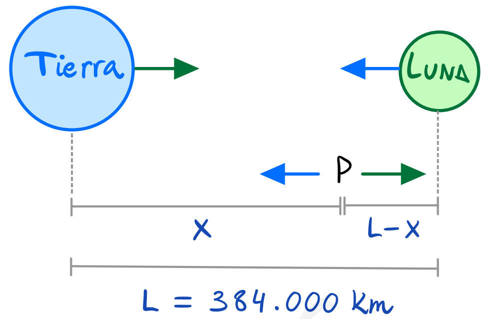
1.1. Calcula a qué distancia, medida desde la Tierra, se anula el campo gravitatorio total creado por la Luna y la Tierra (punto de equilibrio). Dibuja un diagrama.

Datos: $M_{\text{Tierra}} = 81 \cdot M_{\text{Luna}}$, Distancia media Tierra-Luna: $384.000\ km$ *(1,5 pt.)*

El campo se anula en un punto de equilibrio P que tiene que estar más cerca de la Luna (masa débil).



$$\vec{g}_T + \vec{g}_L = 0 \Rightarrow g_T = g_L \text{ (en módulo)}$$

Sustituimos la ecuación del campo gravitatorio:

$$G \cdot \frac{M_T}{x^2} = G \cdot \frac{m_L}{(L-x)^2} \quad ; \text{ sabemos que } M_T = 81 \cdot m_L \Rightarrow \cancel{G} \cdot \frac{81 \cdot \cancel{m_L}}{x^2} = \cancel{G} \cdot \frac{\cancel{m_L}}{(L-x)^2} \Rightarrow$$

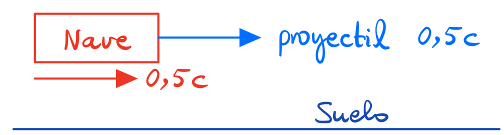
$$\Rightarrow \frac{81}{x^2} = \frac{1}{(L-x)^2} \Rightarrow \sqrt{\frac{81}{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{(L-x)^2}} \Rightarrow \frac{9}{x} = \frac{1}{L-x} \Rightarrow 9L - 9x = x \Rightarrow$$

Tomamos raíces

$$\Rightarrow 10x = 9L \Rightarrow x = \frac{9}{10} L = \frac{9}{10} \cdot 384.000 \text{ km} = 345.600 \text{ km desde La Tierra.}$$

1.2. Una nave espacial que desde el suelo se ve avanzando a una velocidad relativista de $0{,}5 \cdot c$, dispara un proyectil a una velocidad $0{,}5 \cdot c$ relativa a la nave hacia delante (misma dirección y sentido). Calcula la velocidad del proyectil visto desde el suelo (en función de c ; no necesitas el valor). *(0,5 pt.)*

Se mueven en el mismo sentido.



Llamamos u a la velocidad resultante.

$$\boxed{u = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 \cdot V_2}{c^2}}} = \frac{0{,}5c + 0{,}5c}{1 + \frac{0{,}5c \cdot 0{,}5c}{c^2}} = \frac{c}{1 + \frac{0{,}5^2 c^2}{c^2}} = \frac{c}{1 + 0{,}25} = 0{,}8c$$

Obviamente, la velocidad total medida desde el suelo, es inferior a la velocidad de la luz.

PREGUNTA 2: Una partícula alfa se libera, en reposo, entre dos placas eléctricas entre las que existe un campo eléctrico uniforme de $1{,}2 \cdot 10^4\ V \cdot m^{-1}$. Datos: $q_\alpha = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ C\,;\ m_\alpha = 6{,}4 \cdot 10^{-27}\ kg$.

a. Calcula la aceleración debida al campo eléctrico (ignora la gravedad) y la longitud que debe recorrer la partícula, entre las placas, para alcanzar una velocidad de $6\ km \cdot s^{-1}$. *(1,5 pt.)*

b. Calcula el trabajo eléctrico y la diferencia de potencial entre los puntos inicial y final. *(0,5 pt.)*

a) Aceleración:

Campo uniforme

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \Rightarrow \boxed{\vec{F} = q \cdot \vec{E}} = m \cdot \vec{a} \quad \left.\right\} \quad q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \boxed{\vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}}$$

Como no tenemos direcciones, calculamos el módulo.

$$a = \frac{|q| \cdot E}{m} \Rightarrow a = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-19} C \cdot 1{,}2 \cdot 10^4\ N/C}{6{,}4 \cdot 10^{-27}\ kg} = 6 \cdot 10^{11}\ \frac{m}{s^2}$$

; Nota unidades: $\frac{V}{m} = \frac{N}{C}$

El movimiento es m.r.u.a. Como a es cte podemos usar las ecuaciones de Galileo.

Veamos qué longitud recorre hasta alcanzar $6\ km/s = 6000\ m/s$ desde el reposo $v_0 = 0\ m/s$

Longitud: $$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta s \Rightarrow \Delta s = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a} = \frac{(6000\ m/s)^2}{2 \cdot 6 \cdot 10^{11}\ \frac{m}{s^2}} = 3 \cdot 10^{-5}\ m/s$$

b) $$\boxed{W = -q \cdot \Delta V} = \Delta E_c = \frac{1}{2} m \cdot (v^2 - 0^2)$$; parte del reposo

El trabajo eléctrico: $$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 6{,}4 \cdot 10^{-27}\ kg \cdot (6 \cdot 10^3\ m/s)^2 = 1{,}15 \cdot 10^{-19}\ J$$

El potencial eléctrico: $$\Rightarrow \Delta V = \frac{\Delta E_c}{-q} = \frac{1{,}15 \cdot 10^{-19}\ J}{-3{,}2 \cdot 10^{-19}\ C} = -0{,}36\ V = -3{,}6 \cdot 10^{-1}\ V$$

3.1. Una partícula de masa $8\ ng$ y carga eléctrica $-2\ \mu C$ entra en una región del espacio en la que hay un campo magnético $\vec{B} = 3\vec{j}\ T$, con una velocidad $\vec{v} = 6\vec{i}\ km \cdot s^{-1}$. Calcula: a) la velocidad angular con que se mueve; b) la intensidad de campo eléctrico (vector) que se debe aplicar para que la partícula siga una trayectoria rectilínea. Dato: $1\ ng = 10^{-9}\ g$. *(1,5 pt.)*

$m = 8\,ng = 8\cdot10^{-12}\,kg$, $q = -2\mu C = -2\cdot10^{-6}\,C$, $\vec{B} = 3\vec{j}\,T$, $\vec{V} = 6\vec{i}\,km/s = 6\cdot10^3\,\vec{i}\ m/s$

a) Velocidad angular. Como se ve por los datos $\vec{B} \perp \vec{v} \Rightarrow$

$sen(\vec{v},\vec{B}) = sen\,90° = 1 \Rightarrow$ se cumple la condición de órbita.

$\boxed{F_m = F_c} \Rightarrow |q|\cdot\cancel{v}\cdot B = m\cdot\frac{v^{\cancel{2}}}{r} \Rightarrow |q|\cdot B = m\cdot\frac{v}{r}$, sustituimos $v = \omega\cdot r$

$\Rightarrow |q|\cdot B = m\cdot\frac{\omega\cdot\cancel{r}}{\cancel{r}} \Rightarrow \boxed{\omega = \frac{|q|\cdot B}{m}} = \frac{-2\cdot10^{-6}\,C\cdot3\,T}{8\cdot10^{-12}\,kg} = 7{,}5\cdot10^5\ rad/s$

b) Para que siga en línea recta la fuerza eléctrica debe compensar a la magnética de modo que la fuerza total sea nula. Veamos la dirección y sentido de la fuerza magnética.

$\vec{F}_m = q\cdot\vec{v}\times\vec{B} \Rightarrow -\vec{i}\times\vec{j} = -\vec{k} \Rightarrow \vec{F}_m = F_m(-\vec{k}) \Rightarrow$

signo ⊖ de la carga

La fuerza eléctrica debe oponerse , luego $\vec{F}_e = q\cdot\vec{E} = q\cdot E\,\vec{k}$, como la carga es negativa:

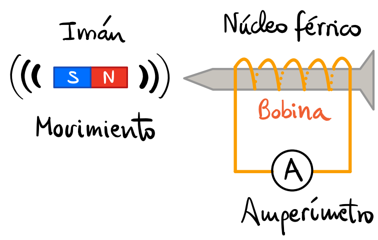
$\vec{E} = E(-\vec{k})$. Cuando $|\vec{F}_e| = |\vec{F}_m|$; trabajamos con los módulos:

$|q|\cdot E = |q|\cdot v\cdot B \Rightarrow \boxed{E = v\cdot B} = 6\cdot10^3\,m/s\cdot3\,T = 1{,}8\cdot10^4\ \frac{N}{C}$

Finalmente, el vector campo eléctrico $\vec{E} = -1{,}8\cdot10^4\,\vec{k}\ \frac{N}{C}$

3.2. En un laboratorio se dispone de: una bobina, un núcleo de hierro dulce, un imán rectangular, un miliamperímetro y cables de conexión. Explica cómo se puede inducir corriente en la bobina y cómo se puede aumentar la intensidad de esa corriente. Haz un esquema del montaje. *(0,5 pt.)*

Experiencia de Faraday - Henry. Podemos inducir una corriente eléctrica en la bobina moviendo el imán con respecto a la bobina de modo que varíe el flujo magnético. Podemos aumentar la intensidad con un movimiento más rápido o bien aumentar el campo magnético con un núcleo que tenga una mayor permeabilidad magnética (μ) o bien aumentando el nº de vueltas de la bobina (solenoide).



$\boxed{\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt}}$ Ley de Faraday - Henry (forma diferencial)

$\boxed{B = \frac{\mu N I}{l}}$ Campo magnético de un solenoide / electroimán

$\boxed{\Phi_m = B\cdot S\cdot\cos\alpha}$ Flujo magnético

PREGUNTA 4: La expresión matemática de una onda armónica transversal que se propaga por una cuerda tensa orientada según el eje X es $y(x,t) = 0{,}5 \cdot \text{sen}\left[2\pi\,(3t - x)\right]$ (unidades en el SI).

a. Calcula los valores de la longitud de onda y la velocidad de propagación. *(0,75 pt.)*

b. Calcula la distancia mínima que separa dos puntos de la cuerda que en un mismo instante vibran desfasados 2π radianes. *(0,5 pt.)*

c. Calcula el primer instante en el que la aceleración es máxima en $x = 0\ m$. *(0,75 pt.)*

a) $\boxed{y = A \cdot \text{sen}\,(\omega t - Kx + \varphi_0)}$ Ecuación general de la onda

Sentido del eje X (signo menos)

En nuestro caso $y = 0{,}5 \cdot \text{sen}\ 2\pi(3t - x) = 0{,}5 \cdot \text{sen}\ (6\pi t - 2\pi x)$

Amplitud $A = 0{,}5\ m$; Fase inicial $\varphi_0 = 0$ rad

Frecuencia angular $\omega = 2\pi \cdot 3 = 6\pi$ rad/s ; nº de onda $K = 2\pi\ m^{-1}$

Longitud de onda $K = \dfrac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \dfrac{2\pi}{K} = \dfrac{2\pi}{2\pi} = 1m$

Velocidad de propagación $K = \dfrac{\omega}{V_p} \Rightarrow V_p = \dfrac{\omega}{K} = \dfrac{6\pi}{2\pi} = 3\ m/s$

Método II: $V_p = \dfrac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \dfrac{2\pi}{K} \cdot \dfrac{\omega}{2\pi} = \dfrac{\omega}{K}$

b) $\boxed{\Delta\varphi = K \cdot \Delta x}$ Diferencia de fase espacial, luego $K \cdot \Delta x = 2\pi \Rightarrow$

$\dfrac{\cancel{2}\pi}{\lambda} \cdot \Delta x = \cancel{2}\pi \Rightarrow \Delta x = \lambda = 1m$; distancia mínima

Esta situación se corresponde con la condición para dos puntos en fase $\boxed{\Delta\varphi = n \cdot 2\pi}$, $n \in \mathbb{N}\ (0, 1, \ldots)$

c) Calculamos la velocidad de vibración y después la aceleración: $y = 0{,}5 \cdot \text{sen}\ (6\pi t - 2\pi x)$

$V(x,t) = \dfrac{dy(x,t)}{dt} = 0{,}5 \cdot 6\pi \cdot \cos\ (6\pi t - 2\pi x)\ m/s$

$a(x,t) = \dfrac{d\,V(x,t)}{dt} = -\,0{,}5 \cdot (6\pi)^2 \cdot \text{sen}\,(6\pi t - 2\pi x)\ m/s^2$; $x = 0\ m.$

Aceleración máxima en $x = 0\ m \Rightarrow \text{sen}\,(6\pi t) = \pm 1 \Rightarrow \varphi = \dfrac{\pi}{2}$ rad (1ª solución)

$6\pi t = \dfrac{\pi}{2} \Rightarrow t = \dfrac{1}{12\,s} \simeq 0{,}083\,s$

5.1.Una lente divergente de distancia focal $10\ cm$ forma una imagen de $2\ cm$ de altura. Si el tamaño del objeto es $10\ cm$. a) Calcula la distancia a la que se encuentra el objeto de la lente. b) Dibuja la marcha de los rayos en un diagrama. *(1,5 pt.)*

a) Datos: $f' = -10\text{ cm} < 0$ (divergente) ; la imagen $y' = 2\text{ cm}$; el objeto $y = 10\text{ cm}$

$$\boxed{A = \frac{y'}{y} = +\frac{s'}{s}}$$ Aumento lateral en lentes delgadas $\Rightarrow A = \frac{2}{10} = 0{,}2 = \frac{s'}{s} \Rightarrow s' = 0{,}2 \cdot s$

$$\boxed{\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}}$$ Ecuación de las lentes delgadas $\Rightarrow \dfrac{1}{0{,}2 \cdot s} - \dfrac{1}{s} = \dfrac{1}{-10} \Rightarrow$

$\dfrac{1}{s}\left(\dfrac{1}{0{,}2} - 1\right) = \dfrac{1}{-10} \Rightarrow \dfrac{1}{s} \cdot 4 = \dfrac{1}{-10} \Rightarrow s = -40\text{ cm}$ a la izquierda (distancia objeto).

$s' = 0{,}2 \cdot s = 0{,}2 \cdot (-40\text{ cm}) = -8\text{ cm}$

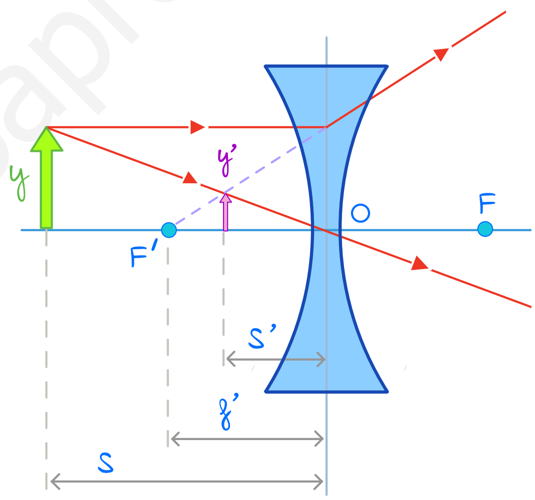
a la izquierda (imagen virtual en una lente).

$$A = 0{,}2 \begin{cases} |A| < 1 \Rightarrow \text{reducida} \\ A > 0 \Rightarrow \text{derecha} \end{cases} \Rightarrow$$

La imagen final es virtual, reducida y derecha.

Lente divergente: Cualquier posición.
Imagen virtual, reducida y derecha.
La distancia focal imagen f' es negativa. $f' < 0$

b) Diagrama de rayos



5.2.Una persona es hipermétrope y necesita una lente correctora de $+3$ dioptrías para ver objetos situados a $25\ cm$ de sus ojos. ¿Cuál es el punto próximo para sus ojos sin la lente correctora? :

a) $-100\ cm$ b) $-50\ cm$ c) Infinito *(0,5 pt.)*

Punto próximo: es el punto donde el ojo sano (emétrope) es capaz de ver un objeto con nitidez (25 cm).

$s = -25\text{ cm} = -0{,}25\text{ m}$; P.P. $= s'$; $P = +3\text{ D}\ (m^{-1})$ lente convergente.

$$\boxed{\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = P} \Rightarrow \frac{1}{s'} - \frac{1}{-0{,}25\text{ m}} = 3 \Rightarrow \frac{1}{s'} + 4 = 3 \Rightarrow \frac{1}{s'} = -1$$

$s' = -1\text{ m} = 100\text{ cm}$; La respuesta correcta es la a

6.1. Disponemos de una muestra de un isótopo del Radón, $^{222}_{86}Rn$ con un período de semidesintegración de 1600 años. ¿Cuánto tiempo tarda una muestra de $10\ g$ de Rn en reducirse a $1\ g$? *(1 pt.)*

$m_0 = 10\ g$, $m = 1 g$ luego se desintegró el 90 % y queda el 10 %. $t_{1/2} = 1600$ años

$\boxed{t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}}$ Período de semidesintegración $\Rightarrow \lambda = \dfrac{\ln 2}{1600 \text{ años}} \simeq 4{,}33 \cdot 10^{-4}$ años^{-1} Constante de desintegración

$\boxed{m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}}$ Ec. de la desintegración radiactiva $\quad 1 g = 10\ g \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \ln \dfrac{1}{10} = -\lambda \cdot t \Rightarrow$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln \frac{1}{10}}{-\lambda} = \frac{\ln \frac{1}{10}}{-4{,}33 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}} \simeq 5318 \text{ años}$$

El cálculo es más exacto si no redondeamos $\lambda \Rightarrow t = \dfrac{\ln 10}{-\frac{\ln 2}{1600 \text{ años}}} \simeq 5315$ años

6.2. Calcula la energía de enlace por nucleón para el $^{222}_{86}Rn$.

Datos: $c = 3{,}0 \cdot 10^8\ m/s$; $m_p = 1{,}00728\ u$; $m_n = 1{,}00867\ u$; $M(^{222}_{86}Rn) = 222{,}0176\ u$;
$1\ u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$

masa del núcleo

$\boxed{\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] - M}$ Defecto de masa $\quad$ $A = 222$, $Z = 86$ Rn , $Z = 86$ protones , $N = A - Z = 222 - 86 = 136$

neutrones $\quad$ nº másico (nucleones)

$\Delta m = (86 \cdot 1{,}00728 + 136 \cdot 1{,}00867) - 222{,}0176 = 1{,}883574\ u$

$\Delta m = 223{,}8052 - 222{,}0176 = 1{,}7876\ u$, pasamos de uma a Kg:

$1{,}7876\ u \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \frac{kg}{u} = 2{,}9674 \cdot 10^{-27}\ Kg \Rightarrow$

La energía de enlace $\Delta m \cdot c^2 = 2{,}9674 \cdot 10^{-27}\ Kg \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}\right)^2 = 2{,}67 \cdot 10^{-10}\ J \Rightarrow$

La energía de enlace por nucleón (A = nº nucleones): $\boxed{E_{\text{nucleón}} = \dfrac{\Delta m \cdot c^2}{A}}$ Energía de enlace por nucleón $\Rightarrow$

$$E_{\text{nucleón}} = \frac{2{,}67 \cdot 10^{-10}\ J}{222} = 1{,}2027 \cdot 10^{-12}\ J/\text{nucleón}$$

7.1. Al iluminar un metal con luz de frecuencia $2{,}5 \cdot 10^{15}\ Hz$ se observa que emite electrones que pueden detenerse al aplicar un potencial de frenado de $7{,}2\ V$. Si la luz que se emplea con el mismo fin es de longitud de onda en el vacío $1{,}78 \cdot 10^{-7}\ m$, dicho potencial pasa a ser de $3{,}8\ V$.

a. Determina el valor de la constante de Planck. *(0,75 pt.)*

b. Calcula el trabajo de extracción del metal. *(0,75 pt.)*

Datos: $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$, $c = 3 \cdot 10^{8}\ m/s$

Tenemos dos frecuencias de luz diferentes, pero el trabajo de extracción, W_0, del metal es el mismo.

$$\boxed{h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_e^2} \Rightarrow \boxed{h \cdot \nu = W_0 + e \cdot V_0}$$

Ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico

Datos: $\nu_1 = 2{,}5 \cdot 10^{15}\ Hz$, $V_{01} = 7{,}2\ V$ (potencial de frenado). $e = |q_e|$

$$\lambda_2 = 1{,}78 \cdot 10^{-7} m \Rightarrow \nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^{8}\ m/s}{1{,}78 \cdot 10^{-7}\ m} = 1{,}685 \cdot 10^{15}\ Hz \ , \quad V_{02} = 3{,}8\ V$$

$\nu_1 < \nu_2 \Rightarrow V_{01} > V_{02}$ (la primera luz tiene mayor energía).

Planteamos un sistema para resolver las dos incógnitas, W_0 y h.

$$\left.\begin{array}{l} h \cdot \nu_1 = W_0 + e \cdot V_{01} \\ h \cdot \nu_2 = W_0 + e \cdot V_{02} \end{array}\right\} \text{Restamos} \quad h \cdot (\nu_1 - \nu_2) = e \cdot (V_{01} - V_{02}) \Rightarrow$$

$$h = \frac{e \cdot (V_{01} - V_{02})}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{e \cdot (V_{01} - V_{02})}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot (7{,}2\ V - 3{,}8\ V)}{2{,}5 \cdot 10^{15}\ Hz - 1{,}685 \cdot 10^{15}\ Hz}$$

$h = 6{,}67 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$; es una buena estimación.

Despejamos el trabajo de extracción de cualquiera de las dos ecuaciones:

$h \cdot \nu_1 = W_0 + e \cdot V_{01} \Rightarrow W_0 = h \cdot \nu_1 - e \cdot V_{01}$, energía incidente − trabajo de frenado

$$W_0 = 6{,}67 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s \cdot 2{,}5 \cdot 10^{15}\ Hz - 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 7{,}2\ V = 5{,}18 \cdot 10^{-19}\ J$$

7.2. El efecto fotoeléctrico se produce si:

a. La intensidad de la radiación es muy grande.

b. La longitud de onda de la radiación incidente es grande.

c. La frecuencia de la radiación es superior a la frecuencia umbral.

$$\boxed{h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + E_c}$$

Si la intensidad aumenta, eso no cambia la energía de cada fotón. La opción a es incorrecta.

El efecto se produce si $\nu > \nu_0$, es decir, si $\lambda < \lambda_0$, luego la respuesta correcta es c.

PREGUNTA 8:

PRÁCTICA: DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UN MEDIO

En el laboratorio de física se monta un experimento para determinar el índice de refracción de una lámina de vidrio inmersa en el aire ($n = 1$) haciendo incidir rayos de luz con distintos ángulos de incidencia θ_i y midiendo en cada caso el ángulo de refracción θ_r .

θ_i (°)	θ_r (°)
24	15
32	20
40	25
50	30

8.1. ¿En qué ley física nos basaremos para hacerlo? Determine el índice de refracción de la lámina a partir de los datos experimentales mostrados en la tabla. Calcula el valor medio del índice del vidrio y su incertidumbre. *(1,5 pt.)*

8.2. Si un rayo de luz viaja desde este vidrio al aire, ¿a partir de qué ángulo no se produciría refracción? Utiliza el índice calculado anteriormente. *(0,5 pt.)*

a) Para calcular el índice de refracción utilizaremos la ley de Snell. $\boxed{n_1 \cdot \text{sen}\,\hat{i} = n_2 \cdot \text{sen}\,\hat{r}}$

$n_1 = 1$ (índice del aire) , $n_2 = n$ es el índice que queremos calcular : $n = \dfrac{\text{sen}\,\hat{i}}{\text{sen}\,\hat{r}} = \dfrac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_r}$

Completamos la tabla :

θ_i°	θ_r°	$n = \dfrac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_r}$	Desviación absoluta $\Delta n_i = \lvert n_i - \overline{n} \rvert$
24	15	1,57	0,03
32	20	1,55	0,01
40	25	1,52	0,02
50	30	1,53	0,01

Media $\overline{n} = \sum_{i=1}^{n} \dfrac{n_i}{n} = \dfrac{1,57 + 1,55 + 1,52 + 1,53}{4} \simeq 1,54$

Incertidumbre (desviación estándar) $\boxed{\sigma = \sqrt{\dfrac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}}$ Desviación estándar $n = 4$ medidas

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,03^2 + 0,01^2 + 0,02^2 + 0,01^2}{3}} \simeq 0,02236\ldots \simeq 0,02$$

El índice de refracción es $\overline{n} \pm \sigma = 1,54 \pm 0,02$

b) $\boxed{n_1 \cdot \text{sen}\,\hat{i} = n_2 \cdot \text{sen}\,\hat{r}}$ Ley de refracción Snell - Descartes ; No se producirá refracción si superamos el ángulo límite de incidencia (cuando se refracta a 90°).

$\boxed{\underbrace{n_1 \cdot \text{sen}\,\ell}_{\text{Ángulo límite}} = n_2 \cdot \underbrace{\text{sen}\,90^\circ}_{1}} \Rightarrow \text{sen}\,\ell = \dfrac{n_2}{n_1} \Rightarrow \boxed{\ell = \text{arc sen}\,\dfrac{n_2}{n_1}}$

La reflexión total sólo es posible cuando $n_1 > n_2$, es decir, cuando la luz se transmita desde el vidrio hacia el aire.

$\ell = \text{arc sen}\,\dfrac{1}{1,54} \simeq 40,5^\circ$ (Ángulo límite)