

ÓPTICA

3.1

Aula 3

Na última aula já definimos o índice de refração n :

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

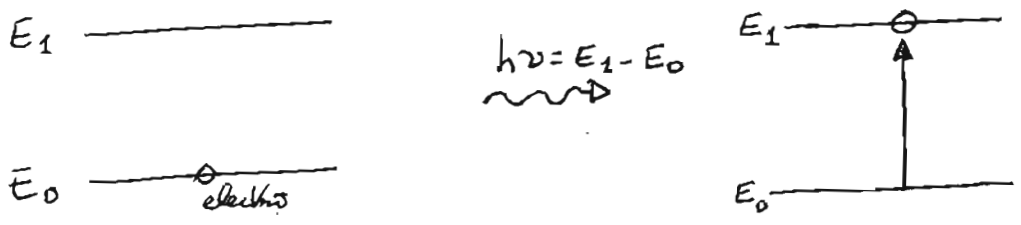
e já referimos que n depende normalmente da frequência, um efeito que dá origem ao fenômeno da dispersão das cores.

De recordar ainda que $n \geq 1$ (para qualquer meio), e que para o ar $n \approx 1,0003 \approx 1$.

Mas porquê é que existe essa dependência, e porquê é que a velocidade da luz não é sempre a mesma, independentemente do meio onde a luz se desloca?

Porque a luz interage com o meio! E para estudar essas interações temos que considerar dois casos.

1º Se a radiação tiver uma energia que corresponda à diferença de energia entre dois níveis de energia de um dado elétron que circunda um átomo, pode ocorrer a absorção:



Essa energia que o átomo (elétron) absorve pode em seguida ser re-emetida, ou pode ser "perdida" de outra forma, por exemplo através do aumento das vibrações do átomo ("dissipação térmica"), sem que um fóton seja re-emetido.

(A re-emissão de fótons por átomos excitados pode ser espontânea ou estimulada, mais tarde voltaremos a falar deste aspecto, quando falarmos de lasers).

2º Por outro lado, quando ~~um~~ ^{um meio} interage com radiação com uma energia diferente da dos seus níveis de energia, a absorção não ocorre; Podem se ocorrer fenômenos ditos de difusão não ressonante.

(Não ressonante porque a frequência da radiação não corresponde à frequência de vibração (absorção) dos átomos).

③

Neste 2º caso, o átomo permanece no estado fundamental, mas pela interação entre os seus elétrons e o campo e.m. da onda a sua "nuvem" de elétrons vai começar a pulsar (a vibrar), formando assim um dipolo em relação ao núcleo do átomo.

Como já vimos na última aula, um dipolo ~~é~~ a oscilar é o principal método de geração de ondas e.m., que mantém a mesma frequência da onda que provocou a excitação.

Estes processos de excitação e re-emitão podem ocorrer muito rapidamente (10^{-8} s) pelo que em termos "clássicos" podemos pensar que os átomos que são "atingidos" por ondas e.m. estão continuamente a re-emitir essas mesmas ondas.

De notar que ~~as~~ essas ondas são emitidas com direções aleatórias, pelo que em média podemos pensar que ~~as~~ os átomos se comportam como se emitissem ondas esféricas.

Em princípio, quanto mais próxima da frequência de ressonância for a frequência da radiação, maior será este efeito.

Vejamos agora a dispersão da γ radiação com mais formalismo.

- Dispersão

Como sabemos existem moléculas que possuem um momento dipolar permanente, as moléculas polares, e outras que não possuem.

No entanto, na presença de um campo externo, a deformação da distribuição dos elétrons resulta na criação de um momento dipolar. (No caso das moléculas polares elas têm tendência a alinhar-se com esse campo).

Em qualquer dos casos, resulta para o meio um certo momento dipolar, que expresso por unidade de volume é nada mais nada menos que a Polarização (elétrica)

$$\vec{P} = \frac{\vec{P}_{total}}{Volume}$$

Para a maior parte dos materiais $\vec{P} \parallel \vec{E}$, e podemos escrever:

$$\left. \begin{aligned} D &= \epsilon_0 E + P \\ D &= \epsilon E \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow (\epsilon - \epsilon_0) E = P$$

EH. 3,25

Veja-se o exemplo de um átomo com uma nuvem de elétrons e seu núcleo. Admitindo que a nuvem de elétrons vai oscilar (devido à presença do campo elétrico), com pequenas oscilações, temos um sistema que é semelhante a um oscilador harmônico forçado.

A diferença para um O.H. simples é que agora temos sempre uma força a atuar no dipolo:

$$F = q_e \cdot E(t)$$

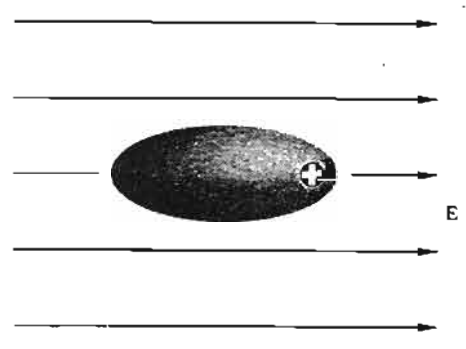
$$= q_e \cdot E_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Assim a equação do oscilador harmônico simples:

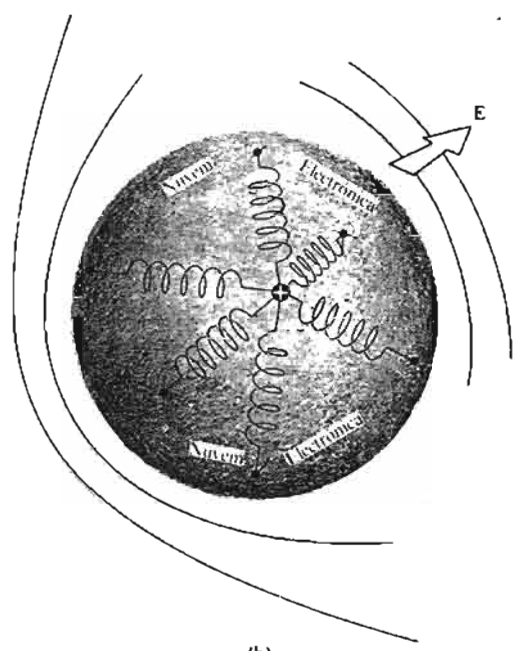
$$-m\omega_0^2 x = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

é alterada da para:

$$\underbrace{q E \cos(\omega t)}_{\text{devido à força}} - m\omega_0^2 x = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$



(a)



(b)

Figura 3.25(a) Distorção da nuvem electrónica provocada por um campo eléctrico E aplicado. (b) Modelo mecânico de um oscilador para um meio isotrópico — todas as molas são iguais e o oscilador pode vibrar igualmente em todas as direcções.

em que m é a massa do electrão e q a carga do electrão. ⑥

ω_0 é a frequência natural de oscilação (do sistema não forçado).

Naturalmente esta frequência depende das características do átomo (ou molécula), (tal como no exemplo do mola k depende de mola para mola).

Procurando soluções do tipo $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$

obtemos:

$$x(t) = \frac{q/m}{(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 \cos(\omega t)$$

$$= \frac{q/m}{\omega_0^2 - \omega^2} E(t)$$

O momento dipolar é o produto da carga \times deslocamento.

$$\vec{p} = q \cdot x(t)$$

Considerando que temos, por unidade de volume, N electrões:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}}{V} = Nq x(t)$$

$$\vec{P} = \frac{q^2 N/m}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \vec{E}$$

de $(\epsilon - \epsilon_0) \vec{E} = \vec{P}$ temos que:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{P}{E} = \epsilon_0 + \frac{q^2 N/m}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Como $n^2 = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right)$$

Esta expressão mostra porque é que n depende da frequência, a parte é que diferentes meios têm diferentes n (porque ω_0 serão diferentes).

De referir no entanto que a expressão anterior está errada, ou melhor, está incompleta, porque não tem em conta diversos aspectos, por exemplo:

- Cada molécula/elétron pode ter uma frequência de oscilação ω_{0j} distinta, existindo uma probabilidade f_j de ela ocorrer: ~~este~~

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m} \sum_j \left(\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \right)$$

O resultado anterior tb pode ser obtido através ⑧
da mecânica quântica, mas nesse caso devemos considerar
 ω_{0j} como sendo as frequências às quais o átomo/molécula
absorve/emite radiação. (f_j representa a probabilidade
de cada uma dessas transições atômicas, que pode ser todas
do mesmo átomo/molécula).

— Além disso na expressão da folha anterior não está
incluído nenhum termo de amortecimento da vibração. Por
exemplo se o átomo absorve a radiação e a liberta na forma
de calor, é necessário descrever essa perda de energia de
alguma forma. Sem justificar, poder escrever:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m} \sum_j \left(\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\gamma_j \omega} \right)$$

em que $i = \sqrt{-1}$ e γ_j corresponde a essas perdas.

— Finalmente o facto de termos um meio composto por muitos
átomos, na proximidade uns dos outros, faz com que
uns influenciem os outros, e que eles "sinkem" no campo
 $P(t)/3\epsilon_0$ que altera a resposta para:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N \epsilon_f^2}{3 \epsilon_0 m} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}$$

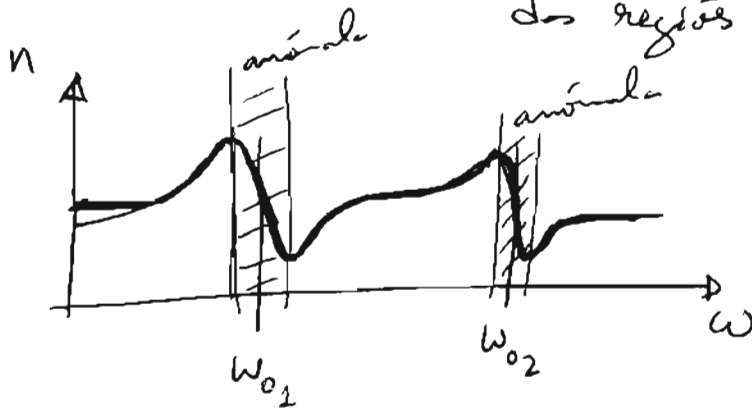
9

(em qe desprezamos as perdas).

Note-se qe quando ω aumenta (\uparrow), e se aproxima de ω_0 , ent \tilde{a} s $(\omega_0^2 - \omega^2)$ diminui, e n aumenta (\uparrow)

$\frac{dn}{d\omega} > 0$ $\omega \uparrow$ — $n \uparrow$ Dispers \tilde{a} Normal
 $\frac{dn}{d\omega} < 0$ qdo $\omega \uparrow$ — $n \downarrow$ Dispers \tilde{a} An \tilde{o} mala

(S \tilde{o} ocorre nas proximidades das regi \tilde{o} es de absor \tilde{c} o ω_0)



As subst \tilde{a} ncias transparentes t \tilde{e} m regi \tilde{o} es de absor \tilde{c} o fora do vis \tilde{a} vel (pois isso \acute{e} qe s \tilde{a} o transparentes!)

No caso das vidros, as mais importantes s \tilde{a} o na regi \tilde{o} es do U.V. o qe faz com qe os vidros sejam opacos para o U.V.

Diferentes materiais, e diferentes compostos, t \tilde{e} m compostos diferentes, mas todos deste tipo.

Em resumo: na região visível do espectro a polarização electrónica é o mecanismo que determina $n(\omega)$. Numa interpretação clássica, imaginam-se osciladores electrónicos a vibrar à frequência da onda incidente. Quando esta é bastante diferente da frequência de ressonância dos osciladores, as oscilações são pequenas e a absorção é reduzida. Nas zonas de ressonância a amplitude de vibração dos osciladores aumenta significativamente e o campo realiza uma maior quantidade de trabalho sobre as cargas.

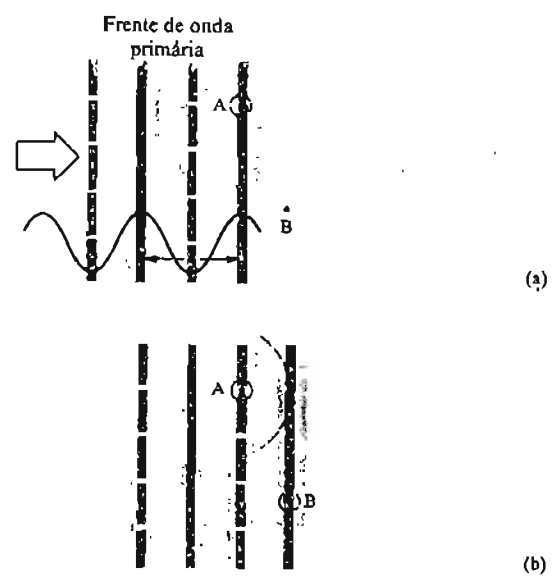
A energia electromagnética retirada à onda é convertida em energia mecânica e dissipada no interior da substância sob a forma de calor; diz-se então que se constitui uma banda de absorção. O material, mesmo quando essencialmente transparente às outras frequências, torna-se opaco à radiação electromagnética com frequência próxima das suas frequências características

- Propagação das ondas em meios dieléctricos

Como já referimos, uma onda que incide num meio vai excitar esse meio, e ~~faz~~ ele vai emitir uma nova onda, que em média pode ser considerada como uma sobreposição de ondas esféricas centradas nos átomos desse meio. Por exemplo, se for uma onda plana que excite o meio, em resposta o meio vai gerar uma outra onda plana (secundária), resultante da sobreposição de todas as ondas esféricas emitidas pelos átomos individuais.

EH 3.31

Veja-se um exemplo, de 2 átomos/moléculas (A e B) que interagem com uma onda plana incidente.



Quando (por exemplo) o pico da onda primária passa em A, esse átomo começa radiar uma onda, que vai adiante está em oposição de fase com a onda primária.

Quando a onda chega a B acontece a mesma coisa.

Como podem ver, em d), as ondas geradas pelos diferentes átomos interferem construtivamente apenas na direção de propagação da onda primária, criando uma frente de onda secundária que é idêntica à da primária, mas desfasada.

Como a interferência construtiva só ocorre na direção de propagação, só há propagação ~~na direção~~ da onda secundária nessa direção.

De referir que ambas as ondas se propagam à velocidade da luz no vácuo (já é vácuo que existe entre os átomos). E naturalmente interferem uma com a outra, formando a onda refractada.

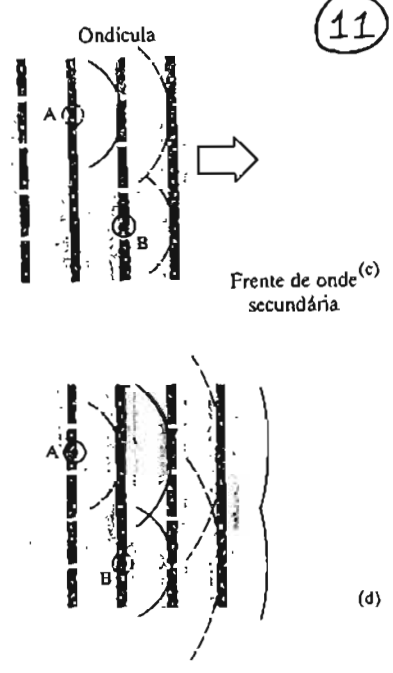
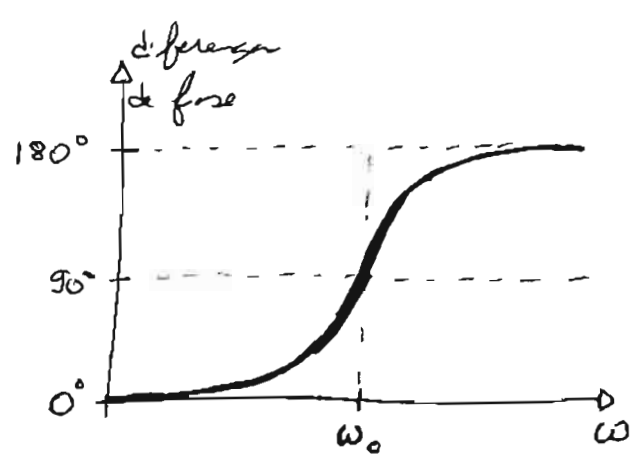


Figura 3.31 Na direção de propagação as ondas esféricas difundidas chegam em fase e constituem frentes de onda planas -- vales com vales, picos com picos.

Mas então qual é a velocidade da onda refractada?

A resposta não é possível depois de analisarmos o atomo que a onda sofre.

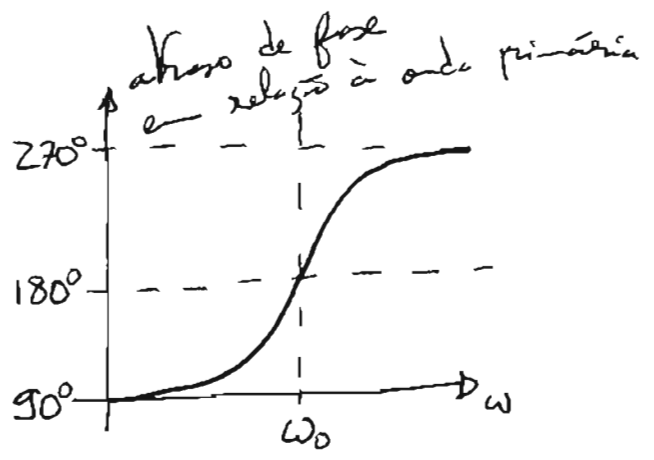
Na realidade qdo os electros da nuvem se põem a vibrar eles vão ter uma diferença de fase (em relação à força que os faz vibrar) que depende das frequências (de vibrações e de absorções (ressonância) do atomo).



(os atmos a vibrar em relação à onda que os excita)

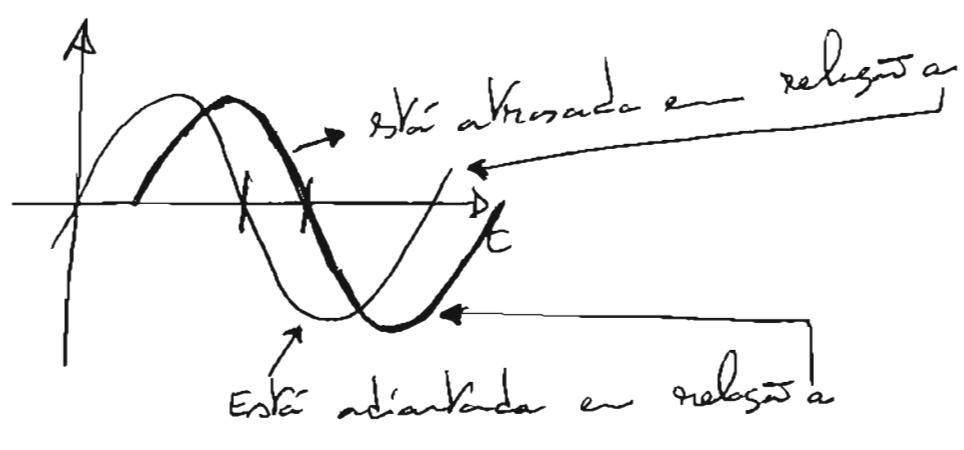
Além disso, a onda emitida (secundária) está da própria atrasada 90° em relação à onda principal!

Juntando esses dois efeitos, vemos que a onda está atrasada entre 90° e 180°, para frequências abaixo da ressonância, e entre 180° e 270° para ondas frequências superiores



(para a onda secundária)

Exemplos:



A ideia agora é simples:

Apesar de as ondas primária e secundária se deslocarem à velocidade da luz no vácuo, a onda refratada vai sendo progressivamente atrasada. Daí se ela tem a velocidade ^{de fase} (~~de grupo~~) diferente.

Se o meio for homogêneo, esse atraso (o aumento do atraso) é constante, logo a velocidade da onda também o vai ser.

Assim um atraso de fase corresponde a $v < c$
Um avanço de fase corresponde a $v > c$

Isto pode parecer impossível, mas não é. Tudo será
mais claro qdo falarmos em velocidade de fase e
velocidade de grupo. Para já, lembrem-se que $v \neq c$
para qualquer meio material.

(Isto não invalida que $v_{ar} = c ; n = 1$).

— Espectro Electromagnético

Como já foi referido, não há nenhuma
diferença fundamental entre as ondas de rádio e
as ondas de TV ou a luz que nós vemos. A
~~maior~~ diferença é "apenas" a frequência!

No caso da luz visível, vale a pena referir os limites
normalmente considerados

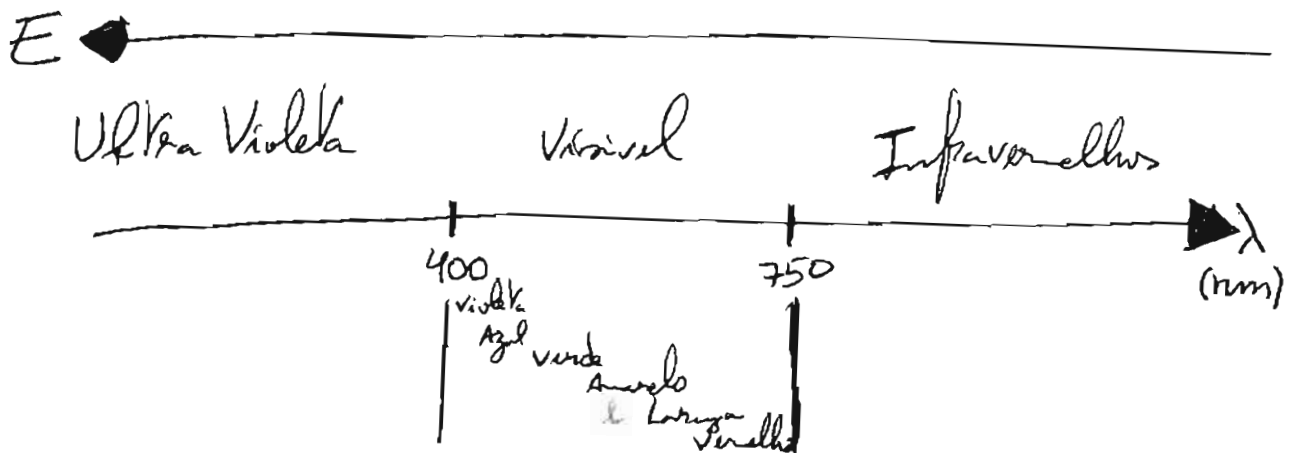
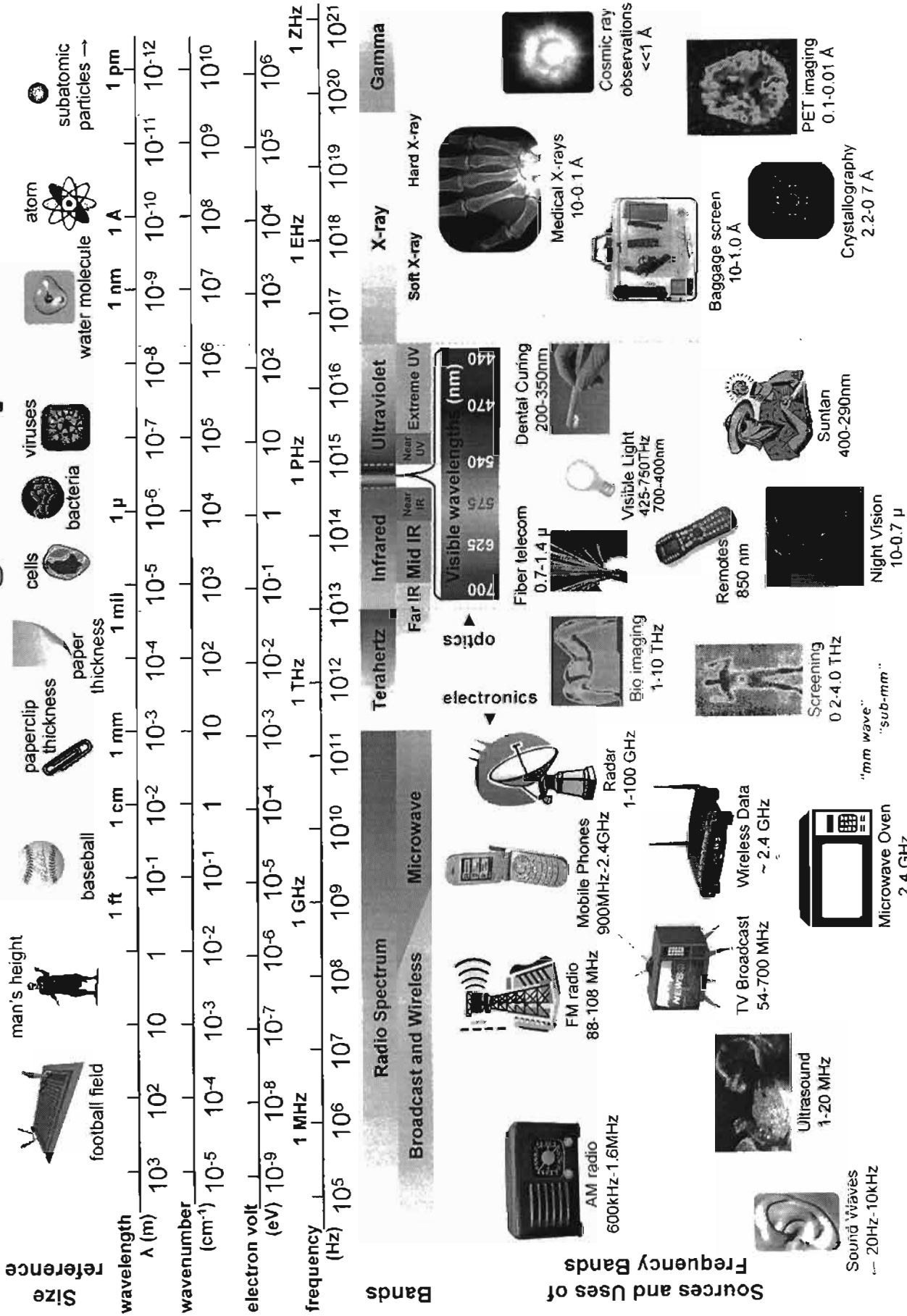


Chart of the Electromagnetic Spectrum



$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \cdot 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

De referir ainda que a percepção que temos das cores é subjetiva e depende do observador, não da radiação.

Para os humanos os 700 nm são vermelho, para os touros, segundo dizem, eles não "vêem" essa cor. (Também não sei como é que perguntaram isso a um touro, mas kido be...)

Além disso, o nosso olho "mistura" as cores. Por exemplo vermelho e verde dá amarelo, apesar de lá não ~~ser~~ existir radiação com esse comprimento de onda.

Por isso, e para sermos mais rigorosos, não devemos falar de cor, mas de frequência ou de comprimento.

Nota: O estudo da cor também é feito em óptica, por exemplo, para a definições de padrões no vinho, já para não falar do caso, talvez mais importante em termos comerciais, dos padrões de cor na indústria têxtil (Exemplo: Benetton).