



Universidade do Minho

Departamento de Física

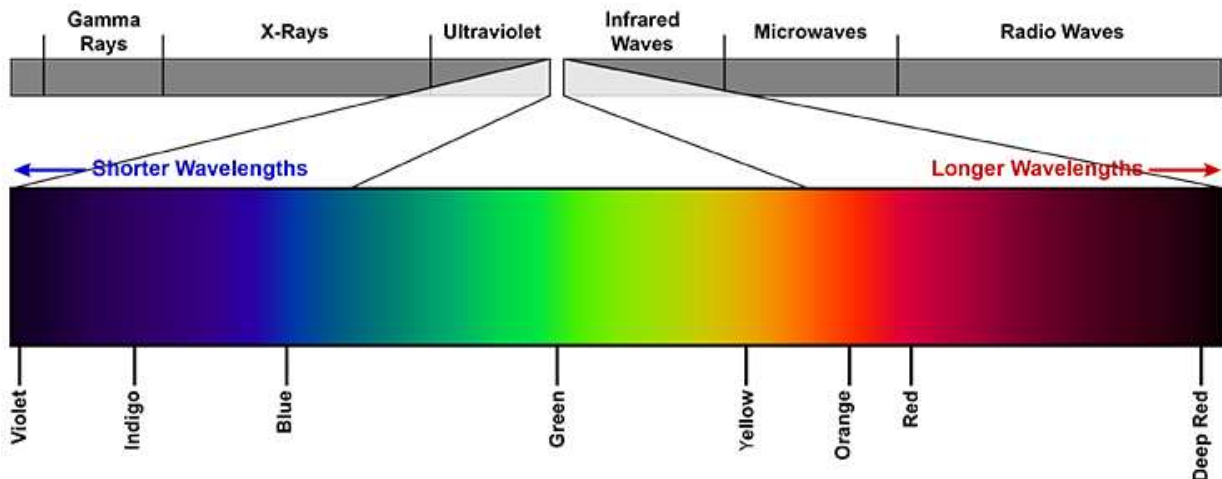
## T9- ÓTICA GEOMÉTRICA. REFLEXÃO E REFRAÇÃO. LEI DE SNELL. ANGULO CRITICO

(adaptado do guião do trabalho T9 da UC Laboratórios Integrados de Física (2019/2020) MIEBIOL)

### 1. Introdução

#### Índice de refração

Uma perturbação do campo eletromagnético pode propagar-se no espaço criando uma onda. Para uma certa gama de frequências (ou comprimentos de onda) chamamos luz a essa radiação que inclui o infravermelho, o visível e o ultravioleta. Neste trabalho vamos usar os nossos olhos como detetores e por isso vamos restringir-nos à luz visível.



**Fig 1** – espectro eletromagnético mostrando em detalhe a gama visível. Note-se que o nosso olho é mais sensível na zona central da gama visível.

O comprimento de onda da luz visível é pequeno à escala humana, varia aproximadamente entre  $0.4 \mu\text{m}$  (violeta) e  $0.7 \mu\text{m}$  (vermelho).

A velocidade com que a luz se propaga depende do meio em que se propague. A velocidade máxima verifica-se no vácuo e tem o valor:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (1)$$

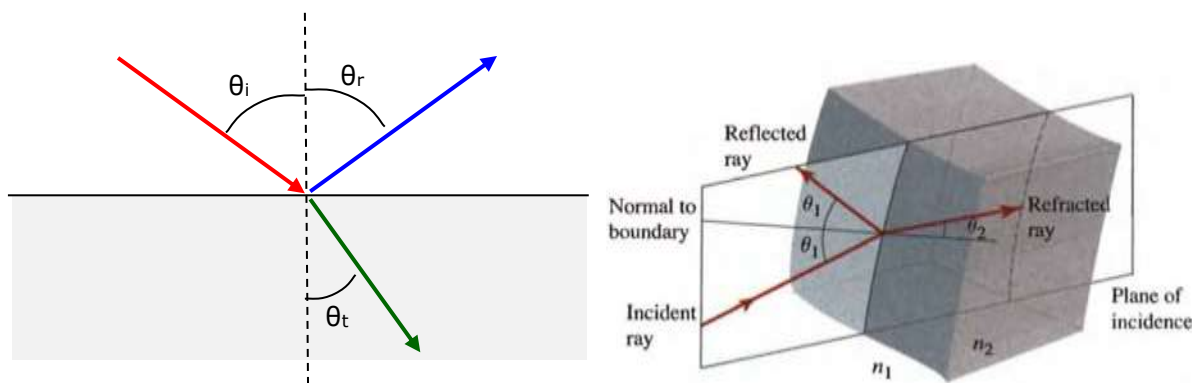
Em qualquer outro meio a velocidade da luz terá um valor inferior,  $v$ . Esse meio é caracterizado pelo *índice de refração*  $n$ :

$$n = c / v \quad (2)$$

O índice de refração do vidro mais comum é pouco superior a 1.5 o que significa que a luz se propaga nesse vidro cerca de vez e meia mais lentamente do que no vácuo. O índice de refração do ar é, aproximadamente 1,  $n_{ar} = 1.0003$ .

### Lei da Reflexão e Lei de Snell

Uma das consequências da mudança de velocidade da luz ao atingir/atraversar uma interface entre dois meios (dioptro) é que o feixe de luz poderá dividir-se em dois: um *refletido* que volta para o mesmo meio e outro, *refratado*, que continua pelo segundo meio. Em geral, ambos os feixes refratado e refletido propagam-se em direções diferentes da do feixe original.



**Fig 2** – Divisão de um raio de luz incidente na interface entre dois meios de índice de refração diferentes. À esquerda uma representação bidimensional e à direita uma representação tridimensional.

A figura 2 mostra dois meios, o meio de cima de índice de refração  $n_1$  e o meio de baixo de índice de refração  $n_2$ . A vermelho está desenhada a trajetória do feixe de luz incidente na interface, a azul o feixe refletido para o meio de origem e a verde o feixe refratado que se propaga no meio de baixo. As direções destes três feixes estão contidas no *plano de incidência* que também contém a normal à superfície. Por convenção os ângulos são medidos em relação à normal e não em relação à interface.

A lei da reflexão relaciona o ângulo do feixe refletido com o ângulo do feixe incidente:

$$\theta_r = \theta_i \quad (3)$$

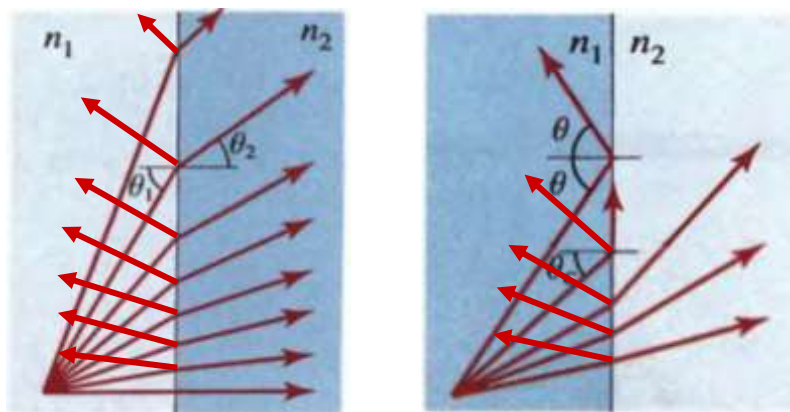
A lei de Snell relaciona o ângulo do feixe refratado (transmitido) com o ângulo do feixe incidente:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (4)$$

### **Ângulo crítico e reflexão total**

A lei de Snell, equação 4, envolve senos que não podem assumir valores maiores do que 1. Isso significa que, se o índice de refração do meio incidente for maior do que o índice de refração do segundo meio, a lei de Snell só tem solução se  $\theta_i < \theta_c$ , ou seja, se o ângulo de incidência é menor que o chamado ângulo crítico  $\theta_c$ :

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_2 / n_1)$$



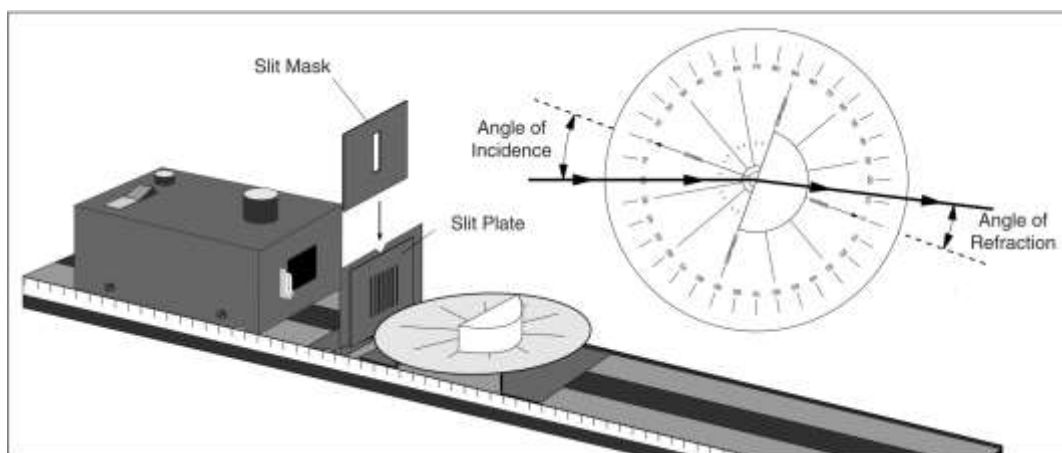
**Fig 3** – Representação do fenômeno da reflexão total. Na figura da esquerda, a luz propaga-se de um índice de refração menor para um maior e há sempre raios refletidos e refratados. Na figura da direita o índice de refração do meio 1 é maior que o do segundo meio e o raio refratado afasta-se da normal mas só há raios refratados se o ângulo de incidência for inferior ao ângulo crítico.

## **II. PARTE EXPERIMENTAL**

### **I - Luz propaga-se de um meio de menor índice de refração para um de maior índice de refração**

**1.** Familiarize-se com o kit de ótica. Evite tocar com as mãos ou qualquer outro objeto nas superfícies óticas dos diversos componentes, isto é, as superfícies que vão interagir com a luz (superfícies polidas de lentes, espelhos, alvos, etc.).

2. Monte o sistema da fig. 4:



**Fig. 4** Reflexão e refração.

3. Antes de colocar o meio cilindro de acrílico na mesa rotativa, ajuste o feixe de luz até (i) ele passar pelo centro da mesa rotativa e (ii) ser suficientemente estreito para permitir a melhor leitura dos ângulos.

4. Coloque o meio cilindro de acrílico como mostrado, alinhando a superfície plana com a linha que diz componente (perpendicular à normal a partir de onde estão graduados os ângulos) e centrando o meio cilindro com a normal.

*Sugestão: alinhe o feixe de luz com a reta normal antes de colocar o semicírculo. O ângulo medido nos dois lados da mesa deve ser  $0^\circ$ . Em seguida, sem rodar a mesa, coloque o meio cilindro. Quando ele estiver perfeitamente alinhado com o traço "componente" e centrado, o feixe de luz deve continuar a medir  $0^\circ$  em ambos os lados da mesa.*

5. Construa uma tabela com os ângulos dos raios de reflexão e de transmissão em função do ângulo de incidência, variando este de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , de  $0^\circ$  até  $80^\circ$ .

## **II - Luz propaga-se de um meio de maior índice de refração para um de menor índice de refração**

1. Mantendo a montagem anterior, continue a rodar a mesa para que o feixe incidente incida na face esférica do meio cilindro.

2. Construa uma tabela com os ângulos dos raios de reflexão e de transmissão em função do ângulo de incidência, variando este de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , de  $0^\circ$  até  $80^\circ$ . Esta nova tabela distingue-se da anterior na medida em que os feixes incidem e são refletidos na face curva e o feixe refratado sai pela face plana do meio cilindro.

3. Há um ângulo de incidência a partir do qual deixa de haver luz refratada. Determine esse ângulo com a melhor precisão que conseguir, verificando se é igual para todas as comprimentos de onda (cor) da luz incidente (pode depois usar também os filtros vermelho, verde e azul disponíveis).

# TRABALHO T7 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO, REFLEXÃO E REFRAÇÃO. LEI DE SNELL

## FOLHA DE RESULTADOS

Grupo:.....;

data:...../...../.....

Alunos: .....nº.....

.....nº.....

.....nº.....

### I Registo dos dados experimentais

1. Preencha a tabela seguinte de acordo com o ponto 5 da parte I do procedimento experimental

Tabela 1 – Luz incidente na face plana vinda do ar

|            |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\theta_i$ | 0.0° | 10.0° | 20.0° | 30.0° | 40.0° | 50.0° | 60.0° | 70.0° | 80.0° |
| $\theta_r$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\theta_t$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |

2. Preencha a tabela seguinte de acordo com o ponto 2 da parte II do procedimento experimental

Tabela 2 – Luz incidente na face plana vinda de dentro do meio cilindro.

|            |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\theta_i$ | 0.0° | 10.0° | 20.0° | 30.0° | 40.0° | 50.0° | 60.0° | 70.0° | 80.0° |
| $\theta_r$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\theta_t$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |

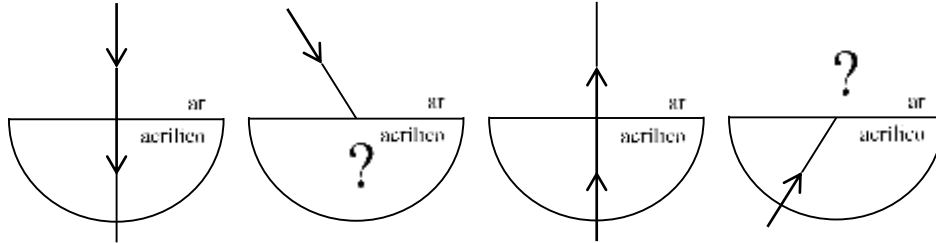
3. Preencha a tabela seguinte de acordo com o ponto 3 da parte II do procedimento experimental

Tabela 3 – Ângulo crítico para a interface acrílico – ar em função de  $\lambda$ .

|            |          |                  |              |
|------------|----------|------------------|--------------|
|            | Luz azul | Valor intermédio | Luz vermelha |
| $\theta_c$ |          |                  |              |

## II Análise dos dados experimentais

1. Um cilindro de acrílico é cortado ao meio criando a forma representada na figura 5



**Fig 5** – Luz a incidir num meio cilindro de acrílico.

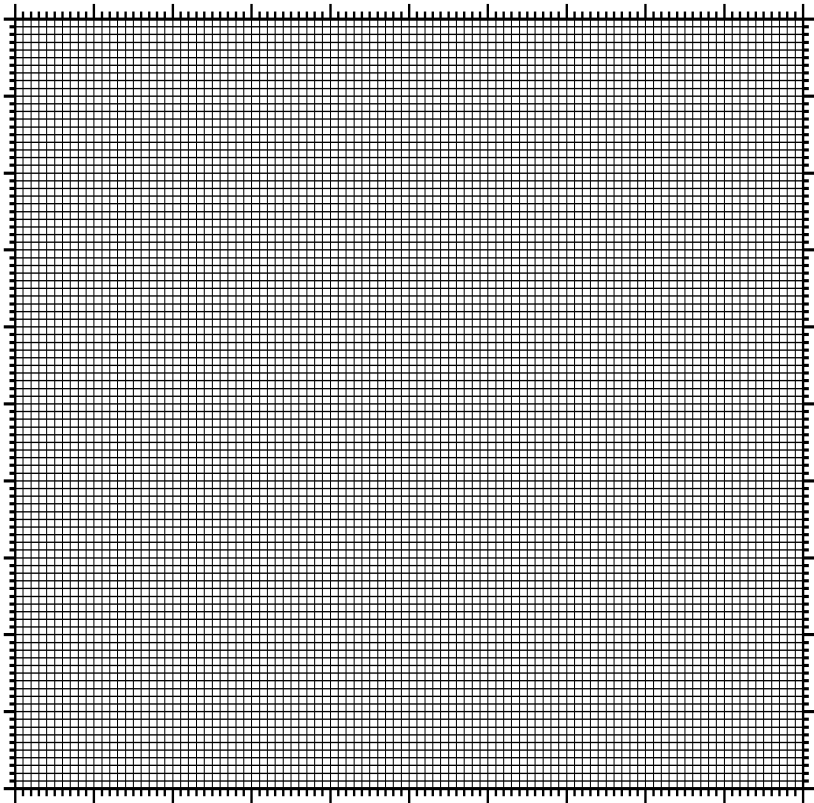
- 1.1. Faz-se incidir um raio de luz em direção ao centro do cilindro. Porque é que esse raio nunca é desviado na superfície curva?
- 1.2. Vai haver reflexão e refração em todas as quatro situações representadas? Tens evidência experimental a apoiar a resposta? Qual?

2. Com os dados da tabela 1 e da tabela 2 verifica a lei da reflexão. Discute a incerteza nos resultados e o modo como eles afetam a validação da lei da reflexão.

3. Com os dados da tabela 1 verifica a lei de Snell e calcula o valor do índice de refração do acrílico. Para tal, preenche a tabela seguinte e traça o gráfico  $\sin (\theta_t)$  em função de  $\sin (\theta_i)$  e faz uma regressão linear.

Tabela 4 – Luz incidente na face plana vinda do ar

|                   |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\theta_i$        | 0.0° | 10.0° | 20.0° | 30.0° | 40.0° | 50.0° | 60.0° | 70.0° | 80.0° |
| $\sin (\theta_i)$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\sin (\theta_t)$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |



**Gráfico 1** –  $\sin (\theta_t)$  em função de  $\sin (\theta_i)$  para luz a incidir do ar para o acrílico.

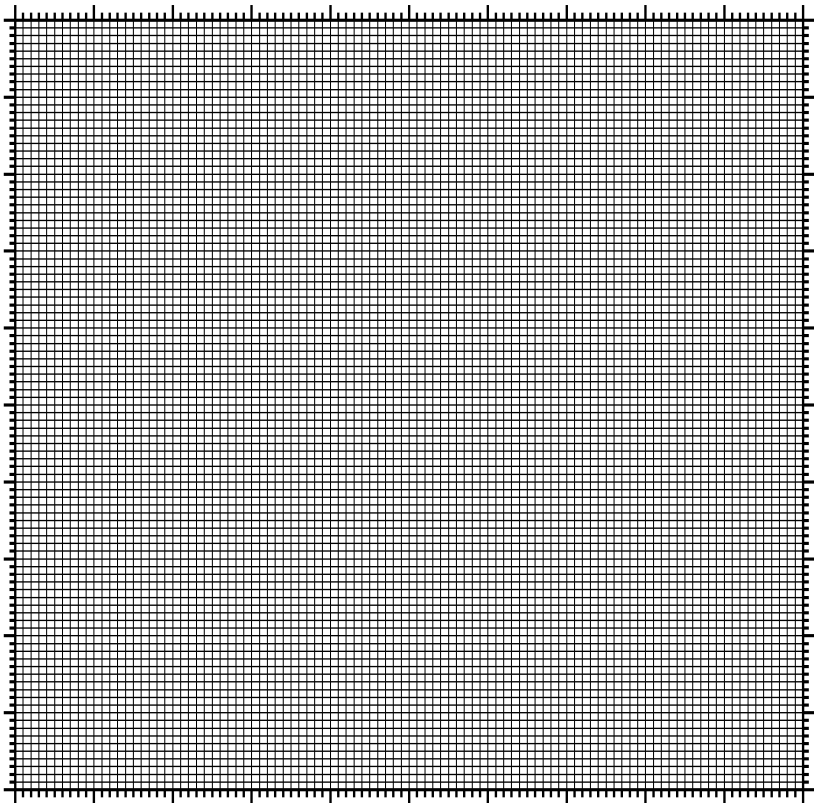
Tabela 5 – Índice de refração do acrílico (luz incide ar → acrílico).

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $n_{\text{acrílico}}$ |  |
|-----------------------|--|

4. Com os dados da tabela 2 verifica a lei de Snell e calcula o valor do índice de refração do acrílico. Para tal, preenche a tabela seguinte e traça o gráfico  $\sin (\theta_t)$  em função de  $\sin (\theta_i)$  e fazendo a regressão linear.

Tabela 6 – Luz incidente na face plana vinda do acrílico

|                   |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\theta_i$        | 0.0° | 10.0° | 20.0° | 30.0° | 40.0° | 50.0° | 60.0° | 70.0° | 80.0° |
| $\sin (\theta_i)$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $\sin (\theta_t)$ |      |       |       |       |       |       |       |       |       |



**Gráfico 2** –  $\sin (\theta_t)$  em função de  $\sin (\theta_i)$  para luz a incidir do ar para o acrílico.

Tabela 7 – Índice de refração do acrílico (luz incide acrílico → ar).

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $n_{\text{acrílico}}$ |  |
|-----------------------|--|



**5.** Com os dados da tabela 3 (ângulo crítico para a interface acrílico – ar) calcula o valor do índice de refração do acrílico para o azul, o vermelho e um valor médio. Discute a incerteza no resultado.

Tabela 8 – Índice de refração do acrílico.

|                       | Luz azul | Valor intermédio | Luz vermelha |
|-----------------------|----------|------------------|--------------|
| $n_{\text{acrílico}}$ |          |                  |              |

Valor médio:  $\langle n_{\text{acrílico}} \rangle =$

**7.** Tendo em atenção todas as medidas e cálculos que efetuou apresente o melhor valor para o índice de refração do acrílico do semicilindro que usou.