La luz: naturaleza, espectro, refracción y reflexión total

Test de 10 preguntas y flashcards de este tema en **farmeandopau.com** ›

Última revisión: 1 de noviembre de 2026.

Escanea y haz el test del tema

LA IDEA EN 30 SEGUNDOS

La luz es una **onda electromagnética**: $\vec{E}$ y $\vec{B}$ perpendiculares que viajan a $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ sin necesitar medio. Al entrar en un medio va más despacio, $v = c/n$, y cambia su longitud de onda, $\lambda = \lambda_0/n$, pero **no su frecuencia**. En una frontera se refracta según la **ley de Snell**, $n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$; si va a menos índice y supera el **ángulo límite** ($\operatorname{sen}\theta_L = n_2/n_1$), hay **reflexión total**, la base de la fibra óptica. Sale en **35 de las 68 convocatorias**, en las 17 comunidades: la refracción en 31 y la naturaleza de la luz en 25.

1 ¿Onda o partícula? El debate sobre la naturaleza de la luz

Durante más de dos siglos se discutió si la luz es un chorro de partículas o una onda. El RD 243/2022 lo pide con estas palabras: «Naturaleza de la luz: controversias y debates históricos». En el examen te piden **qué defendía cada uno y qué experimento inclinó la balanza**, no fechas sueltas.

- **Modelo corpuscular (Newton):** la luz son partículas que salen del foco en línea recta. Explica bien la propagación rectilínea, las sombras nítidas y la reflexión. Para explicar la refracción necesitaba que la luz fuera **más rápida** en el agua que en el aire.
- **Modelo ondulatorio (Huygens):** la luz es una onda. Explica reflexión y refracción con la luz **más lenta** en el medio más denso ópticamente, y además la interferencia y la difracción, que las partículas clásicas no pueden explicar.
- Lo que zanjó el siglo XIX: la **interferencia** de Young, la **difracción** y la **polarización** de Fresnel (solo las ondas transversales se polarizan) y la medida de Foucault (más lenta en el agua).
- **Maxwell** unió electricidad, magnetismo y óptica: la luz es una **onda electromagnética** y no necesita medio. Hertz lo confirmó.
- En el siglo XX, el efecto fotoeléctrico obligó a aceptar que la luz también se comporta como partícula. Hoy hablamos de **dualidad onda-corpúsculo**: se propaga como onda (interferencia, difracción) e intercambia energía en paquetes, los fotones.

Año	Quién	Qué propone o mide	Qué apoya
1676	Rømer	Con los eclipses de Ío (satélite de Júpiter) demuestra que la luz tarda en llegar: unos 11 minutos en recorrer el radio de la órbita de la Tierra. No da un valor de la velocidad: con sus datos, Huygens calcula en 1690 unos $2{,}3 \cdot 10^8$ m/s	La luz no es instantánea
1690	Huygens	*Tratado de la luz*: cada punto de un frente de onda emite ondas secundarias; explica reflexión y refracción	Modelo ondulatorio
1704	Newton	*Óptica*: la luz son corpúsculos; descompone la luz blanca con un prisma	Modelo corpuscular
1801–1803	Young	Experimentos de **interferencia** (franjas claras y oscuras: luz + luz = oscuridad en algunos puntos), que hoy se reproducen con su doble rendija	Ondas
1818–1821	Fresnel	Teoría matemática de la difracción (premiada en 1819) y la luz como onda **transversal** (polarización)	Ondas
1850	Foucault	La luz va **más despacio en el agua** que en el aire	Ondas (Newton predecía lo contrario)
1865	Maxwell	Las ondas electromagnéticas viajan a $1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$, que coincide con la velocidad medida de la luz	La luz es una onda electromagnética

Año	Quién	Qué propone o mide	Qué apoya
1887–1888	Hertz	Produce y detecta ondas electromagnéticas en el laboratorio	Confirma a Maxwell
1905	Einstein	Efecto fotoeléctrico: la luz llega en **fotones** de energía $E = hf$	Vuelve un aspecto corpuscular

Fechas comprobadas en Hecht, *Óptica*, cap. 1, y en el Observatorio de París (Rømer). El fotoeléctrico y el fotón los ves en el Tema 18.

EL EXPERIMENTO DECISIVO DE FOUCAULT

Explica por qué la medida de la velocidad de la luz en el agua sirvió para decidir entre el modelo de Newton y el de Huygens.

Respuesta modelo

Los dos modelos explicaban que el rayo se acerca a la normal al pasar del aire al agua, pero con predicciones opuestas para la velocidad. Para Newton, el agua **atrae** a los corpúsculos y aumenta la componente de la velocidad perpendicular a la superficie: la luz sería **más rápida** en el agua. Para Huygens, el rayo se acerca a la normal porque la onda **frena** ($\operatorname{sen}\theta_1/\operatorname{sen}\theta_2 = v_1/v_2$). Foucault midió en 1850 que la luz va más despacio en el agua: ganó el modelo ondulatorio.

Por qué puntúa. Hoy lo resumimos con $v = c/n$: en el agua ($n = 1{,}33$) la luz va a unos $2{,}26 \cdot 10^8$ m/s.

La frase que puntúa

«La luz tiene **naturaleza dual**: en su propagación se comporta como una onda electromagnética (interfiere, se difracta, se polariza) y al interaccionar con la materia (fotoeléctrico) como un chorro de fotones de energía $E = hf$». Si te piden un experimento a favor de cada modelo: **Young** (ondas) y **efecto fotoeléctrico** (fotones).

2 La luz como onda electromagnética

Una **onda electromagnética** es la propagación de un campo eléctrico y un campo magnético variables que se generan mutuamente: un $\vec{B}$ que cambia crea un $\vec{E}$ (Faraday, Tema 11) y un $\vec{E}$ que cambia crea un $\vec{B}$ (Maxwell). Las producen las **cargas aceleradas** (los electrones que oscilan en una antena) y también los átomos cuando sus electrones cambian de nivel (Tema 18).

- **Transversal:** $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. El sentido de avance es el de $\vec{E} \times \vec{B}$.
- **En fase:** $\vec{E}$ y $\vec{B}$ alcanzan a la vez sus máximos y sus ceros, y sus módulos cumplen $E = c\,B$ en el vacío.
- **No necesita medio:** se propaga en el vacío, a diferencia del sonido (onda mecánica, Tema 14). Por eso nos llega la luz del Sol y no su ruido.
- **Velocidad en el vacío:** Maxwell la dedujo de las constantes eléctrica y magnética:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\,\varepsilon_0}}$$

  Con $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A y $\varepsilon_0 \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ C²/(N·m²) sale $c \approx 2{,}998 \cdot 10^8$ m/s.
- Desde 1983 el metro se define a partir de la luz y $c = 299\,792\,458$ m/s es **exacta** por definición (el SI de 2019 lo mantiene). En los problemas usa $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s. Desde 2019, μ_0 ya no vale exactamente $4\pi \cdot 10^{-7}$: es un valor medido, aunque coincide con él en las nueve primeras cifras.
- **Ecuación** de una onda que avanza en el sentido $+x$ con $\vec{E}$ en el eje y:

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \operatorname{sen}(\omega t - kx)\,\vec{\jmath}, \qquad \vec{B}(x,t) = B_0 \operatorname{sen}(\omega t - kx)\,\vec{k}$$

  con $k = 2\pi/\lambda$, $\omega = 2\pi f$ y $c = \lambda f = \omega/k$. Es la ecuación de onda del Tema 13 con $\vec{E}$ y $\vec{B}$ en lugar de y.
- **Polarización:** como es transversal, $\vec{E}$ puede vibrar siempre en una misma dirección (luz polarizada); las ondas longitudinales, como el sonido, no se polarizan. La polarización y la ley de Malus (que Galicia incluye en sus «Prácticas de Física» de la PAU 2027) las ves en el Tema 13, con la interferencia de la doble rendija de Young.

DE E A B Y LA ECUACIÓN

Una onda electromagnética de frecuencia $5{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz se propaga en el vacío en el sentido positivo del eje x. Su campo eléctrico oscila en el eje y con amplitud 30 N/C. Calcula la amplitud del campo magnético, λ, k y ω, y escribe las dos ecuaciones.

Respuesta modelo

$B_0 = E_0/c = 30/3{,}00 \cdot 10^8 = 1{,}0 \cdot 10^{-7}$ T. $\lambda = c/f = 6{,}0 \cdot 10^{-7}$ m = 600 nm (luz naranja). $k = 2\pi/\lambda = 1{,}05 \cdot 10^7$ m⁻¹ y $\omega = 2\pi f = 3{,}14 \cdot 10^{15}$ rad/s.

$$\vec{E} = 30\,\mathrm{sen}(3{,}14 \cdot 10^{15}t - 1{,}05 \cdot 10^7 x)\,\vec{j}\ \mathrm{N/C}$$

$$\vec{B} = 1{,}0 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{sen}(3{,}14 \cdot 10^{15}t - 1{,}05 \cdot 10^7 x)\,\vec{k}\ \mathrm{T}$$

Por qué puntúa. $\vec{B}$ va en $+\vec{k}$ porque $\vec{j} \times \vec{k} = \vec{\imath}$: así la onda avanza en $+x$. Si pusieras $-\vec{k}$ irías hacia atrás.

LA LUZ Y EL SONIDO EN EL VACÍO

¿Por qué la luz de una explosión en el espacio llegaría a un astronauta y el sonido no?

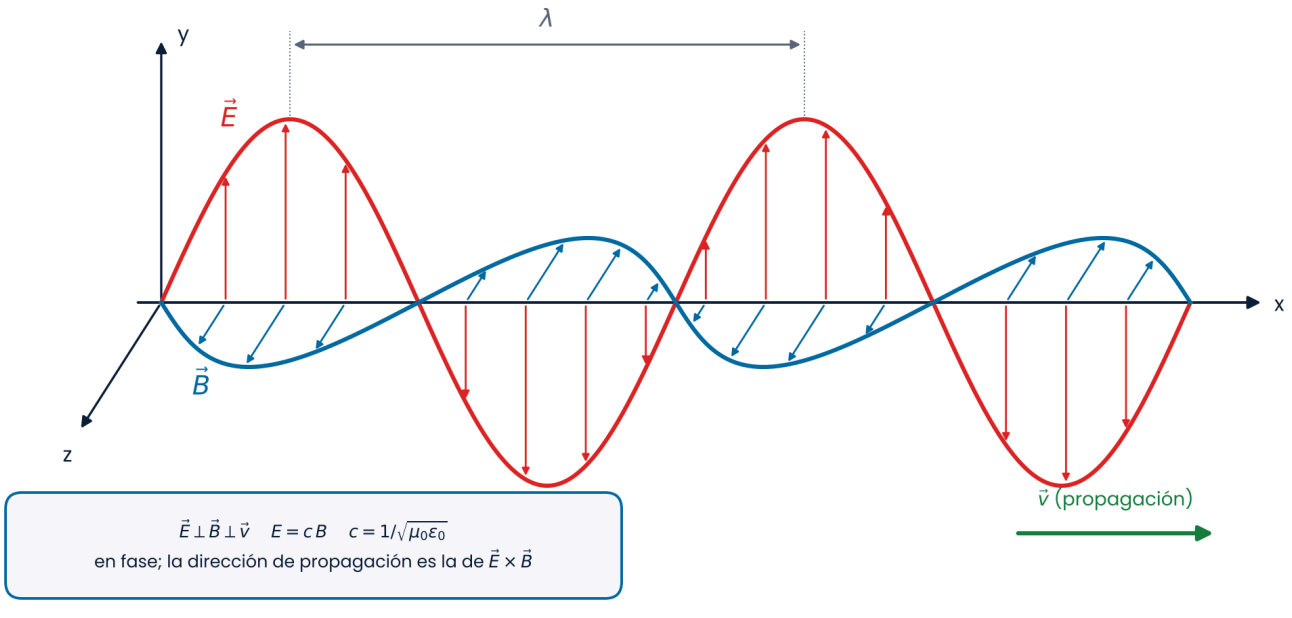
Respuesta modelo

El sonido es una onda **mecánica**: es la vibración de las partículas de un medio y sin medio no se propaga. La luz es una onda **electromagnética**: lo que oscila son los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$, que se generan uno a otro y no necesitan ningún medio material.

Por qué puntúa. Nombra el tipo de onda y por qué: es lo que se corrige.

Lo que dice cada comunidad

Extremadura (Aspectos curriculares, Bloque C; 2025-26; pendiente de confirmar para 2027): la expresión de los campos de la onda electromagnética es «Pregunta descriptiva. No se incluye en los problemas». **Cataluña** (Orientacions PAU 2027): no se pedirán las ecuaciones de Maxwell, «però sí cal saber que un camp magnètic variable en el temps genera un camp elèctric i que un camp elèctric variable en el temps genera un camp magnètic» (pero sí hay que saber que un campo magnético variable genera un campo eléctrico y viceversa). **Comunitat Valenciana** (orientación 2026-27): «Representa esquemáticamente la propagación de una onda electromagnética incluyendo los vectores campo eléctrico y magnético». **Murcia** (Especificaciones 2027) pide c a partir de ε_0 y μ_0, y **no da** c: tienes que saber que vale $3 \cdot 10^8$ m/s.



Onda electromagnética que avanza en el sentido +x. $\vec{E}$ (rojo) oscila en el eje y y $\vec{B}$ (azul) en el eje z, perpendiculares entre sí y a la propagación, en fase y con $E = cB$. El sentido de avance es el de $\vec{E} \times \vec{B}$.

3 El espectro electromagnético

Todas las ondas electromagnéticas son lo mismo y viajan a c en el vacío; solo cambian la **frecuencia** y la **longitud de onda**, que van al revés: $c = \lambda f$. Ordenadas forman el **espectro electromagnético**. Los límites entre regiones son convencionales y se solapan.

- **Orden de memoria** (de mayor a menor λ, es decir, de menor a mayor f): **radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X, rayos γ**.
- Dentro del visible, de mayor a menor λ: **rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta**. Por encima del rojo en λ está el infrarrojo; por debajo del violeta, el ultravioleta.
- La **energía de cada fotón** es $E = hf = hc/\lambda$: crece con la frecuencia. Por eso los rayos X y γ son **radiaciones ionizantes** (arrancan electrones de los átomos y dañan el ADN), y la radio y las microondas no. El UV está en la frontera: solo el de menor λ llega a ionizar, aunque el UV-B y el UV-C ya dañan el ADN; la prevención de riesgos (INSST) lo clasifica, con el visible y el infrarrojo, entre las radiaciones no ionizantes. El fotón lo trabajas en el Tema 18.
- Descubrimientos que a veces preguntan: el infrarrojo (Herschel, 1800, con un termómetro más allá del rojo), el ultravioleta (Ritter, 1801), las ondas de radio (Hertz, 1887–1888), los rayos X (Röntgen, 1895) y los rayos γ (Villard, 1900).

Región	λ aproximada (vacío)	f aproximada	Usos
Ondas de radio	más de 1 m	menos de 300 MHz	Radio AM y FM (87,5–108 MHz), TDT, comunicaciones
Microondas	1 mm – 1 m	300 MHz – 300 GHz	Horno (2,45 GHz), wifi, telefonía móvil, radar, satélites
Infrarrojo	780 nm – 1 mm	300 GHz – 384 THz	Mandos a distancia, termografía, visión nocturna, fibra óptica (1310 y 1550 nm)
Visible	380 – 780 nm	384 – 789 THz	Visión; del rojo (λ larga) al violeta (λ corta)
Ultravioleta	10 – 380 nm	789 THz – 30 PHz	Esterilización, síntesis de vitamina D, bronceado; la capa de ozono filtra el más energético (todo el UV-C y casi todo el UV-B), pero el UV-A llega al suelo
Rayos X	0,01 – 10 nm	30 PHz – 30 EHz	Radiografía, TAC, estudio de cristales (sincrotrón ALBA)
Rayos γ	menos de 0,01 nm	más de 30 EHz	Radioterapia, esterilización de material médico, PET (Tema 19)

Límites orientativos (Hecht, *Óptica*; CIE para el visible). Entre rayos X y γ no hay frontera nítida: se distinguen por su origen (electrones frente a núcleos).

CLASIFICAR POR LA FRECUENCIA

Calcula la longitud de onda de una emisora de FM de 100 MHz, de un router wifi de 2,45 GHz y la frecuencia de unos rayos X de 0,10 nm. Ordénalos de menor a mayor energía por fotón.

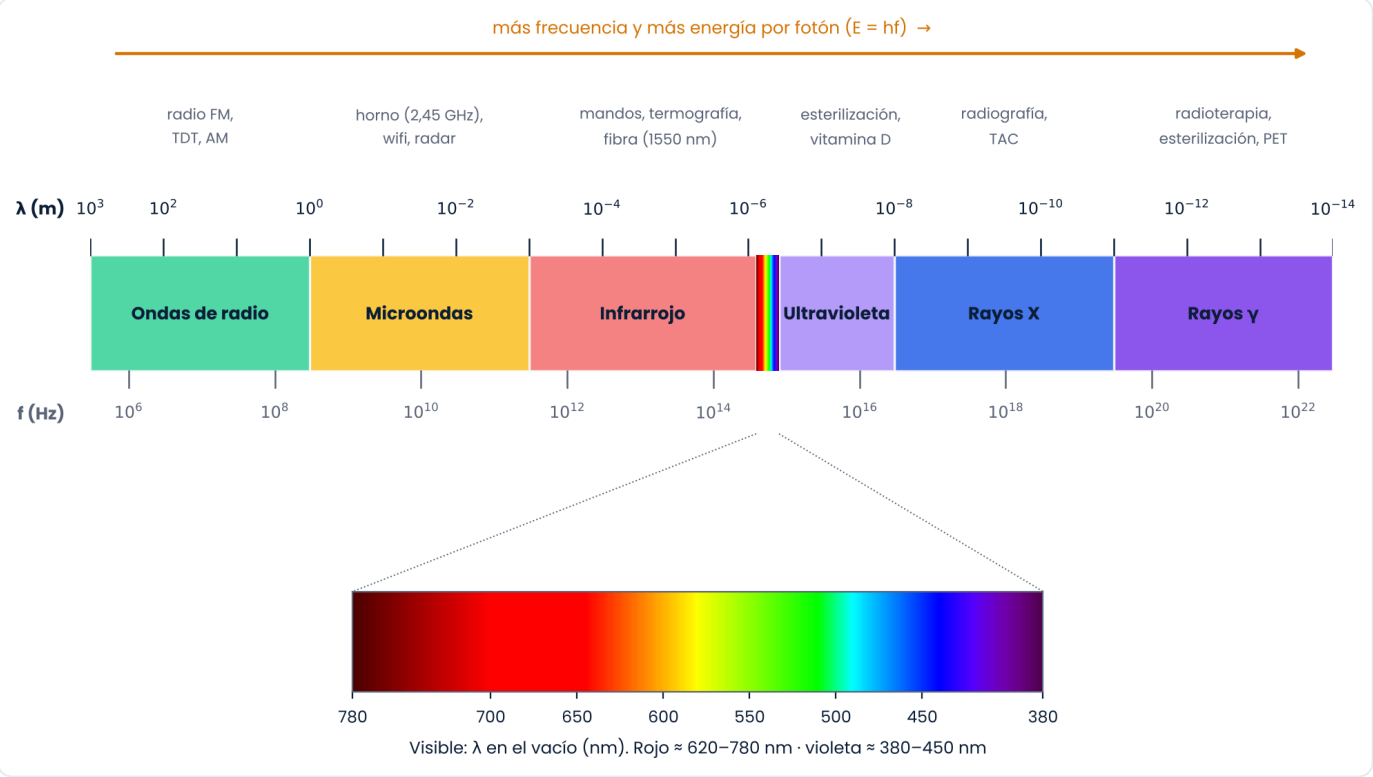
Respuesta modelo

FM: $\lambda = c/f = 3{,}00 \cdot 10^8/1{,}00 \cdot 10^8 = 3{,}00$ m (ondas de radio). Wifi: $\lambda = 3{,}00 \cdot 10^8/2{,}45 \cdot 10^9 = 0{,}122$ m = 12,2 cm (microondas). Rayos X: $f = c/\lambda = 3{,}00 \cdot 10^8/1{,}0 \cdot 10^{-10} = 3{,}0 \cdot 10^{18}$ Hz. Como $E = hf$: **FM < wifi < rayos X**.

Por qué puntúa. Pasa siempre a metros y a hercios antes de dividir.

Cataluña y Cantabria

Cataluña (Orientacions PAU 2027) lo pide así: «Espectre electromagnètic. Classificació d'una ona a partir de la freqüència i longitud d'ona. Energia d'un fotó» (clasificar una onda por su frecuencia o su longitud de onda y calcular la energía de un fotón). **Cantabria** (matriz de la UC, concreción 39): «Reconoce aplicaciones tecnológicas de diferentes tipos de radiaciones, principalmente infrarroja, ultravioleta y microondas». **Comunitat Valenciana** cita en su currículo «El descubrimiento del infrarrojo: El espectro no visible» (Decreto 108/2022).



El espectro electromagnético. Arriba, la longitud de onda en el vacío; abajo, la frecuencia ($f = c/\lambda$). Hacia la derecha aumentan la frecuencia y la energía de cada fotón. Debajo, el visible ampliado, de 780 nm (rojo) a 380 nm (violeta).

4 Índice de refracción: qué cambia y qué no al cambiar de medio

En un medio transparente la luz va más despacio que en el vacío. El **índice de refracción** absoluto de un medio es el cociente

$$n = \frac{c}{v}$$

Es adimensional y siempre $n \geq 1$ (el vacío, $n = 1$; el aire, $n = 1{,}0003 \approx 1$). Cuanto mayor es n, más lenta va la luz: decimos que el medio es **más refringente**.

- **La frecuencia no cambia** al pasar de un medio a otro: la impone el foco y cada frente de onda que llega a la superficie produce uno al otro lado. Por eso **el color no cambia**: el color lo fija la frecuencia.
- **Cambian la velocidad y la longitud de onda**: $v = c/n$ y, como $v = \lambda f$ con la misma f,

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

  donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío (o en el aire).
- Entre dos medios: $\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$. Si la luz **triplica** su longitud de onda al pasar del medio 1 al 2, también triplica su velocidad y $n_1 = 3n_2$.
- El índice depende algo de la longitud de onda (**dispersión**, más abajo). Por eso los índices se dan para una luz concreta, normalmente la amarilla del sodio, de 589 nm.

Medio	n (luz amarilla, 589 nm)	v = c/n (m/s)	Ángulo límite con el aire
Aire	1,0003 ≈ 1,00	≈ $3{,}00 \cdot 10^8$	—
Agua	1,33	$2{,}26 \cdot 10^8$	48,8°
Metacrilato (PMMA)	1,49	$2{,}01 \cdot 10^8$	42,2°
Vidrio común	1,50	$2{,}00 \cdot 10^8$	41,8°
Diamante	2,42	$1{,}24 \cdot 10^8$	24,4°

Valores habituales a 20 °C (Hecht, *Óptica*; el del vidrio depende del tipo, entre 1,5 y 1,9). En el examen, usa siempre los que te dé el enunciado.

LUZ DEL SODIO QUE ENTRA EN EL AGUA

Una lámpara de sodio emite luz de 589 nm en el vacío. Calcula su frecuencia y su velocidad y longitud de onda en el agua ($n = 1{,}33$). ¿Cambia de color?

Respuesta modelo

$f = c/\lambda_0 = 3{,}00 \cdot 10^8 / 589 \cdot 10^{-9} = 5{,}09 \cdot 10^{14}$ Hz, igual en el aire y en el agua. $v = c/n = 3{,}00 \cdot 10^8 / 1{,}33 = 2{,}26 \cdot 10^8$ m/s. $\lambda = \lambda_0/n = 589/1{,}33 = 443$ nm. **No cambia de color**: el color depende de la frecuencia, que no cambia.

Por qué puntúa. Trampa típica: 443 nm en el vacío sería azul, pero dentro del agua la luz sigue siendo amarilla porque su frecuencia es la misma.

ÍNDICE A PARTIR DE LAS LONGITUDES DE ONDA

Un haz de 600 nm en el aire tiene 400 nm dentro de un vidrio. Calcula el índice del vidrio y la velocidad de la luz en él.

Respuesta modelo

$n = \lambda_0/\lambda = 600/400 = 1{,}50$ y $v = c/n = 2{,}00 \cdot 10^8$ m/s.

Por qué puntúa. No hace falta la frecuencia: basta con que no cambie.

5 Reflexión y refracción: la ley de Snell

Cuando la luz llega a la superficie que separa dos medios, una parte se **refleja** (vuelve al primer medio) y otra se **refracta** (pasa al segundo cambiando de dirección). **Todos los ángulos se miden desde la normal**, la perpendicular a la superficie en el punto de incidencia.

- **Leyes de la reflexión:** el rayo incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano, y el **ángulo de reflexión es igual al de incidencia**.
- **Reflexión especular y difusa:** en una superficie lisa (espejo, agua en calma) los rayos paralelos salen paralelos y se forma imagen; en una rugosa (papel, pared) cada rayo sale en una dirección y no hay imagen, aunque cada rayo cumple la ley de la reflexión en su trocito de superficie. Andalucía la cita: «reflexión nítida y difusa».
- **Leyes de la refracción:** el incidente, el refractado y la normal están en el mismo plano, y se cumple la **ley de Snell**:

$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$$

- Si la luz pasa a un medio **más refringente** ($n_2 > n_1$) va más despacio y **se acerca a la normal** ($\theta_2 < \theta_1$). Si pasa a uno **menos refringente**, **se aleja de la normal**. Con incidencia normal ($\theta_1 = 0$) no se desvía.
- **Por qué (Huygens):** las ondas secundarias del frente avanzan más despacio en el medio 2 y el frente gira. De la geometría sale $\dfrac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2}$, y con $v = c/n$ se obtiene la ley de Snell. Murcia pide «Conocer la teoría ondulatoria de Huygens para explicar la reflexión y la refracción» (Especificaciones 2027).
- **Ángulo entre el reflejado y el refractado:** vale $180^\circ - \theta_1 - \theta_2$. Si es 90°, el reflejado sale totalmente polarizado (ángulo de Brewster, $\tan\theta_B = n_2/n_1$). La Rioja lo pide: «Obtiene el índice de refracción de un medio a partir del ángulo formado por la onda reflejada y refractada», y Cantabria casi con las mismas palabras (concreción 35: «Obtiene el coeficiente de refracción…»).

Dibuja la superficie, la **normal** (discontinua) y los rayos con flechas.

↓

Pasa los ángulos a ángulos **con la normal**: si te dan el ángulo con la superficie, réstalo de 90°.

↓

Escribe la ley de Snell **con símbolos** y nombra la ley.

↓

Despeja, sustituye y comprueba el sentido físico: si pasa a más n, θ_2 tiene que salir menor.

↓

Si $\operatorname{sen}\theta_2$ te sale mayor que 1, no hay refracción: es **reflexión total** (siguiente sección).

SNELL DEL AIRE AL AGUA

Un rayo pasa del aire al agua ($n = 1{,}33$) con un ángulo de incidencia de 30°. Calcula el ángulo de refracción y el de reflexión.

Respuesta modelo

Ley de Snell: $1 \cdot \operatorname{sen} 30^\circ = 1{,}33 \operatorname{sen}\theta_2 \Rightarrow \operatorname{sen}\theta_2 = 0{,}376 \Rightarrow \theta_2 = 22{,}1^\circ$. El reflejado sale a 30° (ley de la reflexión).

Por qué puntúa. 22,1° < 30°: se acerca a la normal, como debe ser al pasar a un medio más refringente.

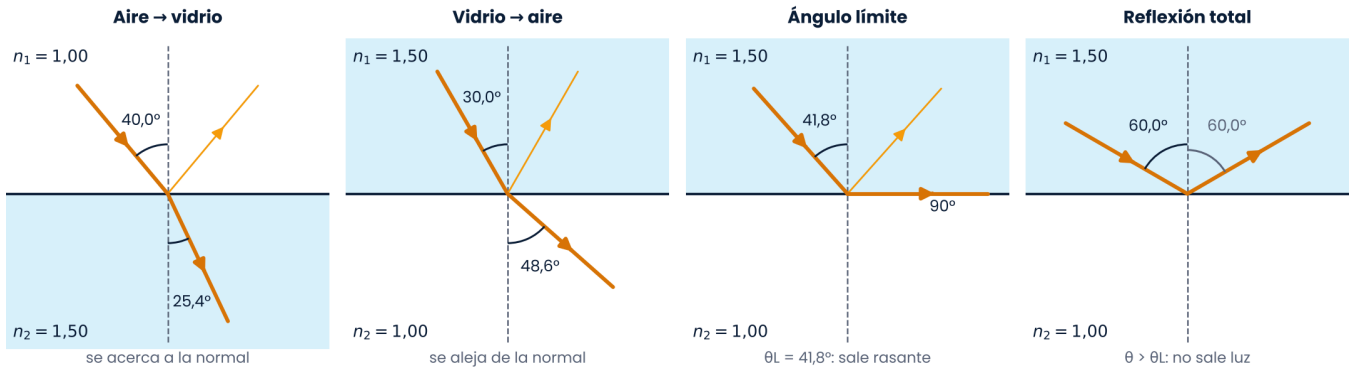
ÍNDICE A PARTIR DEL ÁNGULO ENTRE REFLEJADO Y REFRACTADO

Un rayo incide desde el aire con 60° sobre un plástico y el rayo reflejado y el refractado forman 90°. Calcula el índice del plástico.

Respuesta modelo

Entre reflejado y refractado hay $180^\circ - 60^\circ - \theta_2 = 90^\circ$, así que $\theta_2 = 30^\circ$. Snell: $n = \dfrac{\operatorname{sen} 60^\circ}{\operatorname{sen} 30^\circ} = 1{,}73$.

Por qué puntúa. Es el caso de Brewster: $\tan 60^\circ = 1{,}73$.



Refracción, ángulo límite y reflexión total (vidrio de $n = 1{,}50$ y aire). Al entrar en el vidrio el rayo se acerca a la normal; al salir se aleja. Con $\theta_1 = \theta_L = 41{,}8^\circ$ sale rasante (90°) y por encima toda la luz se refleja. Los ángulos están calculados con la ley de Snell.

6 Ángulo límite y reflexión total

Si la luz pasa a un medio **menos refringente** ($n_1 > n_2$), el refractado se aleja de la normal. Al aumentar θ_1 llega un momento en que el refractado sale rasante ($\theta_2 = 90^\circ$): ese ángulo de incidencia es el **ángulo límite** o crítico, θ_L. Para ángulos mayores no hay refracción: toda la luz se refleja (**reflexión total**).

- **Deducción** (Andalucía la exige siempre; Cataluña la ha pedido: «A partir de la ley de Snell, deduzca la expresión del ángulo límite»): en el ángulo límite $\theta_1 = \theta_L$ y $\theta_2 = 90^\circ$. Con Snell, $n_1 \operatorname{sen}\theta_L = n_2 \operatorname{sen} 90^\circ = n_2$, así que

$$\operatorname{sen}\theta_L = \frac{n_2}{n_1} \qquad (n_1 > n_2)$$

- **Dos condiciones** para que haya reflexión total: 1) la luz va de un medio **más** refringente a uno **menos** refringente ($n_1 > n_2$); 2) el ángulo de incidencia es **mayor** que el ángulo límite ($\theta_1 > \theta_L$).
- Si la luz va al revés ($n_1 < n_2$), $n_2/n_1 > 1$ y no existe ningún ángulo con ese seno: **nunca hay reflexión total**. Es la pregunta de verdadero o falso más repetida.
- Ángulos límite con el aire: agua 48,8°, vidrio de 1,50 41,8°, diamante 24,4°. Entre vidrio (1,50) y agua (1,33): $\operatorname{sen}\theta_L = 1{,}33/1{,}50$, $\theta_L = 62{,}5^\circ$. Cuanto más se parecen los índices, mayor es el ángulo límite.
- **Aplicaciones:** fibra óptica (siguiente sección), **prismas de reflexión total** de prismáticos y periscopios (a 45° hay reflexión total si $n > 1/\operatorname{sen} 45^\circ = 1{,}41$; el vidrio de 1,5 lo cumple), el **brillo del diamante** (con un ángulo límite tan pequeño, la luz rebota muchas veces dentro antes de salir) y el círculo de luz de una lámpara sumergida.

- **Espejismos:** sobre el asfalto caliente el aire de abajo está más caliente y tiene un índice algo menor. La luz que baja casi rasante se va curvando hacia arriba (se refracta poco a poco y acaba reflejándose) y ves el cielo «en el suelo», como si fuera agua.

EL CÍRCULO DE LUZ DE UNA PISCINA

Una lámpara está en el fondo de una piscina de 1,5 m de profundidad ($n_{agua} = 1{,}33$). ¿Qué radio tiene el círculo de la superficie por el que sale luz?

Respuesta modelo

Solo sale la luz que llega a la superficie con $\theta < \theta_L$. $\operatorname{sen}\theta_L = 1/1{,}33 \Rightarrow \theta_L = 48{,}8°$. El borde del círculo está donde el rayo llega con θ_L: $R = h\tan\theta_L = 1{,}5 \cdot \tan 48{,}8° = 1{,}71$ m.

Por qué puntúa. Fuera de ese círculo la superficie actúa como un espejo visto desde abajo.

VERDADERO O FALSO

«Siempre que la luz pasa de un medio a otro de menor índice de refracción se produce reflexión total». Razona si es verdadero o falso.

Respuesta modelo

Falso. Pasar a un medio de menor índice es necesario, pero no suficiente: además el ángulo de incidencia tiene que superar el ángulo límite, $\operatorname{sen}\theta_L = n_2/n_1$. Con ángulos menores la luz se refracta (alejándose de la normal) y solo una parte se refleja.

Por qué puntúa. En un verdadero o falso sin razonar no hay puntos en casi ninguna comunidad.

Cómo se escribe para que puntúe

1) Nombra el fenómeno («reflexión total»). 2) Define: «el ángulo límite es el ángulo de incidencia para el que el refractado sale a 90°». 3) Deduce $\operatorname{sen}\theta_L = n_2/n_1$ con Snell. 4) Di las dos condiciones. 5) Compara el ángulo de incidencia con θ_L con números. En **Andalucía** «ángulo límite de refracción» está en la lista oficial de «Expresiones que siempre se deben deducir antes de su aplicación» (Directrices 2026-27).

7 La fibra óptica

Una fibra óptica es un hilo de vidrio o plástico con un **núcleo** de índice n_1 rodeado de un **revestimiento** de índice algo menor, n_2. La luz avanza rebotando en la frontera núcleo-revestimiento por **reflexión total**, sin escaparse, aunque la fibra se curve un poco. Es el contexto competencial más repetido de este tema.

- **Condición de guiado:** en la frontera núcleo-revestimiento el ángulo con la normal tiene que ser mayor que θ_L, con $\operatorname{sen}\theta_L = n_2/n_1$. Por eso el núcleo tiene que tener **más** índice que el revestimiento.
- **Ángulo de aceptación:** la luz entra por el extremo, una cara plana perpendicular al eje. Si entra con un ángulo φ respecto al eje, se refracta con un ángulo θ_r (también respecto al eje) y llega a la pared con $90° - \theta_r$. Para el ángulo máximo, $90° - \theta_r = \theta_L$, es decir, $\theta_r = 90° - \theta_L$.
- Con Snell en la entrada: $n_0 \operatorname{sen}\varphi_{\max} = n_1 \operatorname{sen}(90° - \theta_L) = n_1 \cos\theta_L$. Como $\cos\theta_L = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$:

$$n_0 \operatorname{sen}\varphi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

  Ese número es la **apertura numérica** de la fibra. Si entra con $\varphi > \varphi_{\max}$, parte de la luz se escapa al revestimiento en cada rebote.
- **Ojo con el ángulo de entrada:** en la cara de entrada la normal es el **eje** de la fibra; en la pared lateral la normal es **perpendicular** al eje. Muchos fallos vienen de mezclar las dos normales.
- **Aplicaciones:** internet por fibra hasta casa y cables submarinos (se usa infrarrojo de 1310 y 1550 nm, donde la fibra de vidrio pierde menos luz), endoscopios en medicina, sensores. Charles Kao propuso en 1966 las fibras de vidrio muy puro para comunicaciones y recibió el Nobel de Física de 2009.

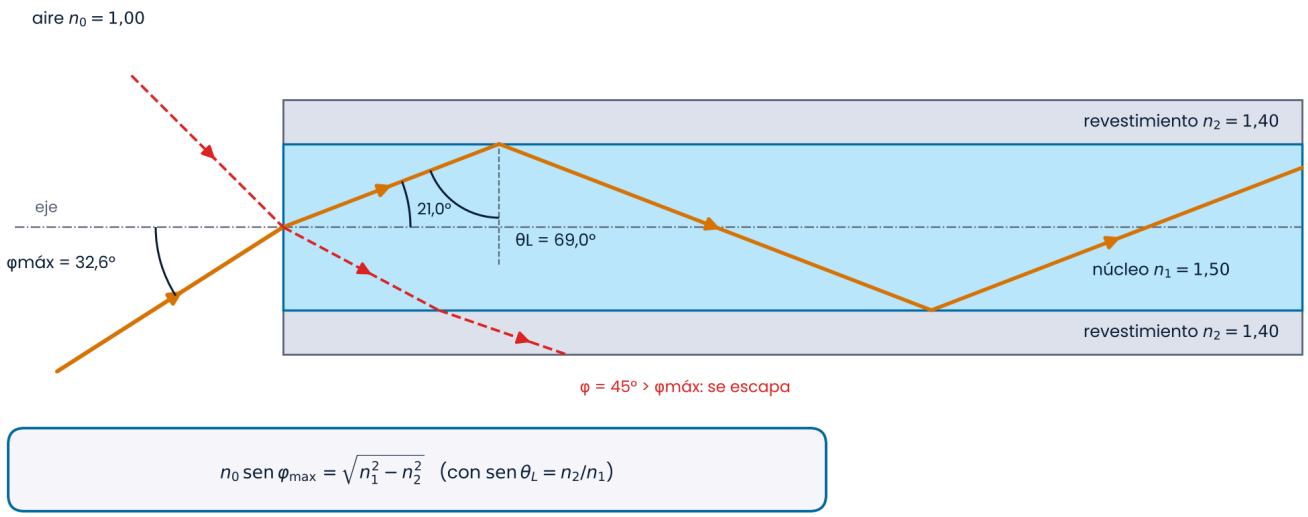
ÁNGULO DE ACEPTACIÓN

Una fibra tiene un núcleo de $n_1 = 1{,}50$ y un revestimiento de $n_2 = 1{,}40$. Calcula el ángulo límite núcleo-revestimiento y el ángulo máximo con el eje con el que puede entrar la luz desde el aire.

Respuesta modelo

$\operatorname{sen}\theta_L = 1{,}40/1{,}50 \Rightarrow \theta_L = 69{,}0°$. Dentro, el rayo forma con el eje $90° - 69{,}0° = 21{,}0°$. En la entrada: $1 \cdot \operatorname{sen}\varphi_{\max} = 1{,}50 \operatorname{sen} 21{,}0° = 0{,}539 \Rightarrow \varphi_{\max} = 32{,}6°$. Con la fórmula directa: $\sqrt{1{,}50^2 - 1{,}40^2} = 0{,}539$.

Por qué puntúa. Haz el camino largo en el examen (Snell, ángulo complementario, Snell): es lo que se ve que entiendes.



Fibra óptica con núcleo de $n_1 = 1{,}50$ y revestimiento de $n_2 = 1{,}40$. El rayo que entra con $\varphi_{\max} = 32{,}6°$ se refracta a 21,0° del eje y llega a la pared justo con el ángulo límite, 69,0°: se refleja entero y queda guiado. Un rayo que entra con 45° llega a la pared con menos de 69° y se escapa al revestimiento.

8 Lámina de caras paralelas, capas de líquidos y profundidad aparente

Una **lámina de caras paralelas** (un vidrio de ventana, la pared de un acuario) desvía el rayo dos veces: al entrar se acerca a la normal y al salir se aleja lo mismo. El rayo **sale paralelo** al incidente, solo desplazado.

- **Por qué sale paralelo:** en la cara de entrada $n_0 \operatorname{sen}\theta_1 = n \operatorname{sen}\theta_2$; las caras son paralelas y el ángulo con que llega a la segunda es el mismo θ_2; al salir, $n \operatorname{sen}\theta_2 = n_0 \operatorname{sen}\theta_3$. Por tanto $\theta_3 = \theta_1$.
- **Camino dentro y tiempo:** el rayo recorre $L = e/\cos\theta_2$ (con e el espesor) a $v = c/n$, así que tarda $t = L/v = nL/c$.
- **Desplazamiento lateral** (distancia entre la prolongación del incidente y el emergente):

$$d = \frac{e \operatorname{sen}(\theta_1 - \theta_2)}{\cos\theta_2}$$

  No hace falta memorizarla: sale de dos triángulos rectángulos con L como hipotenusa común.
- **Varias capas paralelas** (aceite sobre agua, pared de metacrilato y acetona): en cada frontera $n \operatorname{sen}\theta$ se conserva, así que $n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 = n_3 \operatorname{sen}\theta_3$. El ángulo en el último medio **no depende de las capas intermedias**; aun así, en el examen calcula el ángulo en cada capa y dibújalo.
- **Profundidad aparente:** un objeto bajo el agua parece más cerca de la superficie, porque los rayos se alejan de la normal al salir y el ojo los prolonga en línea recta. Mirando casi en vertical, $h' \approx h/n$: una moneda a 1,2 m de profundidad parece estar a $1{,}2/1{,}33 = 0{,}90$ m. Si miras inclinado, se resuelve con Snell y trigonometría. Es el **dioptrio plano** (Tema 16).

LÁMINA DE VIDRIO

Un rayo incide con 45° sobre una lámina de vidrio ($n = 1{,}50$) de 2,0 cm de espesor. Calcula el ángulo dentro, el tiempo que tarda en atravesarla y el desplazamiento lateral.

Respuesta modelo

Snell: $\operatorname{sen}\theta_2 = \operatorname{sen}45^\circ/1{,}50 = 0{,}471 \Rightarrow \theta_2 = 28{,}1^\circ$. Camino: $L = 2{,}0/\cos 28{,}1^\circ = 2{,}27$ cm. Tiempo: $t = nL/c = 1{,}50 \cdot 2{,}27 \cdot 10^{-2}/3{,}00 \cdot 10^{8} = 1{,}13 \cdot 10^{-10}$ s. Desplazamiento: $d = 2{,}0\operatorname{sen}(45^\circ - 28{,}1^\circ)/\cos 28{,}1^\circ = 0{,}66$ cm. Sale a 45°.

Por qué puntúa. Arrastra los decimales de θ_2 sin redondear antes de calcular d: es una resta de ángulos parecidos.

ACEITE SOBRE AGUA

Sobre agua ($n = 1{,}33$) flota una capa de aceite ($n = 1{,}47$). Un rayo llega desde el aire con 40°. ¿Con qué ángulo avanza en el aceite y en el agua?

Respuesta modelo

Aire → aceite: $\operatorname{sen}\theta_{ac} = \operatorname{sen}40^\circ/1{,}47 \Rightarrow \theta_{ac} = 25{,}9^\circ$. Aceite → agua: $1{,}47\operatorname{sen}25{,}9^\circ = 1{,}33\operatorname{sen}\theta_{ag} \Rightarrow \theta_{ag} = 28{,}9^\circ$, lo mismo que si entrara directamente del aire al agua.

Por qué puntúa. Al pasar del aceite al agua va a un medio menos refringente y se aleja de la normal: 28,9° > 25,9°.

Láminas y dioptrio plano por comunidades

Castilla y León (Decreto 40/2022) incluye el «Estudio de la lámina de caras planas y paralelas» y el «dioptrio plano». **Madrid** (presentación de la Comisión 2025-26, directrices de óptica): «No dioptrio esférico, ni plano» (en 2025-26; pendiente de confirmar para 2027), así que allí la lámina se resuelve solo con Snell, como en su examen de 2026. **Illes Balears** (criterios de 2026): que el rayo sale paralelo de la lámina «Es puntuarà la simple menció del fet; no caldrà presentar la deducció» (basta mencionarlo, sin deducirlo).

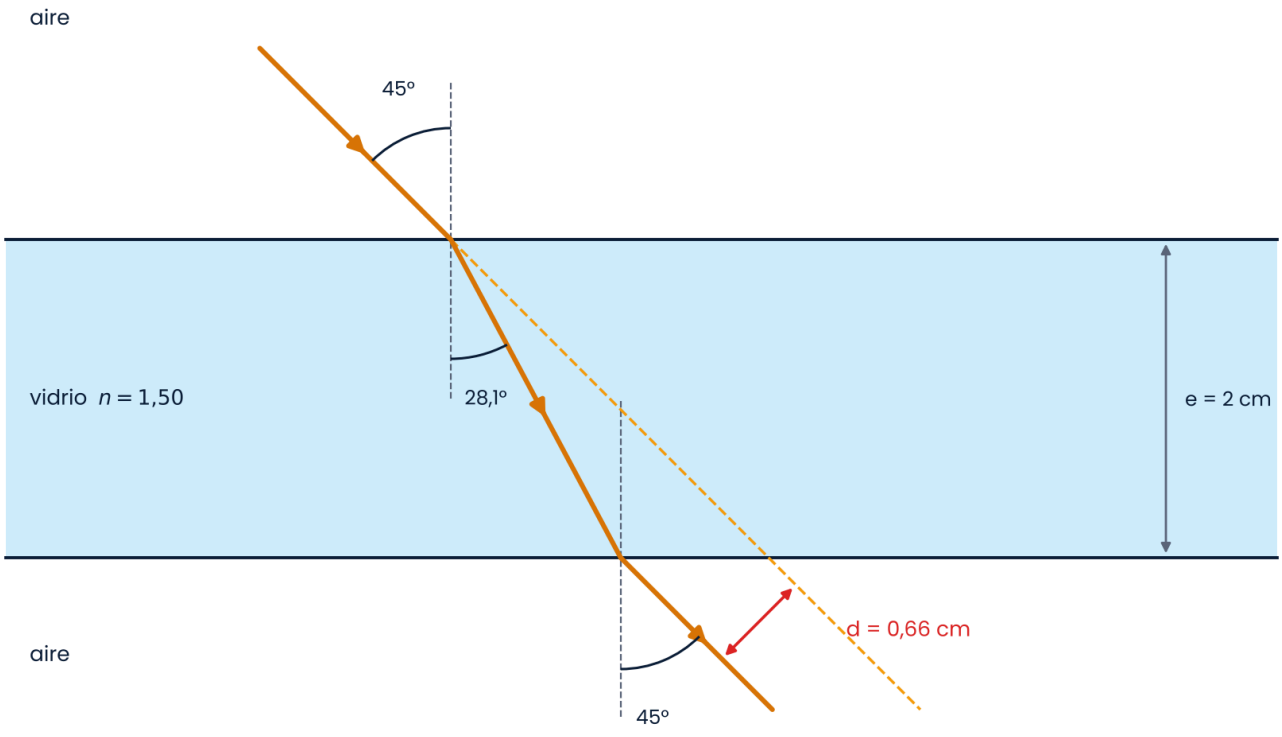


Lámina de caras paralelas de vidrio ($n = 1{,}50$) y 2 cm de espesor con incidencia de 45°. Dentro, el rayo va a 28,1° de la normal; sale de nuevo a 45°, paralelo al incidente, desplazado $d = 0{,}66$ cm respecto a su prolongación (discontinua).

9 Dispersión: el prisma y el arcoíris

El índice de refracción de un medio depende ligeramente de la longitud de onda: en el vidrio y en el agua es **mayor para el violeta que para el rojo**. Por eso cada color se refracta con un ángulo distinto y la luz blanca se separa en colores. Es la **dispersión**.

- **Refracción y dispersión no son lo mismo:** la refracción es el cambio de dirección al cambiar de medio; la dispersión es que ese cambio sea distinto para cada longitud de onda.
- **La luz monocromática** (un láser) se refracta pero **no se dispersa**: solo tiene una longitud de onda. La luz blanca, que mezcla todas, se dispersa.
- En el vacío todos los colores van a c: el vacío **no es dispersivo**. En el vidrio, el violeta (más n) va más despacio y se desvía más que el rojo.
- **El prisma** (Newton, 1666–1672): en sus dos caras la luz se refracta y la dispersión se suma; sale un abanico de colores con el violeta más desviado. Newton recombinó los colores con otro prisma y demostró que la luz blanca es una mezcla.
- **El arcoíris:** la luz del Sol entra en cada gota de lluvia, se refracta, se refleja dentro de la gota y vuelve a refractarse al salir; como cada color sale con un ángulo distinto (en el arco principal lo ves a unos 42° del punto opuesto al Sol —la sombra de tu cabeza— el rojo y a unos 40–41° el violeta), vemos bandas de colores con el **rojo por fuera** y el violeta por dentro. Lo ves con el Sol a tu espalda.

Luz	λ en el vacío	n del vidrio N-BK7	Refracción con 50° desde el aire
Roja (línea C del hidrógeno)	656,3 nm	1,5143	30,39°
Amarilla (línea d del helio)	587,6 nm	1,5168	30,33°
Azul (línea F del hidrógeno)	486,1 nm	1,5224	30,21°

Índices calculados con la fórmula de Sellmeier del fabricante del vidrio óptico N-BK7 (Schott). La diferencia es pequeña, pero en un prisma se acumula y separa los colores.

¿SE DISPERSA UN LÁSER?

Un rayo láser rojo y un rayo de luz blanca inciden con el mismo ángulo sobre un prisma de vidrio. Explica qué se ve a la salida en cada caso.

Respuesta modelo

Los dos se **refractan** (cambian de dirección) en las dos caras. El láser es **monocromático**: tiene un solo índice y sale como un único rayo rojo desviado. La luz blanca contiene todas las longitudes de onda visibles; como el índice del vidrio es mayor para el violeta, cada color se desvía distinto (**dispersión**) y sale un abanico del rojo (menos desviado) al violeta (más desviado).

Por qué puntúa. Castilla y León lo ha preguntado en forma de cuestión obligatoria con espejismos y arcoíris.

Prismas y dispersión por comunidades

Madrid (presentación de la Comisión 2025-26): el prisma «se puede tratar como sistema óptico con dos superficies planas. No se pondrán problemas de prismas en los que haya que utilizar directamente las fórmulas del prisma: desviación y desviación mínima» (en 2025-26; pendiente de confirmar para 2027); y el Decreto 64/2022 pide «Estudio cualitativo de la dispersión». **Extremadura** (Aspectos curriculares, Bloque C; 2025-26; pendiente de confirmar para 2027): «Ejemplos solo con superficies planas, pero sin incluir prismas», y de la luz «No se incluye: interferencia, polarización, difracción». **Andalucía** (Directrices 2026-27): la dispersión con «ejemplos conocidos (dispersión en un prisma, arco iris, etc.)». **Castilla y León** (Decreto 40/2022): «Estudio cualitativo de la dispersión». **Illes Balears** puso en 2025 un índice que depende de λ para decidir dónde queda el rojo.

10 Qué te piden en tu comunidad

La luz ha salido en **35 de las 68 convocatorias** ordinarias y extraordinarias de 2025 y 2026, en las 17 comunidades. Ninguna comunidad excluye la refracción ni el ángulo límite; las diferencias están en cómo se pregunta y en lo que se da por excluido alrededor (prismas, interferencia, problemas con la onda electromagnética).

Comunidad	Cómo ha caído en 2025–2026	Lo que tienes que saber
Andalucía	2025: trayectoria aire–aceite–agua con esquema; índice del agua a partir de λ. No ha caído en 2026; en los modelos 2026 y 2027, «¿puede haber reflexión total?».	Deducir el ángulo límite (lista oficial de deducciones); reflexión nítida y difusa; dispersión con ejemplos; fibra óptica.
Aragón	2026: «la primera fibra óptica», pregunta obligatoria de 1 punto (ángulo con la superficie y ángulo límite).	Datos en un recuadro por bloque. Si piden deducir, deduce: en 2026 dar solo la fórmula final de la velocidad de escape valió 0,2 de 1.
Asturias	2025: dos medios con ángulo límite de 60° y $n_A - n_B = 0{,}3$, λ en cada uno. 2026: pared de metacrilato y acetona.	Unidades también al sustituir; -0,25 por resultado sin unidad.
Illes Balears	En las cuatro: prismas semicirculares sobre una plataforma graduada, láminas, ángulo límite, dispersión con $n(\lambda)$.	Leer ángulos en una figura de laboratorio; la lámina da rayo paralelo «con la simple mención».
Canarias	2026: velocidad y λ en un medio de $n = 1{,}77$; ángulo límite y desde qué medio viene la luz.	En 2027, tres cifras significativas (-0,05, máximo -0,1 por bloque).
Cantabria	Extraordinarias: λ en un medio y ángulo límite (2025); índice del vidrio a partir del cambio de λ de 651 a 420 nm (2026).	Fibra óptica (concreción 36) y usos de IR, UV y microondas (39).
Castilla-La Mancha	Solo $n = c/v$ dentro de preguntas de onda electromagnética (2026); Snell y reflexión total, en 2024 y en el modelo 2025.	La orientación pide Huygens, Young, la onda electromagnética y el espectro.
Castilla y León	Ángulo límite (2025 ord.), piscina con profundidad aparente (2025 extr.), refracción y dispersión con espejismos y arcoíris (2026 extr., obligatoria).	Lámina de caras paralelas y dioptrio plano están en su Decreto.
Cataluña	Moneda en un bloque de policarbonato (2025 ord.), trampolín y láser en la piscina (2025 extr.).	Deducir el ángulo límite; -0,25 por errores de unidades; sin ecuaciones de Maxwell.
C. Valenciana	Índice a partir de la foto de un láser (2025 extr.), aceite sobre agua en una olla (2025 DANA), rayos reflejado y refractado de un esquema (2026 ord.).	Justificar con leyes; representar la onda con $\vec{E}$ y $\vec{B}$.
Extremadura	2026 extr.: láser de helio-neón en metacrilato, ¿cambia el color?	Sin prismas, interferencia, polarización ni difracción de la luz; la onda electromagnética, solo descriptiva (Aspectos curriculares del Bloque C; 2025-26; pendiente de confirmar para 2027).
Galicia	Cuestión de refracción a menor índice (2025 extr.), índices con $n_A + n_B = 3$ (2026 ord.), rayo que sale del agua y profundidad aparente (2026 extr.).	Práctica oficial de índice de refracción y ángulo límite (prácticas PAU 2027).
La Rioja	2026 extr.: reflexión total en una lámina revestida (problema obligatorio) y, a elegir, la ecuación $E(x,t)$ de una onda ultravioleta leída en una gráfica.	«No se pedirán demostraciones» (guía 2025-26; pendiente de confirmar para 2027); índice a partir del ángulo entre reflejado y refractado.
Madrid	2026 ord.: lámina con reflexión en la cara inferior (3.B).	Dispersión cualitativa (Decreto 64/2022); prisma sin sus fórmulas y sin dioptrios (directrices 2025-26; pendiente de confirmar para 2027).
Murcia	Ángulo límite y luz en el diamante (2025 ord.), onda electromagnética y orden del espectro (2025 extr.), reflexión total en un cubo de vidrio sumergido en agua (2026 ord.), luz en el vacío frente al sonido (2026 extr.).	No dan c ni n_{aire}; Huygens, Young y $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$.
Navarra	Ángulo entre reflejado y refractado y ángulo límite de un buceador (2025 extr.), Snell con velocidades y λ en cada medio (2026 ord.), fibra óptica con ángulo de aceptación (2026 extr.).	Ley mal identificada o mal aplicada: 0 en la pregunta.
País Vasco	2025 extr.: refracción de $n = 1{,}7$ a $n = 1{,}3$, λ en el segundo medio y ángulo crítico.	Tabla común de constantes: elige tú la que necesitas.

11 Ejercicio resuelto: lámina de caras paralelas, tiempo y separación de rayos (Madrid 2026)

PAU COMUNIDAD DE MADRID 2026 · CONVOCATORIA ORDINARIA · PREGUNTA 3.B (BLOQUE VIBRACIONES Y ONDAS; A ELEGIR ENTRE 3.A Y 3.B; 2,5 PUNTOS)

Un rayo de luz incide desde el aire sobre una lámina de espesor e = 3 cm, con un ángulo de incidencia de 48°. El índice de refracción de la lámina es n = 1,7. El rayo, tras sufrir refracción en la cara superior, se refleja en la cara inferior de la lámina y vuelve a salir al aire, tal y como se muestra en la figura. Determine: [Figura: lámina horizontal de espesor e con aire arriba y abajo. El rayo llega desde la izquierda; en la cara superior una parte se refleja (rayo 1) y otra entra, se refleja en la cara inferior y sale de nuevo por la cara superior (rayo 2). x es la distancia, medida sobre la cara superior, entre el punto de donde sale el rayo 1 y el punto por donde sale el rayo 2.] Datos: Velocidad de la luz en el vacío, c = $3 \cdot 10^8$ m s^{-1}; Índice de refracción del aire, n = 1.

a) El ángulo de refracción en la cara superior. (0,5 puntos)

b) El tiempo que tarda el rayo refractado en llegar a la cara inferior de la lámina. (1 punto)

c) La separación x entre los rayos (1) y (2). (1 punto)

Apartado a)

1. **La idea:** en la cara superior el rayo pasa del aire ($n_1 = 1$) a la lámina ($n_2 = 1{,}7$). Se aplica la **ley de Snell** con los ángulos medidos desde la normal.
2. $n_1 \operatorname{sen}\theta_i = n_2 \operatorname{sen}\theta_r \Rightarrow \operatorname{sen}\theta_r = \dfrac{1 \cdot \operatorname{sen} 48^\circ}{1{,}7} = 0{,}4371$
3. $\theta_r = \arcsin 0{,}4371 = 25{,}92^\circ$. Es menor que 48°: al entrar en un medio más refringente se acerca a la normal.

SOLUCIÓN $\theta_r = 25{,}92^\circ \approx 25{,}9^\circ$ respecto a la normal.

Apartado b)

1. **La idea:** tiempo = camino / velocidad. El camino es la hipotenusa del triángulo que forman el espesor e (cateto vertical) y el rayo inclinado θ_r.
2. Camino dentro: $d = \dfrac{e}{\cos\theta_r} = \dfrac{3}{\cos 25{,}92^\circ} = 3{,}34$ cm.
3. Velocidad en la lámina: $v = \dfrac{c}{n} = \dfrac{3 \cdot 10^8}{1{,}7} = 1{,}76 \cdot 10^8$ m/s.
4. $t = \dfrac{d}{v} = \dfrac{n\,d}{c} = \dfrac{1{,}7 \cdot 3{,}34 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^8} = 1{,}89 \cdot 10^{-10}$ s.

SOLUCIÓN $t = 1{,}89 \cdot 10^{-10}$ s (0,189 ns): la luz atraviesa 3,34 cm de lámina en menos de una milmillonésima de segundo.

Apartado c)

1. **La idea:** el rayo 2 baja con θ_r, se refleja en la cara inferior (ley de la reflexión: sube con el mismo θ_r) y vuelve a la cara superior. Cada tramo avanza en horizontal $a = e\tan\theta_r$.
2. $a = 3 \cdot \tan 25{,}92^\circ = 1{,}46$ cm y $x = 2a = 2{,}92$ cm.
3. El rayo 2 sale al aire de nuevo con 48° (Snell al revés): los rayos 1 y 2 salen **paralelos**. Si te preguntaran la distancia **perpendicular** entre los dos rayos paralelos, sería $x\cos 48^\circ = 1{,}95$ cm; la figura del examen marca x sobre la superficie, que es lo que da la solución oficial.

SOLUCIÓN $x = 2{,}92$ cm entre los puntos de salida de los rayos 1 y 2 sobre la cara superior.

Lo que puntúa. Madrid publica una solución («Documento de trabajo orientativo») con los mismos resultados: 25,92°; $d = 3{,}34$ cm, $v = 1{,}76 \cdot 10^8$ m s^{-1} y $t = 1{,}89 \cdot 10^{-10}$ s; $a = 1{,}46$ cm y $x = 2{,}92$ cm. No da reparto por pasos. Sus criterios generales: «Las

preguntas deben contestarse razonadamente, valorando en su resolución una adecuada estructuración y el rigor en su desarrollo»; «Se valorará positivamente la inclusión de pasos detallados, así como la realización de diagramas, dibujos y esquemas»; «valorándose positivamente la identificación de los principios y leyes físicas involucradas» y «el uso correcto de las unidades en el Sistema Internacional». Nombra la ley de Snell y la de la reflexión y dibuja la normal.

Error típico que te quita puntos. Usar el coseno donde va el seno (o tomar e como el camino recorrido) en el b), y en el c) olvidar que el rayo baja y sube: $x = 2e\tan\theta_r$, no $e\tan\theta_r$. Otro clásico: dar el tiempo con c en lugar de con $v = c/n$.

12 Ejercicio resuelto: el objeto y el láser en el fondo de la piscina (Cataluña 2025)

PAU CATALUÑA 2025 · CONVOCATORIA EXTRAORDINARIA · EJERCICIO 3, OPCIÓN B (A ELEGIR ENTRE A Y B; 2,5 PUNTOS; VERSIÓN EN CASTELLANO PUBLICADA POR LA COMISIÓN)

Alaitz está encima de un trampolín situado justo sobre el borde de la piscina y está a punto de lanzarse. En este momento observa un objeto en el fondo de la piscina con un ángulo de 40,0° respecto a la vertical. La altura del trampolín es de 0,90 metros respecto a la superficie del agua, la profundidad de la piscina es de 2,00 metros y los ojos de Alaitz se encuentran a 1,60 metros respecto al trampolín. [Figura: los ojos de Alaitz están en la vertical del borde de la piscina, 1,6 m por encima del trampolín, que está 0,9 m por encima del agua; el agua tiene 2 m de profundidad y el objeto está en el fondo, a una distancia horizontal x del borde.] Datos: c = 3,00 × 10^8 m s^{-1}. $n_{\text{aire}} = 1{,}00$. $n_{\text{agua}} = 1{,}33$.

a) Calcule a qué distancia x se encuentra el objeto respecto al borde de la piscina. (1,25 puntos)

b) El objeto sumergido es un puntero láser encendido y dirigido hacia arriba con una cierta inclinación. ¿A partir de qué ángulo de inclinación respecto a la vertical el rayo del láser no saldrá de la piscina? ¿A qué velocidad se propagará el haz láser dentro de la piscina? Sabiendo que la luz que emite el láser tiene una longitud de onda de 632,8 nm en el aire, ¿cuál es la frecuencia y la longitud de onda del haz láser dentro de la piscina? (1,25 puntos)

Apartado a)

1. **La idea:** la luz va del objeto al ojo: sube por el agua, se refracta en la superficie y llega al ojo formando 40,0° con la vertical. La vertical es la normal a la superficie. Dibuja el rayo en dos tramos: en el aire, de la superficie al ojo; en el agua, del objeto a la superficie.
2. Tramo en el aire: el ojo está a $1{,}60 + 0{,}90 = 2{,}50$ m sobre el agua, en la vertical del borde. El rayo llega a la superficie a una distancia horizontal $a = 2{,}50\tan 40{,}0^\circ = 2{,}10$ m del borde.
3. Refracción en la superficie (**ley de Snell**): $n_{agua}\,\text{sen}\,\theta = n_{aire}\,\text{sen}\,40{,}0^\circ \Rightarrow \text{sen}\,\theta = \dfrac{\text{sen}\,40{,}0^\circ}{1{,}33} = 0{,}483 \Rightarrow \theta = 28{,}9^\circ$.
4. Tramo en el agua: baja 2,00 m con 28,9° respecto a la vertical, así que avanza en horizontal $b = 2{,}00\tan 28{,}9^\circ = 1{,}10$ m.
5. $x = a + b = 2{,}10 + 1{,}10 = 3{,}20$ m.

SOLUCIÓN $x = 3{,}20$ m. Alaitz lo ve en la prolongación de su visual, más cerca y menos hondo de lo que está.

Apartado b)

1. **La idea:** el láser va del agua ($n = 1{,}33$) al aire ($n = 1{,}00$), de un medio más refringente a uno menos: puede haber **reflexión total** si el ángulo con la vertical (la normal) supera el ángulo límite.
2. Ángulo límite: con Snell, $n_{agua}\,\text{sen}\,\theta_L = n_{aire}\,\text{sen}\,90^\circ \Rightarrow \text{sen}\,\theta_L = \dfrac{1{,}00}{1{,}33} \Rightarrow \theta_L = 48{,}75^\circ$. Con más inclinación que esa, el láser no sale.
3. Velocidad en el agua: $v = \dfrac{c}{n} = \dfrac{3{,}00\cdot 10^8}{1{,}33} = 2{,}26\cdot 10^8$ m/s.

4. La frecuencia **no cambia** al pasar de un medio a otro: $f = \dfrac{c}{\lambda_0} = \dfrac{3{,}00 \cdot 10^8}{632{,}8 \cdot 10^{-9}} = 4{,}74 \cdot 10^{14}$ Hz (con $n_{aire} = 1{,}00$, la λ en el aire es la del vacío).
5. Longitud de onda en el agua: $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{\lambda_0}{n} = \dfrac{632{,}8}{1{,}33} = 476$ nm.

SOLUCIÓN No sale si su inclinación supera $48{,}75^\circ \approx 48{,}8^\circ$ respecto a la vertical; $v = 2{,}26 \cdot 10^8$ m/s, $f = 4{,}74 \cdot 10^{14}$ Hz y $\lambda = 476$ nm dentro del agua (sigue siendo luz roja: la frecuencia no ha cambiado).

Lo que puntúa. Criterios oficiales (traducidos del catalán): en el a), 0,75 p por el ángulo en el agua con la ley de Snell (28,9°), 0,2 p por $b = 1{,}10$ m, 0,2 p por $a = 2{,}10$ m y 0,1 p por $x = 3{,}20$ m; en el b), 0,5 p por el ángulo límite (48,75°) explicando que «l'angle d'incidència respecte de la normal ha de ser més gran o igual que l'angle límit», 0,25 p por v, 0,25 p por f («La longitud d'ona depèn del medi, però no la freqüència») y 0,25 p por λ = 476 nm. Criterios generales: «Un o més errors d'unitats o no posar-les (resultats intermedis i finals) en un problema es penalitzaran amb 0,25 punts» (uno o más errores de unidades, -0,25 en el problema), «Una resposta correcta sense raonament ni justificació es pot valorar amb un 0» y -0,1 por resultados con 6 o más cifras significativas o con una sola.

Error típico que te quita puntos. Aplicar Snell con 40° dentro del agua (el 40° es en el aire, donde está el ojo), olvidar sumar la altura del trampolín a la de los ojos (2,50 m, no 1,60 m) o calcular solo a o solo b. En el b), dividir también la frecuencia entre n.

13 Ejercicio resuelto: ángulo límite y ángulo de entrada de una fibra óptica (Navarra 2026)

PAU NAVARRA 2026 · CONVOCATORIA EXTRAORDINARIA · APARTADO 4 (ÓPTICA), PREGUNTA 4.A (A ELEGIR ENTRE 4.A Y 4.B; 1,5 PUNTOS)

Una de las claves de las telecomunicaciones modernas es el uso de cables de fibra óptica. Las fibras están constituidas por un núcleo cilíndrico de vidrio de índice de refracción n_1 = 1,50 rodeado de un material de revestimiento de índice n_2 = 1,48. [Figura: un láser, desde el aire, apunta oblicuamente al extremo de la fibra; dentro del núcleo (n_1) el rayo se refleja en la frontera con el revestimiento (n_2), con la normal dibujada en el punto de reflexión.]

a) ¿Cuál es el ángulo límite para que se cumpla la condición de guiado (reflexión total interna en la frontera entre el núcleo y la capa externa)? (0,5 puntos)

b) ¿Con qué ángulo máximo respecto al eje longitudinal podemos apuntar desde el aire al extremo de vidrio de la fibra para que el haz de luz láser quede confinado en el núcleo? (1 punto)

Apartado a)

1. **La idea:** la luz va del núcleo ($n_1 = 1{,}50$) al revestimiento ($n_2 = 1{,}48$), de más a menos índice: puede haber reflexión total. El ángulo límite es el ángulo de incidencia para el que el refractado saldría a 90°.
2. Ley de Snell en el límite: $n_1 \operatorname{sen}\theta_L = n_2 \operatorname{sen} 90^\circ \Rightarrow \operatorname{sen}\theta_L = \dfrac{n_2}{n_1} = \dfrac{1{,}48}{1{,}50} = 0{,}9867$.
3. $\theta_L = 80{,}63^\circ$. Para que la luz quede guiada, el rayo tiene que llegar a la pared con un ángulo (respecto a la normal de la pared) de al menos 80,6°: casi rasante.

SOLUCIÓN $\theta_L = 80{,}6^\circ$, medido desde la normal a la frontera núcleo-revestimiento.

Apartado b)

1. **La idea:** hay que encadenar dos refracciones. En la cara de entrada (plana y perpendicular al eje) la normal es el eje; en la pared lateral, la normal es perpendicular al eje. Un rayo que va dentro con un ángulo θ_r respecto al eje llega a la pared con $90^\circ - \theta_r$.
2. Para que haya reflexión total en la pared: $90^\circ - \theta_r \geq \theta_L \Rightarrow \theta_r \leq 90^\circ - 80{,}63^\circ = 9{,}37^\circ$.

3. Snell en la entrada (aire, $n_0 = 1$, que el enunciado no da pero es el valor que se usa): $n_0 \operatorname{sen} \varphi_{\max} = n_1 \operatorname{sen} 9{,}37^\circ = 1{,}50 \cdot 0{,}1628 = 0{,}244$.
4. $\varphi_{\max} = \arcsin 0{,}244 = 14{,}1^\circ$. Comprobación con la apertura numérica: $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1{,}50^2 - 1{,}48^2} = 0{,}244$.
5. Con ángulos mayores el rayo llega a la pared con menos de 80,6° y en cada rebote se escapa luz al revestimiento.

SOLUCIÓN $\varphi_{\max} = 14{,}1^\circ$ respecto al eje: el láser tiene que entrar en un cono de 14,1° de semiapertura.

Lo que puntúa. La UPNA no publica soluciones ni criterios específicos de cada examen: los resultados son nuestros (comprobados por programa). Su guía de la materia reparte cada pregunta así: interpretar el enunciado y la ilustración hasta un 10 %, dibujo o esquema hasta un 10 %, referencia y expresión de la ley física y por qué se aplica hasta un 25 %, justificación de los cálculos hasta un 25 %, resultados y unidades hasta un 20 % y coherencia hasta un 10 %. Dice además: «Todas las preguntas deben contestarse razonadamente, valorándose una adecuada estructuración y el rigor en el desarrollo de la respuesta», y que identificar mal la ley o aplicarla mal deja la pregunta a 0. Escribe «ley de Snell» y «reflexión total» y dibuja las dos normales.

Error típico que te quita puntos. Usar el ángulo límite como si fuera el ángulo con el eje (sale $\operatorname{sen} \varphi = 1{,}50 \operatorname{sen} 80{,}63^\circ > 1$, imposible) o aplicar Snell en la entrada con θ_L en vez de con su complementario. El resultado absurdo te avisa: revisa qué normal estás usando.

Conceptos clave

Onda electromagnética

Propagación de un campo eléctrico y uno magnético variables, perpendiculares entre sí y a la dirección de avance, en fase, con $E = cB$. No necesita medio material.

Velocidad de la luz en el vacío

$c = 299\,792\,458$ m/s exacta por definición (SI); $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$. En los problemas, $3{,}00 \cdot 10^8$ m/s.

Espectro electromagnético

Conjunto de las ondas electromagnéticas ordenadas por frecuencia: radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos γ.

Dualidad onda-corpúsculo

La luz se propaga como una onda (interfiere, se difracta) e intercambia energía con la materia en fotones de energía $E = hf$.

Índice de refracción

$n = c/v$: cuántas veces más despacio va la luz en el medio que en el vacío. Adimensional y mayor o igual que 1.

Medio más refringente

El de mayor índice de refracción, en el que la luz va más despacio. No tiene por qué ser el más denso en masa.

Ley de Snell

$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$, con los ángulos medidos desde la normal; los tres rayos y la normal en el mismo plano.

Ley de la reflexión

El ángulo de reflexión es igual al de incidencia, y el incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano.

Reflexión especular y difusa

Especular: en una superficie lisa, rayos paralelos salen paralelos y hay imagen. Difusa: en una rugosa salen en todas las direcciones y no hay imagen.

Ángulo límite

Ángulo de incidencia para el que el rayo refractado sale a 90°, al pasar a un medio menos refringente: $\operatorname{sen} \theta_L = n_2/n_1$.

Reflexión total

Toda la luz se refleja en la frontera. Ocurre si la luz va a un medio de menor índice y el ángulo de incidencia supera el ángulo límite.

Fibra óptica

Núcleo de índice n_1 con un revestimiento de índice menor n_2; la luz avanza por reflexión total. Ángulo máximo de entrada: $n_0 \operatorname{sen} \varphi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$.

Lámina de caras paralelas

Medio limitado por dos caras planas paralelas: el rayo sale paralelo al incidente, con un desplazamiento lateral $d = e\,\mathrm{sen}(\theta_1 - \theta_2)/\cos\theta_2$.

Dispersión

Dependencia del índice de refracción con la longitud de onda: cada color se refracta con un ángulo distinto. Separa la luz blanca en un prisma y forma el arcoíris.

Principio de Huygens

Cada punto de un frente de onda actúa como foco de ondas secundarias; la envolvente de estas forma el nuevo frente. Explica la reflexión y la refracción.

MODO PAU

Ocho claves que valen puntos

Desde la normal

Todos los ángulos se miden **desde la normal**. Si el enunciado da el ángulo con la superficie, réstalo de 90° (37° con la superficie son 53° con la normal).

Esquema siempre

Superficie, **normal discontinua**, rayos con flecha, ángulos y medios rotulados. En Navarra el dibujo vale hasta un 10 % de cada pregunta y Madrid «valorará positivamente» los esquemas.

Nombra la ley

Escribe «**ley de Snell**» y la ecuación con símbolos antes de sustituir. En Navarra, identificar o aplicar mal la ley deja la pregunta a 0; en Murcia, aplicar una expresión con error conceptual quita el 100 % del concepto evaluado.

f no cambia

Al cambiar de medio cambian $v = c/n$ y $\lambda = \lambda_0/n$; **la frecuencia y el color no cambian**.

Deduce θL

$n_1\,\mathrm{sen}\,\theta_L = n_2\,\mathrm{sen}\,90^\circ$. Andalucía lo exige siempre y Cataluña lo pide como apartado.

Dos condiciones

Reflexión total: de **más a menos índice** y $\theta > \theta_L$. Si va de menos a más, nunca.

Fibra: dos normales

En la entrada la normal es el eje; en la pared, la perpendicular al eje. Dentro, el ángulo con el eje es $90^\circ - \theta_L$.

Datos que no dan

Murcia no da c ni n_{aire}; Extremadura no dio c en 2026. Sábete $c = 3 \cdot 10^8$ m/s y $n_{aire} = 1$.

Cómo te lo pueden preguntar

- Problema de refracción: ley de Snell, ángulo límite y reflexión total, con láminas de caras paralelas, capas de líquidos, piscinas o fibras ópticas: sale en 31 de las 68 convocatorias ordinarias y extraordinarias de 2025 y 2026, en 16 comunidades (todas menos Castilla-La Mancha, donde salió en el modelo 2025).
- Naturaleza de la luz: velocidad, frecuencia y longitud de onda en un medio ($n = c/v$, la frecuencia no cambia), la onda electromagnética y el orden del espectro: sale en 25 de las 68 convocatorias, en 16 comunidades (todas menos Aragón).
- Contando las dos cosas, la luz sale en 35 de las 68 convocatorias, en las 17 comunidades. Lo más típico es un problema de 1,5–2,5 puntos que combina v, f y λ en un medio con Snell y el ángulo límite, a menudo con contexto: fibra óptica, piscina, acuario, láser de laboratorio.
- Cuestiones razonadas cortas: verdadero o falso sobre la reflexión total («si $v_1 < v_2$, ¿puede haber reflexión total?»), si cambia el color al cambiar de medio, diferencia entre refracción y dispersión (arcoíris, espejismos), por qué la luz viaja en el vacío y el sonido no.
- El debate histórico sobre la naturaleza de la luz está en el RD y ningún documento oficial lo excluye, aunque en 2025–2026 no ha caído como pregunta propia en nuestra clasificación.

No lo confundas

- **Ángulo con la normal con ángulo con la superficie:** Snell usa siempre el de la normal; son complementarios.
- **Frecuencia con longitud de onda:** al cambiar de medio la frecuencia se conserva y la longitud de onda cambia ($\lambda = \lambda_0/n$).
- **Más refringente con más denso:** lo que cuenta es el índice de refracción (la luz va más despacio), no la masa por unidad de volumen.

- **Ángulo límite con reflexión total:** el ángulo límite es un valor ($\operatorname{sen}\theta_L = n_2/n_1$); la reflexión total es lo que pasa por encima de él.
- **Reflexión total con reflexión parcial:** en toda frontera se refleja algo de luz; la reflexión es total solo si no se refracta nada.
- **Refracción con dispersión:** refractarse es cambiar de dirección; dispersarse es que cada color cambie de dirección de forma distinta. Un láser se refracta pero no se dispersa.
- **Ángulo límite de la fibra con ángulo de entrada:** el primero es en la pared lateral; el de entrada se mide desde el eje y es mucho menor.
- **Onda electromagnética con onda mecánica:** la electromagnética no necesita medio; el sonido sí.

Ponte a prueba

PAU Región de Murcia 2025 (extraordinaria), Bloque 3, Opción 3-B (a elegir entre 3-A y 3-B; 2,5 puntos). a) [1.25p] i) Explique qué es una onda electromagnética y represéntela mediante un dibujo, indicando la relación entre los campos eléctrico y magnético y la dirección de propagación. ii) Ordene las siguientes ondas electromagnéticas de mayor a menor frecuencia: luz visible, microondas, ultravioleta. b) [1.25p] Un óptico utiliza una lente divergente con una potencia de -6 dioptrías para corregir la visión de un paciente. Si colocamos un objeto a 40 cm de la lente, calcule a qué distancia de la lente se forma su imagen. Además, indique si la imagen es real o virtual, si está derecha o invertida, y cuál es el defecto de visión del paciente que la lente pretende corregir.

Solución: a) i) Es la propagación de un campo eléctrico y uno magnético variables que se generan mutuamente; $\vec{E}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación (onda transversal), oscilan en fase, $E = cB$, avanza en el sentido de $\vec{E} \times \vec{B}$ y no necesita medio (dibujo como el de la sección de la onda electromagnética). ii) De mayor a menor frecuencia: **ultravioleta > visible > microondas**. b) (Lentes y criterio DIN: Tema 16.) $f' = 1/P = -1/6$ m $= -16{,}7$ cm; con $s = -0{,}40$ m: $\dfrac{1}{s'} = P + \dfrac{1}{s} = -6 - 2{,}5 = -8{,}5$ m$^{-1} \Rightarrow s' = -0{,}118$ m. La imagen está a **11,8 cm** de la lente, del mismo lado que el objeto: **virtual, derecha** y menor ($A = s'/s = 0{,}29$). Una lente divergente corrige la **miopía**. Murcia no da c y descuenta 0,1 por error de unidades.

PAU Extremadura 2026 (extraordinaria), Bloque C, Pregunta 5 (a elegir entre dos; 2,5 puntos). Un láser de helio-neón emite luz roja que en el aire tiene una longitud de onda de 632,8 nm. Cuando alcanza una placa de metacrilato con un ángulo de incidencia de 30º el ángulo de refracción resulta ser de 19,6º. Calcula: a) (0,7 puntos) El índice de refracción del metacrilato. b) (0,7 puntos) La velocidad de propagación de dicha luz en el metacrilato. c) (0,7 puntos) La longitud de onda en ese medio. d) (0,4 puntos) ¿Cambia de color la luz al cambiar de medio? Razona tu respuesta. DATO. Índice de refracción del aire aproximadamente igual a la unidad.

Solución: a) Ley de Snell: $1 \cdot \operatorname{sen} 30^\circ = n \operatorname{sen} 19{,}6^\circ \Rightarrow n = 0{,}500/0{,}3355 = 1{,}49$. b) El enunciado no da c: hay que saberla. $v = c/n = 3{,}00 \cdot 10^8/1{,}49 = 2{,}01 \cdot 10^8$ m/s. c) $\lambda = \lambda_0/n = 632{,}8/1{,}49 = 425$ nm. d) **No**: el color lo determina la frecuencia, $f = c/\lambda_0 = 4{,}74 \cdot 10^{14}$ Hz, que no cambia al pasar de un medio a otro; cambian la velocidad y la longitud de onda en la misma proporción. Criterios oficiales: en el a), 0,3 por plantear Snell, 0,2 por despejar y 0,2 por sustituir; en el d), «Si el razonamiento es incorrecto o inexistente, la calificación de la cuestión es 0 puntos».

PAU Principado de Asturias 2026 (extraordinaria), Pregunta 6 (5 preguntas a elegir de 8; 2 puntos). Disponemos de un depósito cúbico lleno de acetona hasta cierta altura. Las paredes del depósito son planas, con un grosor de 2 cm, y fabricadas con metacrilato transparente cuyo índice de refracción es 1.49. Si un rayo de luz incidiera desde el exterior del depósito (aire) sobre la pared de metacrilato formando un ángulo de 45º respecto a la normal a la pared, calcule: a. El ángulo que formaría el rayo de luz con la normal a la pared de metacrilato en contacto con la acetona. (1.5 puntos) b. La velocidad de la luz en la acetona. (0.5 puntos) Datos (tabla de la cabecera del examen): $n_{\text{acetona}} = 1.36$; c = 3×10⁸ m·s⁻¹.

Solución: a) Dos refracciones (ley de Snell en cada cara; las caras son paralelas). Aire → metacrilato: $\operatorname{sen} r_1 = \operatorname{sen} 45^\circ / 1{,}49 \Rightarrow r_1 = 28{,}3^\circ$ (se acerca a la normal). Metacrilato → acetona: $1{,}49 \operatorname{sen} r_1 = 1{,}36 \operatorname{sen} r_2 \Rightarrow \operatorname{sen} r_2 = \operatorname{sen} 45^\circ / 1{,}36 = 0{,}520 \Rightarrow r_2 = 31{,}3^\circ$ (se aleja un poco: pasa a menos índice). El grosor de 2 cm no hace falta: el ángulo final es el mismo que si el rayo entrara directamente del aire a la acetona. La solución oficial da $r_2 = 31^\circ\, 19'\, 40''$ (31,33°). b) $v = c/n = 3 \cdot 10^8 / 1{,}36 = 2{,}21 \cdot 10^8$ m/s, como la solución oficial. Asturias penaliza con 0,25 no expresar la unidad correcta del resultado.

Fuentes

1. Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato (Física, bloque C: «Naturaleza de la luz: controversias y debates históricos. La luz como onda electromagnética. Espectro electromagnético»)
2. Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida (SI; definición del metro a partir de c)
3. NIST, CODATA: valores de c, μ_0 y ε_0
4. BIPM, folleto del Sistema Internacional de Unidades (9.ª edición, 2019)
5. Examen y soluciones PAU Física Madrid 2026 (ordinaria)
6. Examen PAU Física Cataluña 2025 (extraordinaria), versión en castellano
7. Criterios de corrección PAU Física Cataluña 2025 (extraordinaria), en catalán
8. Examen PAU Física Navarra 2026 (extraordinaria)
9. Examen y criterios PAU Física Murcia 2025 (extraordinaria)
10. Examen PAU Física Extremadura 2026 (extraordinaria)
11. Criterios PAU Física Extremadura 2026 (extraordinaria)
12. Examen PAU Física Asturias 2026 (extraordinaria)
13. Examen y soluciones PAU Física Asturias 2026 (extraordinaria)
14. Andalucía: Directrices y orientaciones generales PAU, Física, curso 2026-27
15. Cataluña: Orientacions per a l'examen de Física, PAU 2027
16. Extremadura: Aspectos curriculares orientativos, Bloque C (acuerdos de 12-03-2026)
17. Madrid: Presentación de la Comisión de Materia de Física, PAU 2025/2026 (directrices de óptica)
18. Murcia: Especificaciones para el ejercicio de Física PAU 2027
19. Comunitat Valenciana: Documento de orientación de Física (PAU) 2026-27
20. Cantabria: Física, saberes básicos, concreciones y criterios (Universidad de Cantabria)
21. Canarias: Estructura y criterios de corrección de la prueba de Física, PAU 2027
22. Navarra: Guía PAU de Física, curso 2025-2026 (UPNA)
23. Galicia: PAU 2027, Prácticas de Física 2.º de Bachillerato (CiUG)
24. La Rioja: Guía de calificación de Física, PAU 2025-2026 (Universidad de La Rioja)
25. Castilla y León: Guía de calificación de Física, PAU 2026
26. Schott, ficha técnica del vidrio óptico N-BK7 (coeficientes de Sellmeier)
27. E. Hecht, *Óptica* (Addison-Wesley / Pearson), caps. 1–4: historia de la luz, ondas electromagnéticas, índices de refracción, reflexión total y dispersión

Imágenes: Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib). · Farmeando PAU: Farmeando PAU, esquema de elaboración propia (Python y matplotlib).

Apuntes de Farmeando PAU · farmeandopau.com · Revisados frente a fuentes. Última revisión: 1 de noviembre de 2026. Licencia CC BY-NC-ND 4.0: puedes copiarlo y compartirlo citándonos, sin uso comercial ni cambios (las imágenes, con su propia licencia). ¿Un error? Avísanos desde la página del tema. Cómo los hacemos: farmeandopau.com/metodologia.