

# Ondas, Acústica e Óptica

**José Manuel Rebordão**

**João Pinto Coelho**

[jmrebordao@fc.ul.pt](mailto:jmrebordao@fc.ul.pt) (sala 8.1.06)  
[joao.coelho@fc.ul.pt](mailto:joao.coelho@fc.ul.pt) (edifício do IBEB)

# NOTA

Muitas das páginas seguintes utilizam muitas imagens livremente disponíveis na Web.

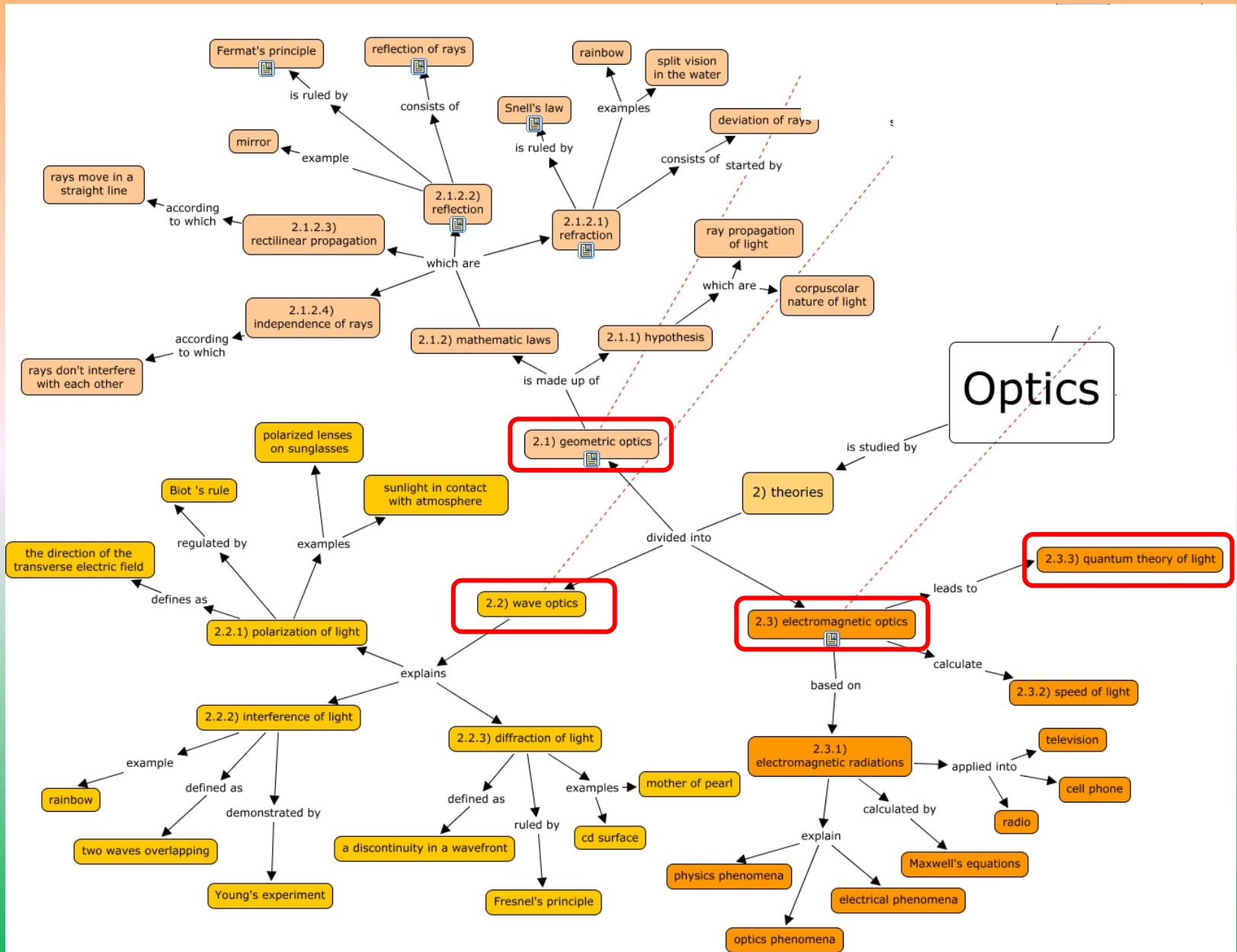
Esta apresentação é propriedade do seu autor e foi concebida em benefício exclusivo dos seus alunos na FCUL, ao longo dos anos, nos cursos do Departamento de Física

Esta informação foi disponibilizada a partir do ano lectivo de 2019/20, e não deve ser usada em contextos não académicos ou para fins que nada tenham a ver com a FCUL.

A informação assim disponibilizada é insuficiente para se obter aprovação na disciplina, devendo ser explicitamente consultadas e estudadas as referências bibliográficas explicitadas nos sumários e neste ficheiro, e que poderão ser diferentes para os vários temas do programa da disciplina e ciclo de estudos.

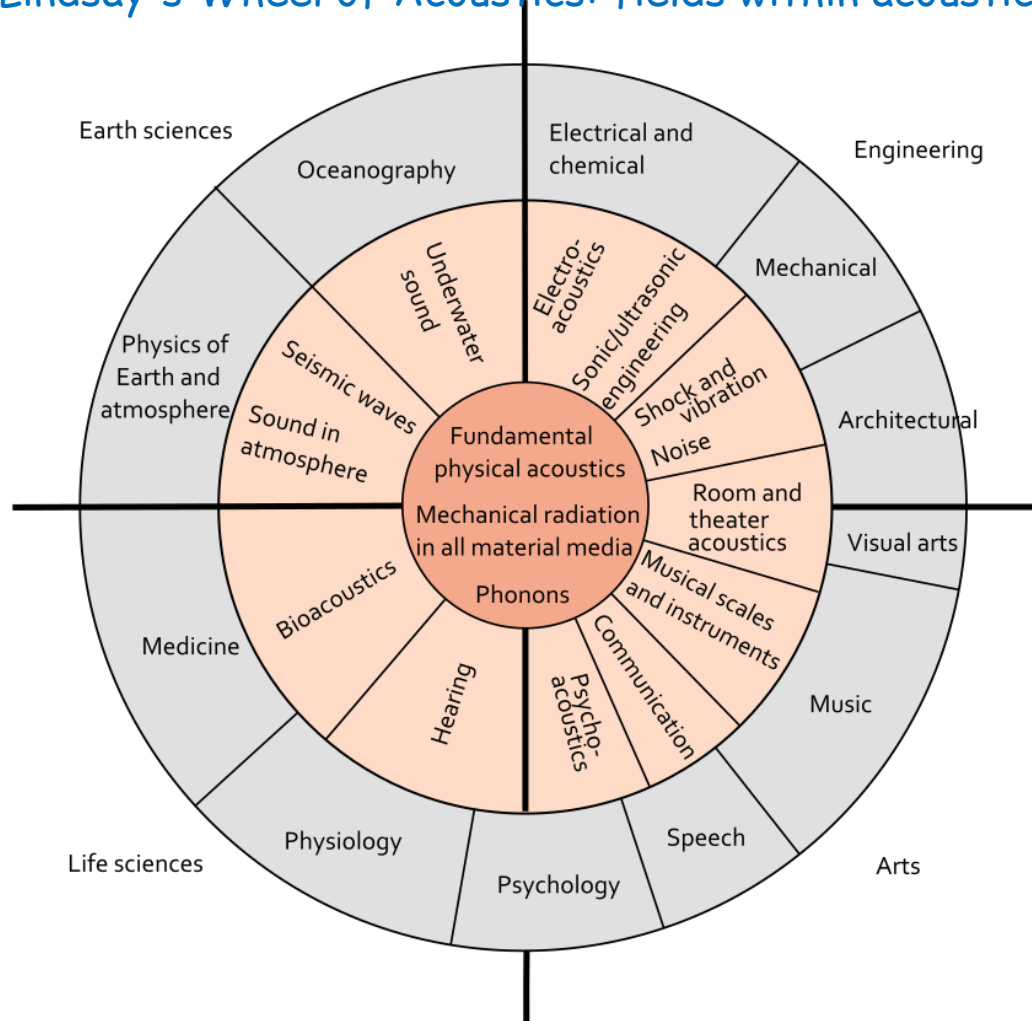


# Mapa conceptual: Óptica



# Mapa conceptual: Acústica

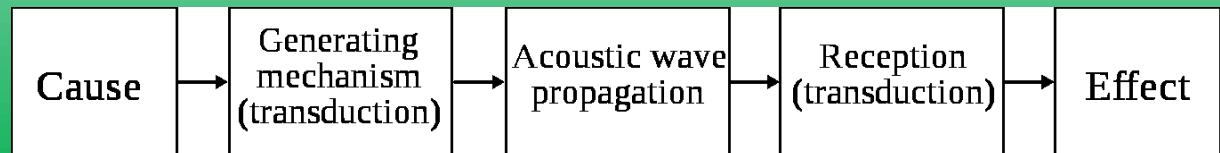
Lindsay's Wheel of Acoustics: fields within acoustics



**Acoustics** (ANSI/ASA S1.1-2013) is:

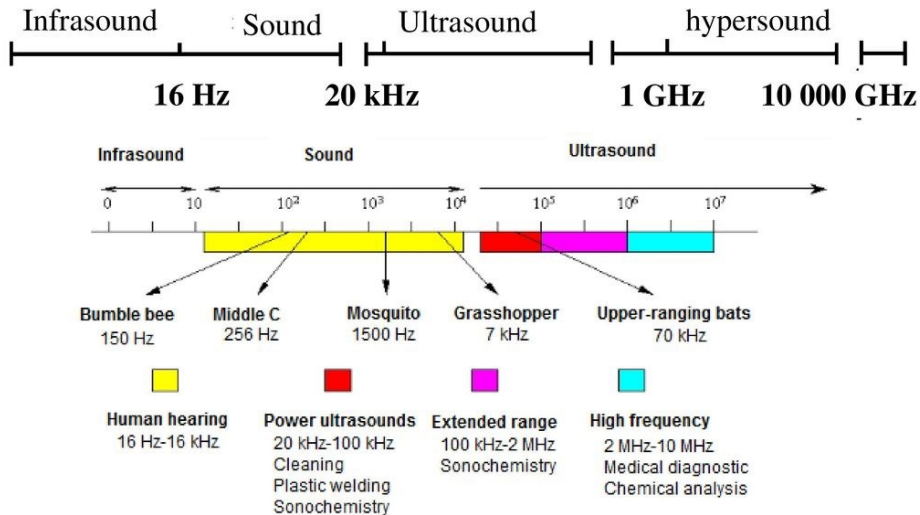
(a) Science of sound, including its production, transmission, and effects, including biological and psychological effects.

(b) Those qualities of a room that, together, determine its character with respect to auditory effects.



# Mapa conceptual: Acústica

## CLASSIFICATION OF ELASTIC WAVES



$$v = \lambda f$$

**Na atmosfera, ao nível do mar (340 m/s)**

20 Hz → 17.2 m

20 kHz → 17.2 mm

**Na água**

10 MHz → 150 μm

**Table 2.1** Speed of sound in different media at 25° C.

State	Medium	Speed in m s <sup>-1</sup>
Solids	Aluminum	6420
	Nickel	6040
	Steel	5960
	Iron	5950
	Brass	4700
	Glass	3980
Liquids	Water (Sea)	1531
	Water (distilled)	1498
	Ethanol	1207
	Methanol	1103
	Gases	Hydrogen
Helium		965
Air		340
Oxygen		316
Sulphur dioxide		213

Diamond

12000

# A disciplina: objetivos e programa

## Objetivos

Apresentar os principais conceitos da **Óptica** na perspectiva de uma formação orientada para aplicações e para abordagens de engenharia, mas sem prejuízo de uma clara identificação da natureza fundamental dos fenómenos ópticos.

Apresentar os vários (4) **Paradigmas** que têm suportado a nossa compreensão dos fenómenos da luz - em termos de geração, interacção com a matéria, propagação e detecção – e respectivos limites.

Apresentar de forma geral o paradigma ondulatório em Física, com incidência directa na **Acústica**, mas usando-o de forma mais detalhada nos fenómenos luminosos que carecem de um modelo de ondas.

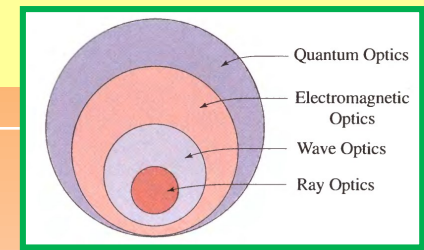
Referir as limitações do paradigma ondulatório e para a fenomenologia e conceitos que fundamentam o paradigma electromagnético, que descreve a vertente clássica da luz.

## Programa

1. Óptica geométrica
2. Paradigma ondulatório: ondas (em geral)
3. Alguns conceitos de acústica
4. Óptica Ondulatória – fenómenos ondulatórios e meios de propagação
5. Alguns conceitos de Óptica Electromagnética
6. *Luminescência e dispersão (scattering)*
7. *Lasers*



# Programa detalhado



## 1. Paradigmas

- Geométrico, ondulatório, vectorial, quântico

## 2. Geração de luz

- Luminescência e fosforescência
- *Dispersão (scattering): Rayleigh, Raman, Brillouin*

## 3. Óptica geométrica

- Princípios: Fermat, Huygens
- Eq. dos planos conjugados e ampliações
- Sistemas delgados e espessos
- Combinação de sistemas
- Espelhos
- Aberrações
- Pupilas
- Olho: constituição, funcionamento, ametropias e compensação
- Outros instrumentos: microscópios, telescópios

## 4. Ondas em Física

- Física e matemática das ondas
- Aplicações: acústica

- Aplicações: óptica

- Equações de onda e soluções: planas, esféricas, paraxiais, gaussianas, outras.

- Fenômenos ondulatórios:

- Propagação, princípio de Huygens-Fresnel
- Difracção, regimes de aproximação
- Interferências e interferômetros

## 5. Óptica Electromagnética (breves referências)

- Equações de Maxwell, eq. Constitutivas
- Equações de Fresnel
- Relação polarização  $\mathbf{P}$  - campo  $\mathbf{E}$
- Descrição EM de materiais, definições, permitividade, índice de refração; modelos
- Polarização: tipos e fenomenologia

## 6. Lasers

- **Princípios de funcionamento**
- Subsistemas: bombeamento, **cavidade ressonante, feixes gaussianos**
- **Geração de impulsos**
- Exemplos de sistemas laser



# Síntese dos objectivos de aprendizagem

## ONDAS ACÚSTICA E ÓPTICA

*Engenharia Física, Engenharia Biomédica e Biofísica (2º ano)*

OBJECTIVOS DE APRENDIZAGEM / ORIENTAÇÕES PARA ESTUDO

9-9-2021

Fénix, em  
Informações Úteis  
- em actualização

### A. Óptica Geométrica

1. A Óptica Geométrica baseia-se no conceito de **raios luminosos**, cuja trajectória é determinada pelo **princípio de Fermat**, sendo rectilínea em meios uniformes. Procura determinar as condições em que a imagem é geometricamente semelhante ao objecto (ambos em planos paralelos e perpendiculares ao eixo óptico, em sistemas com simetria cilíndrica).
2. Apoia-se na equação (não-linear) dos **planos conjugados**, no conceito de **ampliação** transversa e de ampliação longitudinal, razoavelmente verificadas desde que se assumam a **aproximação paraxial**. Apoia-se ainda na distinção entre imagens / objectos **reais / virtuais**, coerente com a convenção de **sinais** habitual.
3. Da forma geral da equação dos planos conjugados e da ampliação transversa, decorrem formas aproximadas – e de validade muito restrita – para sistemas **delgados**, ou para sistemas que operem entre espaços com o mesmo índice de refração. As formas gerais e específicas das diversas equações devem ser bem conhecidas e aplicadas com propriedade.
4. Os desvios às previsões da equação dos planos conjugados ou a um valor fixo da ampliação transversa entre planos conjugados, são globalmente considerados como “**aberrações**”. As aberrações (monocromáticas ou não-monocromáticas) distinguem-se entre si consoante a sua natureza e/ou existência de feixes com vértice bem definido.
5. Os **pontos cardinais** – cuja localização deve ser conhecida, sobretudo em sistemas espessos (que não se possam considerar delgados) - viabilizam a aplicação, única, da equação dos planos conjugados a um sistema constituído por um número arbitrário de componentes ópticos. Em alternativa, a imagem constituída no n<sup>ésimo</sup> sistema, deve ser considerada como objecto para o sistema de ordem  $n+1$ . Em qualquer iteração, ambos, o objecto e a imagem, podem ser reais ou virtuais.
6. Conceitos adicionais relevantes: sistemas de potência nula (**afocais**); **diafragmas** de abertura e de campo, **pupilas** (entrada e de saída); **vinhetagem**; **profundidade de campo**; **f/#**.
7. Arquitectura e conceitos de sistemas ópticos fundamentais: **olho humano** (incluindo **ametropias** e sua **compensação**); **lupa**; **telescópios**; **microscópio** (incluindo a variante confocal).

### B. Ondas

1. Existem fenómenos físicos cuja organização e dependência **espácio-temporal** de uma ou várias grandezas físicas é global, com características completamente diferentes dos fenómenos associados a partículas ou conjunto de partículas: a sua dinâmica é **ondulatória**.
2. Tais fenómenos satisfazem, numa aproximação inicial, uma mesma **equação de ondas (linear)**, que se pode construir de formas diferentes em diferentes situações físicas, produzindo sempre uma **velocidade** de propagação (de **fase**, de **grupo**, ...).
3. Podem-se construir soluções gerais arbitrárias da equação de ondas. Merecem particular destaque as soluções **harmónicas**, cuja

# Bibliografia

## Todos

Freegarde T, **Introduction to the Physics of Waves**, Cambridge, 2013

Serway R A, **Physics**, Saunders (Part II)

Saleh B.E.A., **Fundamentals of Photonics** (2ª ed.)

Hecht, **Óptica** (Gulbenkian)

Bass M et al., **Handbook Of Optics** (OSA, McGraw, 2001, 2009)

## Engª Biomédica e Biofísica

Prasad P. N., **Introduction to Biophotonics**, (Cap. 2, 4, 5, 6)

Vo-Dinh T, **Biomedical Photonics Handbook**, CRC, 2003

## Física

Chartier G, **Introduction to Optics** (Springer, 2005)

Born M, Wolf E, **Principles of Optics** (CUP)

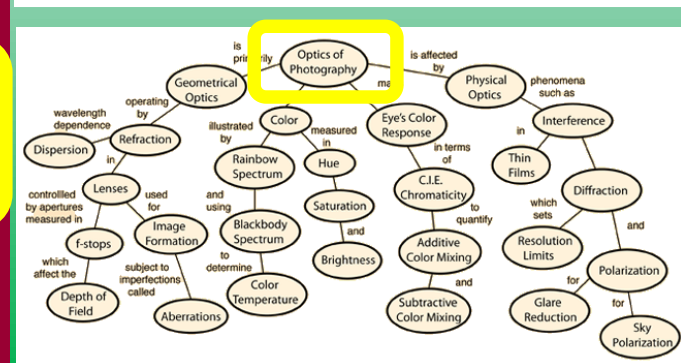
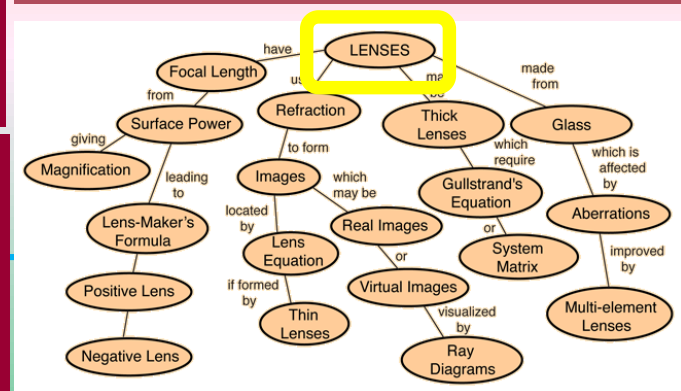
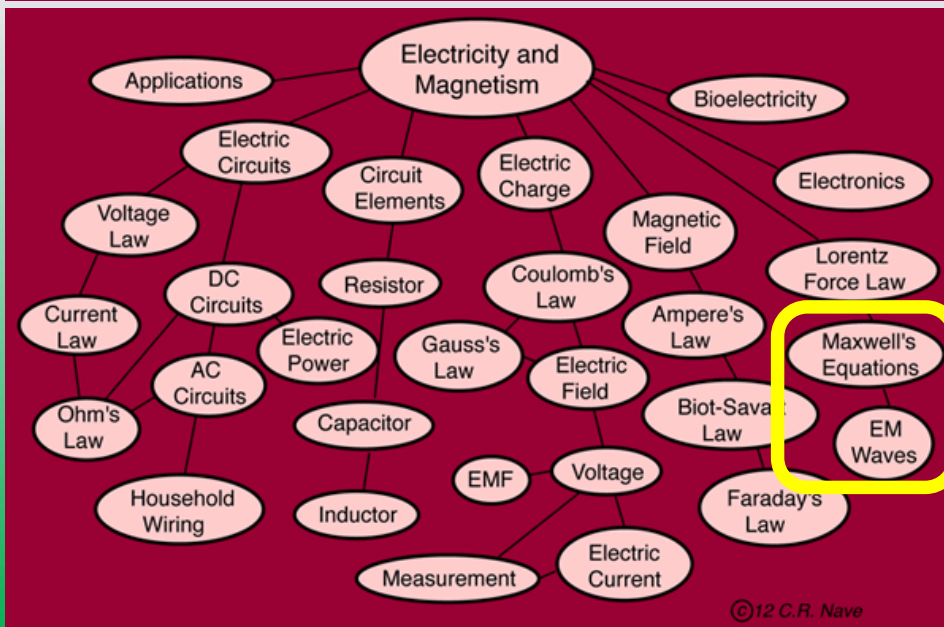
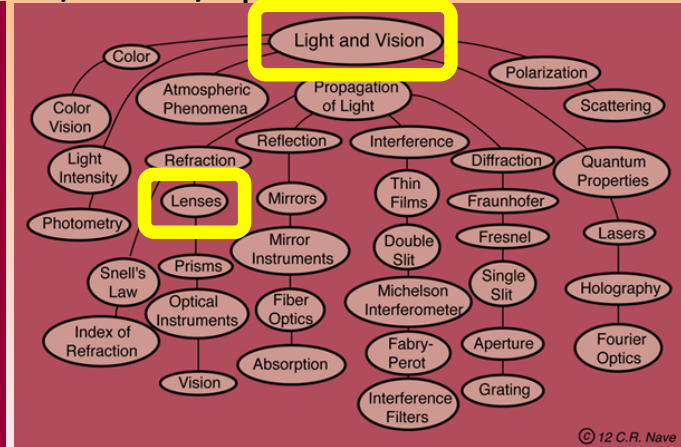
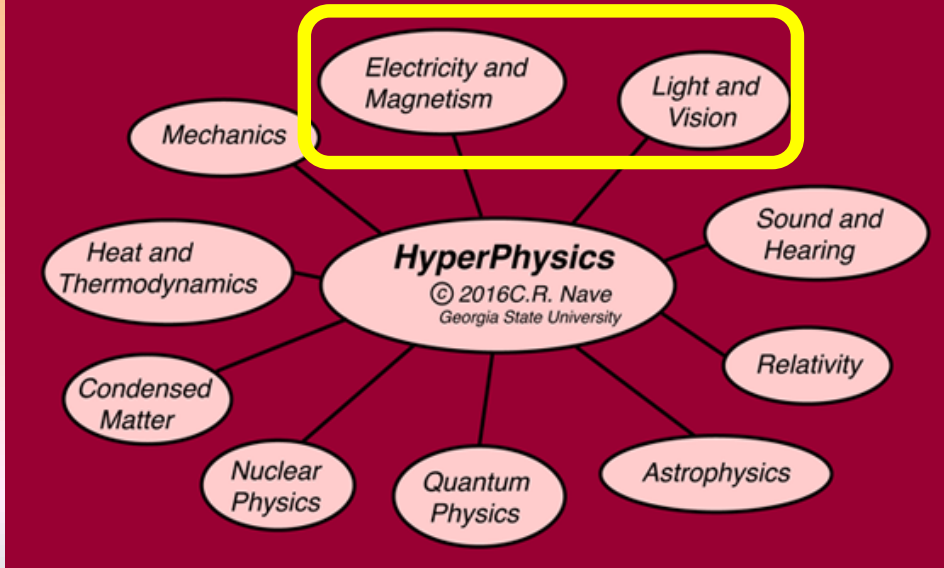
## Diversos

<https://www.britannica.com/science/light>

Apresentações Power Point (ficheiros ppsx, com *Notas e Áudio*), no OneDrive, ULisboa

# Bibliografia

- Wikipedia (em inglês)
- [Hyperphysics](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html) (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>)



# Avaliação

Quizz: 30 - 50%

**\*\* DE NOVEMBRO, 2021**

(Moodle + Zoom + vídeo)

\*\*\*

Exame: 60 - 40%

- ❑ A avaliação consistirá em dois *quizz* de escolha múltipla, feitos no sistema de avaliação do Moodle, e em Zoom, com câmara ligada. *As provas serão diferentes para todos, embora tenham exactamente as mesmas perguntas (em número elevado, 100 a 150 e num tempo relativamente curto), mas por ordem aleatória.*
- ❑ Quem tiver mais de 10 na 1ª prova, só precisará de fazer a 2ª. Quem tiver negativa na 1ª, fará o quizz final completo, na mesma data do 2º quizz. De qualquer modo, todos podem fazer a prova final completa, incidindo sobre a totalidade do programa (caso, por exemplo, em que desejem aumentar a nota da 1ª prova).
- ❑ No final, quem desejar levantar a nota, poderá fazer uma oral - se verá, na altura, em que formato (presencial ou remoto, em função das regras vigentes na altura).

Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA

2º SEMESTRE – 2015 / 2016

PROFESSORES: JOSÉ MANUEL REBORDÃO / JOÃO PINTO COELHO / MARGARIDA PIRES

EXAME - 1ª CHAMADA - 9 de Junho de 2016

QUERO USAR A NOTA DO TESTE (T2):		EXAME COMPLETO (E1):				
NOME DO ALUNO		NUMERO				
1	AS AFIRMAÇÕES SEGUINTE SÃO VERDADEIRAS OU FALSAS. ASSINALE V OU F NO QUADRADO CORRESPONDENTE.					
2	PARADIGMAS: ELECTROMAGNÉTICO, ONDULATÓRIO					
3	Apenas o paradigma electromagnético pode ser aplicado quando a luz interage com estruturas com dimensões características inferiores muito mais pequenas que o comprimento de onda da radiação.		E1			
4	EQUAÇÃO DE ONDAS					
5	A equação de ondas fez suspeitar, ainda no século XIX, que a luz fosse uma onda electromagnética.		E1			
6	EQUAÇÃO DE HELMHOLTZ					
7	A equação de Helmholtz resulta da equação de ondas quando se procuram soluções monocromáticas da equação de ondas.		E1			
8	A equação de Helmholtz é uma equação linear, deste modo garantindo a validade do princípio de sobreposição.		E1			
9	RELAÇÃO ENTRE O CAMPO ELÉCTRICO (E) E A DENSIDADE DE POLARIZAÇÃO (P) NOTAÇÃO: c - letra grega, QUI, minúscula. e - letra grega, EPSILON, minúscula.					
10	Em meios lineares e isotropos, o vector P é proporcional ao vector E, sendo a constante de proporcionalidade EPSO.QUI.		E1			
11	A base física para a geração de uma densidade volumica de polarização (vector P) é a deformação das nuvens electrónicas dos átomos ou moléculas por acção de um campo eléctrico externo.		E1			
12	QUI é a susceptibilidade dieléctrica e não tem dimensões.		E1			
13	GRANDEZAS FÍSICAS QUE CARACTERIZAM UM MEIO NA PERSPECTIVA ELECTROMAGNÉTICA					
	$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 1 + \chi$	$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 + \chi}$	$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon_r \mu_r}{\epsilon_0 \mu_0}}$	$v = \frac{c}{n} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}}$	$n^2 - 1 = \chi$	$\epsilon = \frac{1}{\mu_0 \mu_r}$
	A	B	C	D	E	F
14	A expressão B só é válida em meios não magnéticos					
15	A expressão A representa a definição de constante dieléctrica do meio.					
16	PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAIS					
17	A velocidade de propagação da luz diminui quando o índice de refração aumenta.					
18	Num meio dispersivo, o índice de refração não depende do comprimento de onda.					
19	Num meio dispersivo, o Número de Abbe é tanto maior quanto menor for a variação do índice de refração entre os dois extremos do espectro visível.					
20	Num meio com um coeficiente de atenuação de 0.5 /m, a irradiância da onda transmitida, ao fim de 1 m de propagação, é 39% e 40% da irradiância da onda incidente.					
21	ONDAS (NÃO GAUSSIANAS)					
22	As ondas esféricas são solução da equação de ondas, quando se procuram soluções que apenas dependam de $r =  \mathbf{r} $ .					
23	As ondas monocromáticas resultam quando se impõe que a dependência temporal esteja inteiramente contida no factor $\exp(i\omega t)$ . NOTAÇÃO: $\omega$ é a letra grega OMEGA, minúscula.					
24	A equação de Helmholtz impõe que o módulo do vector $\mathbf{k}$ (na fase de uma onda plana) é o parâmetro escalar $k$ que surge na relação de dispersão.					
25	ONDAS GAUSSIANAS Amplitude complexa (modo TEM <sub>00</sub> ): $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] e^{-i\left[kz + \frac{\rho^2}{2R(z)} - \zeta(z)\right]}$					
26	Numa onda gaussiana, a função R(z) descreve o raio de curvatura da frente de onda à distância z do plano da cintura.					
27	No plano da cintura, W(z) = W0, que é o valor máximo que a largura do feixe pode tomar.					



# Indicações aos Estudantes

Em cada prova, as “Indicação aos Estudantes” serão actualizadas



## Glossário

**Refracção**  
 $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$   
 $\theta_{\text{critico}} = \text{asin}(n_2 / n_1)$   
 $\theta_{\text{Brewster}} = \text{atan}(n_2 / n_1)$

**FORMULÁRIO**  
**Prismas**  
 $\delta \approx (n-1)\alpha$   
 $\theta_i = (\delta_m + \alpha) / 2$   
 $n = \sin\left(\frac{\delta_m + \alpha}{2}\right) / \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$

**Equações de Fresnel**  
 $r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}$   
 $t_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}$   
 $r_{\parallel} = \frac{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) - \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}}{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) + \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}}$   
 $t_{\parallel} = \frac{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) + \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}}{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) + \frac{n_1 \cos \theta - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta + n_2 \cos \theta_t}}$   
 $T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$   
 $\mathfrak{R} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}\right)^2$   
 $\tan \theta_b = n_1 / n_2$   
 $\sin \theta_c = n_1 / n_2$

**Óptica Geométrica**  
 $\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = K$   
 $M_T = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 l'}{n_2 l}$   
 $K = K_1 + K_2 = \frac{d}{n_1} - \frac{d}{n_2} - \frac{d}{n_3}$   
 $K_{L\text{-espessa}} = (n_1 - n_{\text{meio}}) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{d(n_1 - n_{\text{meio}})}{n_1 R_1 R_2} \right)$   
 $K_{L\text{-delgada}} = (n_1 - n_{\text{meio}}) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$   
 $\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$

$\nabla^2 u(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0$   
 $u(\mathbf{r}, t) = U(\mathbf{r}) e^{-i2\pi\nu t} = U(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$   
 $(\nabla^2 + k^2)U(\mathbf{r}) = 0$   
 $U(\mathbf{r}) = A e^{-ikr}$   
 $U(\mathbf{r}) = \frac{A}{r} e^{-ikr}$   
 $U(\mathbf{r}) = \frac{A}{r} e^{-ikz} e^{-i(k^2 x^2 + y^2) / 2z}$   
 $k = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$

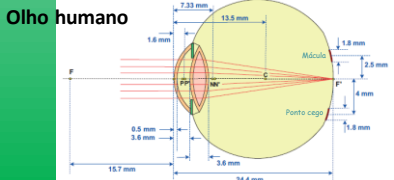
**Ondas paraxiais**  
 $U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{-ikz}$   
 $\nabla_T^2 A - i2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0$

**Modo Gaussiano TEM<sub>00</sub>**  
 $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} e^{-\frac{\rho^2}{W^2(z)}} e^{-i\left[kz + \frac{k\rho^2}{2R(z)} - \zeta(z)\right]}$   
 $z_0 = \frac{\pi W_0^2}{\lambda}$   
 $W(z) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}$   
 $R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$   
 $\zeta(z) = \text{atan}(z / z_0)$

**Modos de Hermite / Laguerre - Gauss**  
 $U_{l,m}(x, y, z) = A_{l,m} \frac{W_0}{W(z)} G_l \left[ \frac{\sqrt{2}x}{W(z)} \right] G_m \left[ \frac{\sqrt{2}y}{W(z)} \right] e^{-ikz - i\frac{kx^2 + y^2}{2R(z)} + (l+m+1)\zeta(z)}$   
 $G_l(u) = \mathbb{H}_l(u) e^{-\frac{u^2}{2}}$   
 $U_{l,m}(\rho, \varphi, z) = A_{l,m} \frac{W_0}{W(z)} \left( \frac{\rho}{W(z)} \right)^{|l|} L_m^{|l|} \left[ \frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] e^{-\frac{\rho^2}{W^2(z)}} e^{-ikz - i\frac{k\rho^2}{2R(z)} - i\ell\varphi + (l+2m+1)\zeta(z)}$   
 $\rho^2 = x^2 + y^2$

**Modos de Bessel**  
 $U(\mathbf{r}) = A(x, y) e^{-i\beta z}$   
 $\nabla_T^2 A + k_T^2 A = 0$   
 $A(x, y) = A_m J_m(k_T \rho) e^{-i\ell\varphi}$   
 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$   
 $k_T^2 + \beta^2 = k^2$   
 $\nabla_T^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$

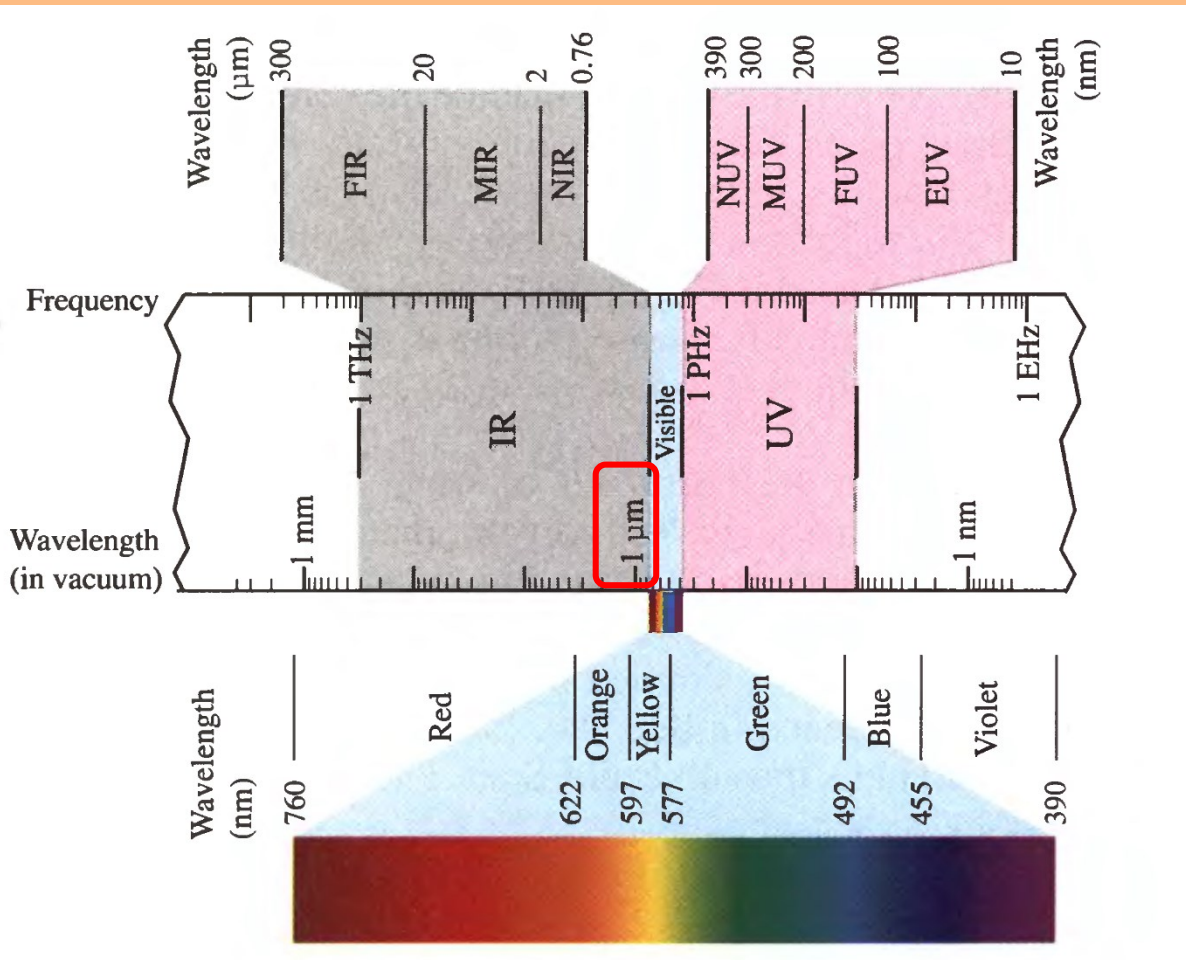
Indicador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Indicador de qualidade	1.0	1.0001	1.0004	1.0016	1.0064	1.0176	1.0384	1.0736	1.1296	1.2144	1.3344	1.5072	1.7504	2.0832	2.5248	3.1008	3.8496	4.8144	6.1632	8.0640
Indicador de dispersão	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de absorção	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de reflexão	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de refração	1.0	1.0001	1.0004	1.0016	1.0064	1.0176	1.0384	1.0736	1.1296	1.2144	1.3344	1.5072	1.7504	2.0832	2.5248	3.1008	3.8496	4.8144	6.1632	8.0640
Indicador de difração	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de interferência	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de polarização	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de coerência	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de difusão	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de absorção	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de reflexão	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de refração	1.0	1.0001	1.0004	1.0016	1.0064	1.0176	1.0384	1.0736	1.1296	1.2144	1.3344	1.5072	1.7504	2.0832	2.5248	3.1008	3.8496	4.8144	6.1632	8.0640
Indicador de difração	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de interferência	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de polarização	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de coerência	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640
Indicador de difusão	0.0	0.0001	0.0004	0.0016	0.0064	0.0176	0.0384	0.0736	0.1296	0.2144	0.3344	0.5072	0.7504	1.0832	1.5248	2.1008	2.8496	3.8144	5.1632	7.0640



## INDICAÇÕES AOS ESTUDANTES

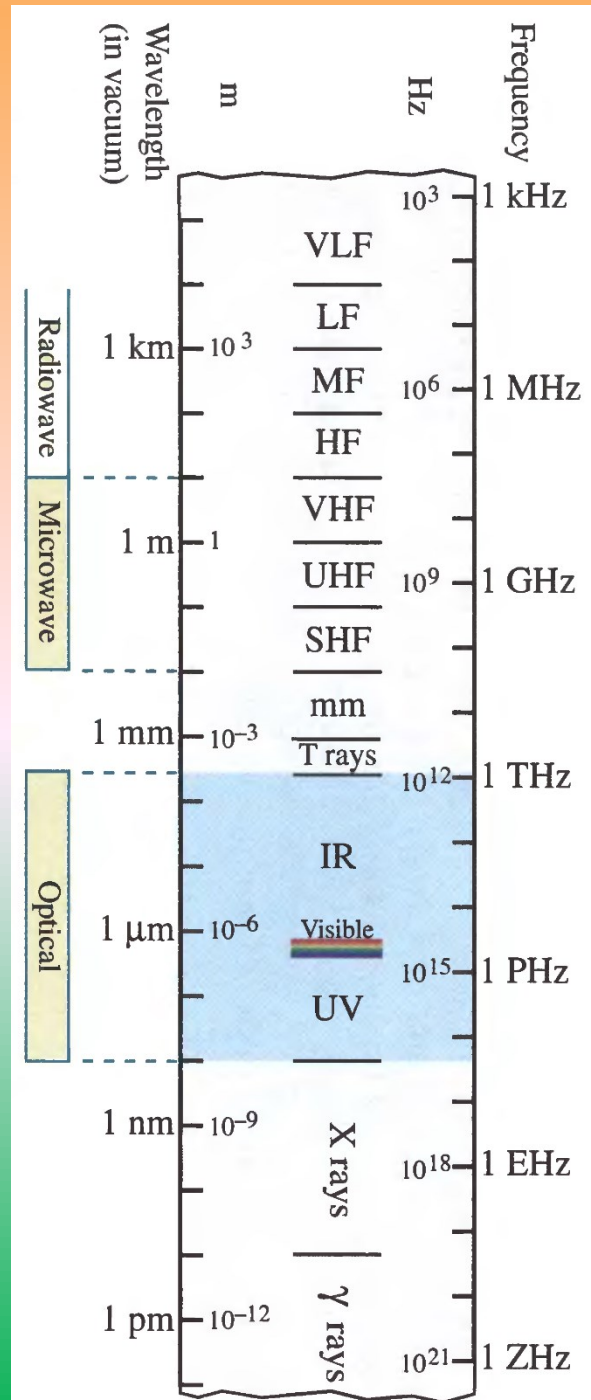
- A 1ª chamada de ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA terá lugar no dia **22 DE JUNHO**, 4ª feira, às 9:00h em anfiteatros do edifício CB: **A DEFINIR**
- A duração total do exame será de 3.0 horas (não havendo tolerância adicional).
- Trata-se de uma prova SEM CONSULTA, à excepção do formulário fornecido no início da prova
- Quem realizou o teste com **classificação superior ou igual a 50%**:
  - Podem responder apenas à matéria **não coberta** pelo teste, isto é:
    - Prática de Interferometria**
    - Teórica e prática de Óptica Geométrica**
    - Teórica de Equações de Fresnel e de Lasers**
  - Podem realizar a **totalidade** da prova, desta forma tornando irrelevante a classificação do teste.
  - No caso a)
    - As classificações do teste e do exame contarão, cada uma, 50% para a nota final.
    - O tempo de prova é, também, de 3.0 horas.
- Quem obteve **classificação inferior a 50%** no teste, deverá realizar a totalidade da prova.
- O exame da 2ª chamada incidirá sempre sobre a totalidade da matéria, sendo irrelevante a classificação do teste.
- Os alunos **terão** à sua **disposição** folhas de papel branco para preparar as suas respostas.
- Os alunos **apenas** podem trazer uma calculadora convencional (gráfica ou não), não esquecendo as pilhas. Será proibido o uso de qualquer dispositivo (telemóvel / tablet / ...) com capacidades de comunicação Wireless / Bluetooth, mesmo que restrito a funções de "calculadora".
- Os alunos **devem exclusivamente** utilizar relógios analógicos ou digitais, sem capacidades de comunicação Wireless / Bluetooth ou de aquisição e transmissão de imagem ou de mensagens.
- A presença visível de qualquer objecto com capacidades de comunicação Wireless / Bluetooth junto do aluno dará lugar à **anulação do teste ou do exame**.
- Qualquer outros objectos pessoais (mochilas, casacos, etc) serão depositados junto do quadro da sala.
- Os alunos podem manter uma garrafa de água, mas não poderão sair e regressar da sala durante o teste.
- A prova será constituída por perguntas de dois tipos:
  - Afirmações, que podem ser Verdadeiras ou Falsas;
  - Perguntas de escolha múltipla (4 opções).
- Respostas erradas ou respostas ambíguas contarão **negativamente**. Ausência de resposta não contará. O valor do desconto dependerá do número de alternativas de resposta em cada pergunta, mas poderá ser alterado globalmente durante a fase de correcção.
- As respostas serão assinaladas a **caneta** (não a lápis), no enunciado do teste.
- Todos os alunos, incluindo os que desistam, têm de **devolver** o enunciado aos docentes quando saírem da sala.
- Matéria para a prova:**
  - Teórica - Toda a matéria coberta nas aulas teóricas;
  - Prática - Toda a matéria coberta pelos exercícios discutidos nas aulas TP.
- Será distribuído** um **Formulário** com fórmulas principais relativas a: feixes gaussianos, óptica geométrica e equações de Fresnel.

# Espectro electromagnético



Visível ~ 0.5 μm (ordem de grandeza)

Sistema Internacional de Unidades: μm ~ 10<sup>-6</sup> m

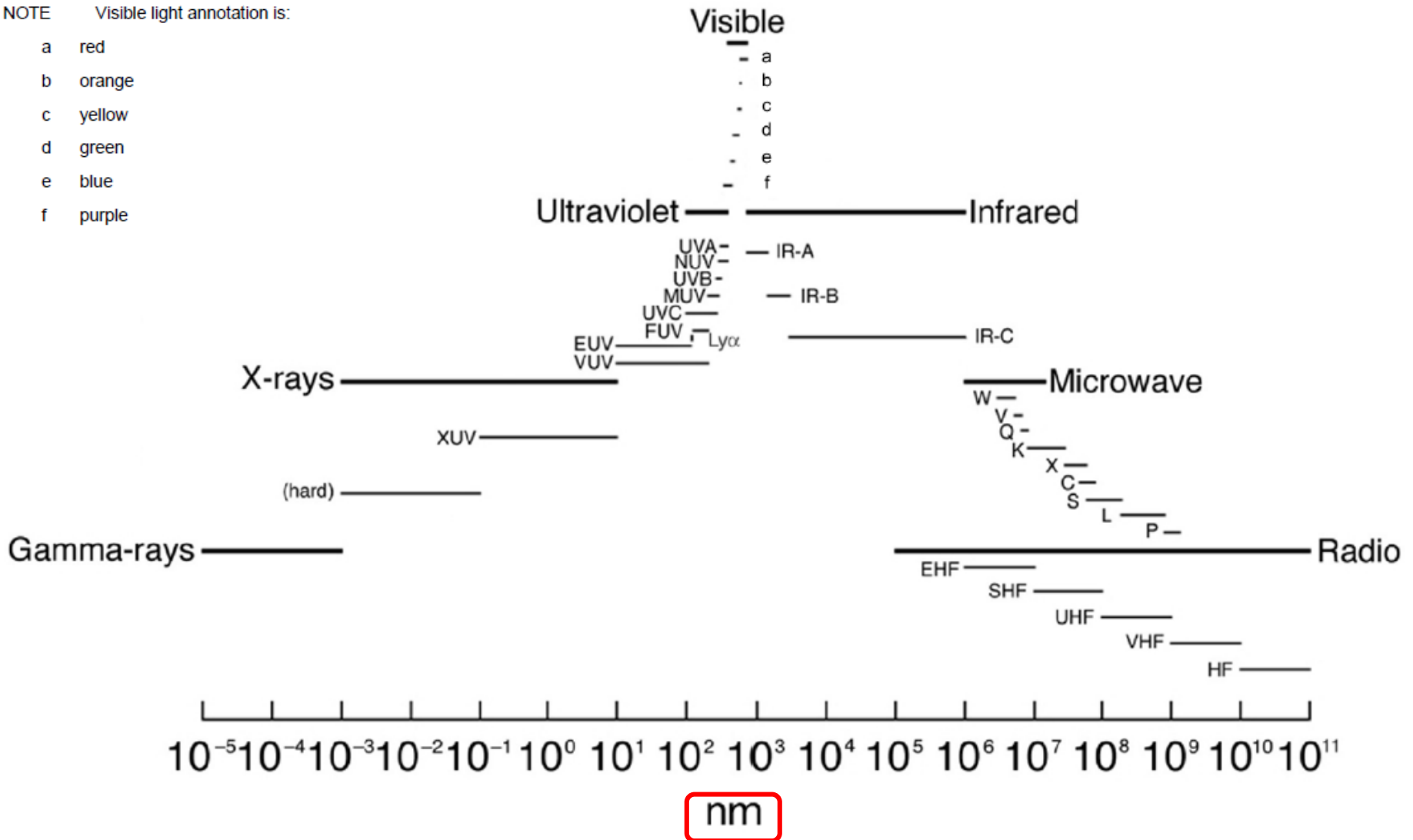


# Espectro electromagnético

<http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet>

NOTE Visible light annotation is:

- a red
- b orange
- c yellow
- d green
- e blue
- f purple



[ISO 21348 - Space environment \(natural and artificial\) - Process for determining solar irradiances](#)



# Espectro EM

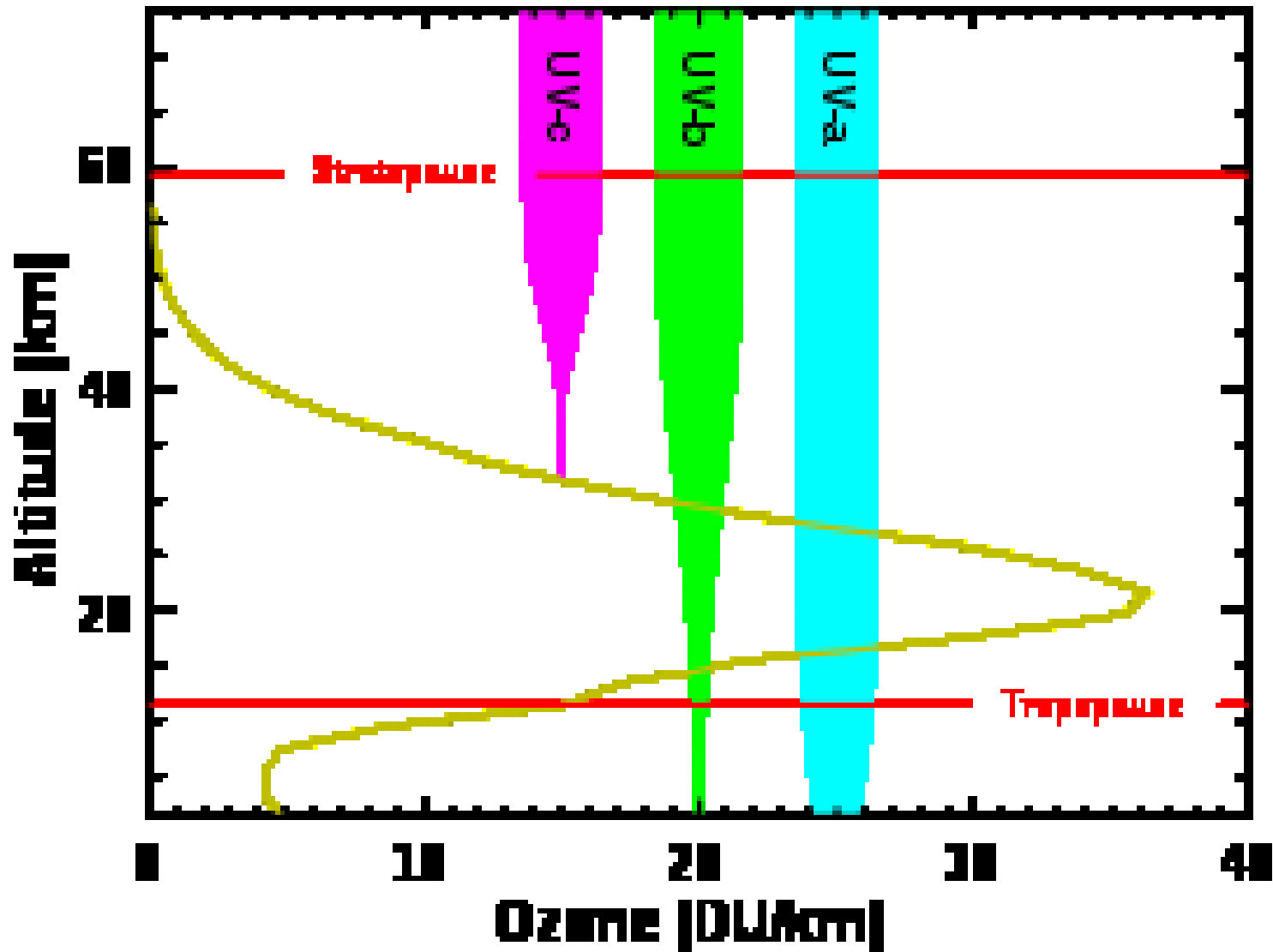
ISO 21348 -  
Space  
environment  
(natural and  
artificial) -  
Process for  
determining  
solar  
irradiances

Spectral category	Spectral sub-category	Wavelength range nm	Wavelength range (SI prefixes from Table 2)	Notes
Total solar irradiance				full-disk, 1 ua solar irradiance integrated across all $\lambda$
Gamma-rays		$0,000\ 01 \leq \lambda < 0,001$	$10\ \text{fm} \leq \lambda < 1\ \text{pm}$	
X-rays		$0,001 \leq \lambda < 0,1$	$1\ \text{pm} \leq \lambda < 0,10\ \text{nm}$	Hard X-rays
	XUV	$0,1 \leq \lambda < 10$	$0,10\ \text{nm} \leq \lambda < 10\ \text{nm}$	Soft X-rays
Ultraviolet	UV			Ultraviolet
	VUV	$10 \leq \lambda < 200$	$10\ \text{nm} \leq \lambda < 200\ \text{nm}$	Vacuum Ultraviolet
	EUV	$10 \leq \lambda < 121$	$10\ \text{nm} \leq \lambda < 121\ \text{nm}$	Extreme Ultraviolet
	H Lyman- $\alpha$	$121 \leq \lambda < 122$	$121\ \text{nm} \leq \lambda < 122\ \text{nm}$	Hydrogen Lyman-alpha
	FUV	$122 \leq \lambda < 200$	$122\ \text{nm} \leq \lambda < 200\ \text{nm}$	Far Ultraviolet
	UVC	$100 \leq \lambda < 280$	$100\ \text{nm} \leq \lambda < 280\ \text{nm}$	Ultraviolet C
	MUV	$200 \leq \lambda < 300$	$200\ \text{nm} \leq \lambda < 300\ \text{nm}$	Middle Ultraviolet
	UVB	$280 \leq \lambda < 315$	$280\ \text{nm} \leq \lambda < 315\ \text{nm}$	Ultraviolet B
	NUV	$300 \leq \lambda < 400$	$300\ \text{nm} \leq \lambda < 400\ \text{nm}$	Near Ultraviolet
	UVA	$315 \leq \lambda < 400$	$315\ \text{nm} \leq \lambda < 400\ \text{nm}$	Ultraviolet A
Visible	VIS			optical
		$360 \leq \lambda < 450$	$360\ \text{nm} \leq \lambda < 450\ \text{nm}$	purple
		$450 \leq \lambda < 500$	$450\ \text{nm} \leq \lambda < 500\ \text{nm}$	blue
		$500 \leq \lambda < 570$	$500\ \text{nm} \leq \lambda < 570\ \text{nm}$	green
		$570 \leq \lambda < 591$	$570\ \text{nm} \leq \lambda < 591\ \text{nm}$	yellow
		$591 \leq \lambda < 610$	$591\ \text{nm} \leq \lambda < 610\ \text{nm}$	orange
Infrared		$610 \leq \lambda < 760$	$610\ \text{nm} \leq \lambda < 760\ \text{nm}$	red
	IR			
	IR-A	$760 \leq \lambda < 1\ 400$	$760\ \text{nm} \leq \lambda < 1,40\ \mu\text{m}$	Near Infrared
	IR-B	$1\ 400 \leq \lambda < 3\ 000$	$1,40\ \mu\text{m} \leq \lambda < 3,00\ \mu\text{m}$	Middle Infrared
	IR-C	$3\ 000 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$3,00\ \mu\text{m} \leq \lambda < 1,00\ \text{mm}$	Far infrared
Microwave				
	<i>W</i>	$3,00 \times 10^6 \leq \lambda < 5,35 \times 10^6$	$3,00\ \text{mm} \leq \lambda < 5,35\ \text{mm}$	$(100,0 \geq \nu > 56,0)$ GHz
	<i>V</i>	$5,35 \times 10^6 \leq \lambda < 6,52 \times 10^6$	$5,35\ \text{mm} \leq \lambda < 6,52\ \text{mm}$	$(56,0 \geq \nu > 46,0)$ GHz
	<i>Q</i>	$6,52 \times 10^6 \leq \lambda < 8,33 \times 10^6$	$6,52\ \text{mm} \leq \lambda < 8,33\ \text{mm}$	$(46,0 \geq \nu > 36,0)$ GHz
	<i>K</i>	$8,33 \times 10^6 \leq \lambda < 2,75 \times 10^7$	$8,33\ \text{mm} \leq \lambda < 27,5\ \text{mm}$	$(36,00 \geq \nu > 10,90)$ GHz
	<i>X</i>	$2,75 \times 10^7 \leq \lambda < 5,77 \times 10^7$	$27,50\ \text{mm} \leq \lambda < 57,70\ \text{mm}$	$(10,90 \geq \nu > 5,20)$ GHz
	<i>C</i>	$4,84 \times 10^7 \leq \lambda < 7,69 \times 10^7$	$48,40\ \text{mm} \leq \lambda < 76,90\ \text{mm}$	$(6,20 \geq \nu > 3,90)$ GHz
	<i>S</i>	$5,77 \times 10^7 \leq \lambda < 1,93 \times 10^8$	$57,70\ \text{mm} \leq \lambda < 193,00\ \text{mm}$	$(5,20 \geq \nu > 1,55)$ GHz
	<i>L</i>	$1,93 \times 10^8 \leq \lambda < 7,69 \times 10^8$	$193,00\ \text{mm} \leq \lambda < 769,00\ \text{mm}$	$(1,550 \geq \nu > 0,390)$ GHz
	<i>P</i>	$7,69 \times 10^8 \leq \lambda < 1,33 \times 10^9$	$769,00\ \text{mm} \leq \lambda < 1,33\ \text{m}$	$(0,390 \geq \nu > 0,225)$ GHz
Radio				measurements: $(1\ 000\ 000 \leq \lambda < 10\ 000\ 000\ 000)$ nm
		EHF	$1,00 \times 10^6 \leq \lambda < 1,00 \times 10^7$	$1,00\ \text{mm} \leq \lambda < 10,00\ \text{mm}$ Extremely High Frequency $(300 \geq \nu > 30)$ GHz
		SHF	$1,00 \times 10^7 \leq \lambda < 1,00 \times 10^8$	$10,00\ \text{mm} \leq \lambda < 100,00\ \text{mm}$ Super High Frequency $(30 \geq \nu > 3)$ GHz
		UHF	$1,00 \times 10^8 \leq \lambda < 1,00 \times 10^9$	$100,00\ \text{mm} \leq \lambda < 1,00\ \text{m}$ Ultra High Frequency $(3\ 000 \geq \nu > 300)$ MHz
		VHF	$1,00 \times 10^9 \leq \lambda < 1,00 \times 10^{10}$	$1,00\ \text{m} \leq \lambda < 10,00\ \text{m}$ Very High Frequency $(300 \geq \nu > 30)$ MHz
		HF	$1,00 \times 10^{10} \leq \lambda < 1,00 \times 10^{11}$	$10,00\ \text{m} \leq \lambda < 100,00\ \text{m}$ High Frequency $(30 \geq \nu > 3)$ MHz

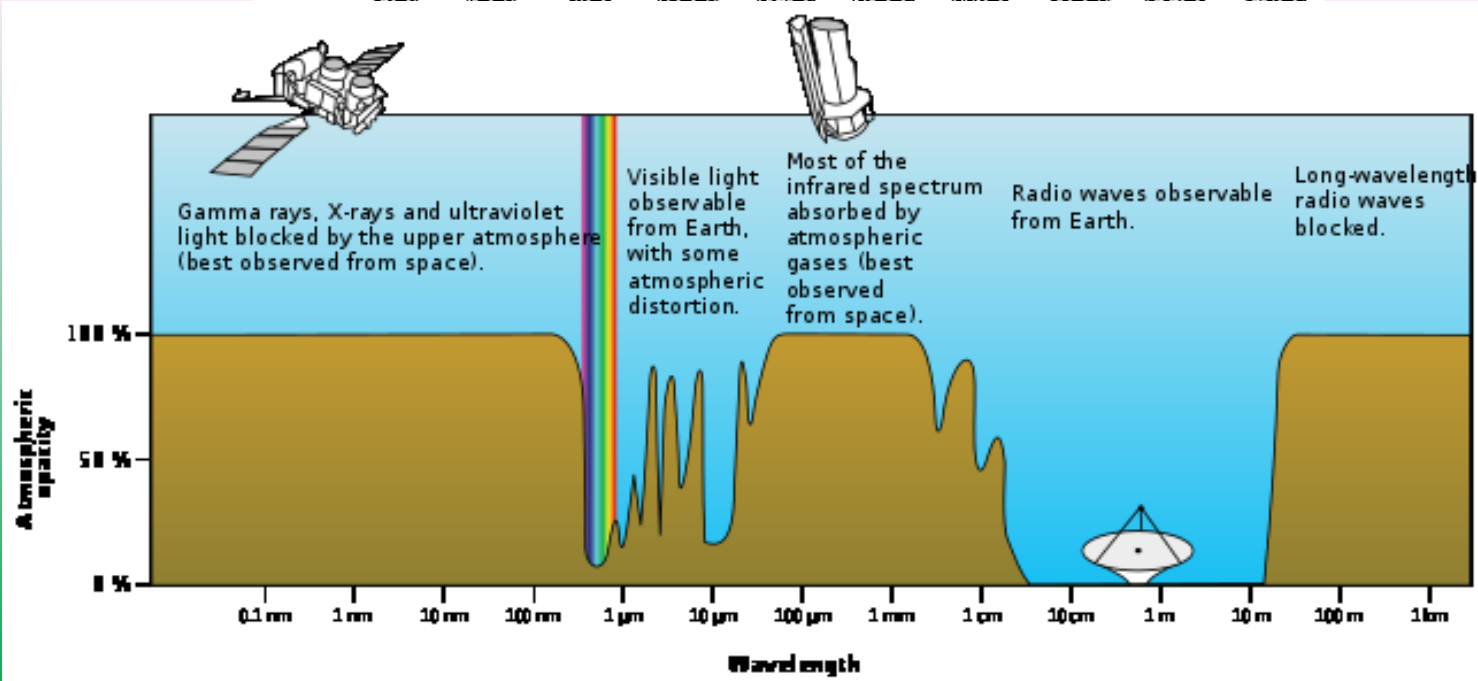
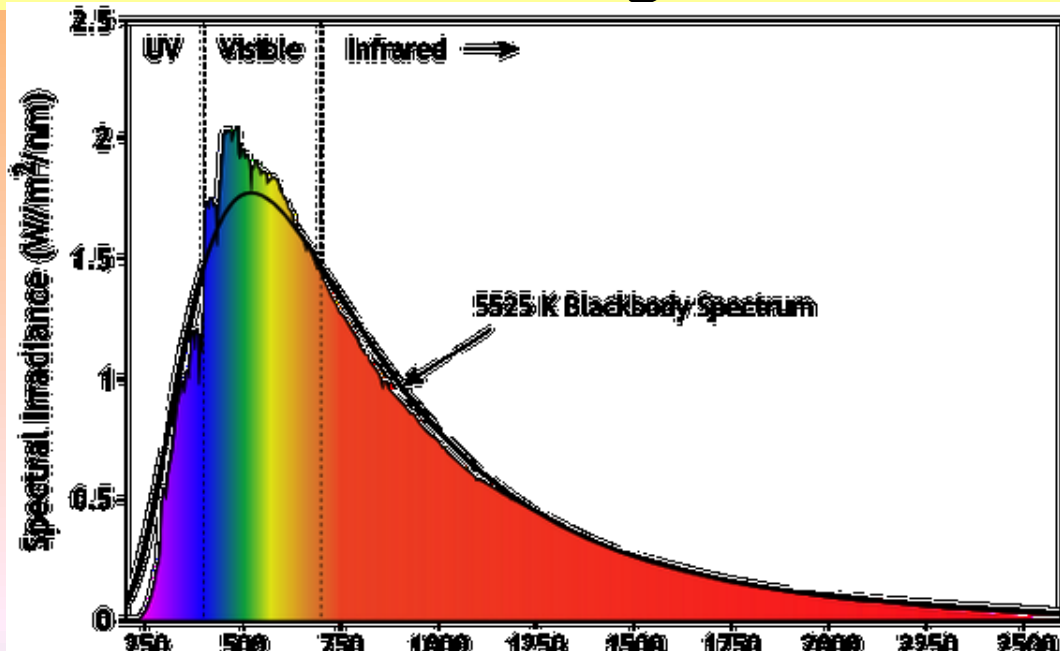
# Espectro electromagnético: UV

Name	Abbreviation	Wavelength range (nm)	Energy per photon (in eV)	Alternative names
Ultraviolet	UV	400 – 100 nm	3.10 – 12.4 eV	
Ultraviolet A	UVA	400 – 315 nm	3.10 – 3.94 eV	long wave, black light
Ultraviolet B	UVB	315 – 280 nm	3.94 – 4.43 eV	medium wave
Ultraviolet C	UVC	280 – 100 nm	4.43 – 12.4 eV	short wave, germicidal
Near Ultraviolet	NUV	400 – 300 nm	3.10 – 4.13 eV	visible to birds, insects and fish
Middle Ultraviolet	MUV	300 – 200 nm	4.13 – 6.20 eV	
Far Ultraviolet	FUV	200 – 122 nm	6.20 – 10.16 eV	
Hydrogen Lyman-alpha	H Lyman- $\alpha$	122 – 121 nm	10.16– 10.25 eV	
Extreme Ultraviolet	EUV	121 – 10 nm	10.25 – 124 eV	
Vacuum Ultraviolet	VUV	200 – 10 nm	6.20 – 124 eV	

# Espectro electromagnético: UV



# Espectro electromagnético: **Visível**

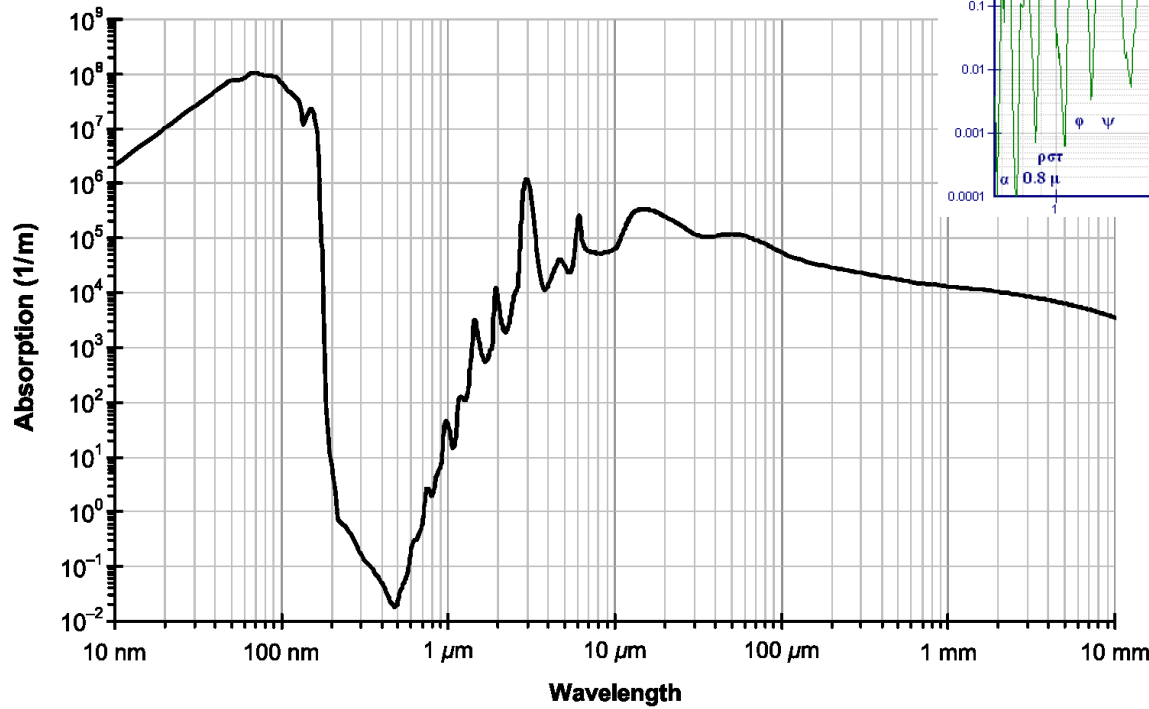
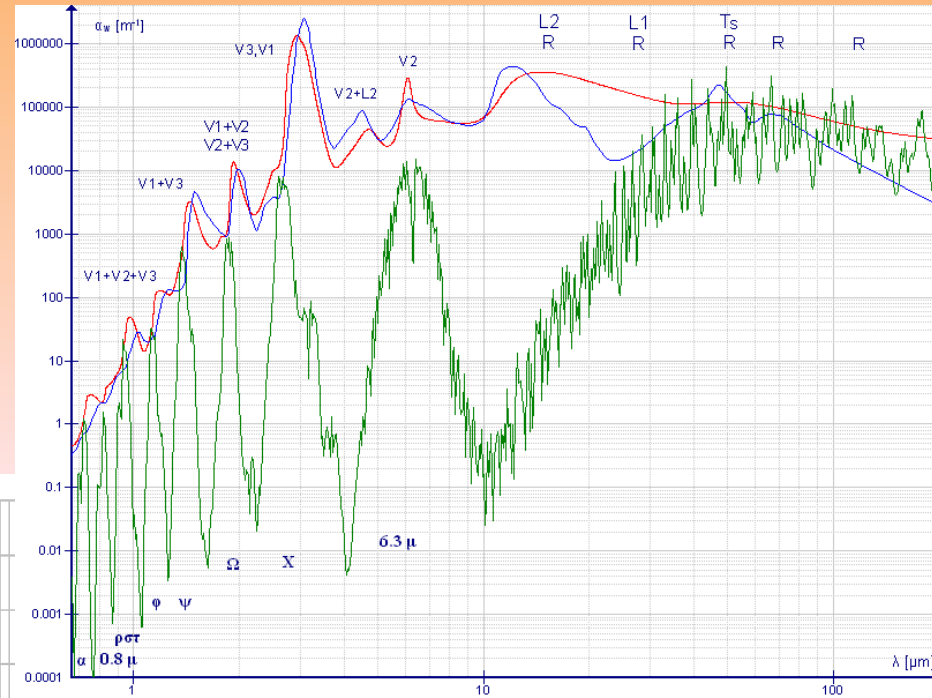


# Espectro electromagnético: IR

NAME		WAVELENGT H	ENERGY	CHARACTERISTICS
Near-IR	NIR, IR-A	0.75– 1.4 $\mu\text{m}$	0.9 - 1.7 <a href="#">eV</a>	Defined by the <a href="#">water absorption</a> , and commonly used in <a href="#">fiber optic</a> telecommunication because of low attenuation losses in the $\text{SiO}_2$ glass ( <a href="#">silica</a> ) medium. Image intensifiers are sensitive to this area of the spectrum. Examples include night vision devices such as night vision goggles.
Short-wavelength IR	SWIR, IR-B	1.4-3 $\mu\text{m}$	0.4 - 0.9 <a href="#">eV</a>	<a href="#">Water absorption</a> increases significantly at 1,450 nm. The 1,530 to 1,560 nm range is the dominant spectral region for long-distance telecommunications.
Mid-wavelength IR	MWIR, IR-C; MidIR	3–8 $\mu\text{m}$	150 - 400 <a href="#">meV</a>	In guided missile technology the 3–5 $\mu\text{m}$ portion of this band is the atmospheric window in which the homing heads of passive IR 'heat seeking' missiles are designed to work, homing on to the <a href="#">Infrared signature</a> of the target aircraft, typically the jet engine exhaust plume. This region is known as <a href="#">thermal infrared</a> , but it detects only temperatures somewhat above body temperature.
Long-wavelength IR	LWIR, IR-C	8–15 $\mu\text{m}$	80 - 150 <a href="#">meV</a>	The <a href="#">"thermal imaging"</a> region, in which sensors can obtain a completely passive image of objects only slightly higher in temperature than room temperature, (for example, the human body), based on thermal emissions only and requiring no illumination such as the sun, moon, or infrared illuminator. <a href="#">Forward-looking infrared</a> (FLIR) systems use this area of the spectrum. This region is also called the "thermal infrared."
Far IR	FIR	15– 1,000 $\mu\text{m}$	1.2 – 80 <a href="#">meV</a>	see also <a href="#">far-infrared laser</a> and <a href="#">far infrared</a> .

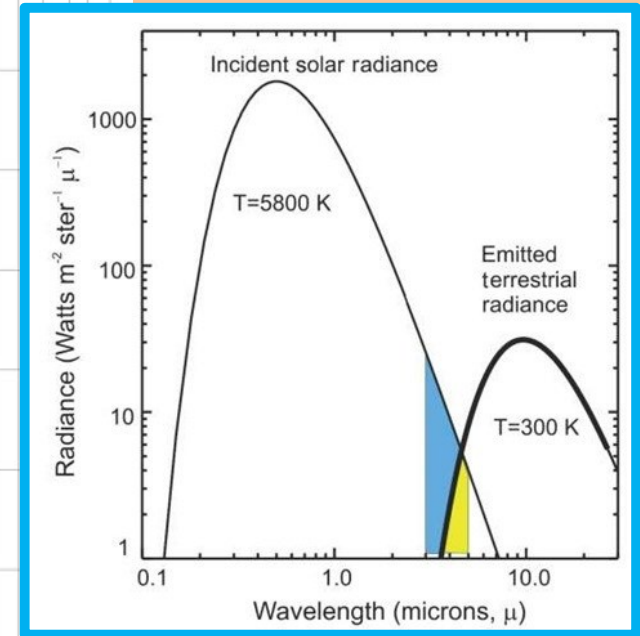
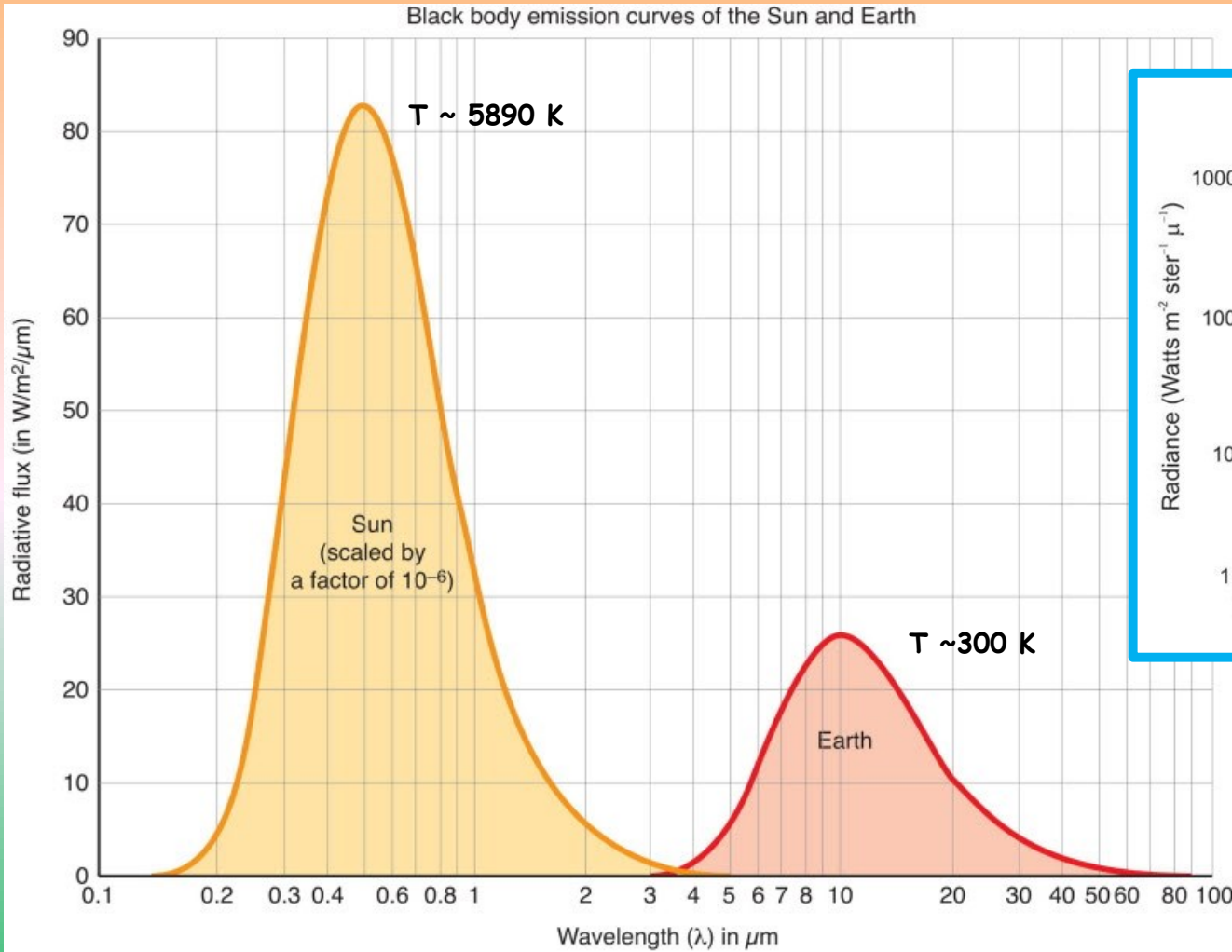
# Água – espectro de absorção

Absorption spectrum of **liquid water** (red), **atmospheric water vapor** (green) and **ice** (blue line) between 667 nm and 200  $\mu\text{m}$ .



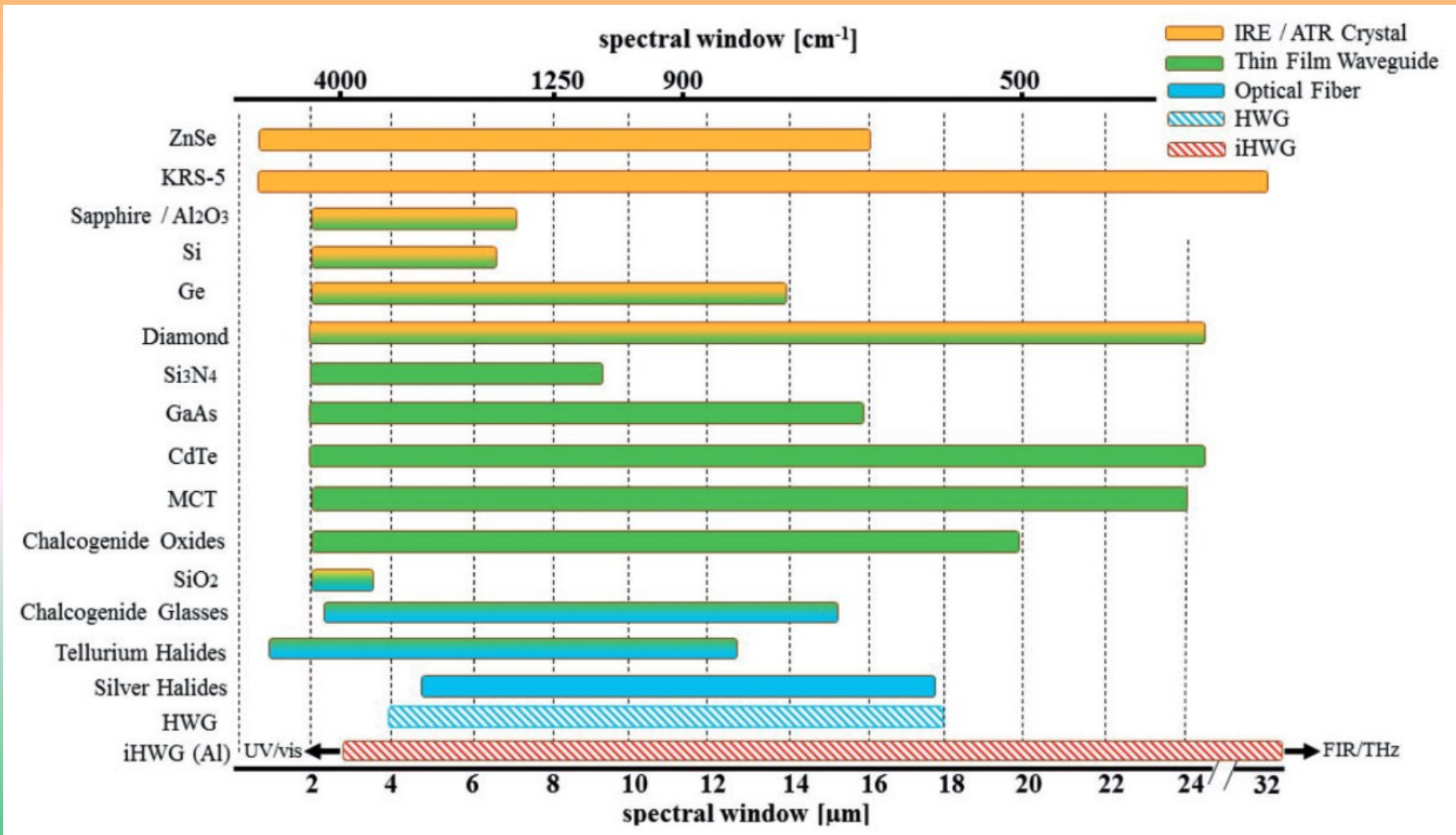
Ultraviolet   VIS   Near IR   Mid IR   Far IR   EHF

# Espectro electromagnético: IR





# Materials para o IR



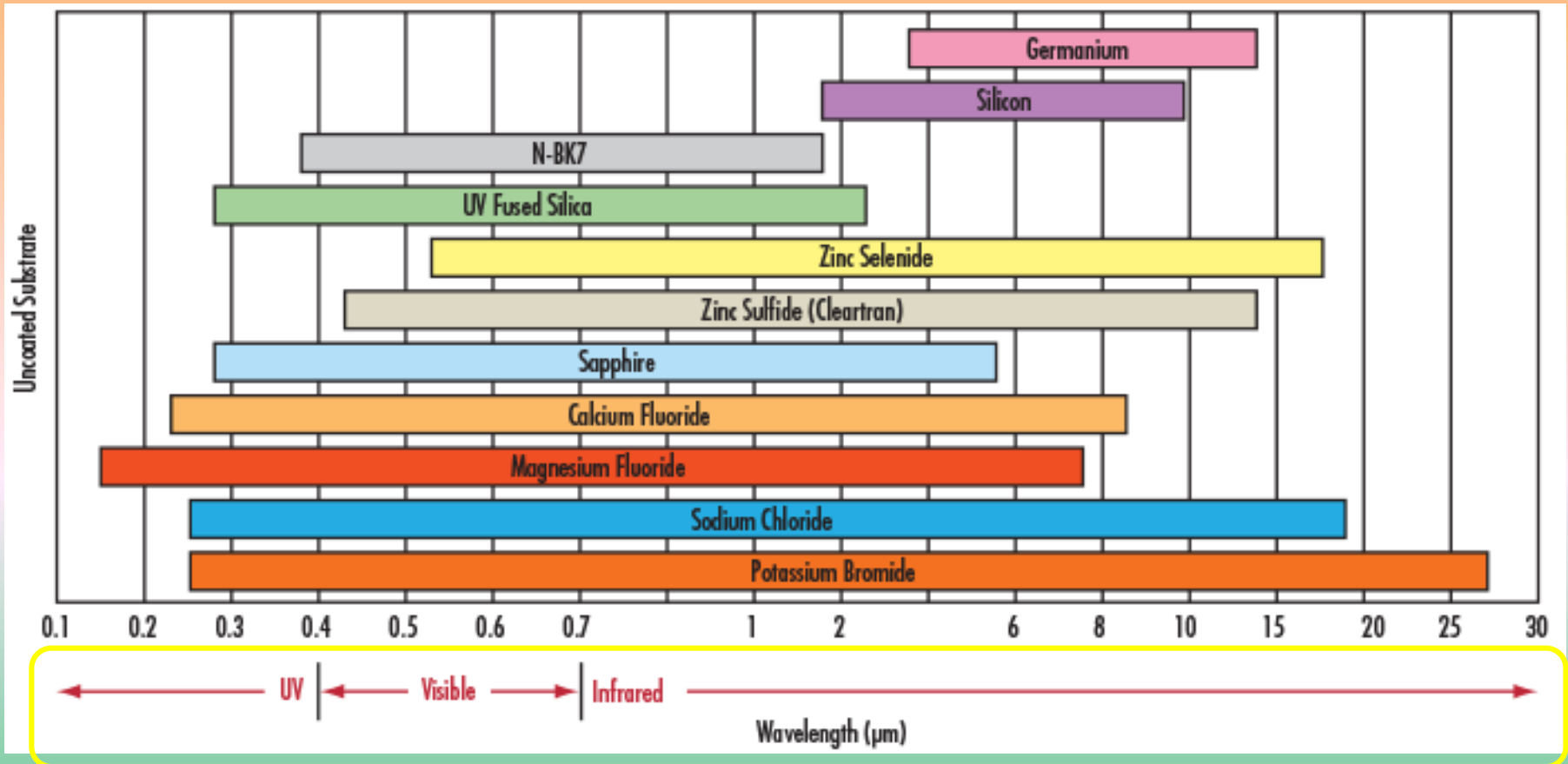
## Mid-Infrared Waveguides: A Perspective

Thomas Schadle and Boris Mizaikoff

Applied Spectroscopy 2016, Vol. 70(10) 1625-1638

[https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/481C1975-FC64-B878-15EDC7035357D8A5\\_352479/as-70-10-1625.pdf?da=1&id=352479&seq=0&mobile=no](https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/481C1975-FC64-B878-15EDC7035357D8A5_352479/as-70-10-1625.pdf?da=1&id=352479&seq=0&mobile=no)

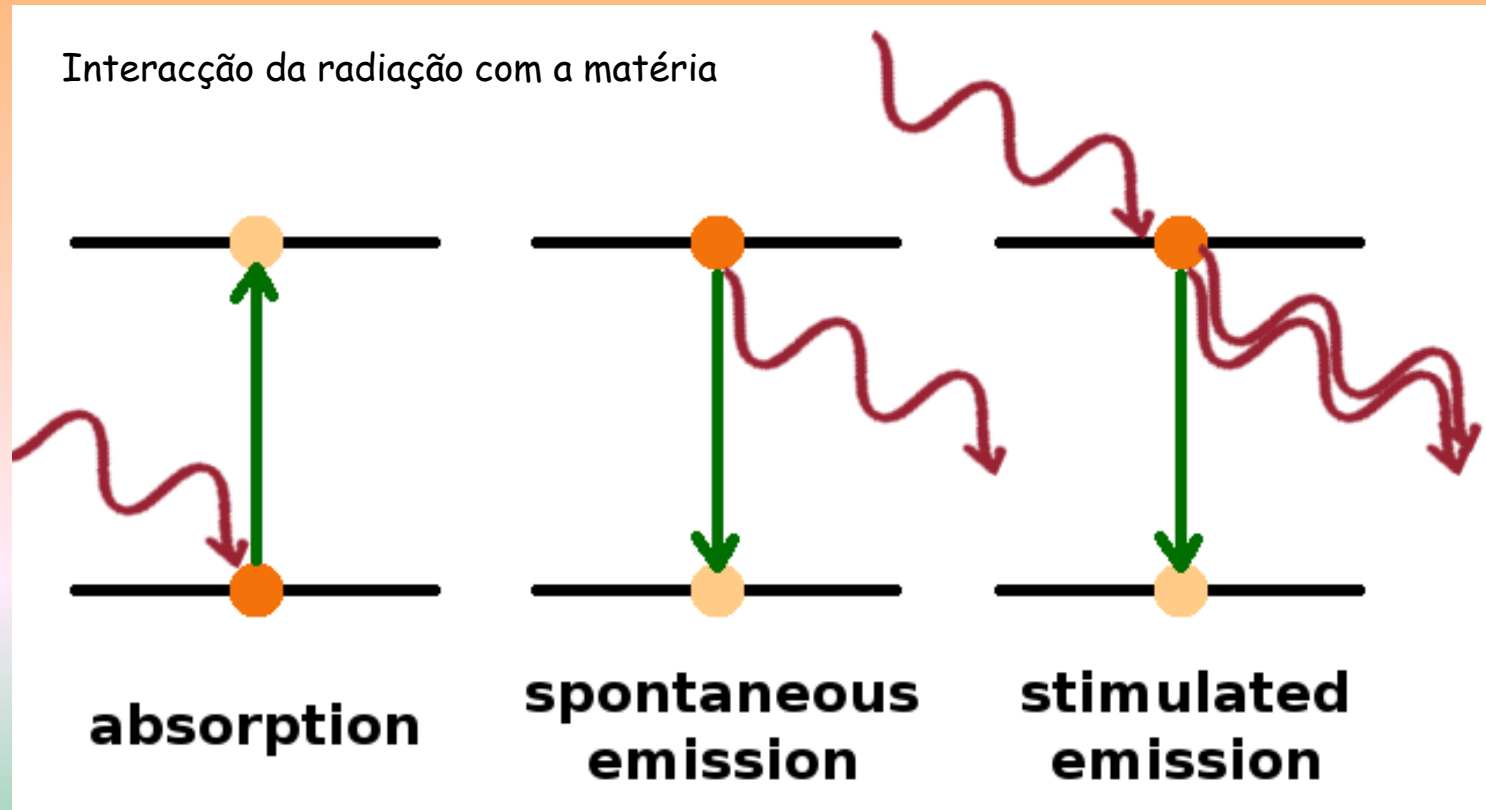
# Materiais e absorção espectral



Índice de refração,  $n = c/v$

$$n \rightarrow n(\omega) - ik(\omega)$$

# Absorção e emissão de radiação

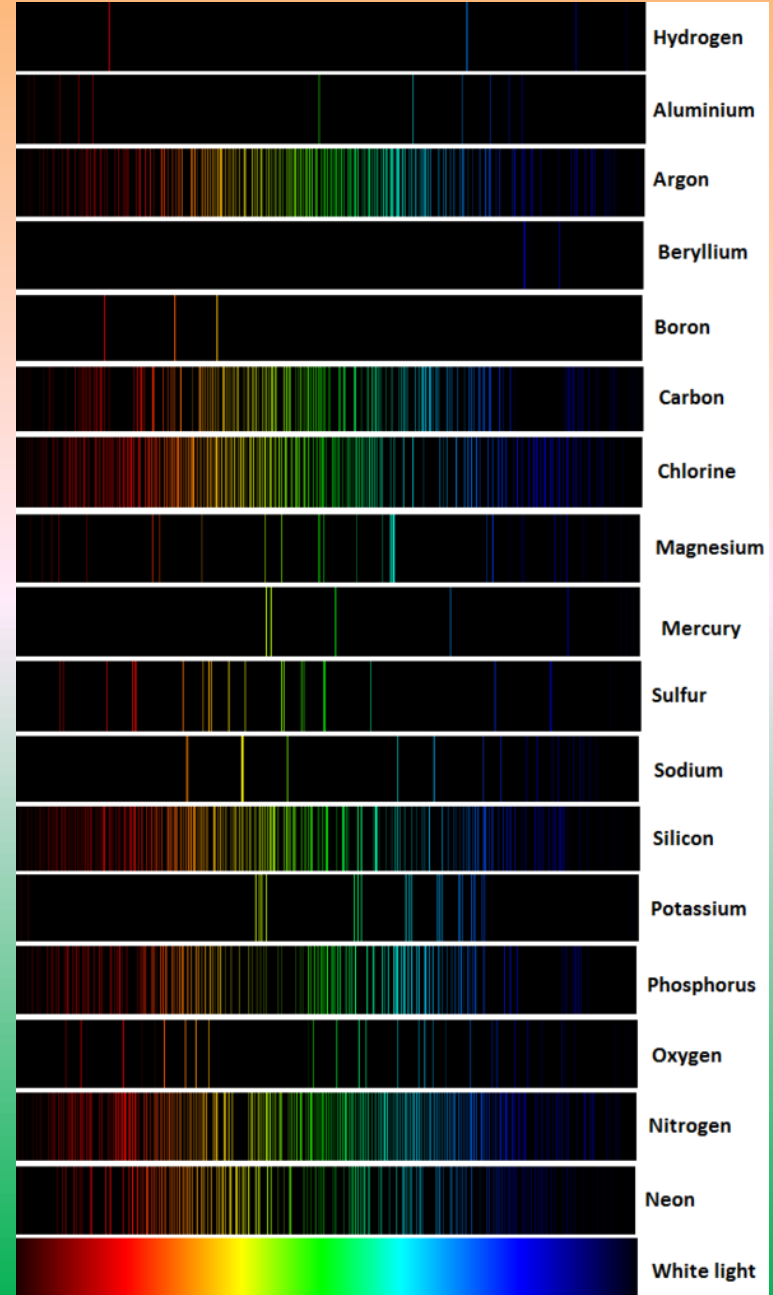
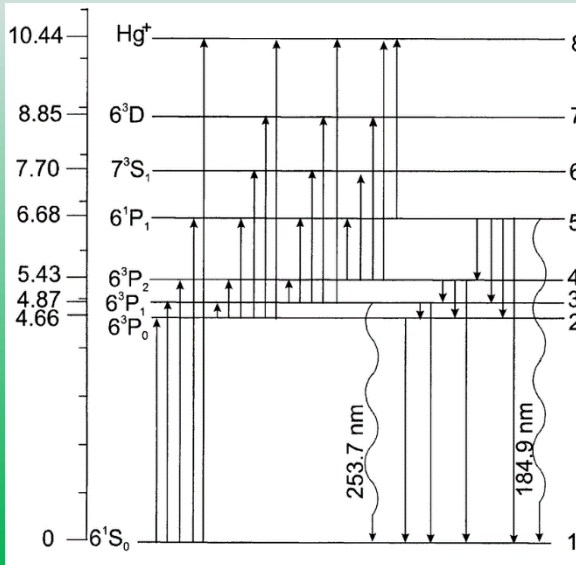
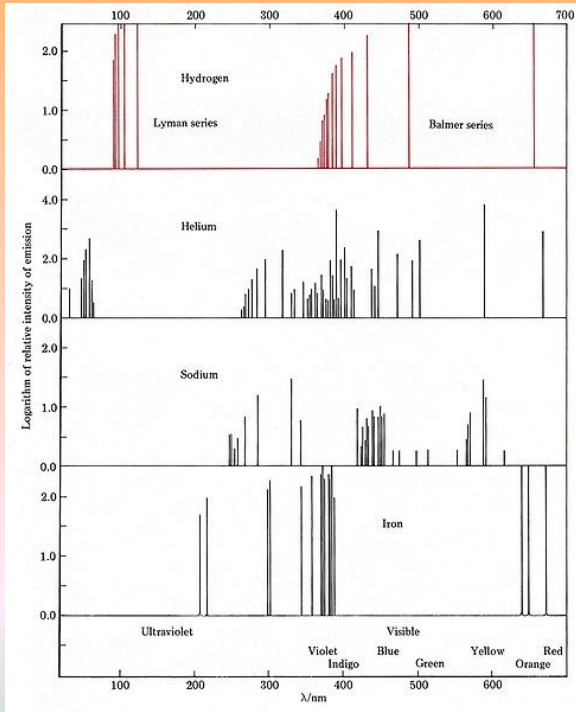


Geração de radiação por cargas eléctricas aceleradas (radiação de *Bremsstrahlung*)

Emissão do corpo negro (escala macroscópica): Se  $T > 0$ , um sistema físico na busca de equilíbrio térmico com o seu exterior, radiando a energia que tem em excesso

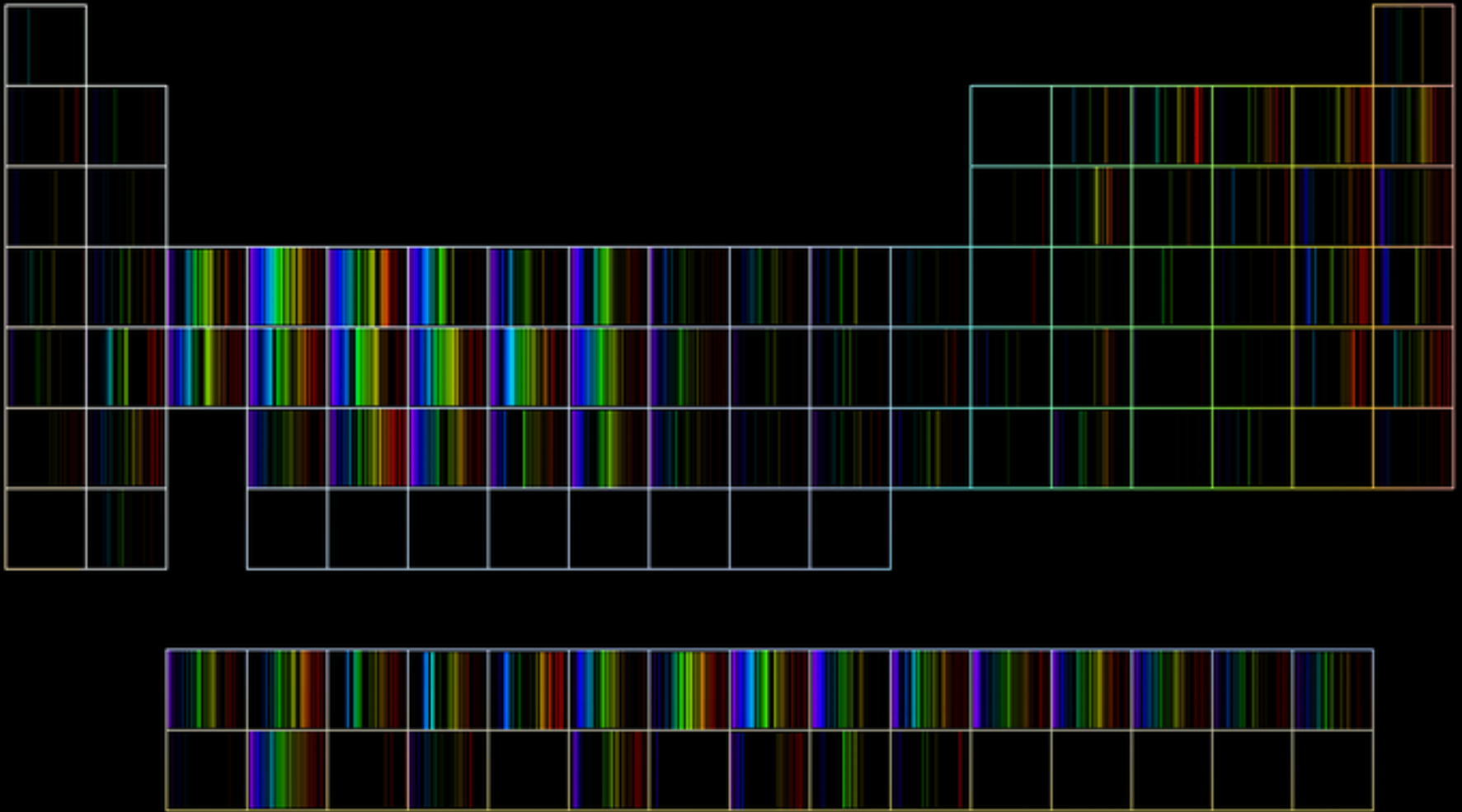
Processos nucleares (fusão)

# Espectros e bandas

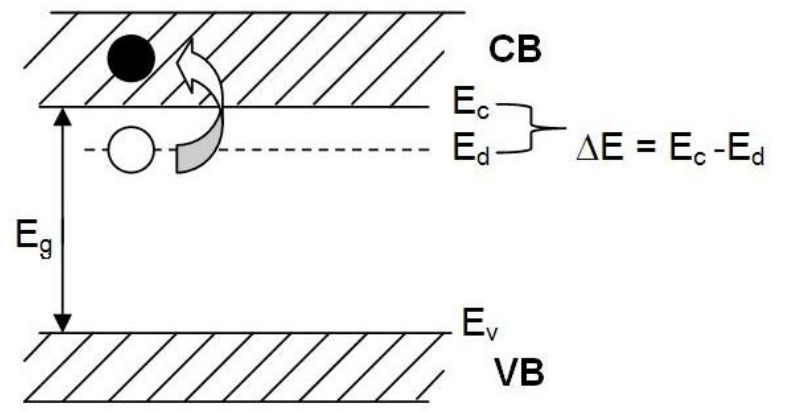
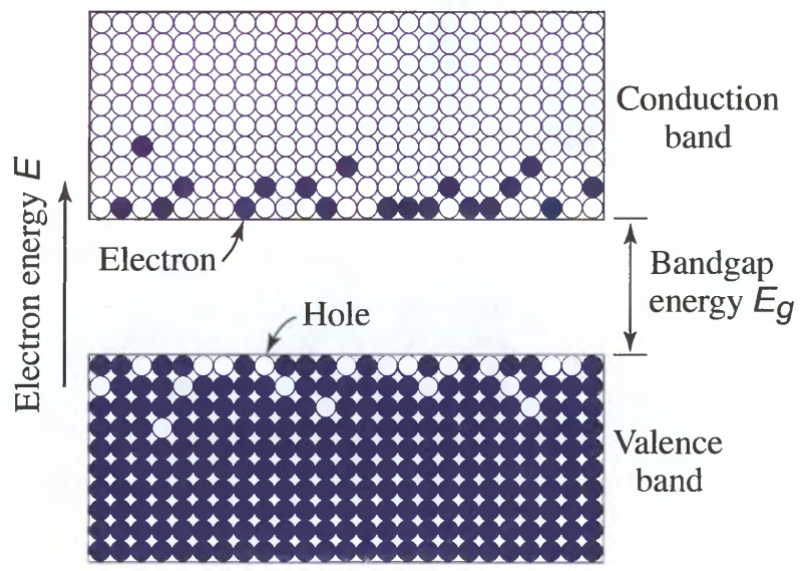
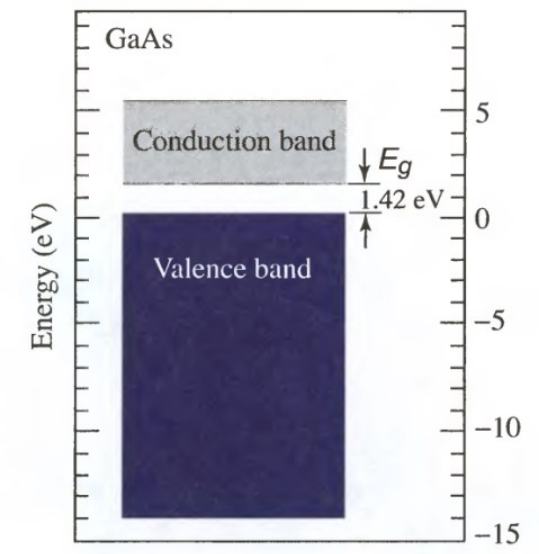
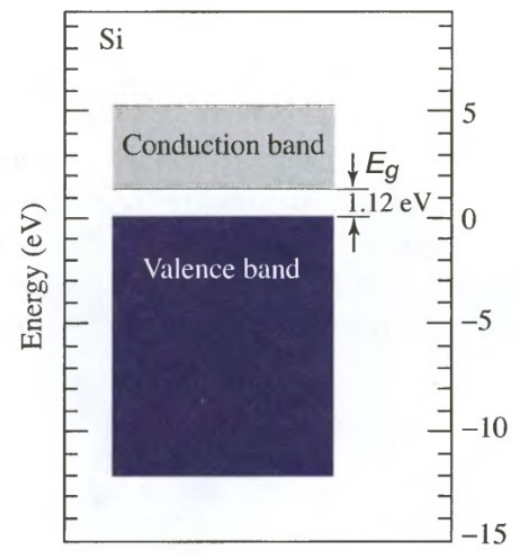
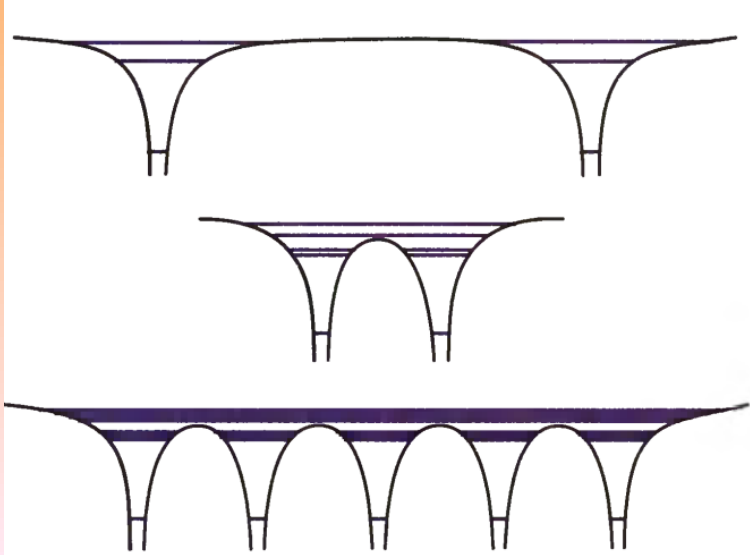


# Espectros e bandas

## Emission Spectra of the Elements

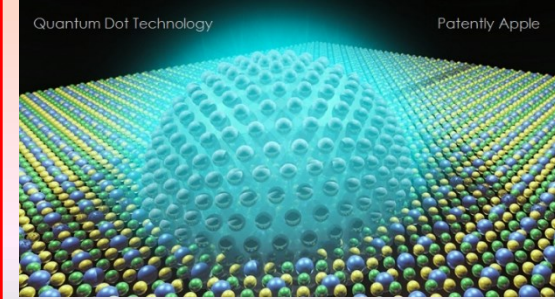
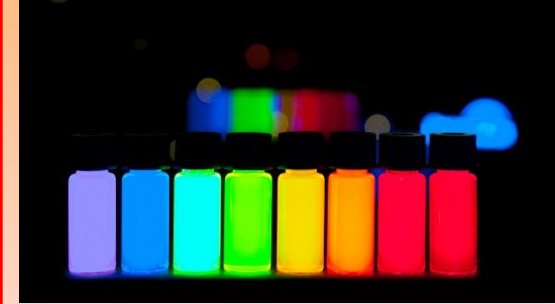
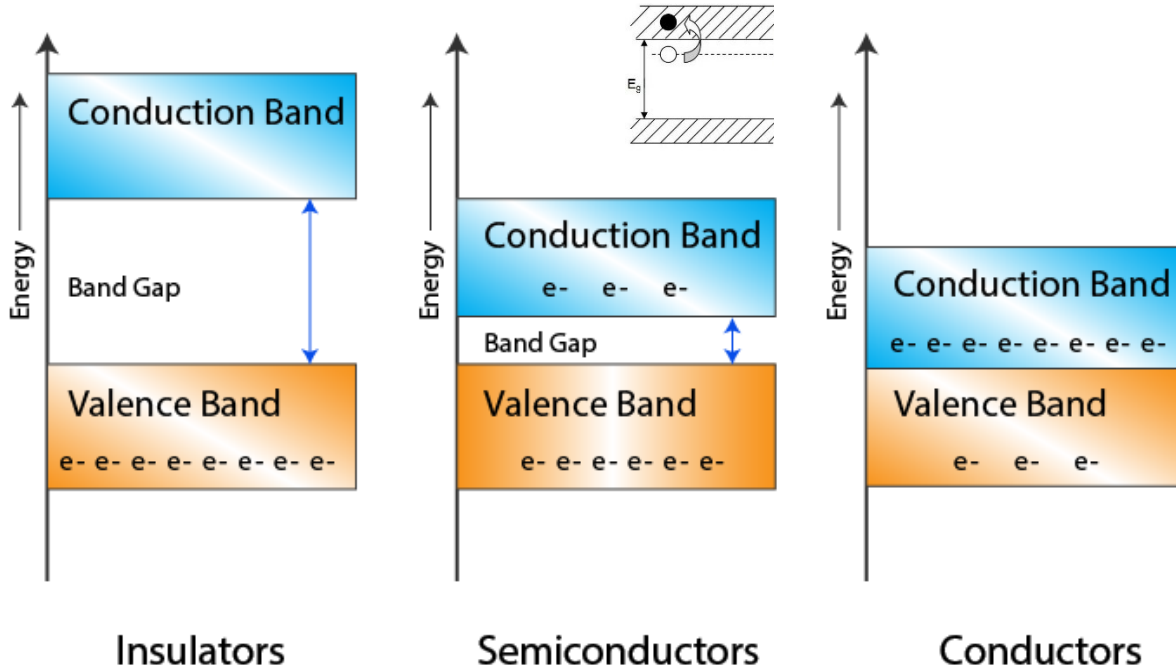


# Espectros e bandas

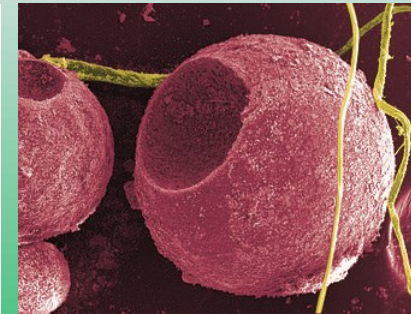
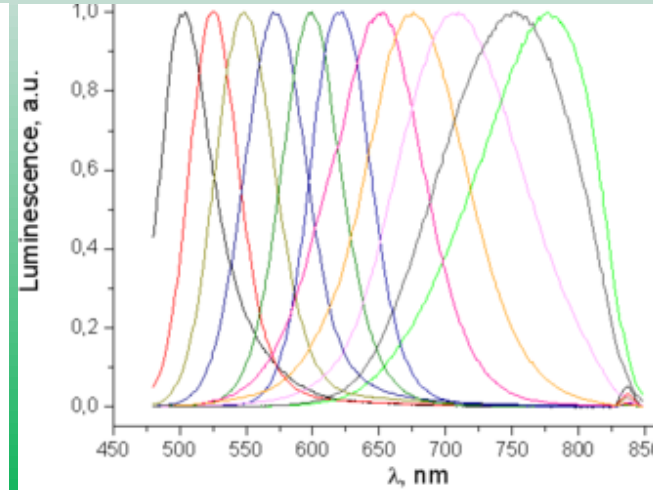
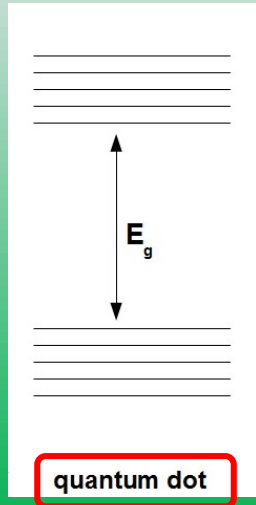
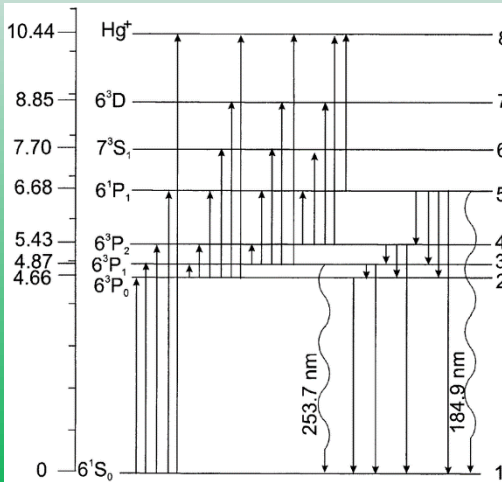




# Espectros e bandas



<https://www.patentlyapple.com/patently-apple/2017/11/apple-patent-found-in-australia-details-work-on-future-product-displays-using-micro-leds-with-quantum-dot-technology.html>



[https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_dot](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot)



# Fontes de luz: Luminescência

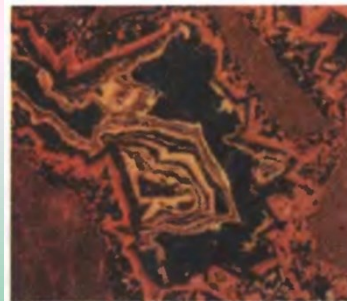
Fontes **térmicas**: fontes **macroscópicas**, a radiação emitida é função da temperatura: Lei de Plank, radiação do corpo negro, corpos cinzentos, emissividade, ...

Para além da excitação **térmica**, a nível não-macroscópico, há processos que provocam excitação e subsequente des-excitação, **com emissão de fótons**

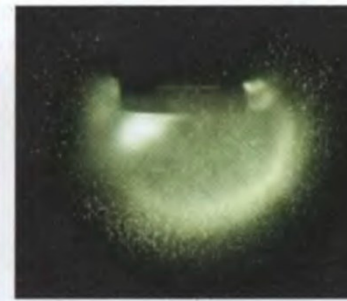
Fontes que radiam por processos **não térmicos**: **fontes luminescentes**

Processo radiativo associado: **luminescência**, que pode ser:

- Catodoluminescência
- Sonoluminescência
- Quimoluminescência
- Bioluminescência
- Electroluminescência
- **Fotoluminescência**



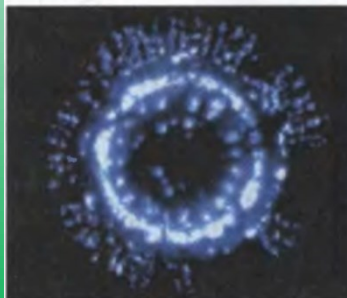
(a) Cathodoluminescence



(b) Sonoluminescence



(c) Chemiluminescence



(d) Bioluminescence



(e) Electroluminescence



(f) Photoluminescence

# Tipos de Luminescência

## ➤ Catodoluminescência

Luz emitida por um material como resultado da excitação por electrões energéticos

## ➤ Sonoluminescência

Emissão de luz induzida por cavitação acústica: criação, crescimento e colapso de bolhas num líquido irradiado por sons ou ultrassons intensos

## ➤ Electroluminescência

Emissão de luz resultante da aplicação de um campo eléctrico a um material (exemplo: LED ou injeção de portadores de carga numa junção)

## ➤ Fotoluminescência / radioluminescência

Luz emitida decorrente da absorção de fotões normalmente mais energéticos (UV, X ou  $\gamma$ )

## ➤ Quimoluminescência

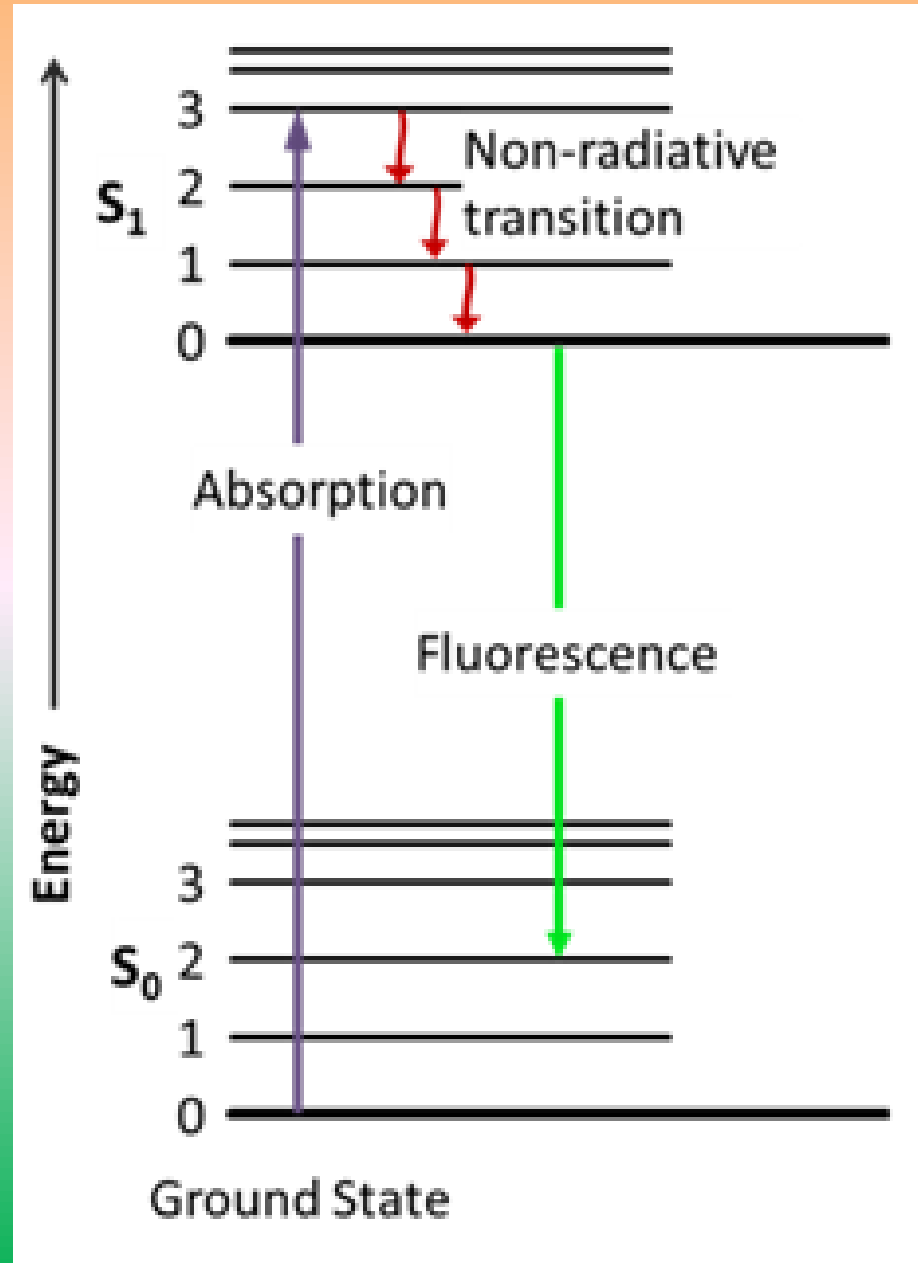
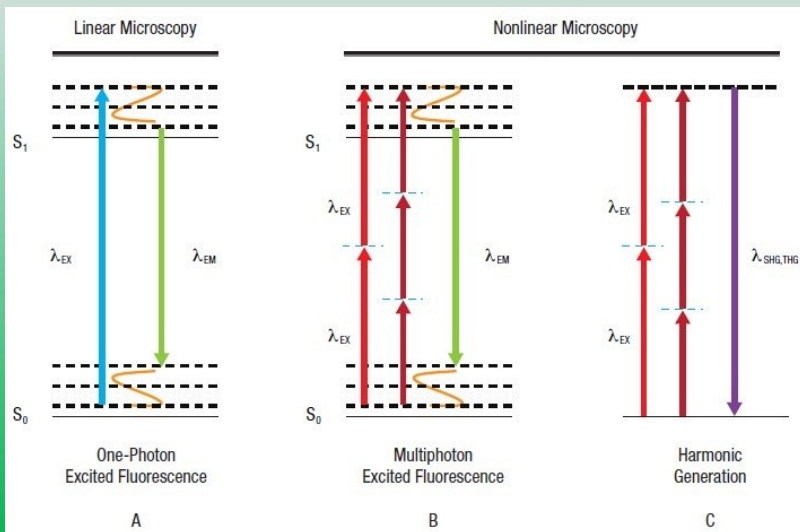
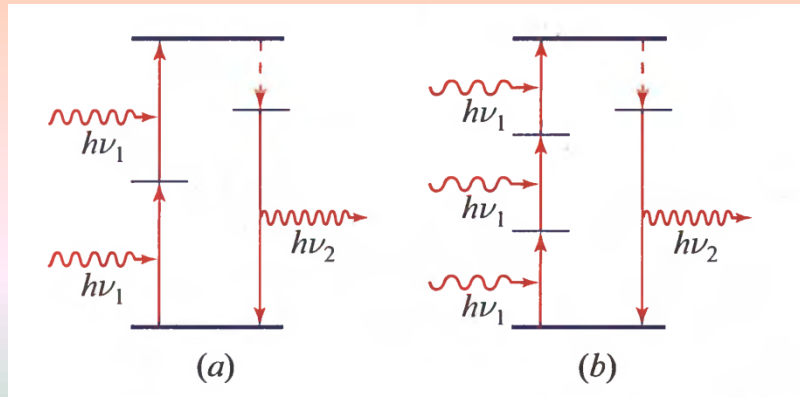
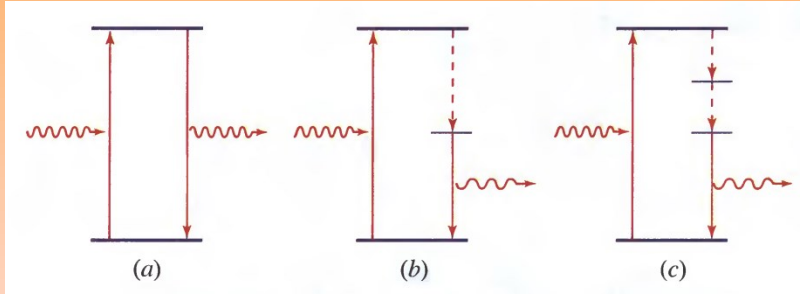
Emissão de luz decorrente de reacção química, com os produtos de reacção num estado excitado.

## ➤ Bioluminescência

Quimoluminescência produzida por organismos vivos

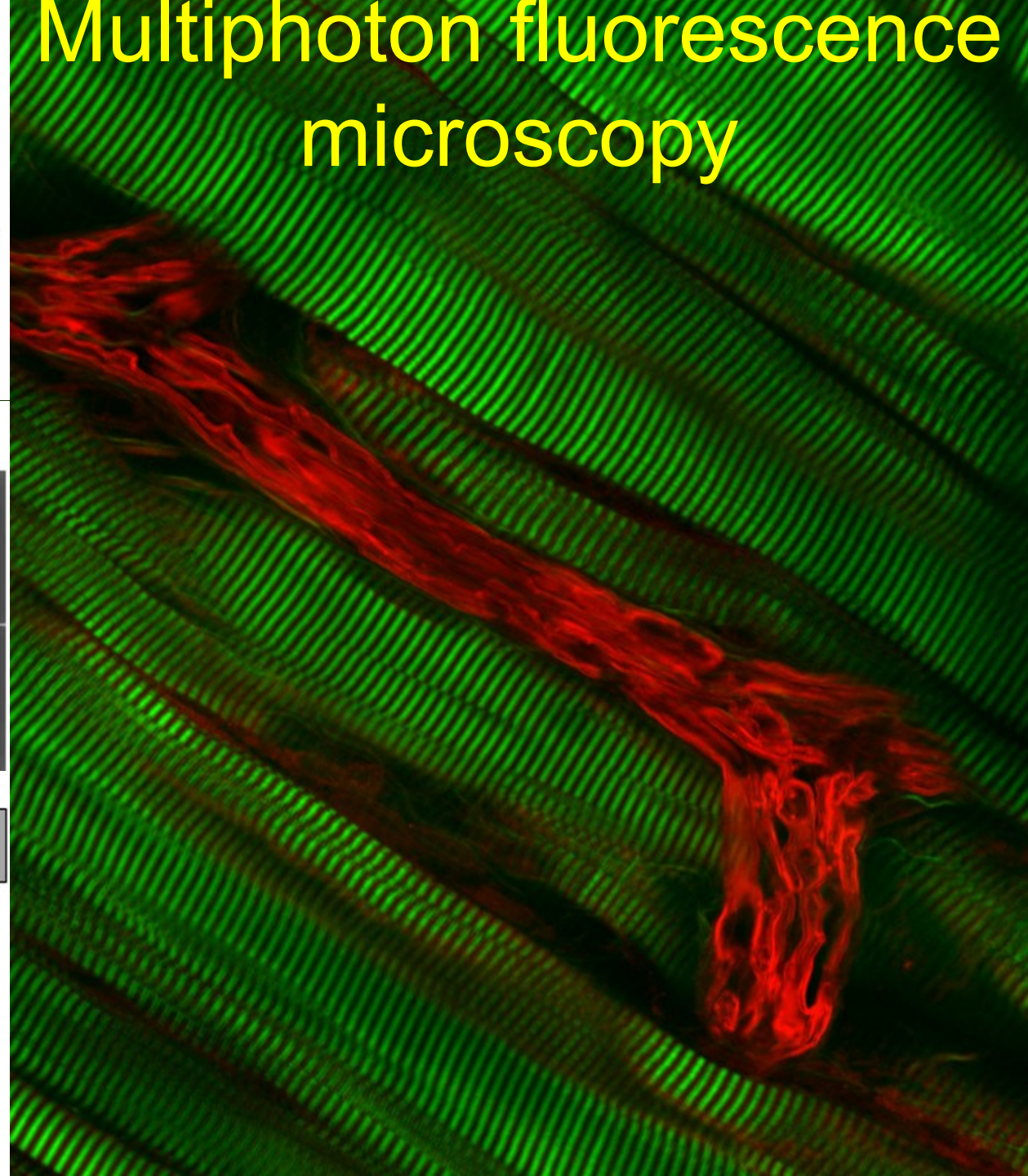
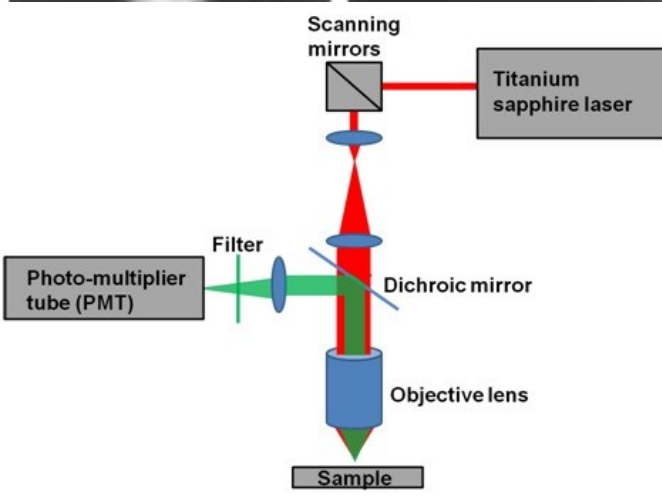
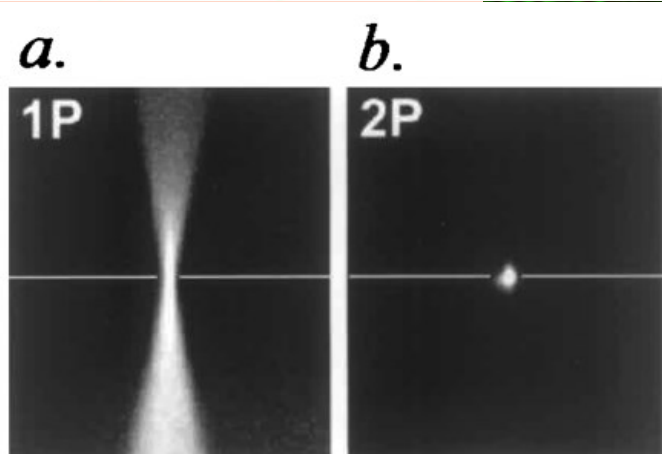
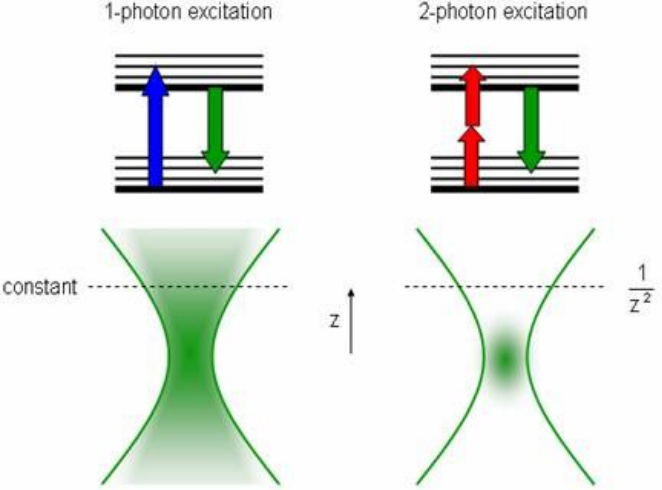


# Fotoluminescência: fluorescência / fosforescência





# Multiphoton fluorescence microscopy



# A - Paradigmas

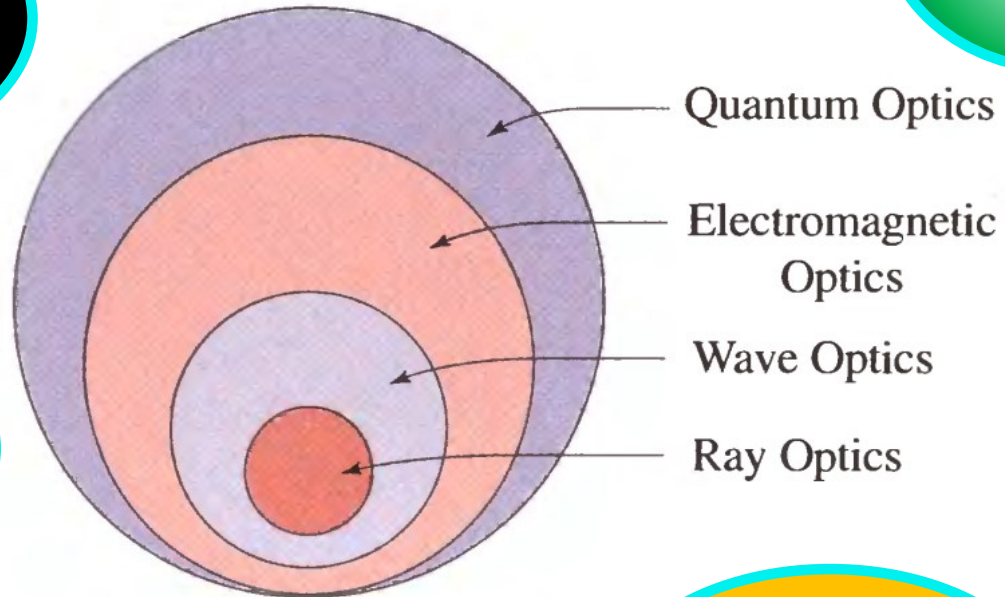
**ELECTRO-  
MAGNÉTICO**

**ONDULATÓRIO**

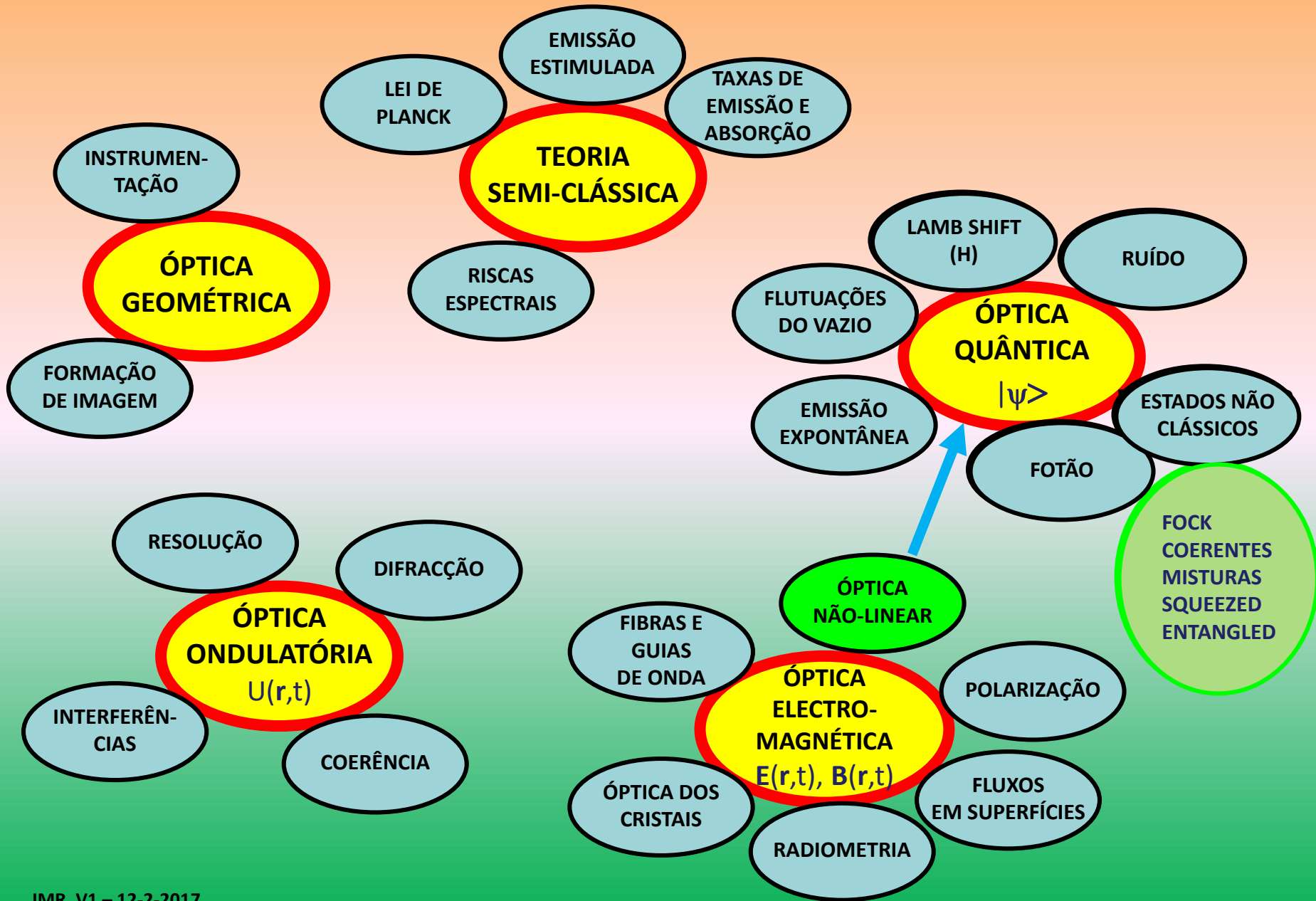
**ÓPTICA  
GEOMÉTRICA**

**QUÂNTICO**

**A  
RETER...**

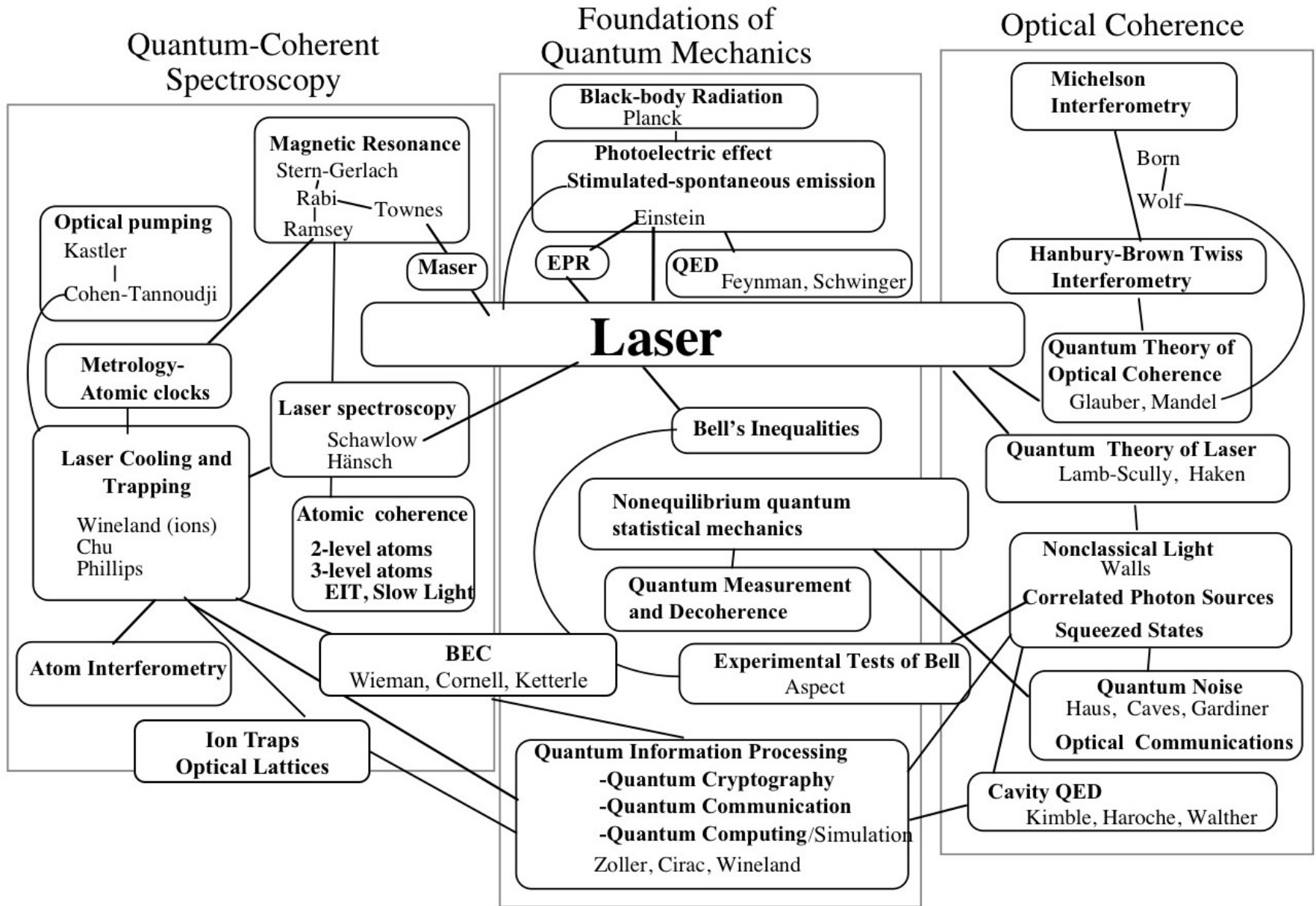


# Paradigmas e Fenomenologia da Óptica



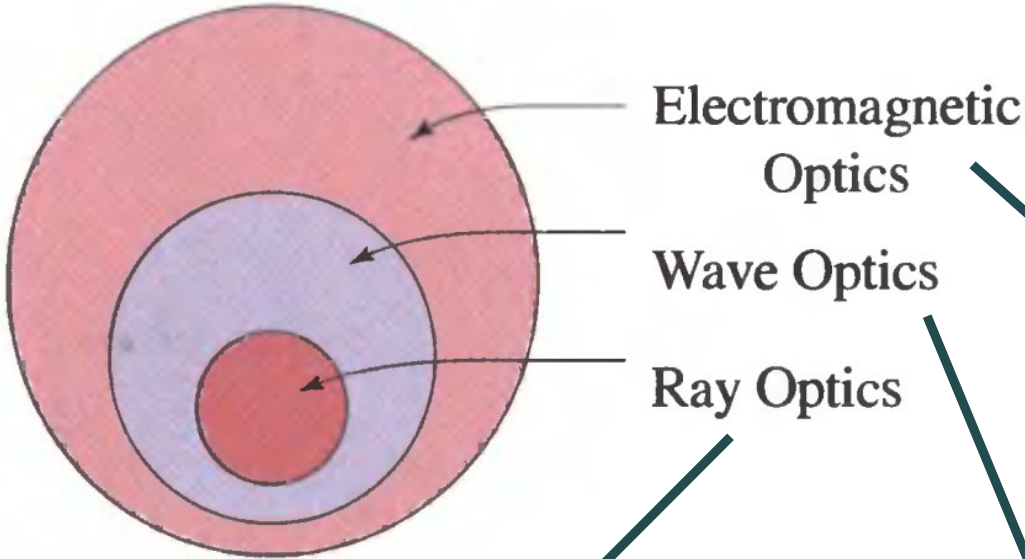


# Mapa conceptual: Óptica Quântica

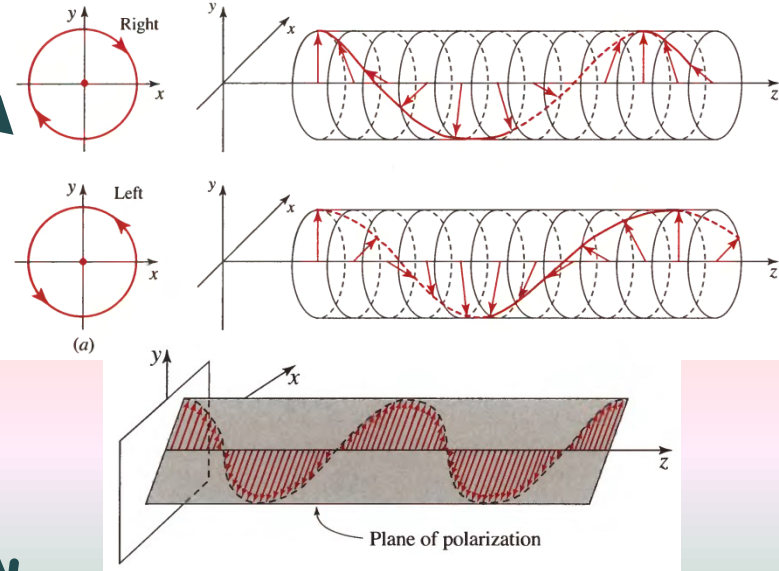




# Níveis de aproximação em EM

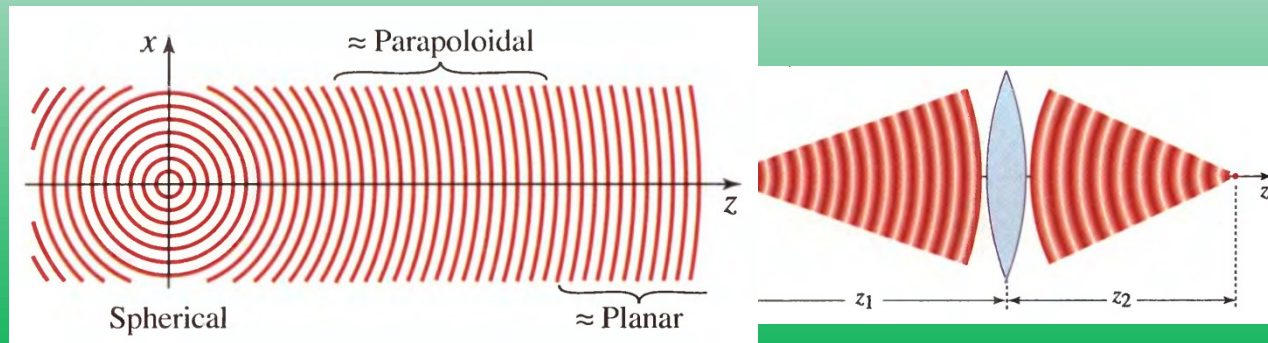
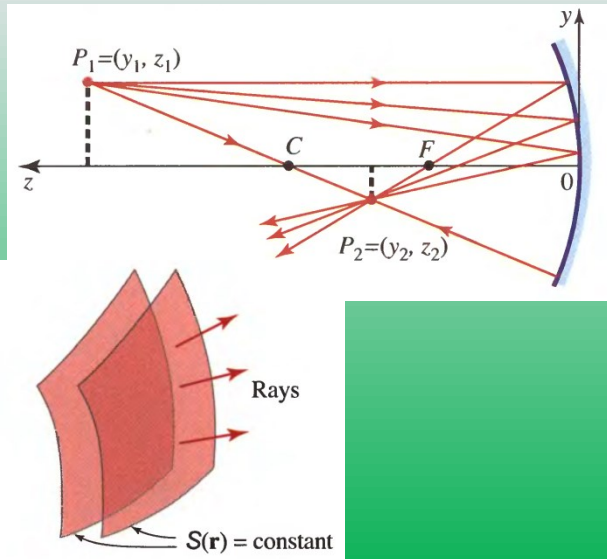


Natureza **vectorial** dos campos **E** e **H**  
Polarização



A luz é descrita através de raios luminosos

Natureza **escalar** da função de onda,  $U(\mathbf{r}, t)$



# Paradigmas “não quânticos”

## Geométrico

Equação do Eikonal

Conceitos: Feixes; Raios luminosos / superfícies de igual fase

Matéria: índice de refração,  $n=c/v$

Fluxos: Radiância,  $L$  [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{sr}$ ], “transportada” ao longo de um raio luminoso...

Observáveis: Forma e contraste da imagem / projecção de feixes em planos

## Electromagnético

Equações de Maxwell

Campos vectoriais:  $\mathbf{E}$ ,  $(\mathbf{D})$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $(\mathbf{B})$ ,  $\mathbf{S}$

Fenomenologia: Polarização

Matéria:  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\chi$ ,  $\mathbf{J}$ , ... ( $\rightarrow n$ )

Observáveis:  $\mathbf{E}$  (Irradiância,  $\text{W}/\text{m}^2$ ),  
repartição do fluxo entre meios

## Ondulatório

Equação de ondas

Campo escalar:  $U(\mathbf{r},t) = |U(\mathbf{r},t)| e^{i\Phi(\mathbf{r},t)}$

Fenomenologia: interferências,  
difracção, ...

Matéria:  $n$

Observáveis:  $\mathbf{E}$  (Irradiância,  $\text{W}/\text{m}^2$ )