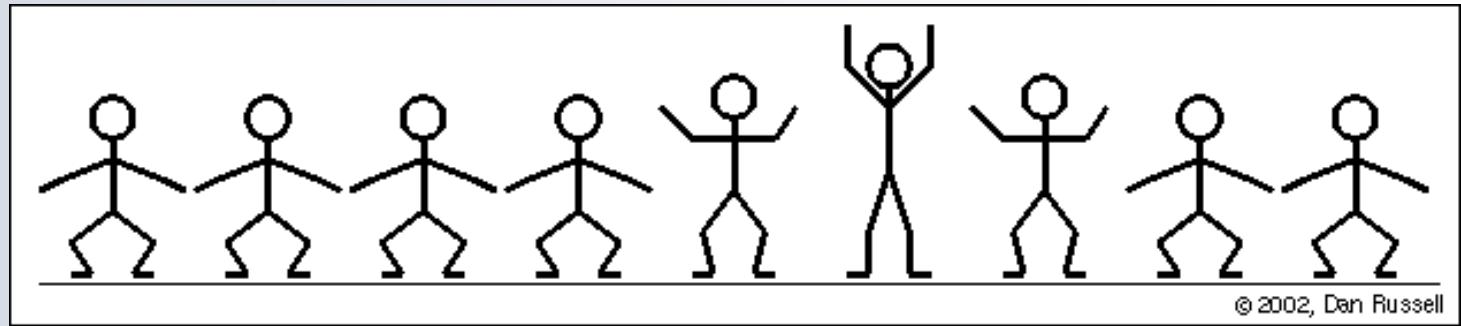
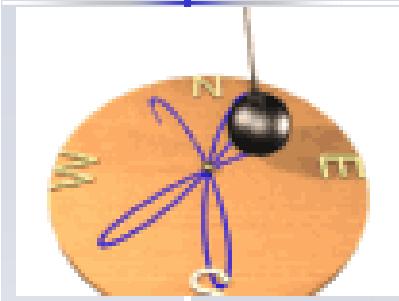




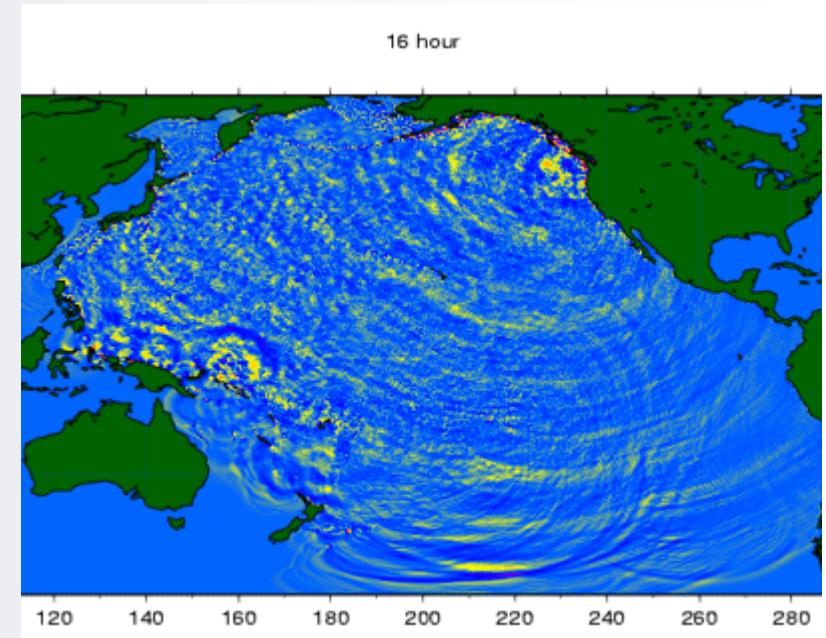
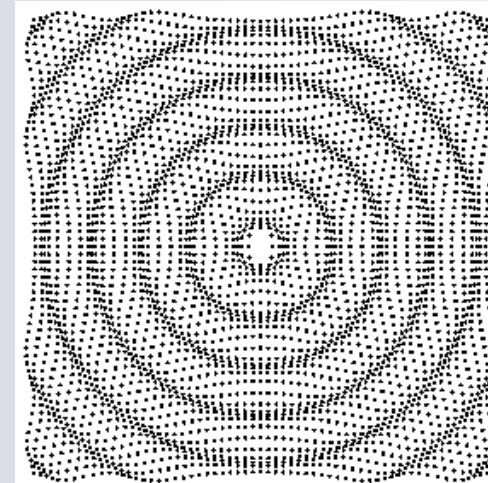
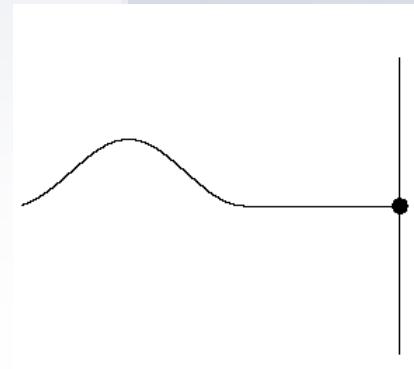
Tópicos de Física Moderna

LEI – 2011 / 2012 – 2º semestre

Teresa Viseu (regente)



© 2002, Dan Russell



Ondas – conceitos fundamentais

Física, Marcelo Alonso, Edward J. Finn, Escolar Editora (2012) capítulos 28, 29, 34 e 35

1. Ondas – conceitos fundamentais

O que é uma onda; ondas na natureza; tipos de ondas;

Equação diferencial de onda; onda sinusoidal; conceitos de amplitude, velocidade de propagação, comprimento de onda, período e frequência;

2. Radiação Eletromagnética

Teoria ondulatória da radiação eletromagnética

O Espetro Eletromagnético

Propagação da REM – reflexão e refração

Polarização

Propagação da REM – interferência e difração

Ondas – conceitos fundamentais

O mundo que nos rodeia está preenchido por ondas.

Onda – forma de transportar energia e momento de um ponto do espaço para outro, sem transporte de matéria. Para caracterizar uma onda, tem que se descrever matematicamente a forma como a perturbação que é gerada num dado ponto varia (se propaga) no espaço e no tempo – **equação de onda**.

Tipos de ondas:

Ondas Mecânicas ou Ondas Elásticas – a energia e momento são transportados mediante uma perturbação do meio elástico (ondas em cordas, ondas sonoras, ondas no mar) (dependem das propriedades elásticas do meio).

Ondas eletromagnéticas – a energia e o momento são transportados por oscilações dos campos elétricos e magnéticos associados a oscilações de cargas elétricas (oscilações dipolares) e podem-se propagar mesmo no vazio (luz, raios-X, micro-ondas, ondas de rádio, etc)

Ondas Transversais – a perturbação do meio (mov. oscilatório de cada partícula) é perpendicular à direção de propagação da onda (cordas, REM, mola)

3

Ondas Longitudinais – a perturbação do meio (mov. oscilatório de cada partícula) é paralela à direção de propagação da onda (som, mola)

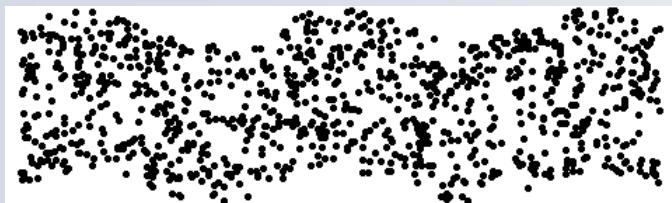
Ondas – conceitos fundamentais

Ondas Mecânicas ou Elásticas – precisam dum meio físico para se propagarem e obedecem às Leis de Newton (ondas sonoras, na água, sísmicas)

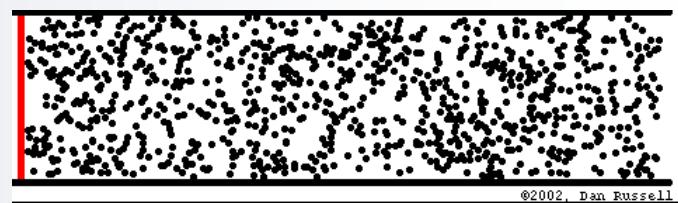
Ondas Eletromagnéticas – não precisam dum meio físico para se propagarem viajando no vácuo todas à mesma velocidade, $c \approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ (radiação eletromagnética, luz)

Ondas de Matéria – ondas associadas a partículas fundamentais, como os eletrões e os protões

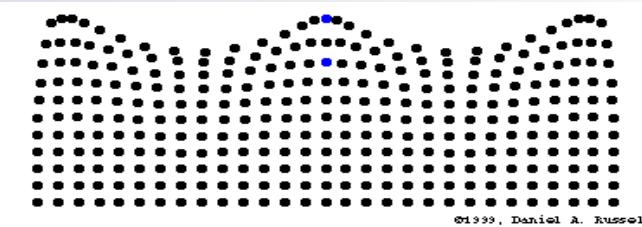
Onda Transversal



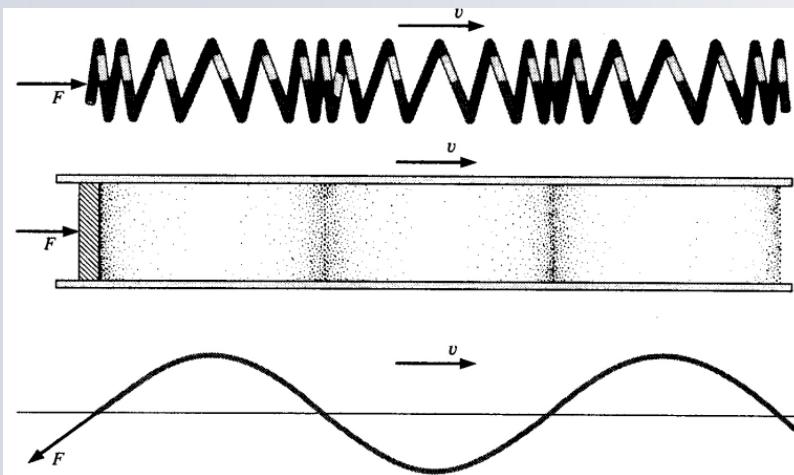
Onda Longitudinal



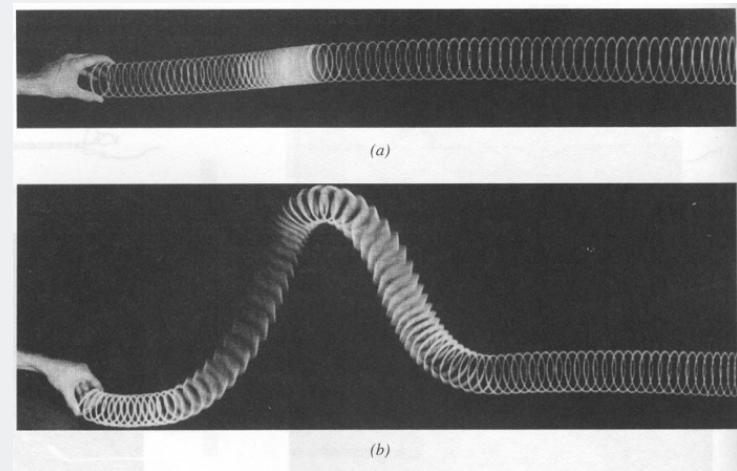
Onda Mista



Ondas – conceitos fundamentais



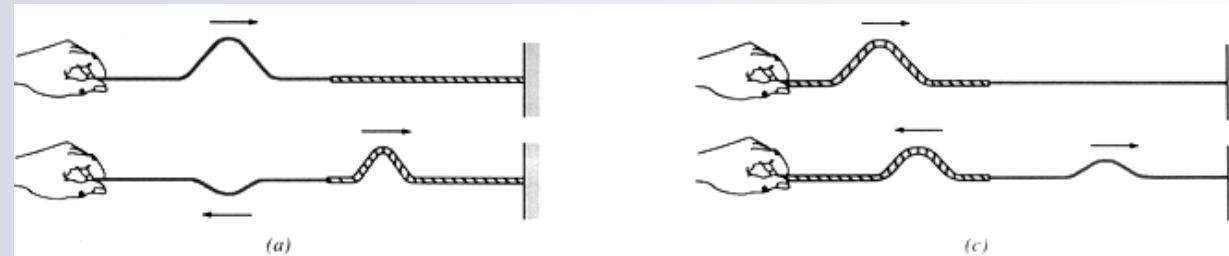
Ondas mecânicas longitudinais numa mola
e num gás e ondas transversais numa corda



Ondas mecânicas longitudinais
e transversais numa mola.

Ondas – conceitos fundamentais

A forma mais fácil de visualizar uma onda é numa corda. Vamos, numa onda numa corda visualizar algumas propriedades gerais das ondas (**reflexão e refração**) que nos serão úteis nas ondas eletromagnéticas.



Onda transversal numa corda a mover-se para a direita e a ser refletida e transmitida.

A intensidade de uma onda relaciona-se com a sua amplitude ($I \propto A^2$)

Quando uma onda encontra a superfície de separação de dois meios **parte é refletida e parte é transmitida**. A forma como a intensidade da onda incidente se reparte pelos dois meios depende dos materiais.

Na parte (a) da figura a componente transmitida é a mais importante porque o segundo meio é mais denso que o primeiro e a amplitude da componente refletida inverte o sinal.

- 6 Na parte (c) da figura vê-se que a componente transmitida é agora a menor porque o segundo meio é o menos denso e a amplitude da componente refletida não inverte o sinal.

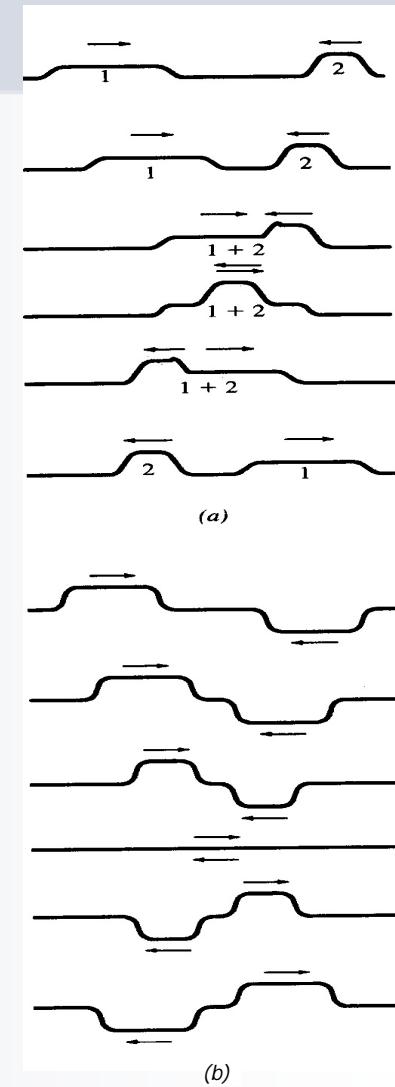
Ondas – conceitos fundamentais

Todos os tipos de ondas, para além de serem refletidas e transmitidas/refratadas, podem sofrer difração quando se intercalam obstáculos no seu caminho e podem interferir quando se sobrepõem no espaço e no tempo.

Na figura junta mostra-se o resultado da sobreposição de duas ondas que se deslocam, uma para a direita e a outra para a esquerda. Quando as ondas se cruzam, as perturbações, isto é os deslocamentos, “adicionam-se”.

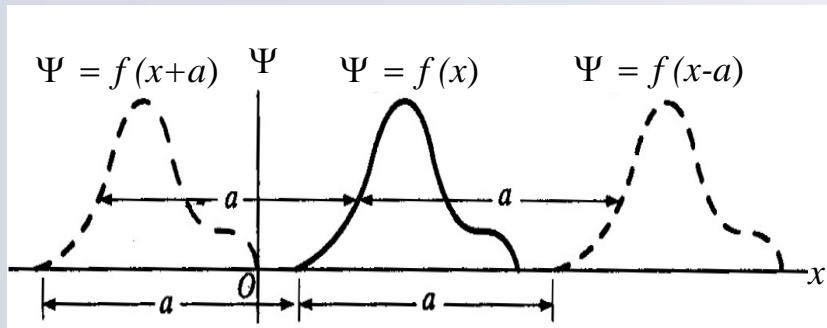
Ver o caso (b) em que, num dado instante, a perturbação “global” é nula, porque se estão a adicionar deslocamentos numericamente iguais mas simétricos.

Este princípio da sobreposição é uma propriedade de todos os tipos de ondas e não tem analogia no movimento de partículas. A interferência e a difração são assim a assinatura do caráter ondulatório.



Ondas – conceitos fundamentais

Na figura junta mostra-se uma função genérica $\Psi = f(x)$.



A forma da curva não varia se esta sofrer uma translação de a . Podemos representar a função a deslocar-se para a direita por $\Psi = f(x - a)$ e a deslocar-se para a esquerda por $\Psi = f(x + a)$.

Se a representar o deslocamento da curva, à velocidade v , no intervalo de tempo t ,

$$\Psi = f(x - vt)$$

e

$$\Psi = f(x + vt)$$

representam a função Ψ genérica a deslocar-se, respetivamente, para a direita e para a esquerda, com velocidade v .

A natureza da perturbação é irrelevante! Pode ser um deslocamento numa corda, numa mola ou numa haste, uma perturbação dos campos elétricos e magnéticos associados à radiação ou mesmo uma variação da probabilidade quântica associada a uma onda de matéria (mecânica quântica).

Ondas – conceitos fundamentais

Para situações simples, ondas numa corda, numa mola ou numa coluna de gás, é possível, a partir das leis de Newton da física clássica (forças), obter uma equação diferencial que relate a propagação da perturbação com as propriedades do meio em que ela se propaga.

Chega-se sempre a uma equação diferencial do tipo

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$$

que é a chamada **equação de onda diferencial**.

Alguns exemplos (ver deduções no Alonso & Finn)

1. Onda transversal numa corda: $v^2 = T/m$ (T é a tensão na corda e m a sua densidade linear ou massa por unidade de comprimento)
2. Ondas elásticas longitudinais numa mola: $v^2 = kL/m$ (k é a constante elástica da mola, L o comprimento da mola não deformada e m a sua densidade linear)
3. Ondas elásticas longitudinais num gás (som): $v^2 = k/r$ (k é o módulo volumétrico de elasticidade do gás, e r é a sua densidade)

Ondas – conceitos fundamentais

Considere-se uma situação genérica, em que a função periódica que se propaga seja do tipo $\Psi = f(x \pm vt)$. Derivando uma vez tem-se,

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial u} , \quad \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial u} (-v) \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -v \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

e derivando de novo,

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} , \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} (v^2) \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Mostrou-se assim que qualquer função genérica, periódica, em que o argumento seja uma função de $(x \pm vt)$ obedece à equação diferencial de uma onda.

A função periódica mais simples é a função sinusoidal.

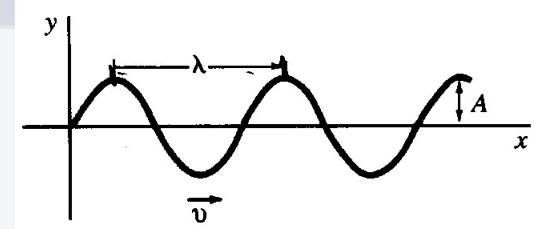
A função $\Psi(x, t) = \Psi_0 \operatorname{sen} k(x \pm vt)$ deve então descrever uma onda, que se diz harmónica.

Esta função é periódica no espaço e no tempo.

Ondas – conceitos fundamentais

$$\Psi(x, t) = \Psi_0 \operatorname{sen} k(x \pm vt)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$



Se se substituir x por $x+2\pi/k$, a função repete-se, ou seja $2\pi/k$ é o "período espacial" a que se chama **comprimento de onda**, $\lambda = 2\pi/k$. À constante positiva $k = 2\pi/\lambda$ chama-se **número de onda**.

O valor máximo da função é $\Psi_0 = A$ e a A chama-se **amplitude**.

Se se substituir t por $t+T$, sendo T o **período temporal**, a função deve-se manter inalterada, ou seja $k \nu T = 2\pi$, donde $T = \lambda/v$.

Ao **inverso do período** chama-se **frequência** $f = 1/T = v/\lambda$

Note-se que a **frequência** depende da fonte que gera a onda (frequência da oscilação numa corda, por exemplo) e não do meio onde ela se propaga, enquanto que a **velocidade e o c.d.o.** dependem do meio em que a onda se propaga.

Uma forma conveniente de escrever a função de onda é $\Psi(x, t) = A \operatorname{sen}(kx - wt)$ onde $w = 2\pi f$ é a **frequência angular**.

Ondas – conceitos fundamentais

Generalizando para a situação tridimensional, a **equação diferencial de uma onda em coordenadas cartesianas**, será:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Ou, escrita de uma forma mais compacta, usando o **operador Laplaciano em coordenadas cartesianas**, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Esta forma de escrever a equação de onda é adequada para as **ondas tridimensionais planas, mas não para as ondas cilíndricas ou esféricas**.

Nestes casos deve-se **escrever a equação de onda, respetivamente, em coordenadas cilíndricas e esféricas**.

Radiação Eletromagnética

Ao longo da História filósofos e cientistas têm tentado explicar o que é a luz.

Há três princípios básicos que foram ganhando consistência ao longo dos tempos e que foram sendo verificados experimentalmente por diversos meios:

A velocidade de propagação da luz é finita e depende do meio;

A luz propaga-se seguindo o caminho mais rápido;

A luz tem uma natureza ondulatória.

Os filósofos e cientistas Gregos (**Pitágoras, Demócrito, Platão, Aristóteles, Euclides, Hero**), (séculos III-I AC), desenvolveram muitas teorias sobre a natureza da luz, acreditando que a luz se propaga em linha recta e com uma velocidade muito grande, senão infinita.

(Hoje sabemos que a propagação rectilínea da luz não é rigorosamente verdadeira: quando a luz passa por pequenos obstáculos espalha-se em todas as direcções – **difração**; quando a luz passa por um campo gravitacional forte sofre **deflexão**). Mas, nas situações mais comuns, a propagação rectilínea defendida pelos filósofos gregos é uma boa aproximação e é a base de toda a **Ótica Geométrica**.)

Radiação Eletromagnética

Os filósofos e cientistas Gregos (**séculos III-I AC**), já “demonstravam” a lei da reflexão com base num princípio geral de que a luz se propaga seguindo o caminho mais curto entre dois pontos (**Heros de Alexandria**).

*(Este princípio veio a dar origem ao **princípio de Fermat** (1657!!!) – a luz segue o caminho mais rápido, o que permite demonstrar as **leis da Reflexão e da Refração**.)*

A lei da refração foi estudada experimentalmente por **Ptolomeu** (**séc. II**) que verificou que quando a luz passa de meio para outro a sua trajectória é tanto mais desviada quanto maior for a diferença de densidades entre os dois meios.

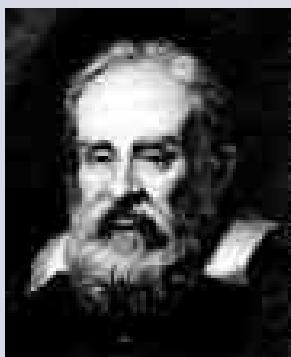
*(A relação quantitativa tal como a conhecemos hoje – **Lei de Snell** - só veio a ser estabelecida no século XVII com os trabalhos de **Galileu e Kepler**)*

Pouco se evoluiu sobre o conhecimento da natureza da luz, desde a antiguidade Grega até ao século XVII.

No século **XVII** nomes como **Galileu, Kepler, Descartes, Fermat, Newton, Snell, Hooke, Grimaldi, Huygens**, ficaram para sempre ligados à óptica.

Radiação Eletromagnética

Galileo (1564-1642)
Telescópio



Kepler (1571-1630)
Leis dos mov. dos planetas
Microscópio e telescópio



Huygens (1629-1695)
Índice de refração.
Interferência e difração



Newton (1643-1727)
Dispersão da luz
branca



Snell (1580-1626) e Decartes (1596-1650)
A lei da refração é conhecida por Lei de Snell nos países de influência britânica e por Lei de Decartes nos países de influência Francesa ($n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$)



Hooke (1635-1703)
Interferência e
Difração



Thomas Young (1773-1829)
Interferência

Radiação Eletromagnética

Só no início do século XIX são feitas experiências que indubitavelmente estabelecem a **natureza ondulatória da radiação** – **Thomas Young (1773-1829)** – Princípio da sobreposição e estudo dos fenómenos de interferência.

No início a radiação foi imaginada como uma onda longitudinal, por analogia com o som. É **Thomas Young** que propõe pela primeira vez, em 1817, que as ondas associadas à radiação têm um **carácter transversal**. A polarização aparece então associada à direcção da oscilação.

Fresnel (Francês, 1788-1827) – com base na teoria ondulatória estabelece as equações de Fresnel, que permitem conhecer como se reparte a intensidade da radiação, nas interfaces, entre os feixes refletido e refratado, em função dos índices de refracção dos dois meios e dos ângulos de incidência.

Fresnel apresenta também um tratamento matemático ondulatório para a polarização, considerando as ondas de radiação transversais (1821).

Radiação Eletromagnética

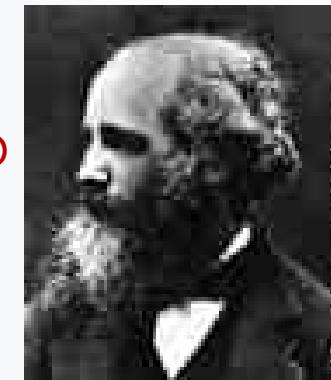
O estudo da eletricidade e do magnetismo estava a ser feito em paralelo com o estudo da ótica. Em meados do século XIX começa-se a ir no caminho da **unificação entre o eletromagnetismo e a ótica**.

Faraday (1791-1867) em 1851 propõe que **a origem de toda a radiação são oscilações de cargas eléctricas**.

Maxwell (1831-1879) estabelece um conjunto de equações formais que resumem todo o eletromagnetismo e que se podem também aplicar à radiação (**Equações de Maxwell**) mostrando assim que a radiação é uma onda eletromagnética.



Faraday
(1791-1867)



Maxwell
(1831-1879)

Radiação Eletromagnética

Maxwell provou que a luz se propaga como uma **onda associada aos campos elétrico e magnético** e assim **a ótica pode ser considerada um ramo do eletromagnetismo**.

No tempo de Maxwell (~1850) só se conhecia radiação visível, ultra-violeta e infra-vermelha. Por esta altura (1887) Hertz criou, manipulando cargas elétricas, um tipo de radiação, hoje conhecida por ondas de rádio, e mostrou que esta radiação se propagava no ar com a mesma velocidade da luz, c , validando assim as equações de Maxwell para toda a REM.

Origem da REM – associada a cargas elétricas em movimento não uniforme

Raios- γ , raios-X, ultra-violeta, visível – oscilações de cargas atómicas e nucleares;

Infra-vermelho e Micro-ondas – vibrações e rotações moleculares; (*os fornos micro-ondas funcionam a 2.45GHz ou 12.2cm*)

As equações de Maxwell provam que **a REM são ondas transversais**, oscilando sempre os campos elétrico e magnético perpendicularmente um ao outro e perpendicularmente à direção de propagação da onda. As duas componentes da onda não existem independentemente uma da outra, só existem associadas.

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k}$$

$$E = E_0 \operatorname{sen}(kx - wt)$$

$$\frac{E_0}{B_0} = c$$

$$\frac{E}{B} = c$$

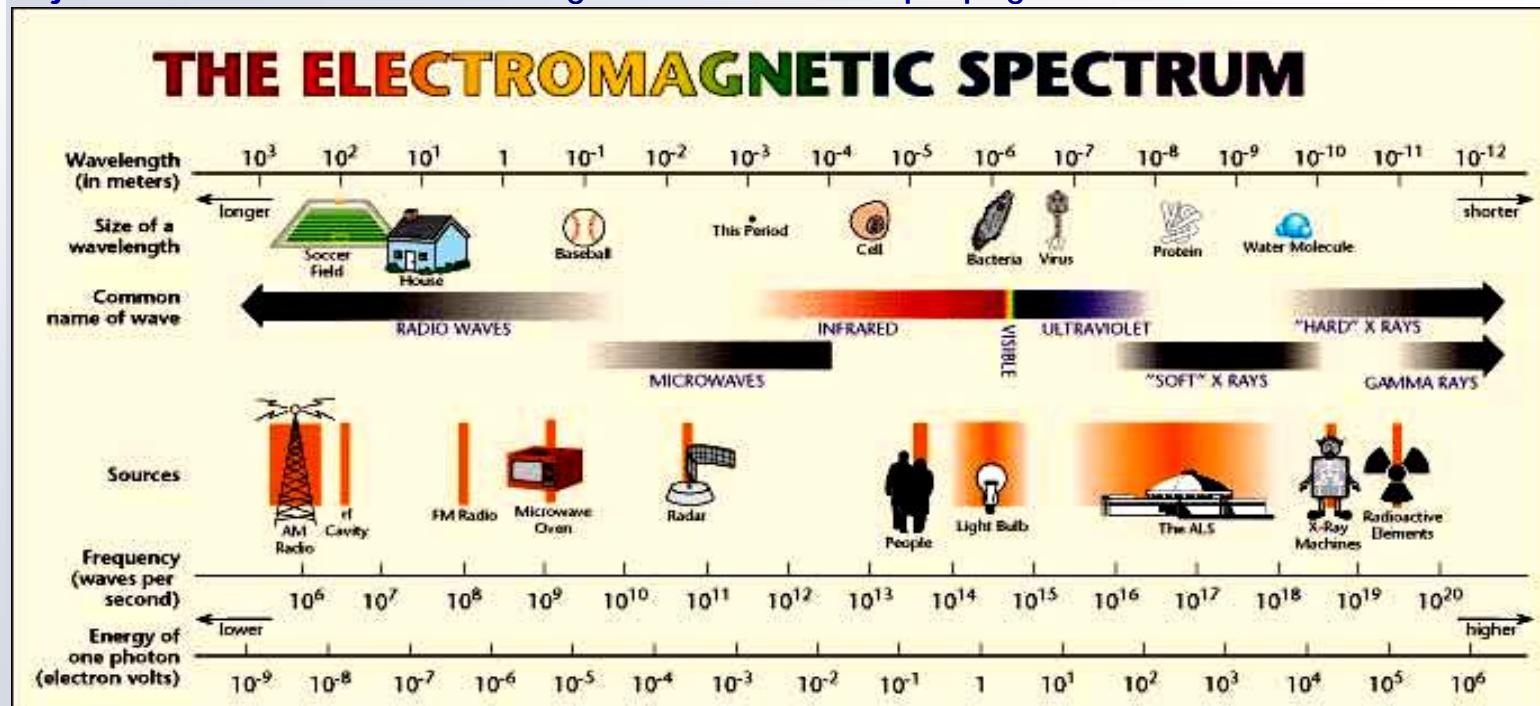
$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c$$

$$\vec{E} \times \vec{B} = \vec{k}$$

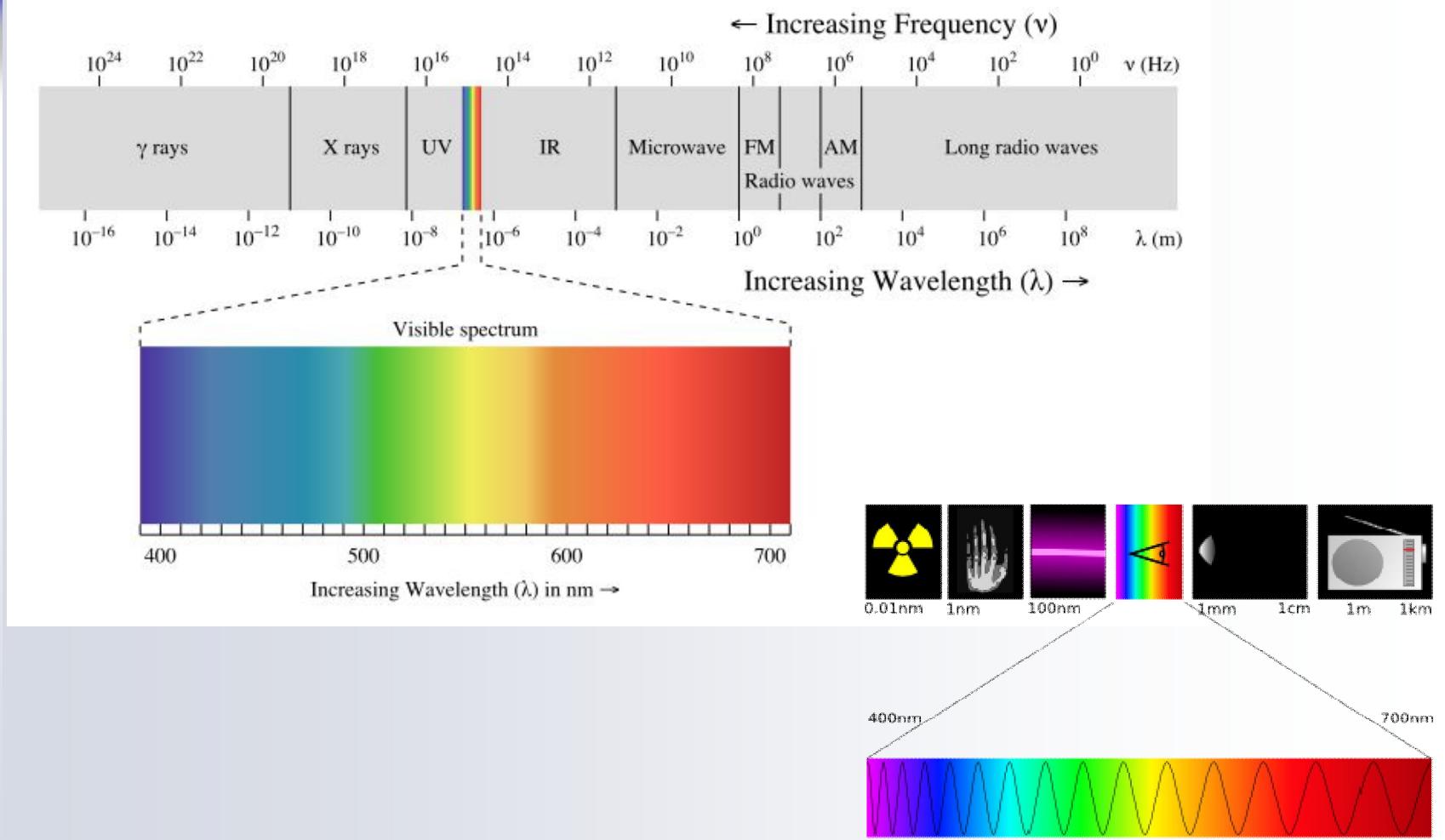
$$B = B_0 \operatorname{sen}(kx - wt)$$

Radiação Eletromagnética: O espetro eletromagnético

Desde que **Hertz** mostrou experimentalmente que se pode criar radiação manipulando campos elétricos e magnéticos (criando as chamadas **ondas rádio**) e que estas ondas têm todas as propriedades previstas pelas equações de Maxwell (propagam-se com velocidade c , sofrem reflexão, refração e polarização, interferem e são difratadas) que a **luz visível** passou a ser encarada apenas como um caso particular da REM (**espetro eletromagnético**) todo ele sujeito às mesmas leis eletromagnéticas e todo ele propagando-se no vácuo com velocidade c .

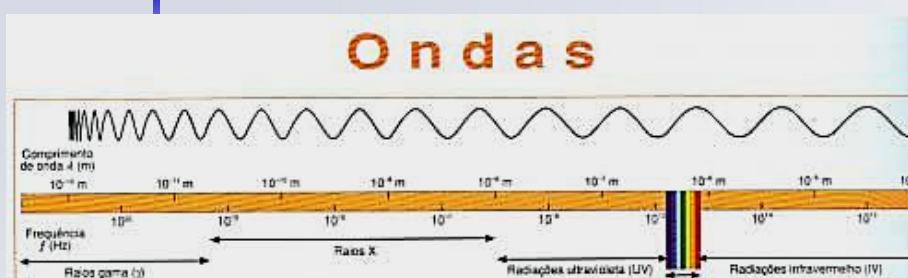
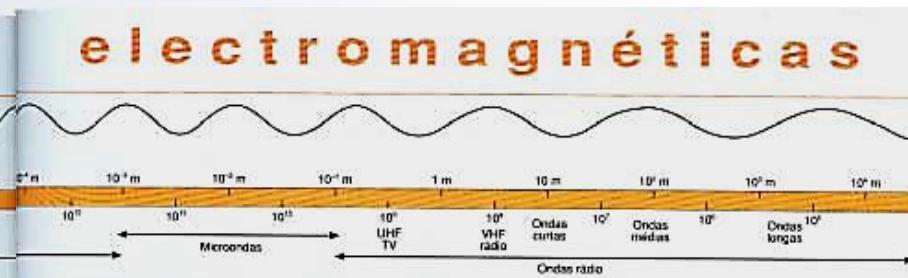


Radiação Eletromagnética: O espetro eletromagnético



Radiação Eletromagnética

Efeitos da REM sobre a matéria

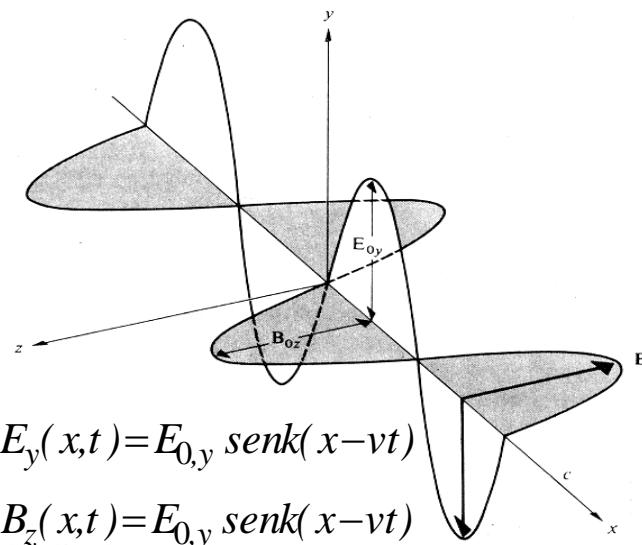
| Ondas eletromagnéticas | | | | | | | |
|---|--|--|--|---|--|--|--|
|  | | | |  | | | |
|  |  |  |  |  |  |  | |
| Raios gama (γ) | Raios X | Radiações UV | Luz visível | Radiações IV | Microondas | Ondas rádio | |
| <ul style="list-style-type: none">Estas radiações podem ser emitidas por algumas substâncias radioactivas como o rádio e o urânio. São muito penetrantes. Podem mesmo atravessar o betão ou o chumbo. Os raios γ são nocivos para todos os seres vivos. | <ul style="list-style-type: none">São radiações electromagnéticas emitidas pelas estrelas. Podem ser produzidas artificialmente na Terra. Foram descobertas em 1895 pelo físico alemão Roentgen. Deu-lhes o nome de raios X. Utilizam-se em medicina radiológica, para obtenção de fotografias do interior do nosso corpo. | <ul style="list-style-type: none">A principal fonte destas radiações é o Sol. A radiação UV de elevada frequência é nociva à vida na Terra. É absorvida pela camada de ozono existente na estratosfera. Por isso, é importante preservar esta camada. A radiação de baixa frequência é benéfica para o nosso planeta. É esta radiação que provoca o bronzeamento da pele. Estimula a produção de vitamina D. | <ul style="list-style-type: none">É emitida pelo Sol e pelas estrelas. As substâncias fluorescentes e as que ardem também emitem luz. A luz branca é uma mistura de várias cores. Diz-se policromática. O laser é uma radiação electromagnética visível. É um feixe de luz monocromático muito estreito, concentrando muita energia. | <ul style="list-style-type: none">São radiações emitidas por qualquer corpo a elevada temperatura. Estas radiações aplicam-se em fotografia. Há películas fotográficas sensíveis às radiações infravermelhos. É possível fotografar objectos na escuridão. Esta técnica designa-se por termografia. Usam-se, também, em medicina para diagnosticar doenças. | <ul style="list-style-type: none">São muito usadas nas telecomunicações via satélite e no radar. Um radar emite ondas. Um objecto que se encontre no trajecto destas ondas reflecte-as. O radar detecta as ondas reflectidas e indica a posição do objecto. Estas ondas aplicam-se, actualmente, nos fornos de microondas. São facilmente absorvidas pela água, que é um dos principais constituintes dos alimentos. Logo, a cozedura e o descongelamento são rápidos. | <ul style="list-style-type: none">Estas ondas são emitidas não só pelo Sol como, também, pelas estrelas. Detectam-se facilmente nos radiotelescópios, através de grandes parabólicas receptoras. No entanto, as ondas rádio usadas na transmissão de telefonia e televisão são produzidas artificialmente. Constituem-se antenas metálicas transmissoras. As ondas rádio têm designações diferentes conforme o seu comprimento de onda e frequência. Têm inúmeras aplicações. Como, por exemplo, na televisão, telemóveis, navegação aérea, controlo por rádio, comunicações barco-terra e aparelhos radiotónicos. | |

Radiação Eletromagnética

Efeitos da REM sobre a matéria

| Tipo de Radiação | Interacção com a matéria | Limites aproximados de c.d.o. |
|-------------------------|---|---|
| Raios γ | Transições nucleares | $\lambda < 1 \text{ \AA}$ |
| Raios -X | Transições electrónicas das camadas internas | $1 \text{ \AA} < \lambda < 10 \text{ \AA} (1 \text{ nm})$ |
| Ultravioleta de vácuo | Transições electrónicas da camada externa (electrões de valência) | $1 \text{ nm} < \lambda < 200 \text{ nm}$ |
| Ultravioleta próximo | | $200 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$ |
| Visível | | $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ |
| Infravermelho próximo | Vibrações moleculares | $800 \text{ nm} (0.8\mu\text{m}) < \lambda < 2.5 \mu\text{m}$ |
| Infravermelho médio | | $2.5 \mu\text{m} < \lambda < 25 \mu\text{m}$ |
| Infravermelho longínquo | Rotações moleculares | $25 \mu\text{m} < \lambda < 400 \mu\text{m}$ |
| Micro-ondas (radar) | | $400 \mu\text{m} < \lambda < 25 \text{ cm}$ |
| Ondas de rádio | Orientações de spin (RMN, ESR) | $\lambda > 25 \text{ cm}$ |

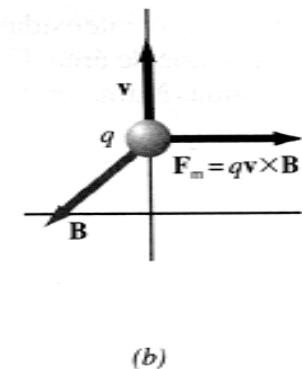
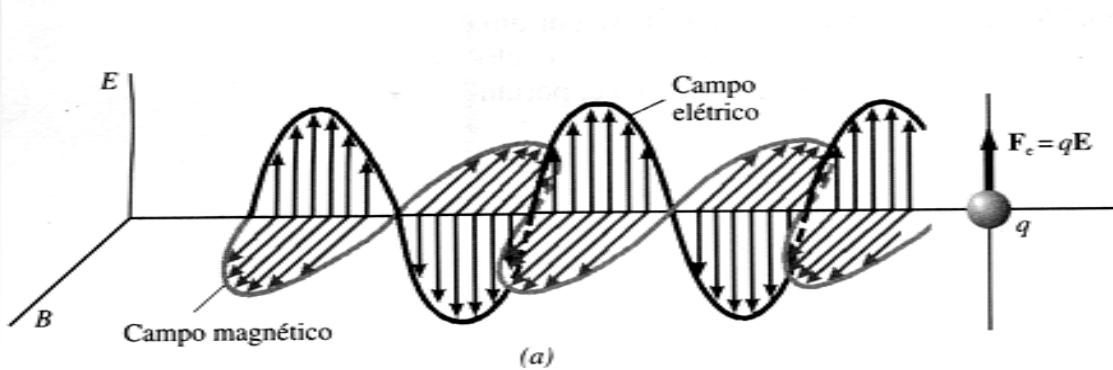
Radiação Eletromagnética



Visão simplista e simplificada de uma REM a propagar-se ao longo do eixo dos X através de oscilações sinusoidais, simultâneas e em fase, dos campos elétrico e magnético. Esta radiação está linearmente polarizada no eixo dos Y (direção da oscilação do campo elétrico) e pode-se representar por:

$$\vec{E}(x,t) = E_{0,y} \operatorname{sen} k(x-vt) \hat{j}$$

$$\vec{B}(x,t) = E_{0,y} \operatorname{sen} k(x-vt) \hat{k}$$



Radiação Eletromagnética

Já se afirmou (slide 6) que quando uma onda encontra a superfície de separação de dois meios **parte é refletida e parte é refratada** e que a forma como a intensidade da onda incidente se reparte pelos dois meios depende dos materiais.

No caso das ondas eletromagnéticas (OEM) a influência do material na forma como a onda se propaga relaciona-se com uma propriedade muito importante que é o **índice de refracção**, definido pela razão entre a velocidade de propagação da radiação no vazio e no interior de um dado material. Pela definição, **n é sempre maior que 1**.

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)}$$

Dependendo dos índices de refração dos dois meios e de como a radiação incide nos materiais (ângulo de incidência) é possível calcular como é que a intensidade luminosa se reparte pelos feixes refletido e refratado – isso é feito pelas **Equações de Fresnel**, que não vamos aqui deduzir.

Para a situação mais trivial em que o **ângulo de incidência é zero** (e portanto **os ângulos de reflexão e de transmissão também são zero**) as equações de Fresnel simplificam-se muito e permitem calcular facilmente como é que a intensidade do feixe incidente se reparte pelos feixes refletido e refratado.

Radiação Eletromagnética

Definindo então a reflectância R como a razão entre a intensidade refletida e a intensidade incidente e a transmitância T como a razão entre a intensidade transmitida e a intensidade incidente.

$$R = \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i}$$

$$T = \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i}$$

Apenas para a situação mais simples em que $\theta_i = 0$, as equações de Fresnel permitem obter

$$R = \frac{(n_t - n_i)^2}{(n_t + n_i)^2}, \quad T = \frac{4n_i n_t}{(n_t + n_i)^2}$$

Considerando o índice de refração dum vidro normal, $n = 1.5$, facilmente se percebe que a maior parte da intensidade luminosa que incide sobre uma lamela de vidro seja transmitida (cerca de 92%) sendo apenas cerca de 8% refletida (não esquecer que uma lamela de vidro tem duas interfaces iguais).

Também facilmente se percebe pelas relações apresentadas que, quanto maior for a diferença entre os índices de refração dos dois materiais que constituem a interface, maior é a fração de radiação que é refletida e portanto menor é a transmitância do material. Então um vidro será tanto mais “transparente” quanto menor for o seu índice de refração.

Radiação Eletromagnética

Já sabemos como se reparte a intensidade luminosa entre os feixes refletido e transmitido para a situação mais simples de incidência normal ($\theta_i = 0$):

Também já sabemos escrever a equação geral dumha onda eletromagnética linearmente polarizada e que se propaga ao longo de uma dada direção:

Se definirmos agora a intensidade luminosa ou irradiância ou potência por unidade de área [$\text{Nm}^{-1}\text{s}^{-1} \equiv \text{watt m}^{-2}$] para uma radiação a propagar-se no vazio, como

ficamos com uma forma de calcular a sua intensidade luminosa desde que se conheça a amplitude do seu campo elétrico e/ou magnético e os valores das constantes ϵ_0 e μ_0 (tabelas).

26

Atenção que se a radiação não se estiver a propagar no vazio é necessário tomar o meio em consideração alterando adequadamente os valores de c , ϵ_0 e μ_0 .

$$R = \frac{(n_t - n_i)^2}{(n_t + n_i)^2}, \quad T = \frac{4n_i n_t}{(n_t + n_i)^2}$$

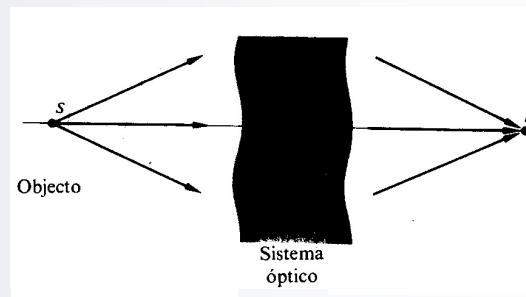
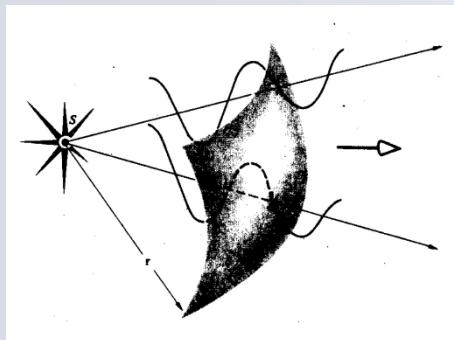
$$\vec{E}(x,t) = E_{0,y} \operatorname{sen} k(x - vt) \hat{j}$$
$$\vec{B}(x,t) = E_{0,y} \operatorname{sen} k(x - vt) \hat{k}$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{c^2 \epsilon_0}{2} E_0 B_0 = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2 = \frac{c}{2\mu_0} B_0^2$$

Radiação Eletromagnética

O conceito de **raio luminoso** é fundamental em ótica geométrica.

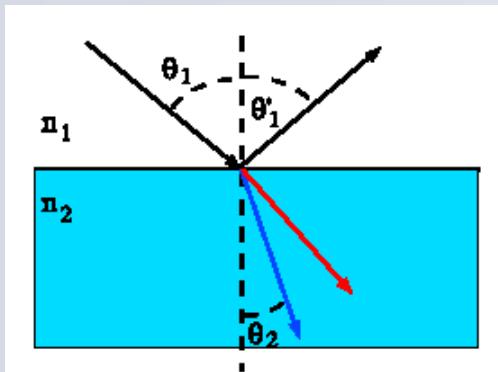
Considere-se uma fonte luminosa (S). A fonte emite ondas sinusoidais em todas as direções. As **frentes de onda** são superfícies que unem pontos em que a fase da perturbação ótica (da onda) é constante. **Os raios luminosos são perpendiculares às frentes de onda logo, os raios luminosos divergem a partir de uma fonte pontual.**



Os raios luminosos são reliníneos e após passarem por um **sistema óptico** (superfície refletora e refrat ora) convergem para um ponto (P). As leis da reflexão e da refração permitem perceber como se alteram as direções dos raios luminosos após passarem pelos sistemas ópticos.

Radiação Eletromagnética

O princípio de Fermat (**princípio do tempo mínimo**) permite deduzir as **leis da reflexão e da refração (Lei de Snell)**



Lei da Reflexão – ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão $\theta_1 = \theta'_1$

Lei da refração (Lei de Snell) – $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

Muita atenção à definição de ângulo de incidência, de reflexão e de refração.

O **índice de refração** já foi definido como a razão entre a velocidade de propagação da radiação no vazio e no interior de um dado material.

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)}$$

Verifica-se que a velocidade de propagação de uma dada radiação num dado meio é uma característica dessa radiação. Ou seja, radiação com c.d.o. diferente terá uma velocidade de propagação, no mesmo meio, diferente (decomposição da luz branca nas cores do arco-íris).

Radiação Eletromagnética

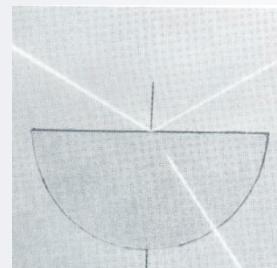
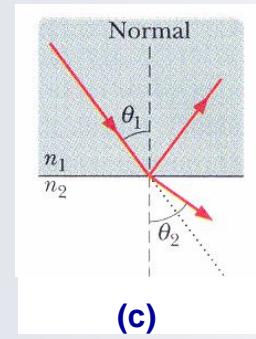
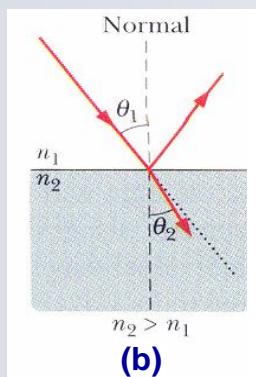
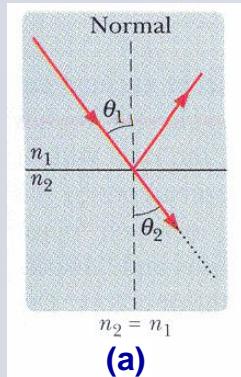
Relacionado com o princípio de Fermat, ou do tempo mínimo, pode-se definir um conceito muito importante em ótica – **percurso ótico, $\Delta = nd$** .

O tempo t que uma dada radiação demora a atravessar a distância d , é dado por

Como se vê $\Delta = nd$ e representa o espaço que a radiação percorreria, no mesmo tempo, se se propagasse à velocidade c .

$$t = \frac{d}{v} = \frac{nd}{c} = \frac{\Delta}{c}$$

Vamos analisar algumas situações decorrentes da Lei de Snell



A situação trivial é a de um raio que incide segundo a normal à superfície em que

$$\theta_i = \theta' = \theta_t = 0$$

Quando a radiação passa dum meio com n maior para outro com n inferior, o feixe refratado afasta-se da normal como se vê em (c).

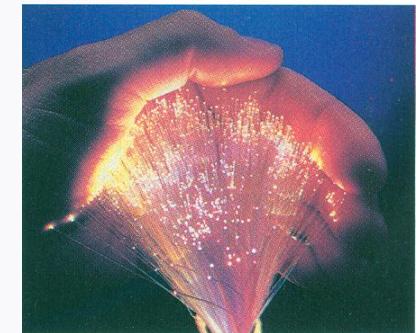
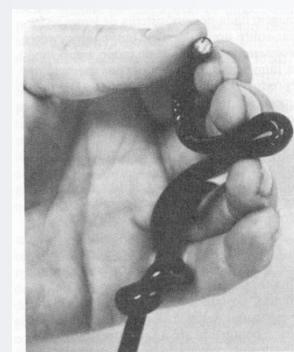
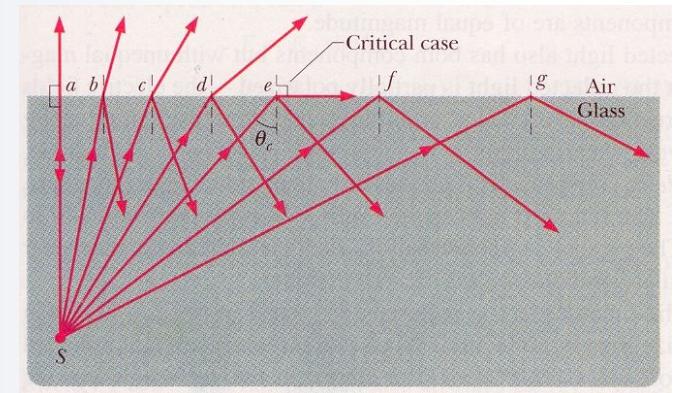
Radiação Eletromagnética

Então, para a situação em que a radiação passa dum meio com n maior para outro com n inferior, existe um valor para o ângulo de incidência, para o qual o feixe refratado faz um ângulo de 90° com a normal. A partir desse valor de ângulo de incidência, chamado **ângulo crítico**, deixa de existir feixe refratado. Dá-se a chamada **reflexão interna total (RIT)**

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad \theta_c = \sin^{-1} (n_2/n_1)$$

Por exemplo para uma interface vidro/ar, $\theta_c \sim 42^\circ$.

A RIT é o princípio geral de funcionamento das fibras óticas que têm inúmeras aplicações tecnológicas: medicina, transmissão de dados, comunicações. Permitem levar a luz entre dois pontos, mesmo às curvas, praticamente sem perdas.



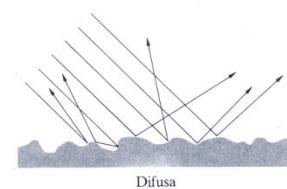
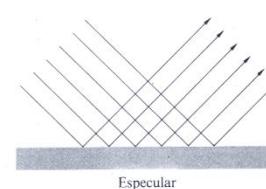
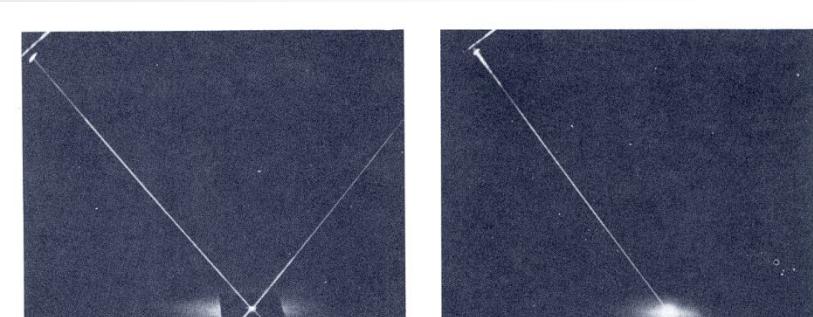
Radiação Eletromagnética

Reflexão Especular vs Reflexão Difusa – Pode parecer que a Lei da Reflexão contraria o nosso conhecimento experimental do dia-a-dia. Como se sabe, quando um feixe de luz incide numa folha de papel ou numa parede branca, ele é totalmente refletido (se a parede é branca não absorve nenhuma componente do espetro visível). No entanto a situação é completamente diferente da que se observa se o mesmo feixe incidir num espelho... e for também totalmente refletido. A principal diferença entre o papel ou a parede e o espelho está na superfície. **A superfície do espelho é lisa** (irregularidades superficiais muito inferiores ao c.d.o.) **e dá por isso origem à reflexão especular**, enquanto que **a superfície do papel ou da parede é rugosa e origina uma reflexão difusa**.

A nível local, microscópico, toda a reflexão verifica a lei $\theta_1 = \theta'$, mas a nível macroscópico a grande maioria dos materiais que nos rodeiam são total ou parcialmente difusores.

31

Quanto menos difusora for uma superfície, maior é o seu brilho.



Radiação Eletromagnética

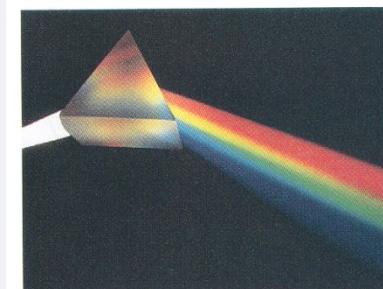
Como já se disse, o facto de n ser função de λ dá origem à **dispersão**. Uma das funções dos **prismas** é **dispersar a luz**.

Como se vê na figura a dispersão que ocorre na primeira interface é aumentada depois na segunda e consegue-se assim uma maior separação cromática.

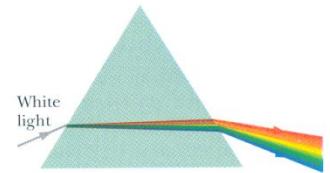
O mais belo exemplo de dispersão da luz na natureza é sem dúvida o **arco-íris**. Quando está a “chover e a fazer sol” alguma luz branca do Sol, intercetada por gotas de chuva, pode ser dispersa pelas gotas.

A luz sofre depois uma RIT dentro das gotas e é de novo refratada, saindo da gota e podendo chegar ao observador...

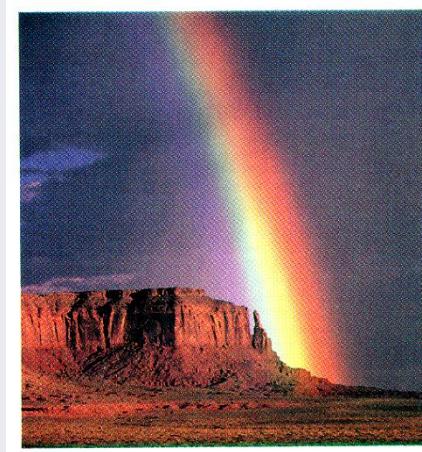
O ângulo entre a linha do Sol e o observador é de cerca de 42° .



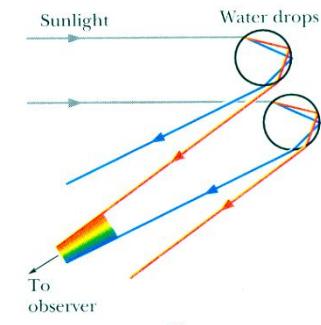
(a)



(b)



(a)



(b)

Radiação Eletromagnética: Polarização

Já se disse (slide 18) que as ondas eletromagnéticas são transversais e que os campos E e B estão sempre em fase.

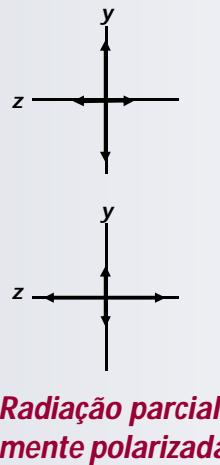
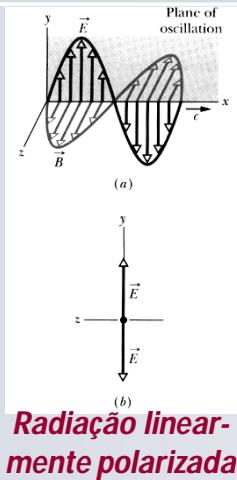
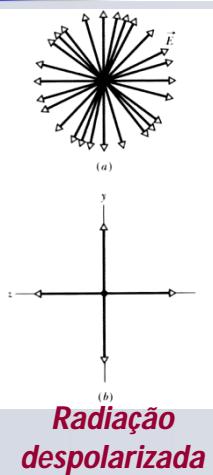
A polarização da radiação é a direção (ou o plano) de oscilação do seu vetor campo elétrico.

Diz-se que uma dada radiação é linearmente polarizada quando podemos identificar a direção de oscilação do seu campo elétrico. A direção de oscilação de E é a direção de polarização da radiação. Se a radiação for despolarizada (luz natural) todas as direções são igualmente prováveis.

Luz natural – uma fonte de luz vulgar é formada por milhões de emissores atómicos. Cada átomo emite radiação numa dada direção, durante cerca de 10^{-8} s, mas não há qualquer correlação entre esta direção e a direção de emissão dos outros milhões de átomos que emitem ao mesmo tempo ou nos instantes anteriores ou seguintes. Em estado estacionário, o resultado é a emissão de radiação não polarizada.

Na prática deparamo-nos muitas vezes com radiação parcialmente polarizada, que pode ser modelizada como resultando da sobreposição de uma fração (f) de radiação natural, despolarizada, com uma fração ($1-f$) de luz polarizada.

Radiação Eletromagnética: Polarização



Pode-se transformar radiação despolarizada em radiação polarizada por :

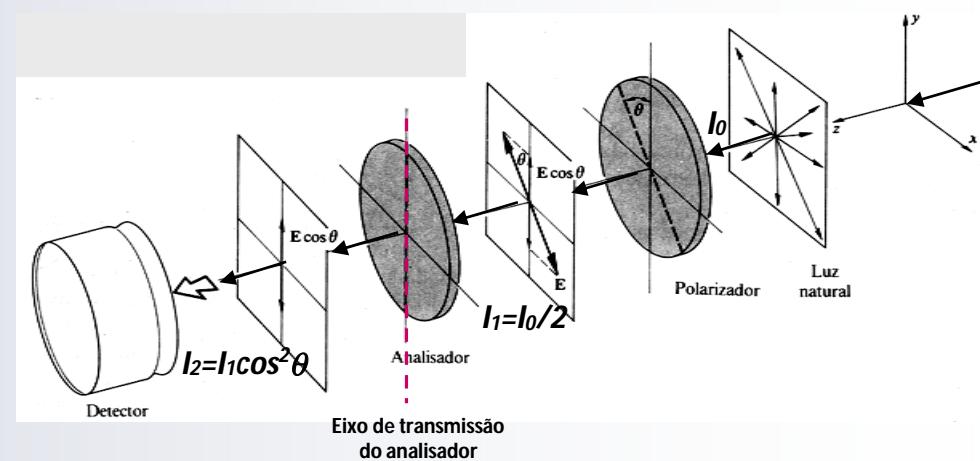
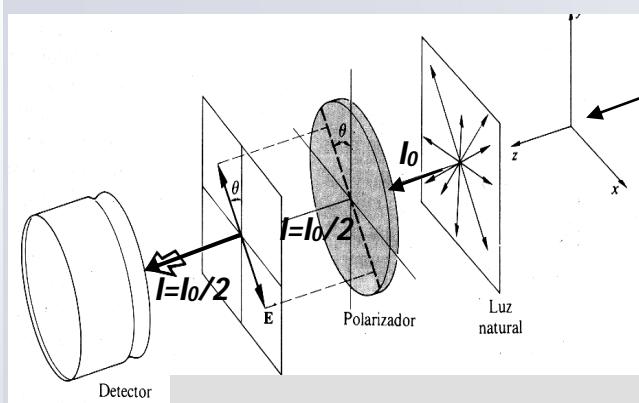
- 1 – Dicroismo ou absorção seletiva
- 2 – Reflexão
- 3 – “Scattering”, espalhamento ou difusão (nunca dispersão)
- 4 – Birrefringência ou dupla refração e atividade ótica.

Os polarizadores são dispositivos óticos que transformam radiação natural em radiação polarizada. Os polarizadores mais comuns para polarizar radiação visível são estruturas moleculares que formam fios paralelos. Estas estruturas são dícróicas isto é, absorvem a componente do campo elétrico paralela ao alinhamento molecular e deixam passar a componente do campo elétrico perpendicular ao alinhamento molecular. A direção que o polarizador transmite é a direção do seu eixo de transmissão.

ÓTICA ONDULATÓRIA

5. Polarização – Dicroismo

Radiação natural, não polarizada, de intensidade I_0 , a propagar-se ao longo do eixo dos z, incide sobre um polarizador. Rodando o polarizador em torno do eixo dos z, a intensidade da radiação detetada (por exemplo por uma célula fotoelétrica) não se altera com o ângulo de rotação do polarizador. Qualquer que seja a posição do polarizador a intensidade detetada será sempre $I = I_0/2$ (para radiação incidente não polarizada).



Se colocarmos à frente um segundo polarizador (analisador) e se os eixos de transmissão dos dois polarizadores fizerem entre si um ângulo θ , então será $I = I_0 \cos^2 \theta$, que traduz a **lei de Malus**. Se $\theta = 90^\circ$ diz-se que os polarizadores estão cruzados e a intensidade detetada é nula.

Radiação Eletromagnética: Polarização

Poder de alguma forma alterar, manipular, controlar o estado de polarização da REM tem muitas vantagens e muitas aplicações tecnológicas

Os LCDs estão em todo o lado e a radiação que observamos é polarizada

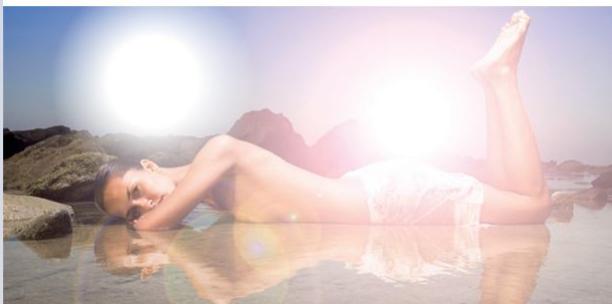


36



Radiação Eletromagnética: Polarização

GLARE-FREEVISION



GLARE-FREEVISION



WHAT IS POLARIZATION?

Daylight travels in waves oscillating in all directions of three-dimensional space. Polarized light also travels, but mostly moves in two dimensions: horizontally and vertically. Vertical light brings useful information to the human eye, enabling us to see colors and contrasts, while horizontal light simply creates optical noise or glare. Where light strikes a non-metallic surface such as water it often reflects primarily in a horizontal plane. This creates a high concentration of glare which can be selectively blocked only by a good quality polarizing filter.

Polarizing lenses selectively filter out the horizontal light, thus eliminating glare. Wearing Polaroid sunglasses means:

- Glare-free vision
- Enhanced contrasts
- 100% UV protection
- Significantly less eye-fatigue
- Outstanding color perception

37



As lentes (de óculos de Sol) polaroid (polarizadas) são muito comuns

Radiação Eletromagnética: Polarização



Filtro polarizador



O efeito dos polarizadores nas máquinas fotográficas é espetacular e por vezes inesperado. É um dos poucos efeitos que não pode ser “manipulado” no photoshop.

Radiação Eletromagnética: Interferência e Difração

Já se disse no slide 7 que todos os tipos de ondas, e não apenas a REM, para além de serem refletidas e refratadas, podem interferir quando se sobrepõem no espaço e no tempo e podem sofrer difração quando se intercalam obstáculos no seu caminho .

Os fenómenos de interferência e difração permitem assim distinguir o comportamento ondulatório do comportamento corpuscular. As partículas não interferem nem se difractam como o fazem as ondas.

A interferência e a difração embora sejam fenómenos diferentes aparecem muitas vezes associados.

- Interferência – combinação, por sobreposição (princípio de sobreposição de Young), de duas ou mais ondas que se encontram no espaço e no tempo.
- Difração – espalhamento, curvatura, das ondas em torno de obstáculos (note-se que obstáculo é entendido como um constrangimento à propagação da radiação cujo tamanho seja da ordem de grandeza do comprimento de onda dessa radiação). Para lá do obstáculo a radiação propaga-se como uma onda esférica secundária. Quando estas ondas secundárias se sobrepõem, podem, se as condições experimentais o permitirem, dar origem a padrões de interferência e/ou de difração estáveis.

Radiação Eletromagnética: Interferência e Difração

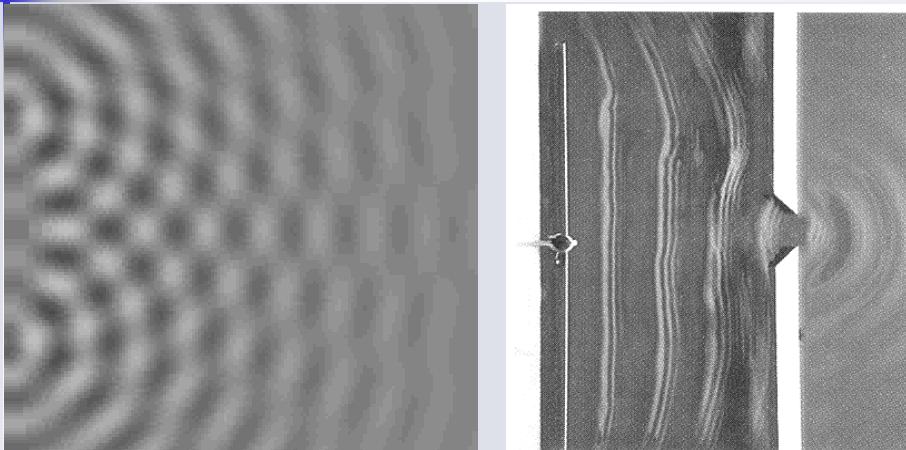
Existe **interferência** quando duas ou mais ondas se encontram no espaço e no tempo. Mas, para se observarem padrões de interferência estáveis, com máximos e mínimos, isto não basta; é ainda necessário que a radiação que interfere tenha **a mesma frequência**, seja monocromática e coerente.

Há dois processos práticos para obter interferências:

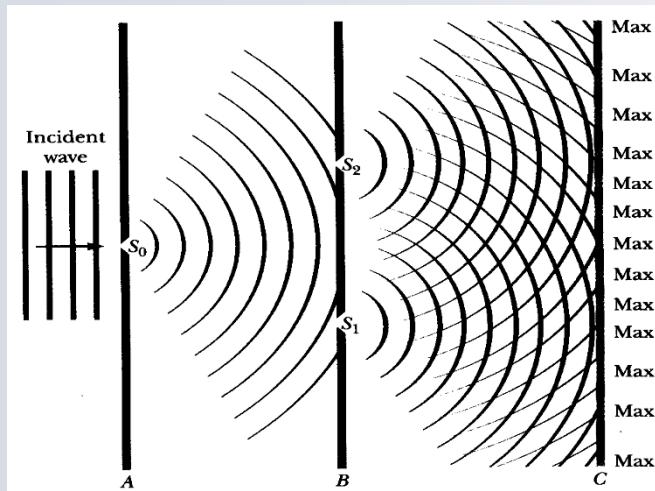
1 – Por divisão da frente de onda – a frente de onda é feita passar por obstáculos e é assim dividida em várias (duas ou mais) porções que são usadas como fontes de ondas secundárias, que depois irão interferir (**ex: orifícios circulares, fenda simples, dupla fenda, fendas múltiplas, redes de difração, etc**). **Este tipo de interferência está sempre associado à difração.**

2 – Por divisão de amplitude – a onda primária é dividida em segmentos (por reflexão e refração) que interferem quando se juntam de novo após percorrerem diferentes caminhos (**ex: Interferómetro de Michelson, filmes finos, Interferómetro de Fabry-Perot, etc**). **Este tipo de interferência não está associado à difração.**

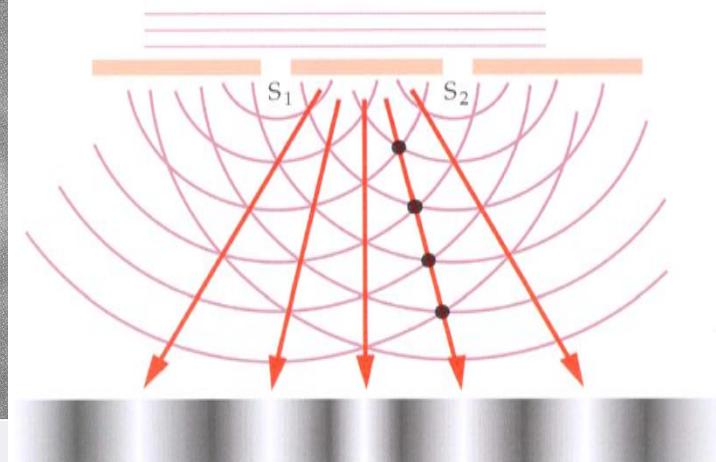
Radiação Eletromagnética: Interferência e Difração



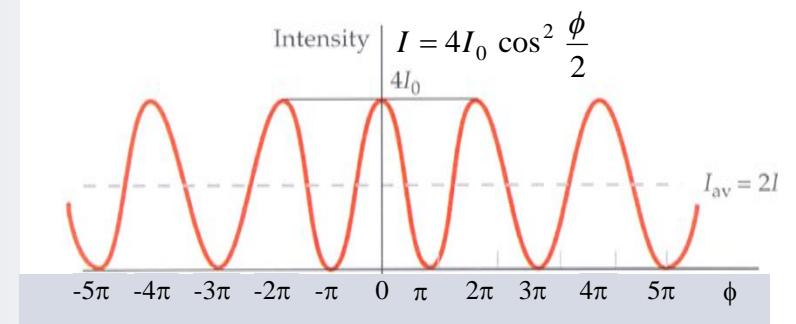
Interferência e difração numa tina de ondas



41

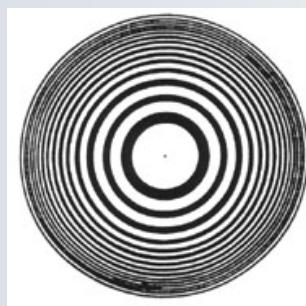
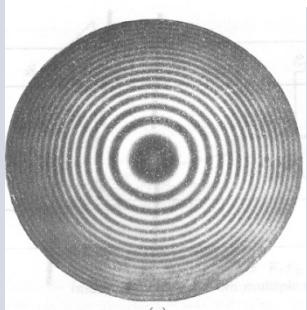


(a)

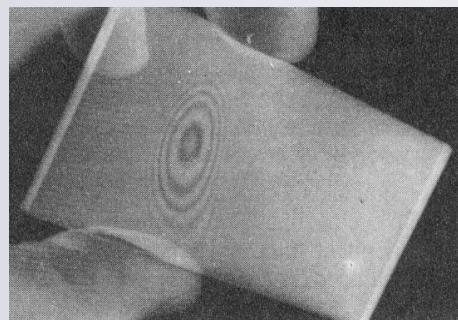
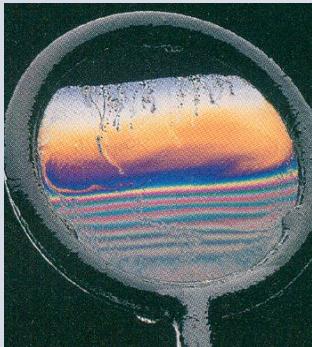


Interferência e difração numa dupla fenda

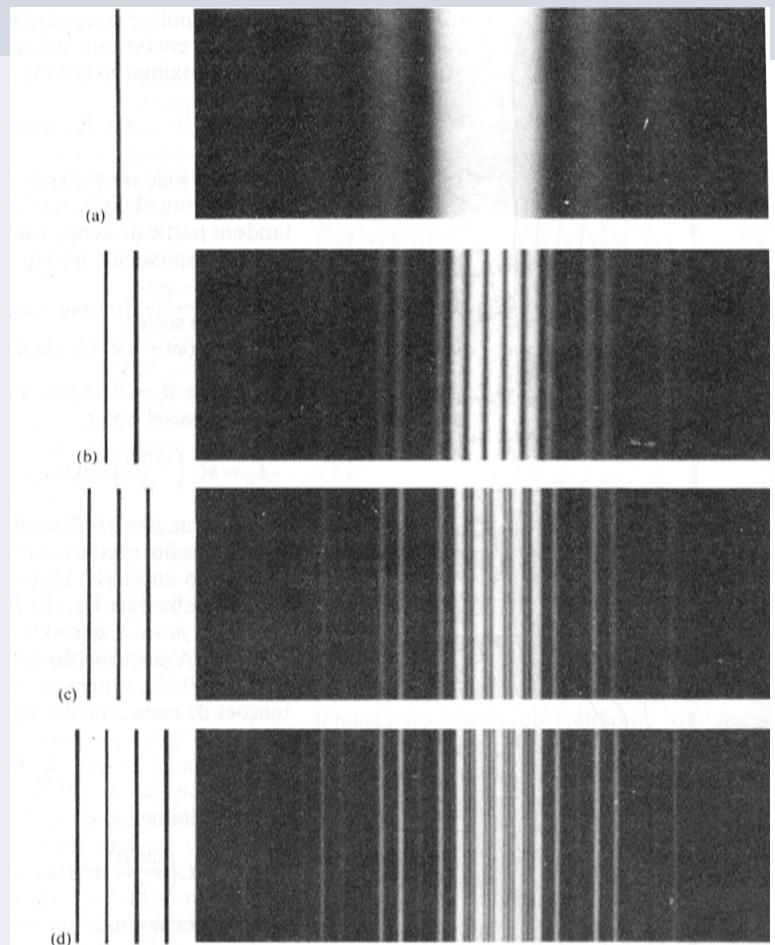
Radiação Eletromagnética: Interferência e Difração



Padrão de interferências típico obtido num Interferómetro de Michelson e num Fabry-Perot



Padrão de interferências típico observado numa bolinha de sabão e entre duas lamelas de microscópio.



Figuras de difração associadas a 1, 2, 3 e 4 fendas finas de largura a e espaçamento d.

Radiação Eletromagnética: Interferência e Difração

Qualquer que seja o processo que leva à criação dos padrões de interferência,

a condição de interferência construtiva é sempre

$$\Delta\phi = m 2\pi$$

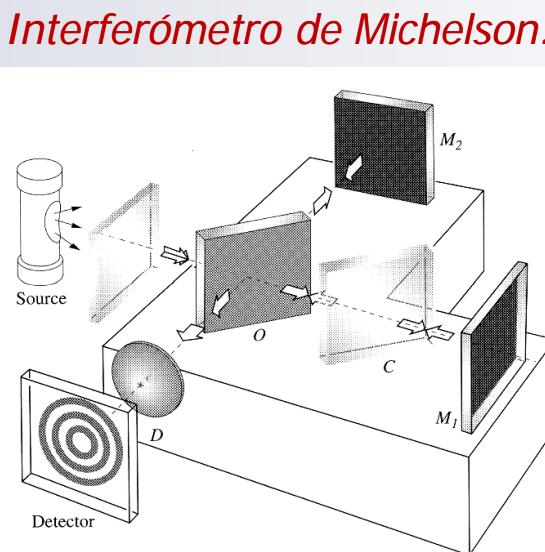
e a condição de interferência destrutiva é sempre

$$\Delta\phi = (m \pm \frac{1}{2}) 2\pi$$

A diferença de fase ($\Delta\phi$) entre os feixes de radiação que interferem resulta de diferenças no seu percurso ótico mas também, nos casos de interferência por divisão de amplitude (interferómetros e filmes finos), de diferenças de fase adicionais que podem existir associadas às reflexões.

Na interferência por divisão de frente de onda (fendas, redes de difração) a diferença de fase está apenas associada à diferença de percurso ótico (ΔPO) e é então $\Delta\phi = \Delta\text{PO} 2\pi/\lambda$.

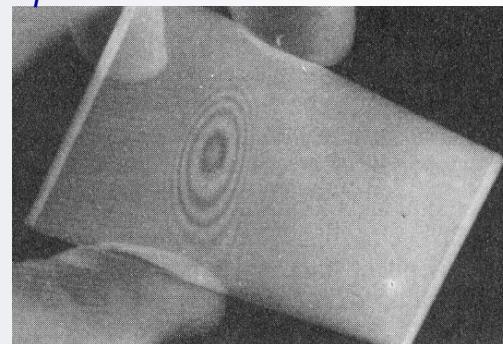
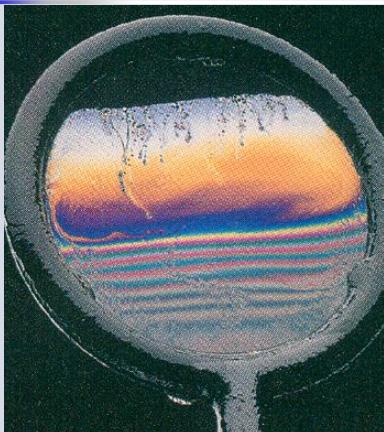
Radiação Eletromagnética: Interferência



Interferómetro de Michelson: Existe um divisor de feixe (O) onde a radiação incidente é dividida por reflexão/refração. Cada parte segue até aos espelhos M₁ e M₂ onde é refletida. Os dois segmentos passam de novo no divisor de feixe e chegam ao detetor onde se pode observar um padrão de interferência.

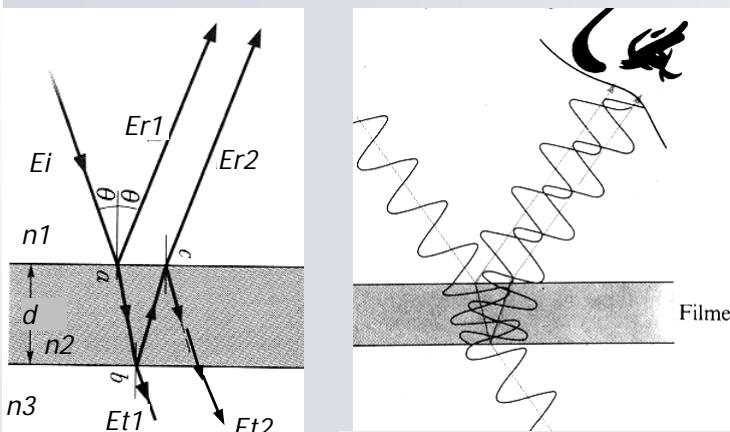
Se existir uma pequena diferença no percurso ótico da radiação pelos dois braços do interferómetro é possível ela ser detetada. Essa diferença pode resultar de os dois espelhos não estarem exatamente à mesma distância do divisor de feixe ou pode ser devida a ter-se intercalado uma película fina num dos braços do interferómetro. Neste caso é possível determinar a espessura desta película e/ou o seu índice de refração.

Radiação Eletromagnética: Interferência



Radiação Eletromagnética: Interferência

Quando **filmes finos**, como manchas de óleo na estrada ou bolinhas de sabão, são iluminados por luz branca, refletem, por vezes, uma variedade de cores. Todas essas cores têm origem em fenómenos de **interferência** e só são visualizáveis devido às **espessuras muito pequenas** dos filmes. Para serem observadas a espessura do filme deve ser da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz que incide sobre ele.



Pode-se mostrar que, se **n_1 e n_3 forem $< n_2$** , então

46

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_2 d + \pi$$

Diferença de fase
em luz refletida

Cada uma das interfaces do filme funciona como um divisor de amplitude: parte da amplitude da onda é refletida e parte é refratada.

Quer na radiação refletida quer na transmitida é possível observar um padrão de interferências e calcular a espessura e o índice de refração do filme.

A diferença de percurso ótico entre os dois primeiros feixes refletidos ou transmitidos, em incidência normal, é $\Delta\text{PO} = 2n_2 d$.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_2 d$$

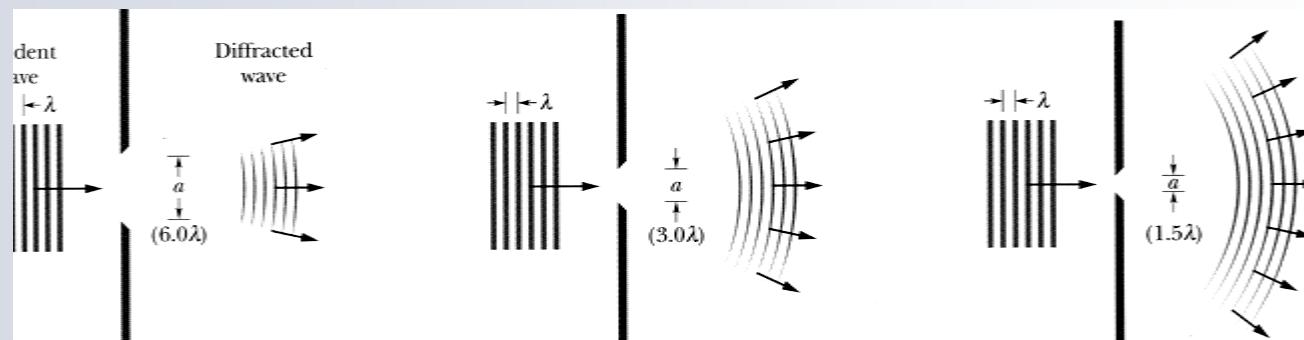
Diferença de fase
em luz transmitida

Radiação Eletromagnética: Difração

A difração está associada à interferência por divisão da frente de onda quando a radiação é obrigada a passar por obstáculos.

Na difração, um feixe incidente de raios paralelos, ao passar por um obstáculo de reduzidas dimensões, dá origem a uma onda secundária esférica. Há assim um espalhamento da radiação depois de passar pelo obstáculo. Esse espalhamento, pode dar origem a um padrão de interferência/difração, se as ondas secundárias interferirem, construtiva e destrutivamente sobre um alvo. Os padrões de difração só são observáveis quando a dimensão característica dos obstáculos, a , for da ordem de grandeza do c.d.o. da radiação incidente.

Quanto mais pequeno for o obstáculo relativamente ao comprimento de onda da radiação mais importante é a difração.

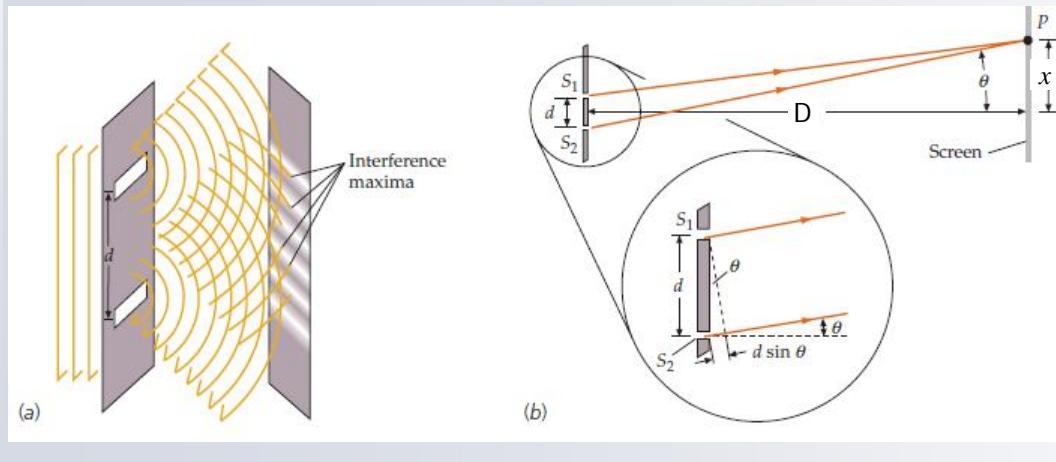


Radiação Eletromagnética: Difração

A experiência da dupla fenda de Young foi realizada em 1800 e é o exemplo mais simples de **interferência por divisão de frente de onda**. A radiação, ao passar pelas fendas (obstáculos) é difratada e interfere num alvo distante. Para se visualizar o padrão no alvo a radiação deve ser monocromática. Usa-se por isso, normalmente radiação proveniente de um **laser** ou de uma **lâmpada espectral**.

As diferenças de fase sobre os diversos pontos do alvo, que dão origem às interferências construtivas e destrutivas, resultam apenas de diferentes percursos óticos.

Se a diferença de percurso ótico for de um c.d.o. ou de um número inteiro de c.d.o., a interferência é construtiva e ter-se-à um máximo de intensidade no alvo.



Se a diferença de percurso ótico corresponder a um múltiplo semi-inteiro de c.d.o. a interferência é destrutiva e observa-se uma zona escura no alvo.

Radiação Eletromagnética: Difração

Se a distância (D) entre o alvo e a dupla fenda for suficientemente grande para que θ seja pequeno, e sendo d a separação entre as fendas, a diferença de percurso ótico será dada por

$$\Delta PO = d \sin \theta \approx d \frac{x}{D}$$

e a diferença de fase correspondente será

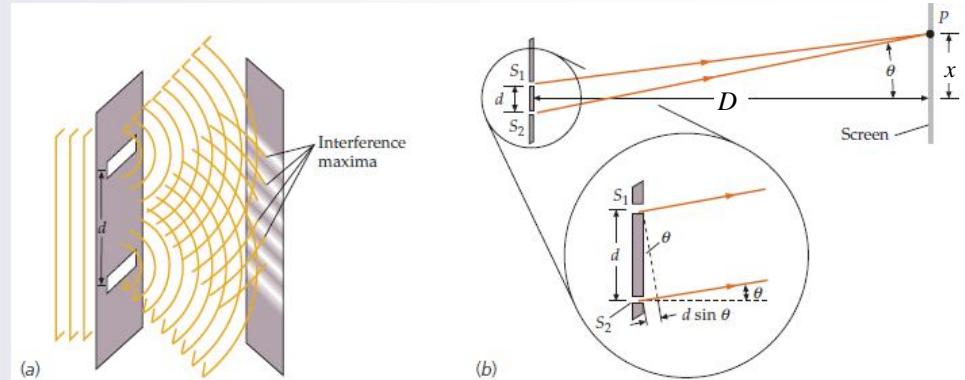
$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{xd}{D}$$

Igualando a diferença de fase à condição de interferência construtiva obtém-se

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{xd}{D} = m 2\pi$$

ou

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

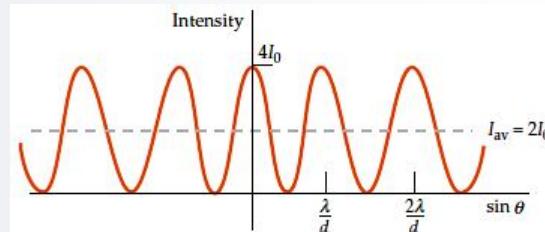


Vê-se assim que a separação entre dois pontos brilhantes no alvo é

$$\Delta x = \frac{\lambda D}{d}$$

A intensidade no alvo pode ser calculada por

$$\frac{I_\theta}{I_{max}} = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right) \approx \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \frac{x}{D}\right)$$



Radiação Eletromagnética: Difração

Em vez da **dupla fenda** podemos ter uma **fenda simples**, **fendas múltiplas**, **orifícios circulares** ou de outras formas. Desde que funcionem como “obstáculos” para a radiação e desde que a radiação incidente seja suficientemente monocromática, continuam a poder observar-se padrões estáveis num alvo.

Um elemento dispersivo muito importante são as **redes de difração**. Dá-se o nome de **rede de difração** a um sistema ótico formado por um grande número de fendas separadas entre si de uma distância d , em que $d \approx \lambda$.

Numa **rede de difração** continuam a poder localizar-se os máximos de interferência de acordo com a relação
$$d \operatorname{sen} \theta = m \lambda$$
 também chamada **equação das redes de difração**.

As **redes de difração** são muito úteis em **espetroscopia** já que permitem separar radiação **policromática** nos seus diversos c.d.o.

Radiação Eletromagnética: Difração

Uma **rede de difração** muito particular é aquela em que os elementos repetitivos são os átomos de um cristal, ordenados segundo regras bem definidas e com **distâncias interatómicas**, **d**, características (rede cristalina) e da ordem do Å.

Para esta situação verifica-se que a condição de interferência construtiva é a conhecida Lei de Bragg (*) $2d \operatorname{sen} \theta = m \lambda$ sendo ***d*** a distância entre planos cristalográficos, ***θ*** o ângulo de incidência que se pode variar e ***λ*** o c.d.o. da radiação incidente.

Neste tipo de rede de difração têm de se usar ***λ*** muito pequenos, da ordem de grandeza das **distâncias interatómicas**, isto é, radiação da gama dos **raios-X**.

Na **difração de raios-X** usam-se habitualmente raios-X de c.d.o. bem conhecido e depois, analisando a posição das riscas (espetro de difração) estudam-se as distâncias interatómicas em cristais (**cristalografia**).

(*) Numa rede cristalina os átomos formam como que um padrão que se repete no espaço. Em 1912 Bragg percebeu que, se os átomos formam planos paralelos, então um feixe de radiação monocromática de c.d.o. adequado (na gama dos raios-X), pode ser refletido nesses planos e dar origem a interferências construtivas para determinados ângulos, duma forma semelhante às interferências nos filmes finos.