

* Difração de raios X num cristal

- Roentgen (1895) descobriu os raios X

$\lambda \sim 1 \text{ \AA} \sim 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$

impossível construir uma rede com este espaçamento.

- Em 1913, von Laue sugeriu que o espaçamento entre os átomos em um cristal poderia servir como grade de difração para os raios X \Rightarrow experiências comprovaram

este pensar (1914 \rightarrow 2014) | Transparência 1 |

* Dedução da Lei de Bragg (interpretação geométrica)

O espaçamento entre os planos atômicos é o código de barras de organização dos átomos no material (ICD, TCPS)

$m\lambda = 2d \sin \theta$

| Transparência 2 |

* Polarização das ondas luminosas

- O fenômeno da polarização é uma evidência convincente de natureza transversal das ondas eletromagnéticas.

- A direção de polarização da onda eletromagnética é definida como a direção em que \vec{E} está vibrando. (átomos vibrando) | Transparência 3 |

* Tipos de polarização

(2)

- Nas polarizada
- Linearmente polarizada (polarizada, plano-polarizada)
- Circularmente polarizada
- Elipticamente polarizada

* Processos físicos para se obter luz polarizada a partir de luz não polarizada

- absorção seletiva
- reflexão
- difração
- espalhamento

(a) Polarização por absorção seletiva

Materiais que transmitem a vibração do campo elétrico numa direção e absorvem as ondas que vibram nas outras direções.

É transmitida em 1 única direção \Rightarrow substância
divoica
(polaróide)

Transparência 4

- Polariza a luz mediante absorção seletiva por moléculas orientadas.
- Compostos por folhas finas de compostos orgânicos de cadeia longa \Rightarrow álcool polivinílico.

- As folhas são esticadas durante o processo de fabricação de modo que as moléculas de cadeia longa se alinhem.
- Mergulha-se em iodo \Rightarrow folhas condutoras \Rightarrow a condução ocorre principalmente ao longo das cadeias de carbono.
- A luz é absorvida pelos elétrons de valência da cadeia de carbono \Rightarrow $\vec{E} \parallel$ cadeia \Rightarrow absorved
 $\vec{E} \perp$ cadeia \Rightarrow transmitida.

- Direção perpendicular às cadeias moleculares \Rightarrow eixo de transmissão
 Luz com $\vec{E} \parallel$ ao eixo de transmissão \Rightarrow transmitida totalmente
 Luz com $\vec{E} \perp$ ao eixo de transmissão \Rightarrow absorvida totalmente

Polarizador ideal

Transparência 4

* Polarizador + analisador

- Passa pelo polarizador \Rightarrow polarizada verticalmente: \vec{E}_0
- Passa pelo analisador \Rightarrow faz um ângulo θ com o eixo do polarizador
- A componente $\vec{E}_0 \perp$ ao eixo do analisador é absorvida e a componente $\vec{E}_0 \parallel$ ao eixo do analisador é $E_0 \cos \theta$
- A intensidade varia com o quadrado da amplitude transmitida
 $I_0 \equiv$ intensidade da onda polarizada que incide sobre o analisador.

$I = I_0 \cos^2 \theta$

Lei de Malus

(c) Polarização por dupla refração

- Ocorre quando a velocidade da luz não é a mesma em todas as direções \Rightarrow n varia com a direção

- materiais birrefringentes \rightarrow Transparência 5
dupla refração

Exemplos: SiO2 e CaCO3

Quando o feixe de luz entra num cristal birrefringente o feixe se divide em 2 raios plano polarizados que se propagam com velocidades diferentes.

- O raio ordinário (O) é caracterizado por um índice de refração n_o que é o mesmo em qualquer direção (frontes de ondas esféricas)

- O raio extraordinário (E) propaga-se com diferentes velocidades em diferentes direções e se caracteriza por um índice de refração n_E que varia com a direção de propagação (frontes de ondas elípticas)

Eixo óptico: direção em que os raios E e O têm a mesma velocidade

$$n_o = n_E$$

(d) Polarização por espalhamento

(6)

- A absorção e re-emissão de luz por um meio é denominada espalhamento.
- Feixe de luz do sol atinge uma molécula de ar e provoca a vibração horizontal das cargas e também vertical.

Transparência 5

A intensidade da luz espalhada varia com $\frac{1}{\lambda^4}$ ou E^4
($d \ll \lambda$)

moléculas de ar $\left\{ \begin{array}{l} O_2 \\ N_2 \end{array} \right. \sim 0,2 \text{ nm}$

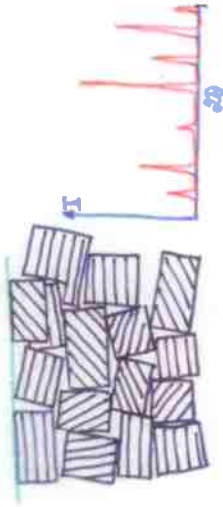
$E_{\text{azul}} > E_{\text{vermelho}}$

Os comprimentos de onda mais curtos (azul) são espalhados mais efetivamente que os raios longos (vermelho) \Rightarrow o céu parece azul

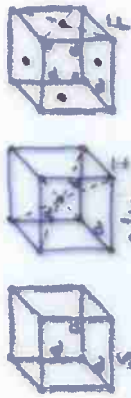
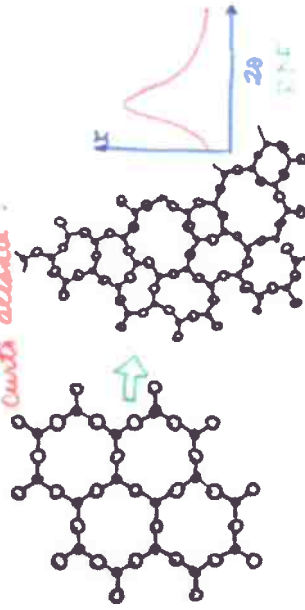
Rotação do plano de polarização da luz transmitida \Rightarrow Atividade óptica \Rightarrow forma das moléculas, tensões.

Monocristal: arreglo periódico de largo alcance de estas unidades perpendicularmente empilhadas

Policristal: arreglo periódico de longo alcance de estas unidades de tamaño finito orientadas ao acaso



Amorfo: arreglo não periódico de longo alcance. Correlação a curta alcance



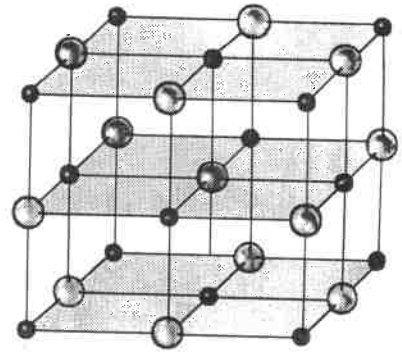
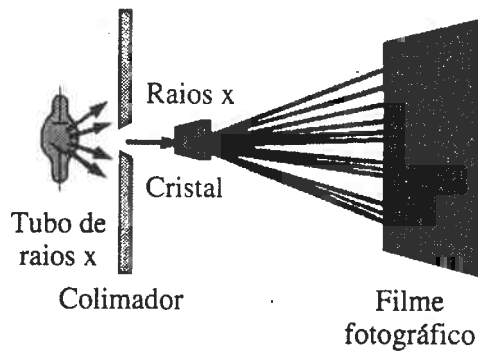
Monoclinic

Triclinica

14 REDES DE BRAVAIN'S

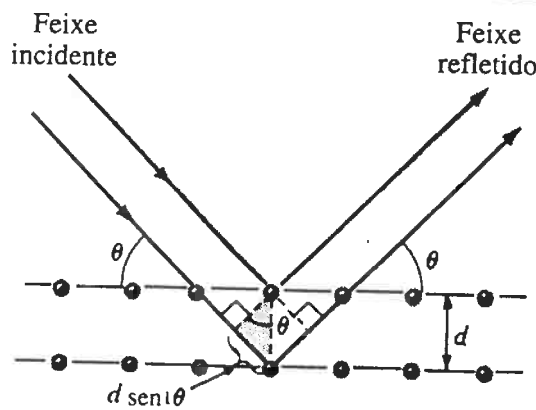
DIFRAÇÕES DE RAIOS X EM CRISTAIS

(7)



Experiência de Laue

Rede cúbica (fcc) NaCl
 $a = 0,562737 \text{ nm}$



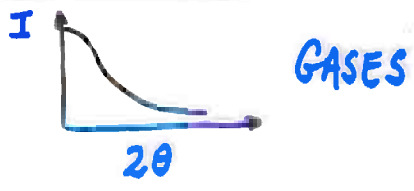
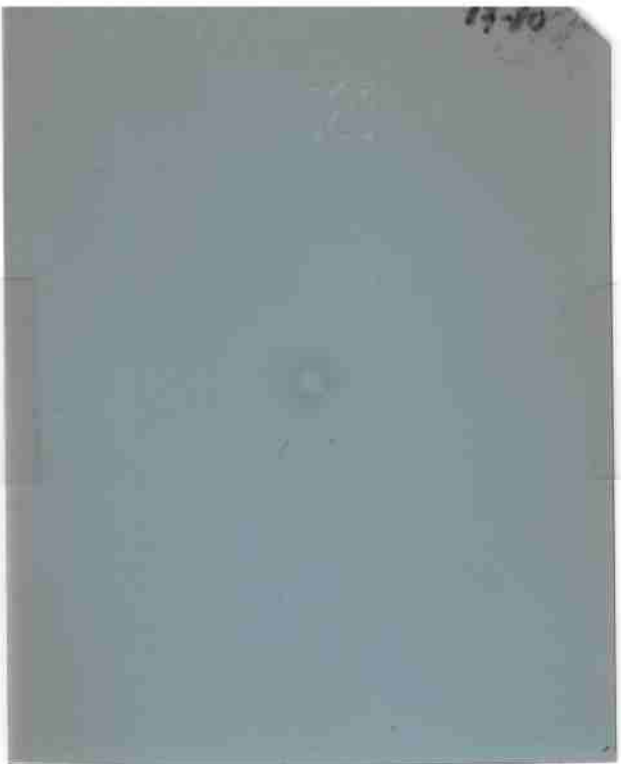
Lei de Bragg

Interferência construtiva \Rightarrow diferença de caminho óptico =
número inteiro de comprimentos de onda

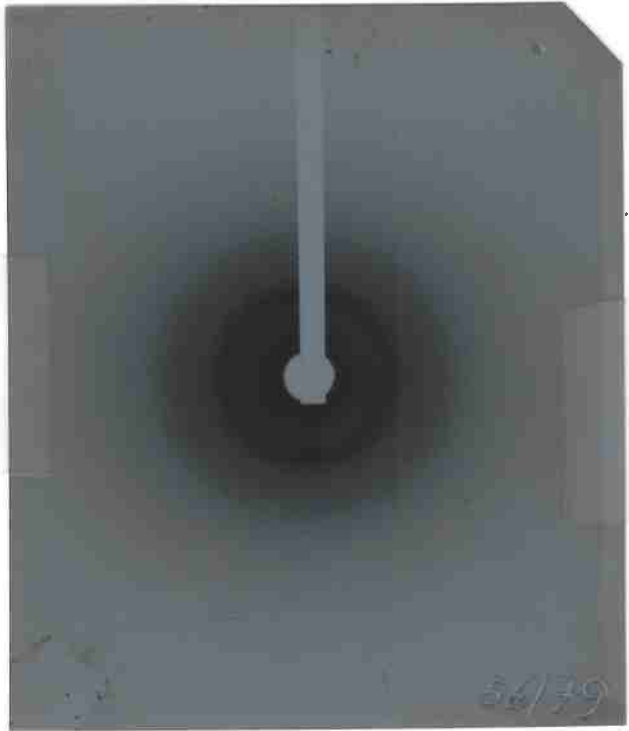
Diferença de caminho óptico = nº inteiro de λ

$$2d \sin \theta = m \lambda$$

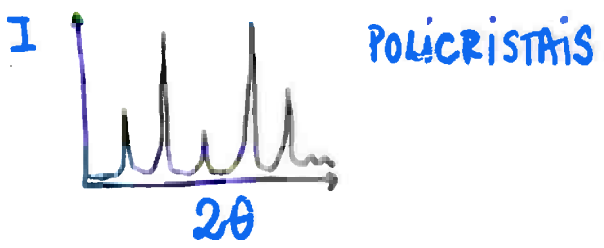
$m \equiv$ ordem de difração



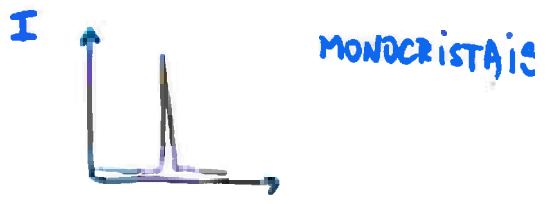
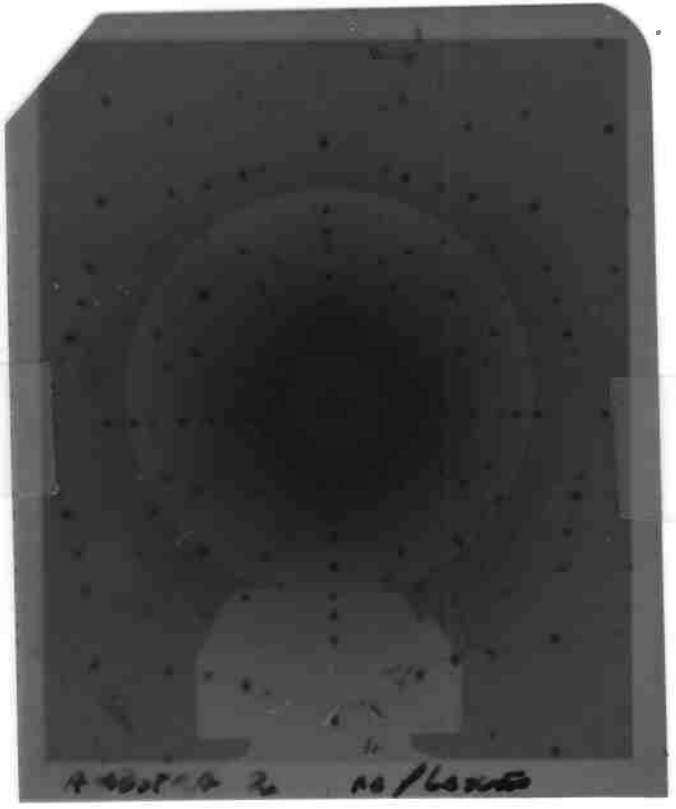
GASES



LÍQUIDOS E MATERIAIS AMORFOS



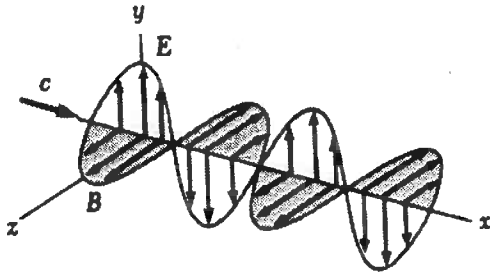
POLICRISTAIS



MONOCRISTAIS

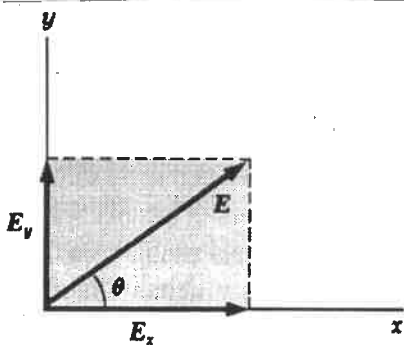
POLARIZAÇÃO

(2)



Onda eletromagnética propagando-se na direção x : $\vec{k} = k \hat{i}$

\vec{E} vibra no plano $y-z$ $\vec{E} = E \hat{j}$
 \vec{B} vibra no plano $x-z$ $\vec{B} = B \hat{k}$



Onda linearmente polarizada

\vec{E} faz um ângulo θ com o eixo x

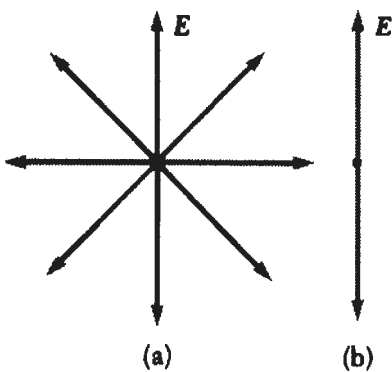
$$E_x = E \cos \theta \quad \text{e} \quad E_y = E \sin \theta$$

$E_x = E_y$ ($\theta = \pi/4$ ou 45°) } diferença de fase = $\pi/2$
 E descreve um círculo no tempo } polarização circular

$E_x \neq E_y$ (diferença de fase = 90°)

polarização elíptica

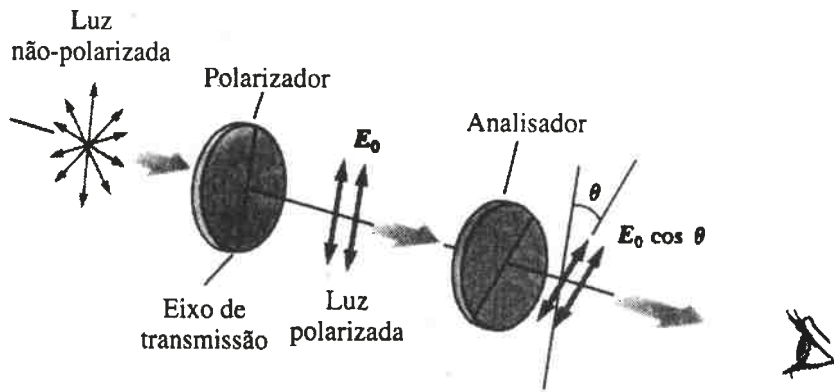
(a) feixe de luz não polarizado



(b) feixe de luz linearmente polarizado

\vec{E} vibra numa mesma direção em todos os instantes (polarizado ou plano-polarizado)

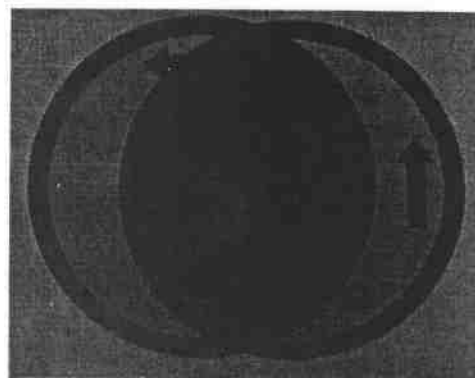
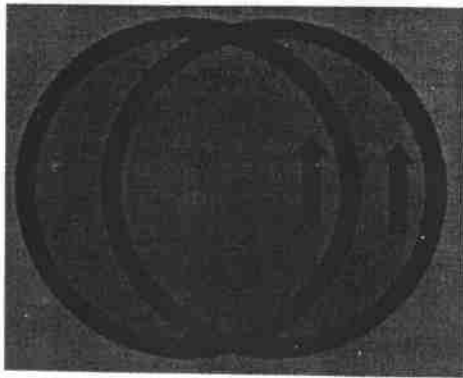
a) POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO SELETIVA



DVAS PEQUENAS POLARIZADORAS

Substância
dielétrica

Polarímetro



POLARIZADOR
+
ANALISADOR

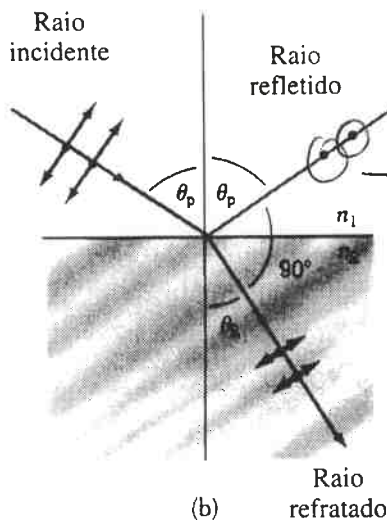
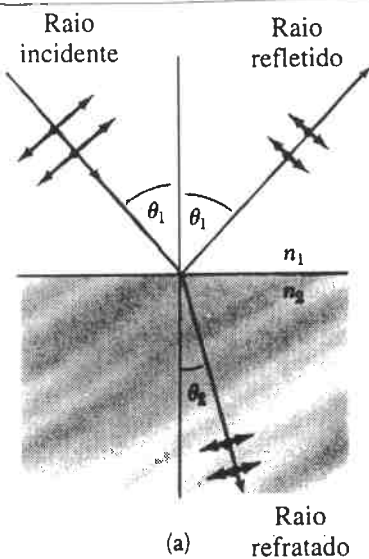


EIXO DE TRANSMISSÃO \parallel S



EIXO DE TRANSMISSÃO \perp S

b) POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO

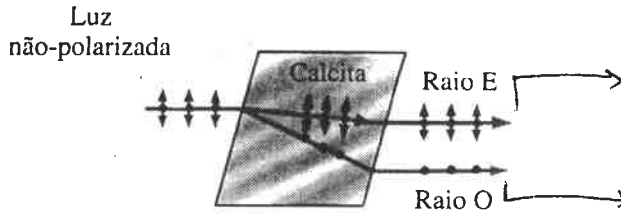


paralelo à superfície
(a) componente \parallel à superfície
se reflete + intensamente
parcialmente polarizada
(b) feixe refletido totalmente
polarizado

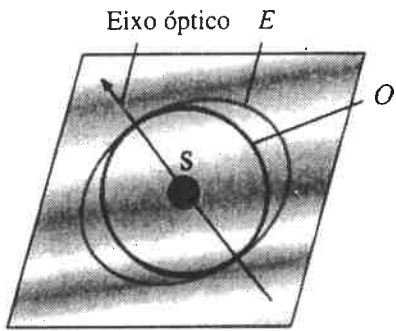
c) POLARIZAÇÃO POR DUPLA REFRAÇÃO

(4)

materiais birrefringentes



os dois raios estão polarizados em direções mutuamente perpendiculares

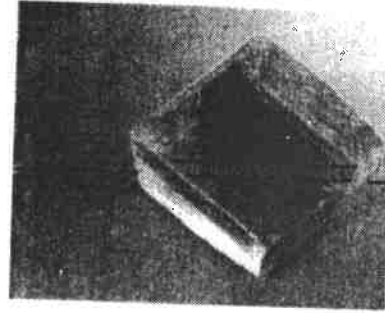


$$v_E = v_o$$

$$n_E = n_o$$

$$n_E \rightarrow v_E$$

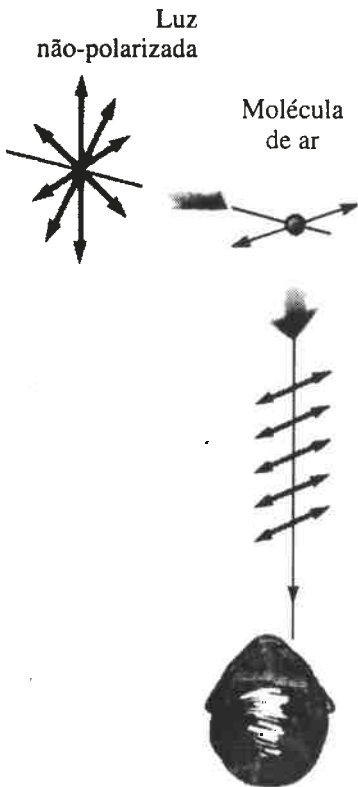
$$n_o \rightarrow v_o (=)$$



Propagação das ondas num cristal birrefringente

Imagem do ple num cristal de calcita

d) POLARIZAÇÃO POR ESPALHAMENTO



absorção e reemissão da luz pelo meio

Por que o céu é azul?

$$I \propto E^2 \propto \frac{1}{\lambda^2}$$

I maior para λ menor

- A partir destas *relações alternativas dos Coeficientes de Fresnel* fica fácil também mostrar (verifique!) que:

$$\begin{cases} r_{12} = -r_{21} \\ r_{12}^2 + t_{12}t_{21} = 1 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{(vamos precisar disto em uma} \\ \text{aula futura)} \end{array}$$

- Agora, um outro resultado interessante envolve a situação na qual *não há onda refletida paralelamente ao plano da incidência, ou seja, apenas a componente paralela à interface entre os dois meios é que subsiste após a reflexão.*

as duas componentes da onda



$$r_{12||} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_r}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_r}$$

- Para isto acontecer devemos ter $r_{12||} = 0 \Rightarrow n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_r = 0$

$$n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_r = 0$$

• Então: $n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_r = 0 \Rightarrow$ usando Snell: \Rightarrow

$$\Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_i} \Rightarrow \underbrace{\sin \theta_r \cos \theta_i}_{= 1/2 \sin(2\theta_i)} = \underbrace{\sin \theta_i \cos \theta_r}_{= 1/2 \sin(2\theta_r)}$$

• Então: $\sin 2\theta_i = \sin 2\theta_r \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta_i = \theta_r \rightarrow \text{(meios indistinguíveis, não há interface)} \\ 2\theta_i = 180^\circ - 2\theta_r \end{array} \right.$

mas

$$\sin(2\theta_i) = \sin(180^\circ - 2\theta_i)$$

• Assim: $\theta_i + \theta_r = \pi/2$

\equiv condição para que só haja componente de \vec{E} paralela à interface (\perp ao plano de incidência) na reflexão!

