

Ondas Electromagnéticas e Óptica

José Manuel Rebordão
João Pinto Coelho

NOTA

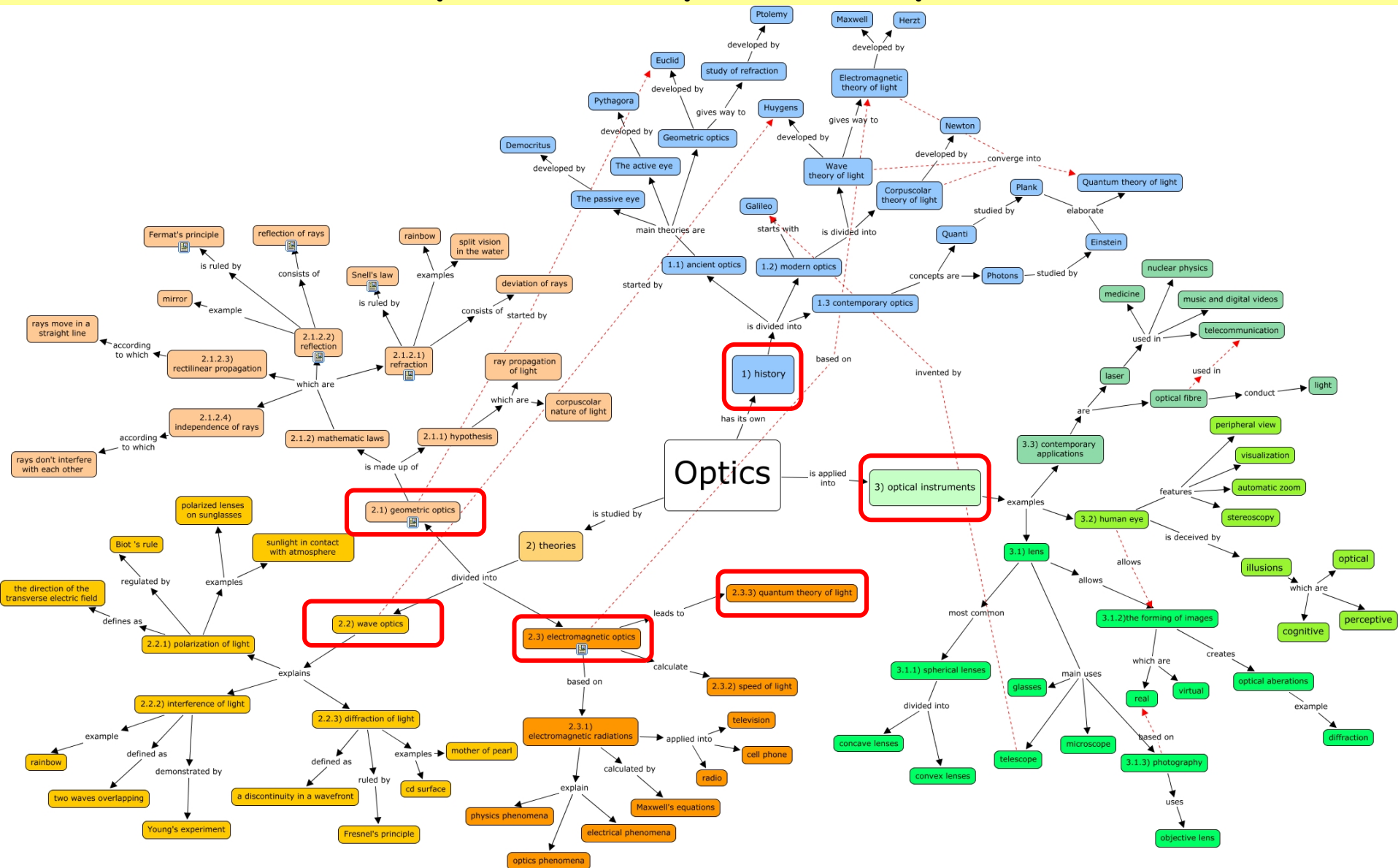
Muitas das páginas seguintes utilizam muitas imagens livremente disponíveis na Web.

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.

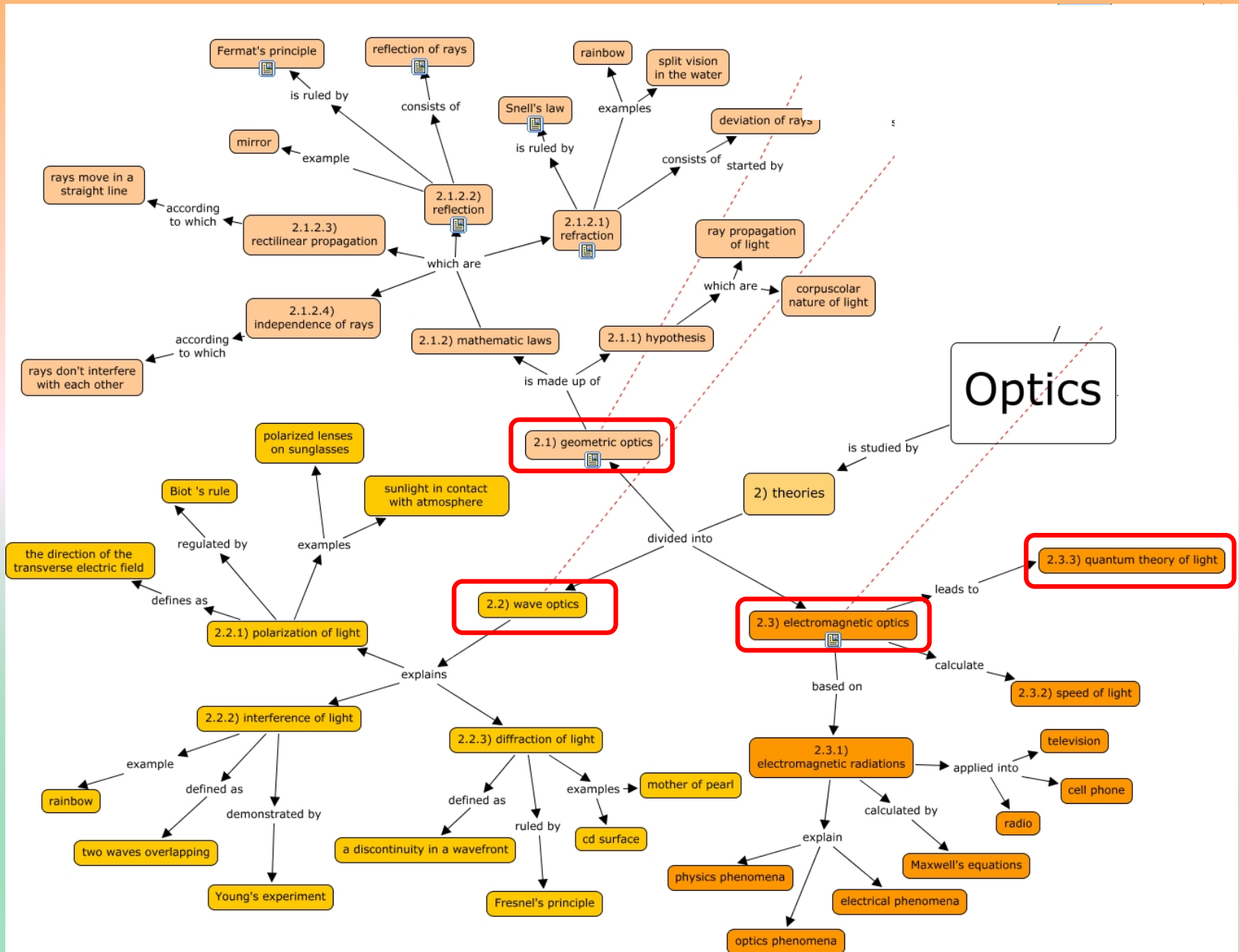
Mapa conceptual: Óptica



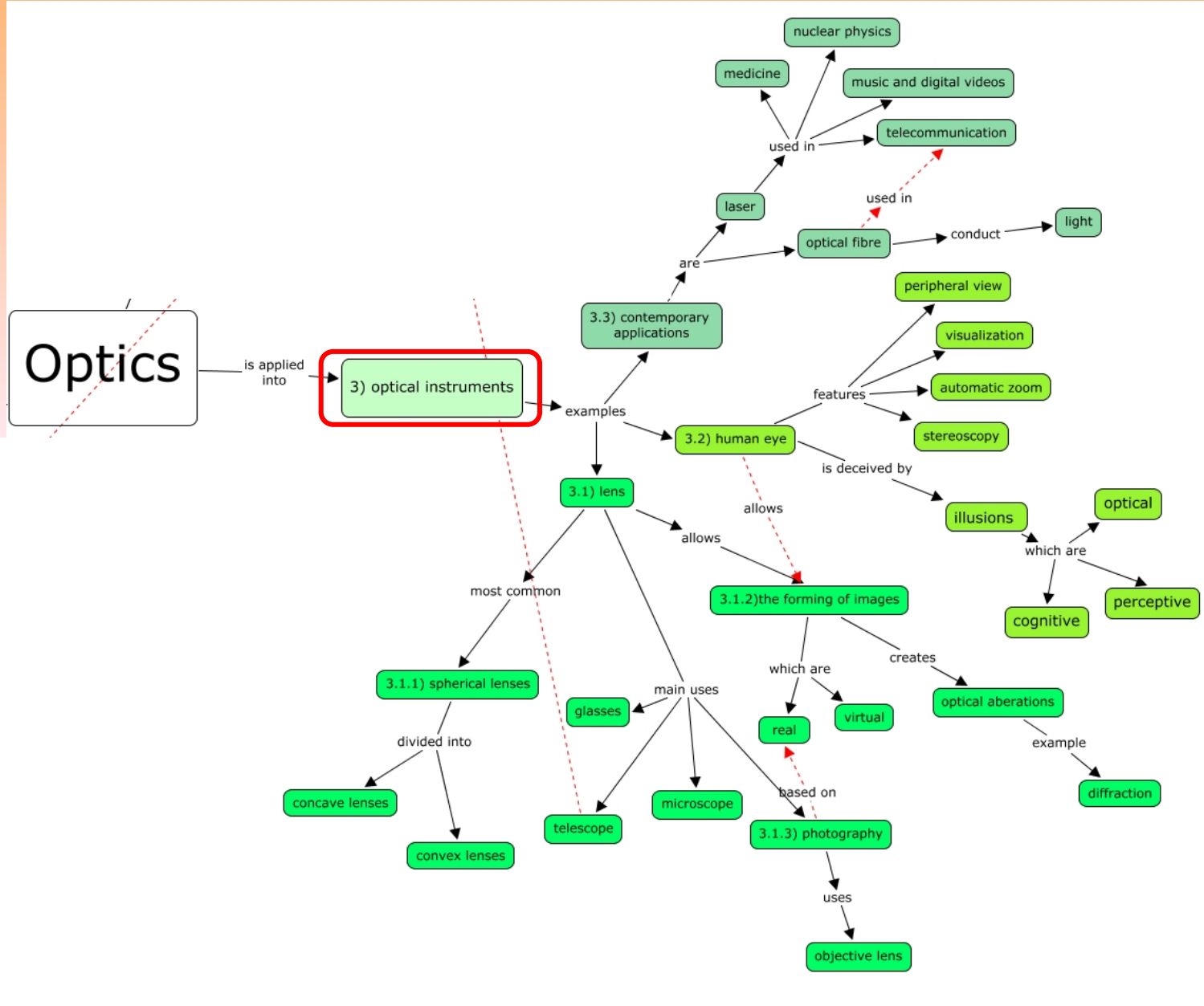
Disponível no FÉNIX - Ver Elementos de Estudo

http://cmapspublic3.ihmc.us/rid=1194352461531_1097666020_8666/optics%20concept%20map.cmap

Mapa conceptual: Óptica



Mapa conceptual: Óptica



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 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.

Referências ao mundo da **Fotónica**, sempre que possível, com ênfase nas propriedades dos materiais, nas fontes e detectores de luz e nas formas de utilização de feixes de fótons para diversas funcionalidades.

Programa

1. Paradigmas
2. Elementos de óptica geométrica
3. Conceitos de Óptica Electromagnética
4. Propriedades e fenómenos ondulatórios
5. *Radiometria e Fotometria(s)*
6. *Luminescência e dispersão (scattering)*
7. *Lasers*

Programa detalhado

1. Paradigmas

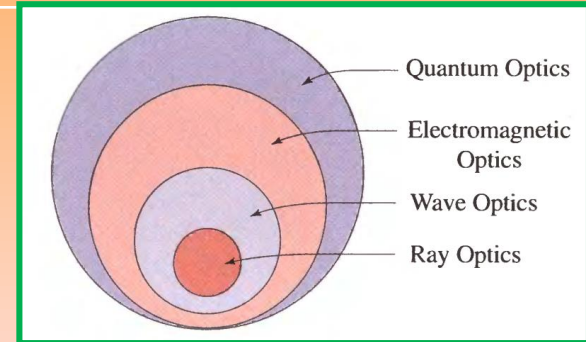
- Geométrico, ondulatório, vectorial, quântico

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. Óptica Ondulatória

- Equações de onda e soluções: planas, esféricas, paraxiais, gaussianas, outras.
- Propagação, princípio de Huygens-Fresnel
- Difracção, regimes de aproximação
- Interferências e interferómetros

5. Óptica Electromagnética

- 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

Programa detalhado

6. Radiometria e Fotometria(s)

- *Grandezas, unidades e principais resultados*
- *Fotometria(s)*
- *Propagação da luz: fonte → detector*
- *Mecanismos de interacção da radiação óptica com a matéria: biológicos, outras*

7. Lasers

- *Princípios de funcionamento, ganho, riscas espectrais; arquitecturas*
- *Subsistemas: bombeamento, cavidade ressonante, feixes gaussianos*
- *Geração de impulsos*
- *Exemplos de sistemas laser*
- *Exemplos de aplicação: biomédicas, outras*
- *Segurança laser*

Síntese dos objectivos de aprendizagem

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA

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

OBJECTIVOS DE APRENDIZAGEM / ORIENTAÇÕES PARA ESTUDO

18-2-2020

Fénix,
Informações
Úteis, nº 4
(2 páginas)

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 $n^{\text{ésimo}}$ 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 [em Óptica Ondulatória]

1. Linearidade da **equação de ondas** e sua importância na geração de soluções complexas com base em combinações lineares de

Bibliografia

Todos

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>

Aulas (confinamento, 2020/21) - ver Fénix

➤ Teóricas sala Zoom: 979 0153 9222 (J. M. Rebordão)

- Na 1ª semana, por Zoom, síncronas, com apresentação de matéria.
- Aulas disponibilizadas em formatos Power Point (ppsx) e vídeo (mp4), numa directoria OneDrive da Universidade de Lisboa, à qual têm acesso.
- A correspondência entre aulas e ficheiros não é biunívoca: alguns ficheiros podem corresponder a 1 aula, outros a 2 aulas. As correspondências estarão claramente identificadas no ficheiro Word README.doc, e incluídas nos sumários.
- Todas as 2ª feiras, às 15:00h (horário) farei uma sessão Zoom síncrona, para focar um outro aspecto dos conteúdos das aulas anteriores, responder a dúvidas, etc.
- O horário das outras aulas teóricas (4ª e 5ª às 16:00h) também será utilizado para sessões síncronas de dúvidas.

➤ TEÓRICO-PRÁTICAS - sala Zoom: 884 8156 3801 (J. Pinto Coelho)

- Todas as semanas, até às 17h de 3ª feira, serão disponibilizados na secção **Aulas TPs**, na página do Fénix da disciplina, os exercícios para resolver nessa semana. Será igualmente disponibilizado um resumo sobre a parte da matéria relevante para o conjunto de exercícios em causa. Os dois documentos **apenas** estarão disponíveis nessa semana.
- Na manhã da 2ª feira da semana seguinte, o docente estará disponível numa sessão síncrona, às 9h30, para responder a dúvidas sobre os exercícios da semana anterior.

➤ Correio electrónico dos docentes

jmrebordao@fc.ul.pt (sala 8.1.06) ; joao.coelho@fc.ul.pt (edifício do IBEB)

Avaliação

Quizz: 40 - 60%

**** DE MARÇO/ABRIL, 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 1º prova, só precisará de fazer a 2ª. Quem tiver negativa na 1º, 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 1º 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: ω 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 ₀₀): $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] e^{-i\left[kz + \frac{\rho^2}{2R(z)} - \zeta(z)\right]}$					
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

α - alfa
 β - beta
 χ - qui
 δ - delta
 ϵ - eps
 λ - lambda
 μ - miu
 ν - nu
 π - pi
 θ - theta
 ρ - rho
 τ - tau
 ω - omega
 Ω - OMEGA
 ξ - xsi

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

$$\delta \approx (n-1)\alpha$$

$$\theta_{\text{li}} = (\delta_m + \alpha) / 2$$

$$n = \sin\left(\frac{\delta_m + \alpha}{2}\right) / \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Equações de Fresnel

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$r_{\parallel} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$t_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$r_{\parallel} = \frac{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) - 1}{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) + 1}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2}{\left(\frac{E_{0v}}{E_{0h}}\right) + 1}$$

$$T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

$$\mathfrak{R} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2}\right)^2$$

$$\tan \theta_B = n_1 / n_2$$

$$\sin \theta_c = n_1 / n_2$$

$$l = s_o, \quad l' = s_i$$

$$n = n_1, \quad n' = n_2$$

Óptica Geométrica

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = K$$

$$m = M_T = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 l'}{n_2 l}$$

$$K = K_1 + K_2 = \frac{d}{n_1} K_1 K_2$$

$$K_{L\text{-espessa}} = (n_1 - n_{\text{meio}}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{d(n_1 - n_{\text{meio}})}{n_1 R_1 R_2} \right)$$

$$K_{L\text{-delgada}} = (n_1 - n_{\text{meio}}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

$$K = \frac{n}{f}, \quad M_L = -M_T^2, \quad K = \frac{n_2 - n_1}{R}, \quad K = -\frac{2}{R}$$

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

$$(\nabla^2 + k^2)U(\mathbf{r}) = 0$$

$$U(\mathbf{r}) = A e^{-ikr}$$

$$U(\mathbf{r}) = \frac{A}{r} e^{-ikr}$$

$$U(\mathbf{r}) = \frac{A}{z} e^{-ikz} e^{-ik^2 x^2 + y^2 / 2z}$$

$$u(\mathbf{r}, t) = U(\mathbf{r}) e^{-i2\pi\nu t} = U(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}$$

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Ondas paraxiais

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{-ikz}$$

$$\nabla_{\perp}^2 A - i2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0$$

Modo Gaussiano TEM₀₀

$$U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} e^{-\frac{\rho^2}{W^2(z)}} e^{-i\left[kz + \frac{k\rho^2}{2R(z)} - \zeta(z)\right]}$$

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$$

$$\zeta(z) = \text{atan}(z / z_0)$$

Modos de Hermite / Laguerre - Gauss

$$U_{l,m}(x, y, z) = A_{l,m} \frac{W_0}{W(z)} G_l \left[\frac{\sqrt{2}x}{W(z)} \right] G_m \left[\frac{\sqrt{2}y}{W(z)} \right] e^{-ikz - ik \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + i(l+m+1)\zeta(z)}$$

$$U_{l,m}(\rho, \varphi, z) = A_{l,m} \frac{W_0}{W(z)} \left(\frac{\rho}{W(z)} \right)^{|l|} L_m^{|l|} \left[\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] e^{-ikz - ik \frac{\rho^2}{2R(z)} - i\ell\varphi + i(l+2m+1)\zeta(z)}$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2$$

Modos de Bessel

$$U(\mathbf{r}) = A(x, y) e^{-i\beta z}$$

$$\nabla_{\perp}^2 A + k^2 A = 0$$

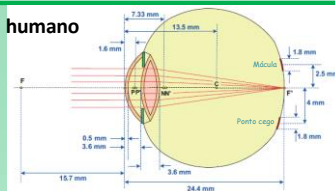
$$A(x, y) = A_m J_m(k_T \rho) e^{-im\varphi}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$k_z^2 + \beta^2 = k^2$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$$

Indicador	Módulo				Comodidade			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Indicador de qualidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de segurança	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de eficiência	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de durabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de facilidade de uso	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de custo	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de suporte técnico	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de inovação	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de sustentabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de flexibilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de escalabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de interoperabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de compatibilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de portabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de conectividade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de segurança de dados	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de privacidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de acessibilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de usabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de satisfação do cliente	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de fidelidade do cliente	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retenção de clientes	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de crescimento do negócio	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de rentabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de lucratividade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retorno sobre investimento	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de produtividade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de eficiência operacional	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de qualidade de serviço	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de satisfação do funcionário	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retenção de funcionários	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de produtividade dos funcionários	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de qualidade de trabalho	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de satisfação do cliente	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de fidelidade do cliente	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retenção de clientes	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de crescimento do negócio	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de rentabilidade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de lucratividade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retorno sobre investimento	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de produtividade	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de eficiência operacional	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de qualidade de serviço	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de satisfação do funcionário	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de retenção de funcionários	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de produtividade dos funcionários	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Indicador de qualidade de trabalho	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Olho humano



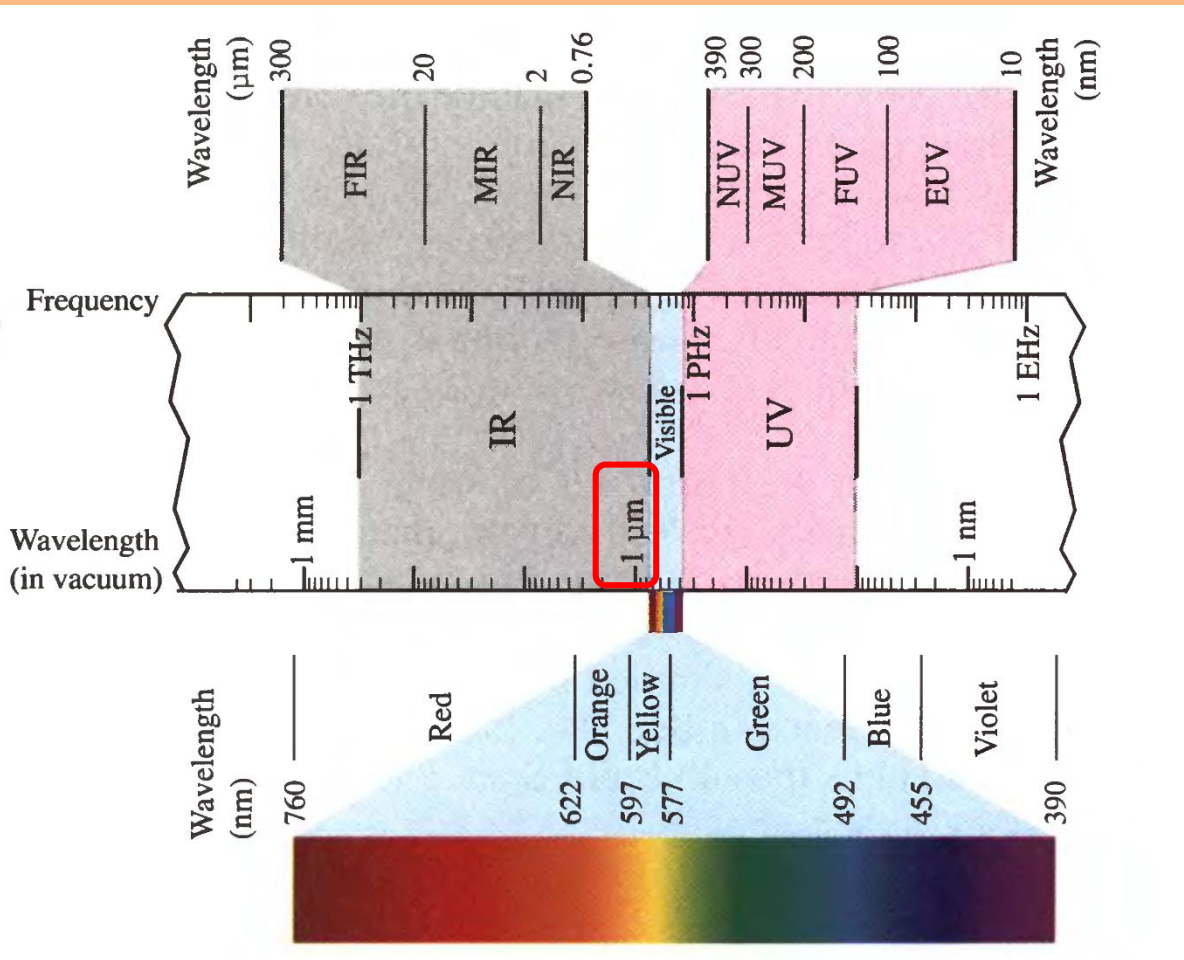
Ondas Electromagnéticas e Óptica

2º SEMESTRE - 2015 / 2016

INDICAÇÕES AOS ESTUDANTES

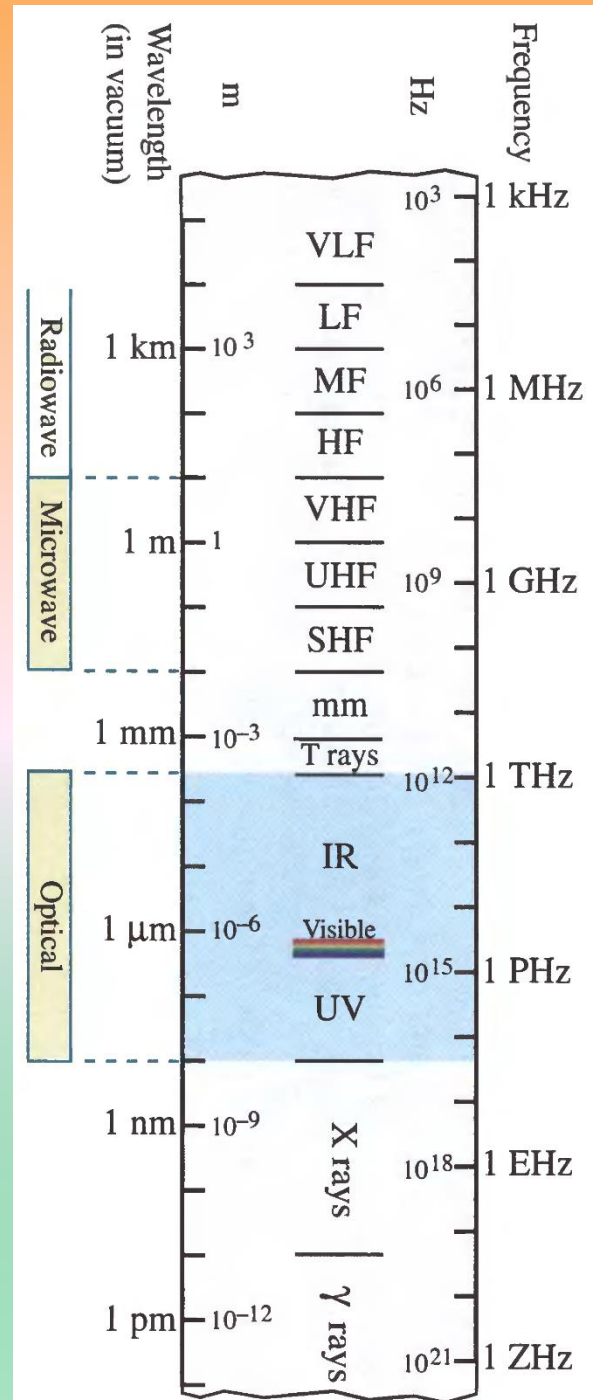
- A 1ª chamada de ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA terá lugar no dia **22** DE JUNHO, 4ª feira, às 9:00h em anfiteatros do edifício C8: **A DEFINIR**
- A duração total do exame será de 3.0 horas (não havendo tolerância adicional).
- Trata-se de uma prova SEM CONSULTA, à excepção do formulário fornecido 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.
- Quaisquer 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 ~ $1 \mu\text{m}$ (ordem de grandeza)

Sistema Internacional de Unidades: 10^{-6} m

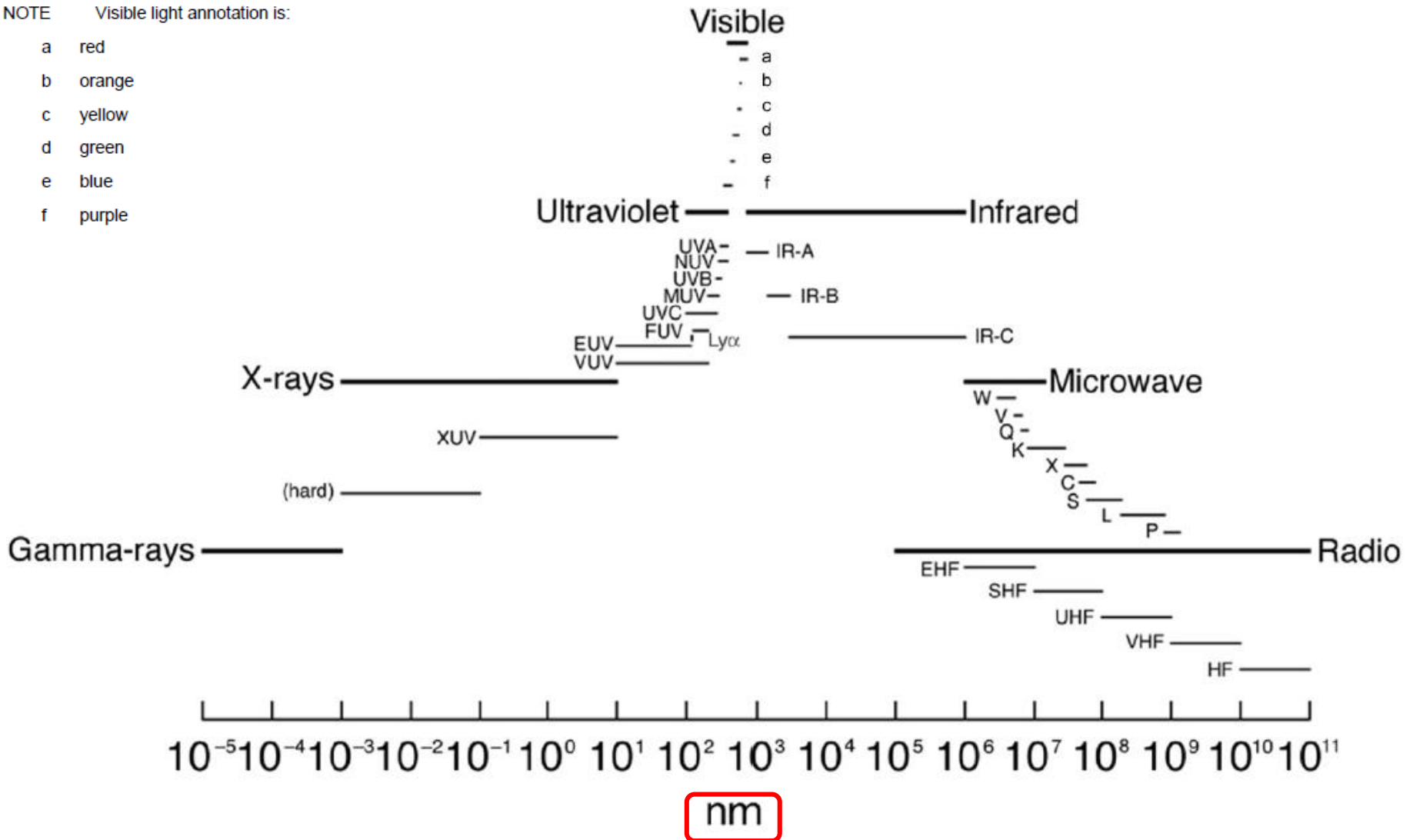


Espectro electromagnético

<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

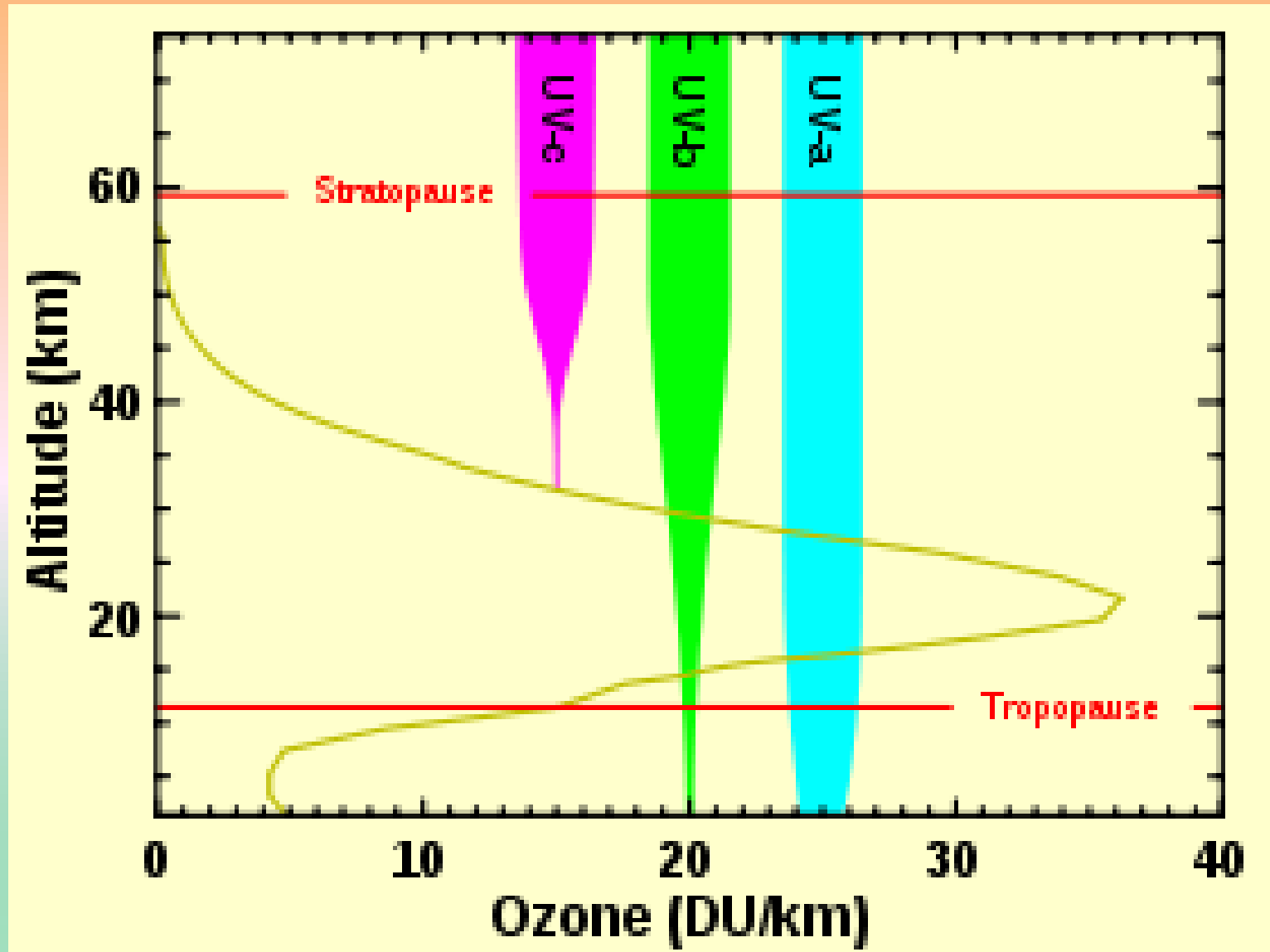
ISO 21348 -
Space
environment
(natural and
artificial) -
Process for
determining
solar
irradiances

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 λ
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	$100 \leq \lambda < 400$	$100\ \text{nm} \leq \lambda < 400\ \text{nm}$	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- α	$121 \leq \lambda < 122$	$121\ \text{nm} \leq \lambda < 122\ \text{nm}$	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	$380 \leq \lambda < 760$	$380\ \text{nm} \leq \lambda < 760\ \text{nm}$	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
		$610 \leq \lambda < 760$	$610\ \text{nm} \leq \lambda < 760\ \text{nm}$	red
Infrared	IR	$760 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$760\ \text{nm} \leq \lambda < 1,00\ \text{mm}$	
	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		$1\ 000\ 000 \leq \lambda < 15\ 000\ 000$	$1,00\ \text{mm} \leq \lambda < 15,00\ \text{mm}$	
	<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		$100\ 000 \leq \lambda < 100\ 000\ 000\ 000$	$0,10\ \text{mm} \leq \lambda < 100\ \text{m}$	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

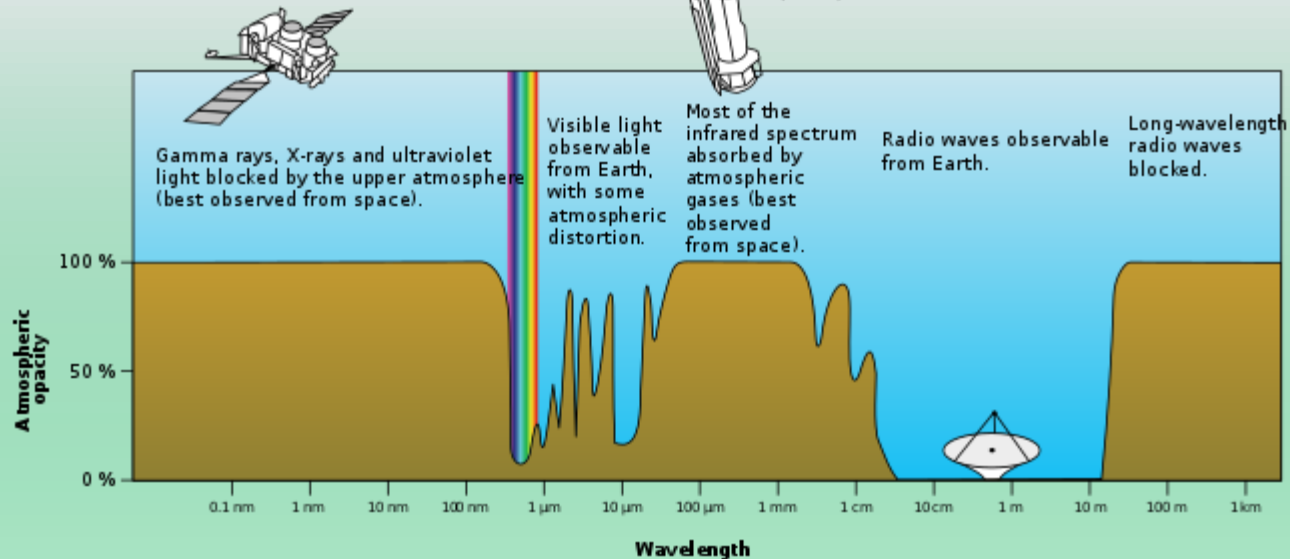
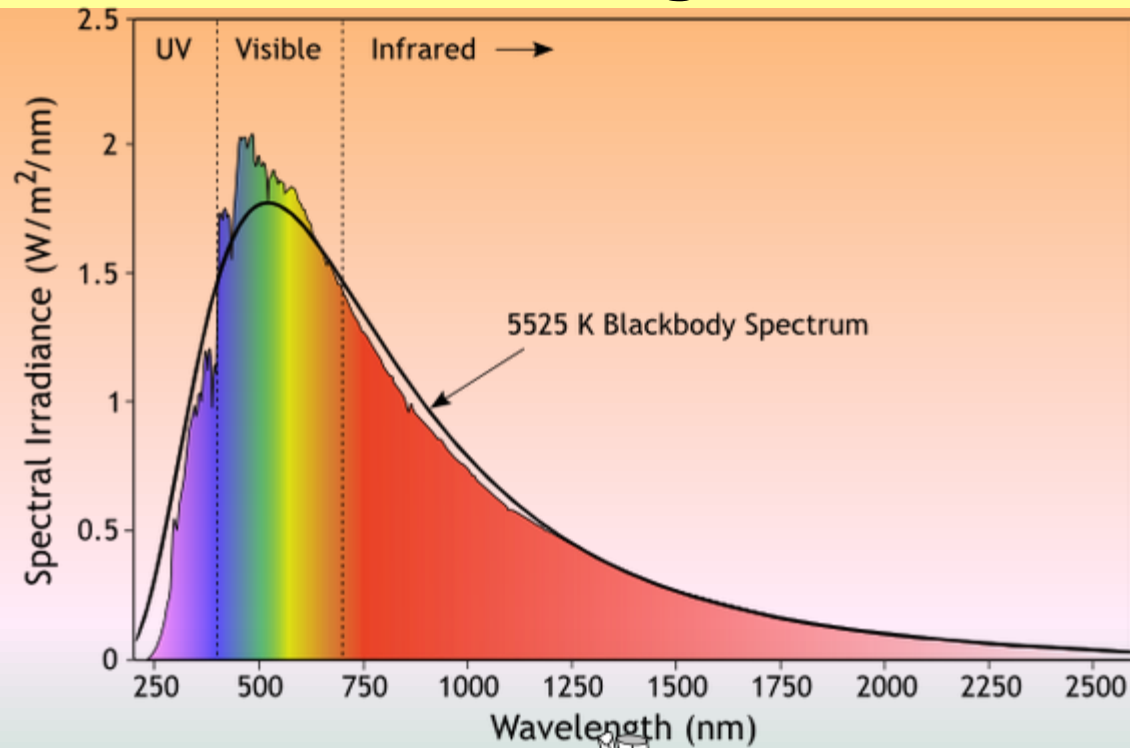
Espectro electromagnético: **UV**

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- α	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



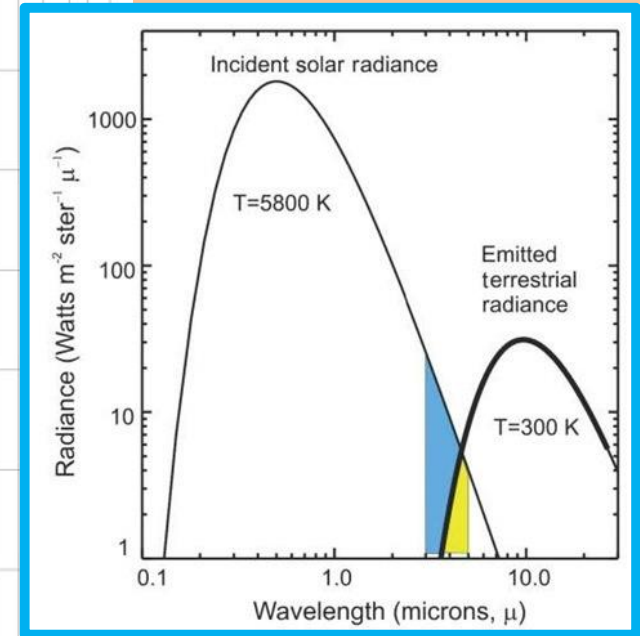
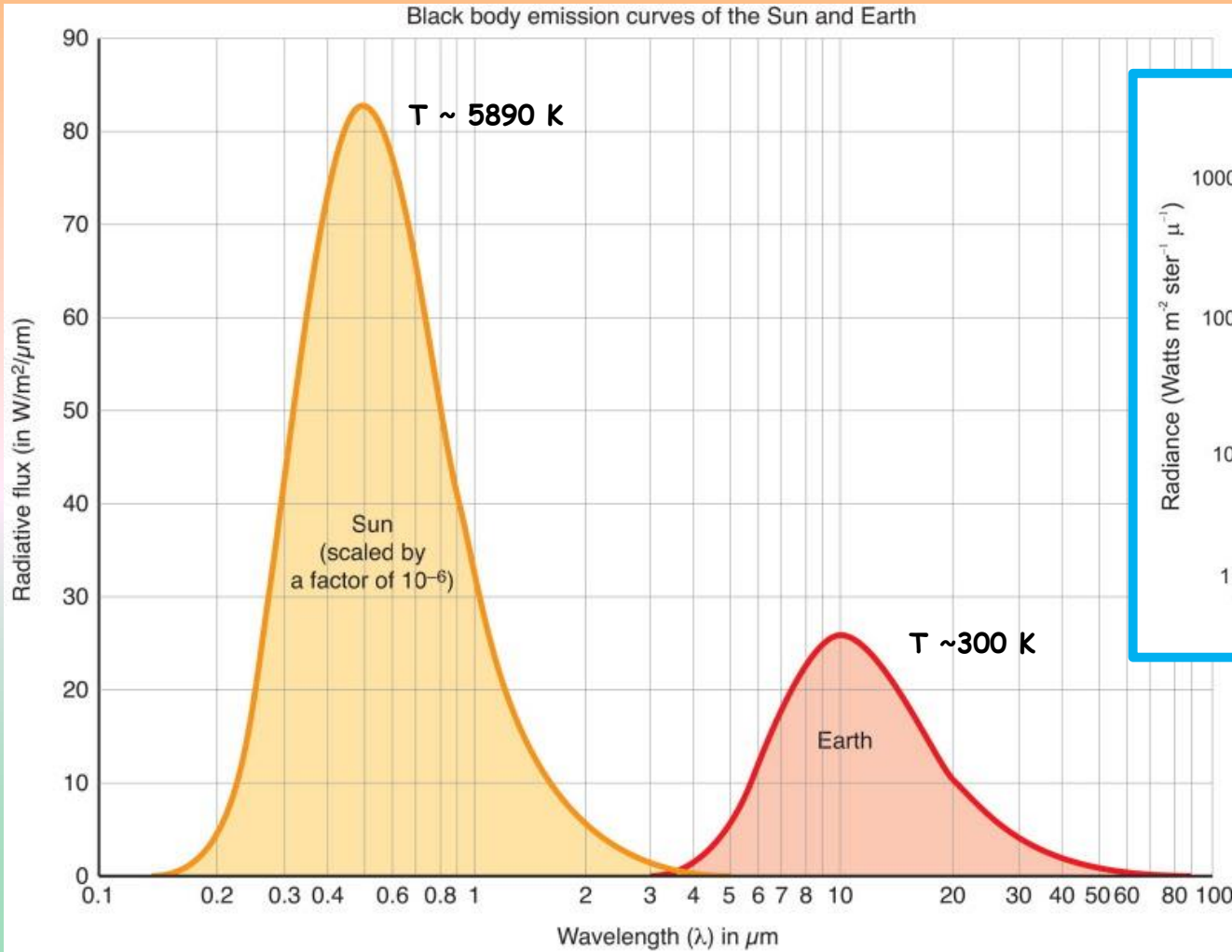
Espectro electromagnético: **Visível**



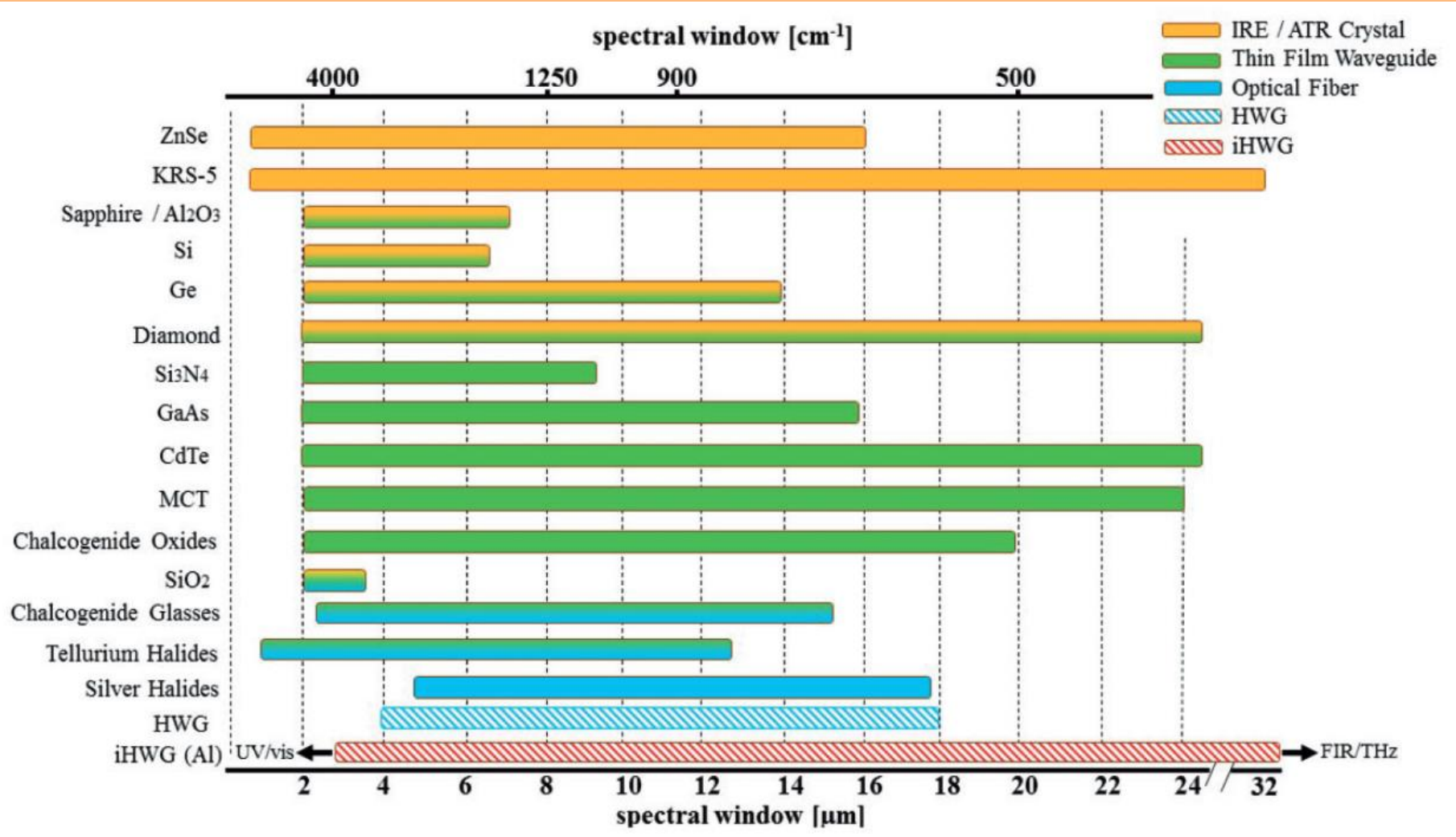
Espectro electromagnético: IR

NAME		WAVELENGT H	ENERGY	CHARACTERISTICS
Near-IR	NIR, IR-A	0.75– 1.4 μm	0.9 - 1.7 eV	Defined by the water absorption , and commonly used in fiber optic telecommunication because of low attenuation losses in the SiO_2 glass (silica) 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 μm	0.4 - 0.9 eV	Water absorption 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 μm	150 - 400 meV	In guided missile technology the 3–5 μm 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 Infrared signature of the target aircraft, typically the jet engine exhaust plume. This region is known as thermal infrared , but it detects only temperatures somewhat above body temperature.
Long-wavelength IR	LWIR, IR-C	8–15 μm	80 - 150 meV	The "thermal imaging" 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. Forward-looking infrared (FLIR) systems use this area of the spectrum. This region is also called the "thermal infrared."
Far IR	FIR	15– 1,000 μm	1.2 – 80 meV	see also far-infrared laser and far infrared .

Espectro electromagnético: IR



Materials para o IR



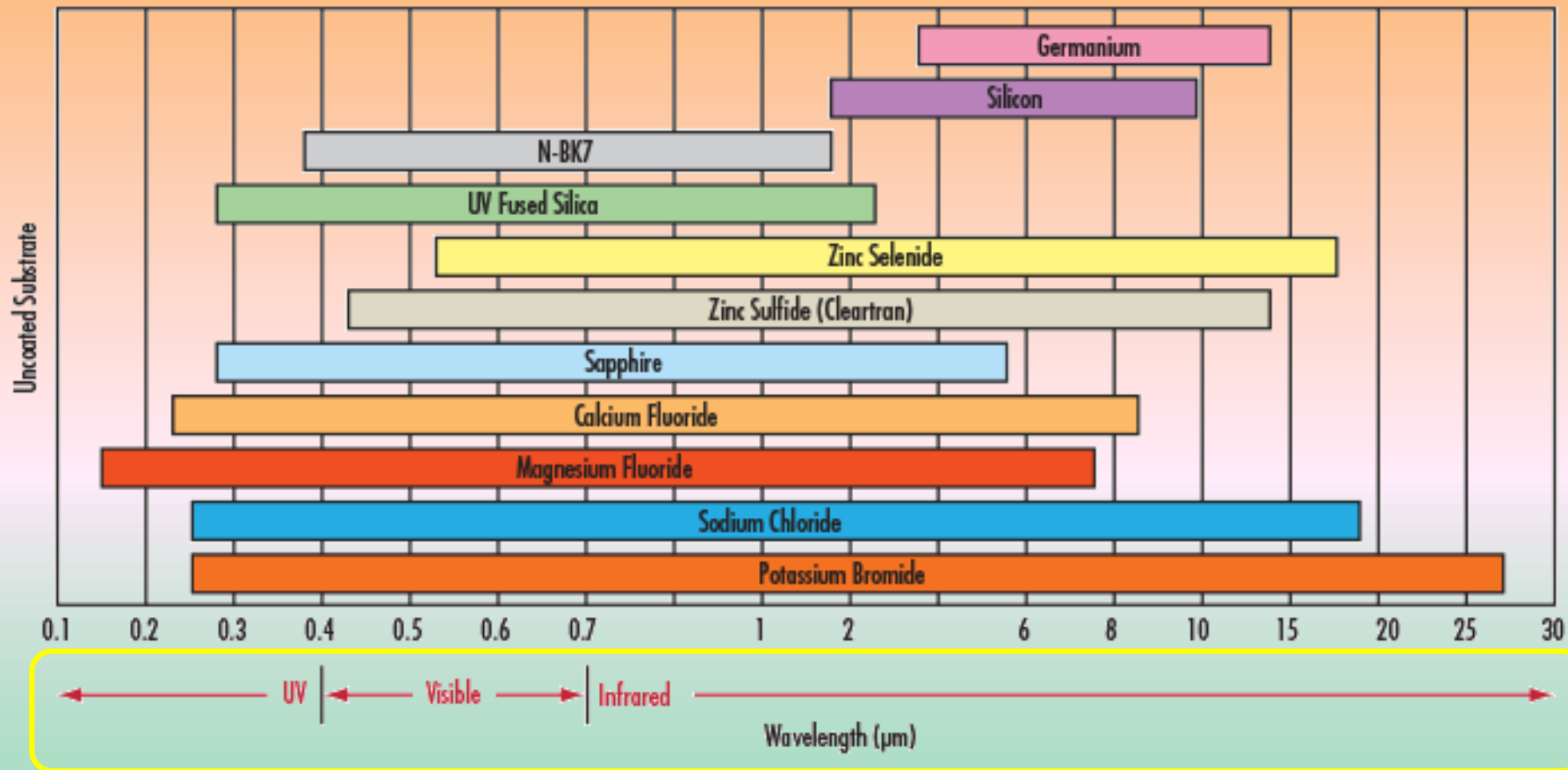
Mid-Infrared Waveguides: A Perspective

Thomas Schadle and Boris Mizaikoff

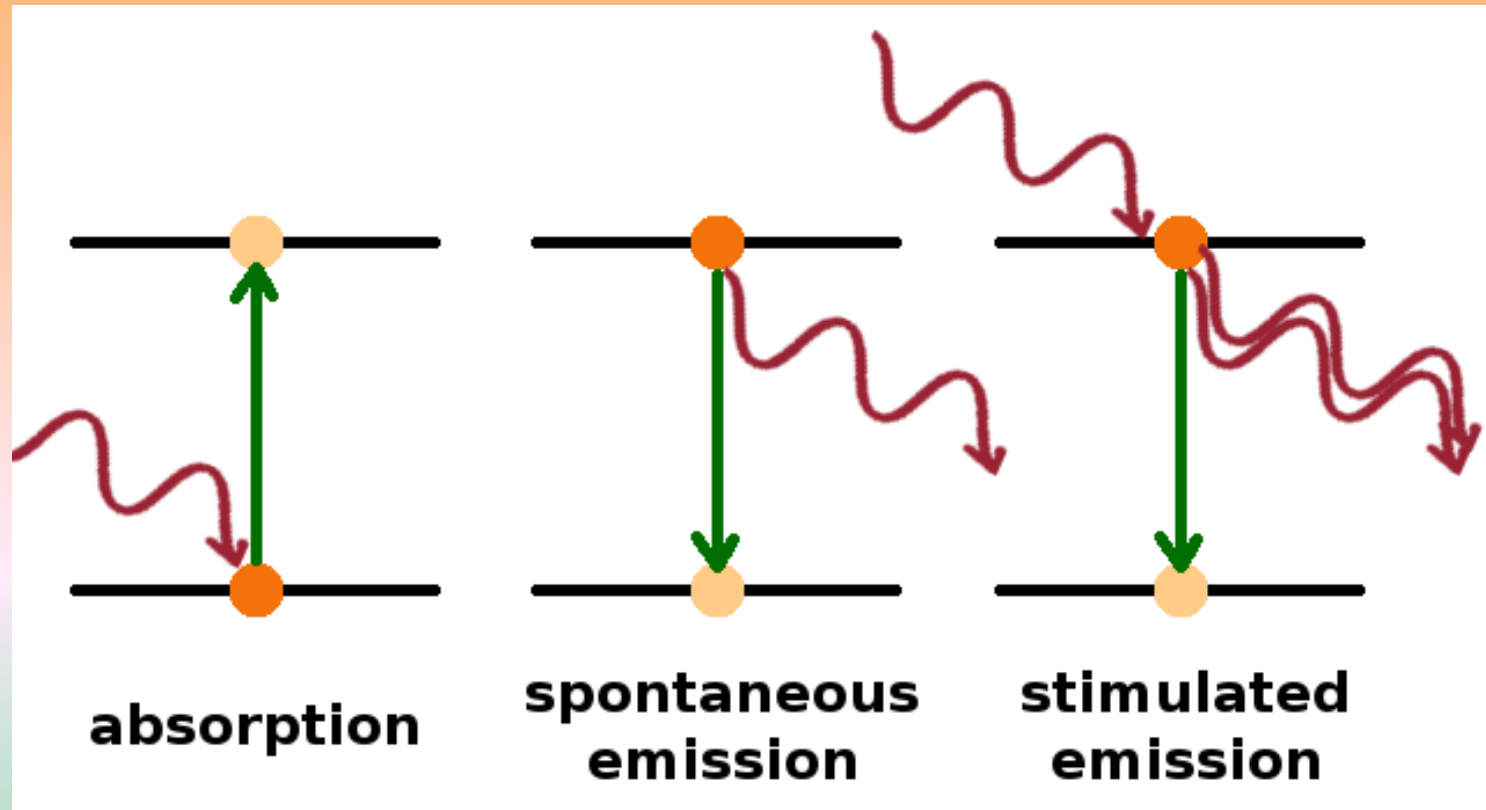
Applied Spectroscopy 2016, Vol. 70(10) 1625-1638

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

Materiais e absorção espectral



Absorção e emissão de radiação

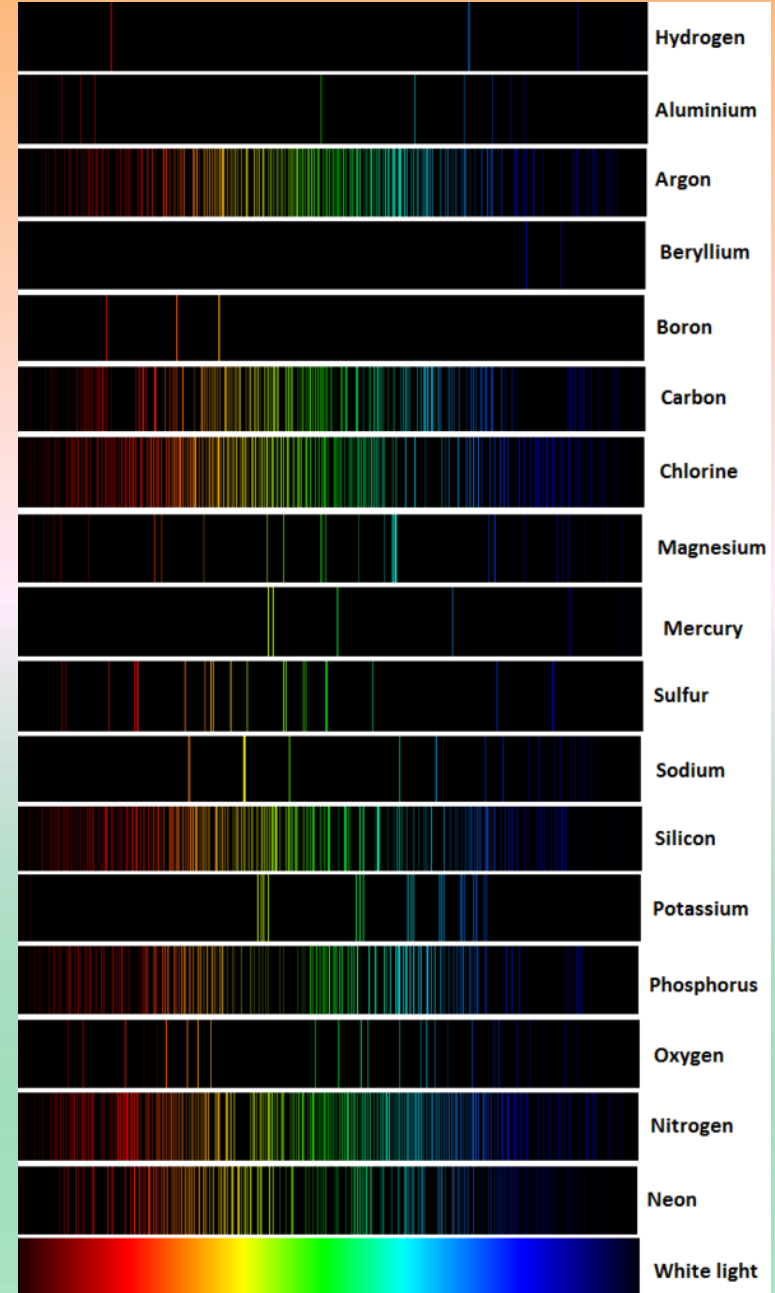
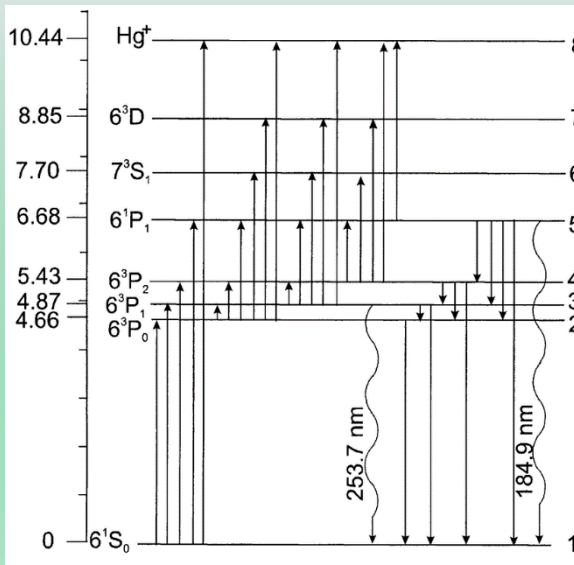
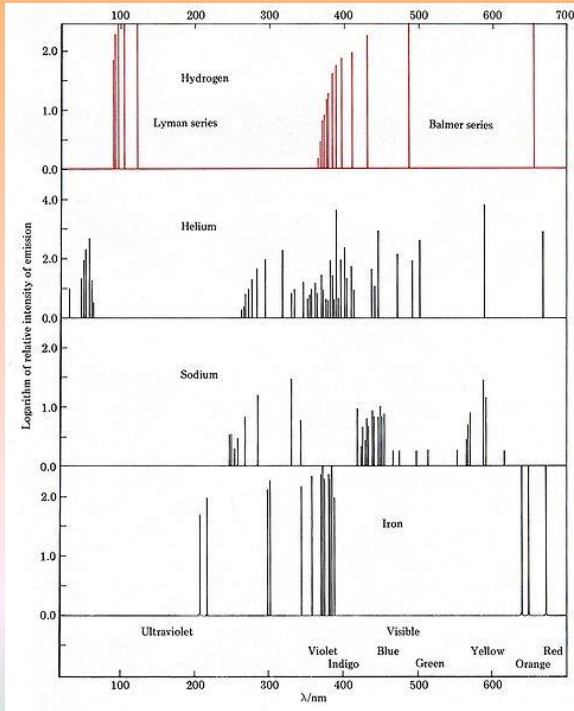


Geração de radiação por cargas eléctricas aceleradas (radiação de *Bremsstrahlung*)

Emissão do corpo negro: Se $T > 0$, um sistema físico tenta entrar em equilíbrio com o seu exterior radiando a energia que tem em excesso

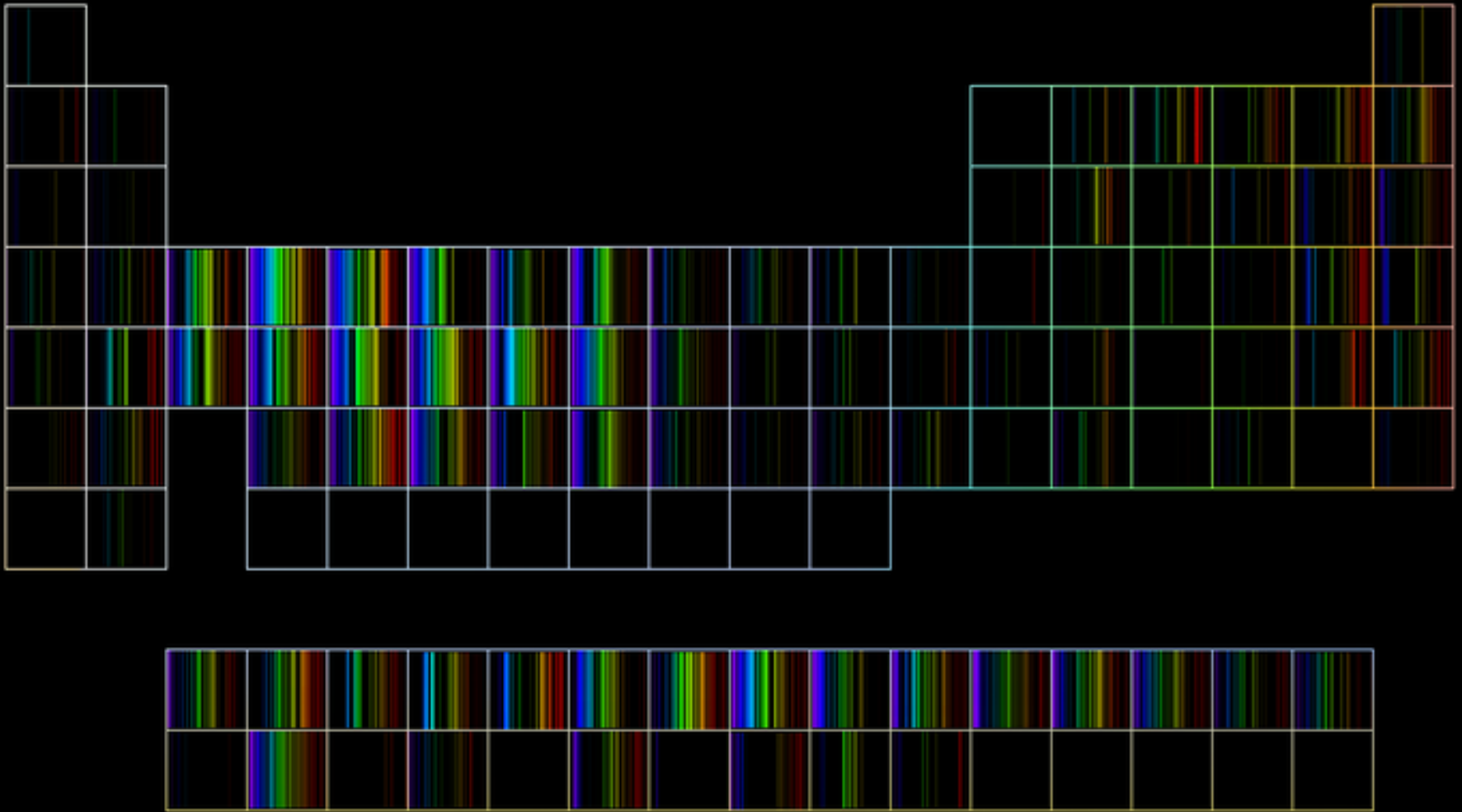
Processos nucleares (fusão)

Espectros e bandas

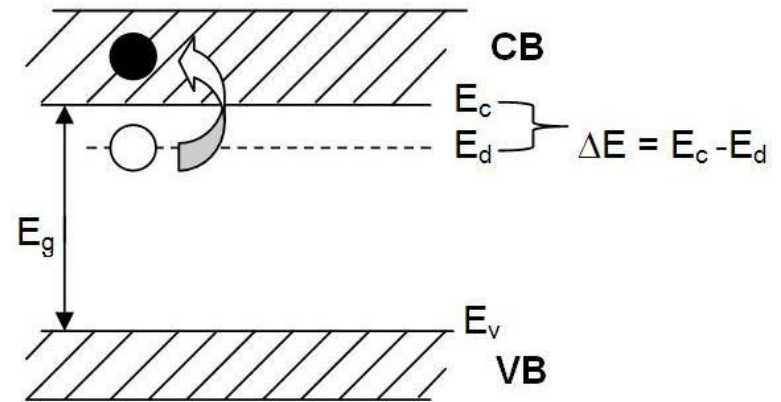
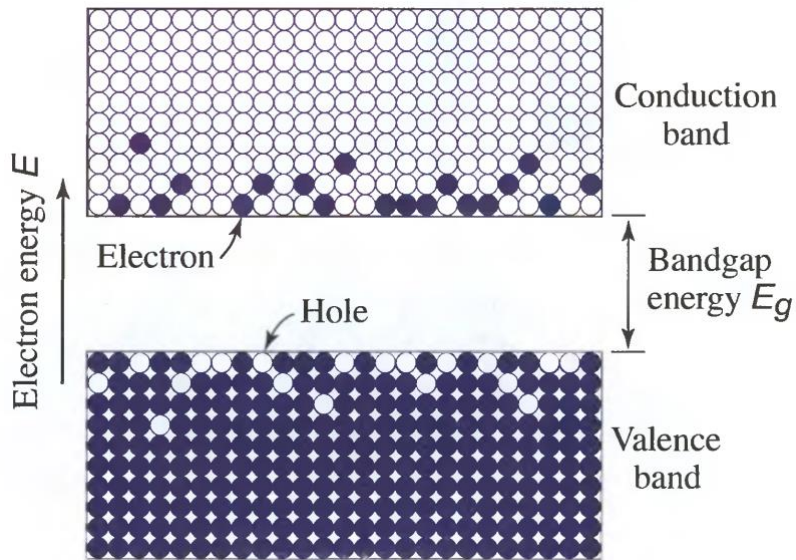
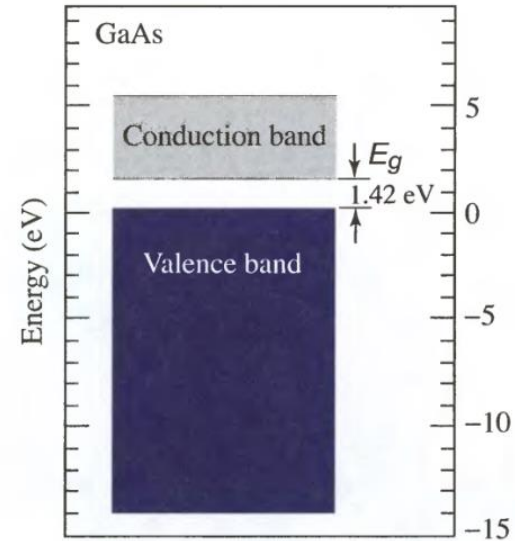
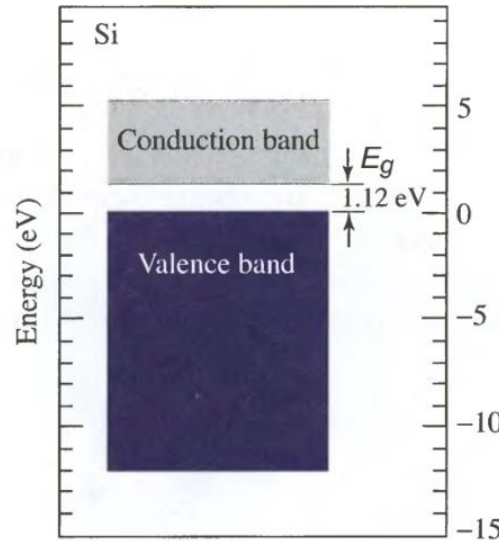
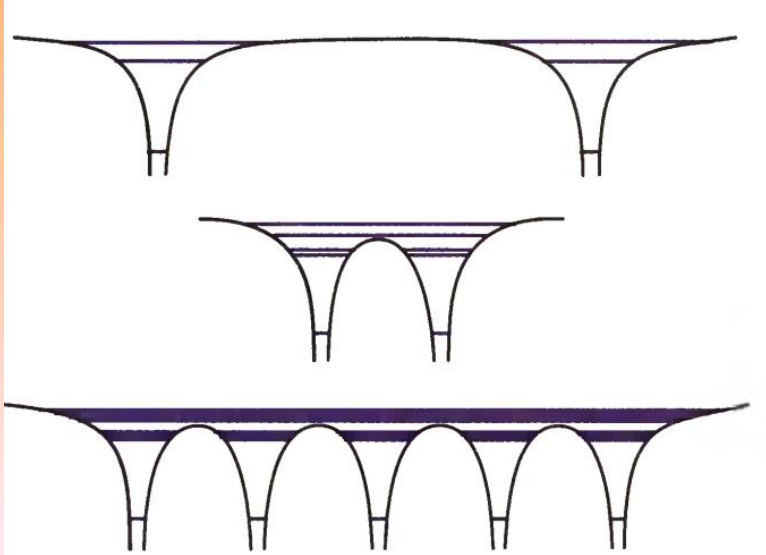


Espectros e bandas

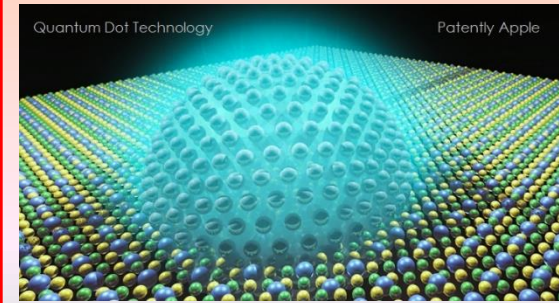
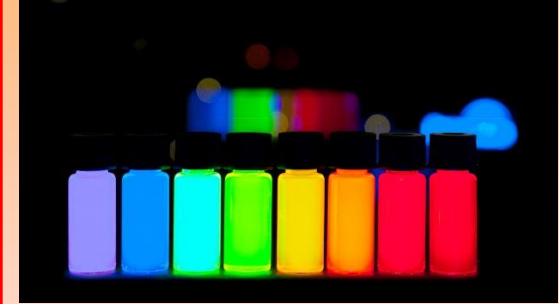
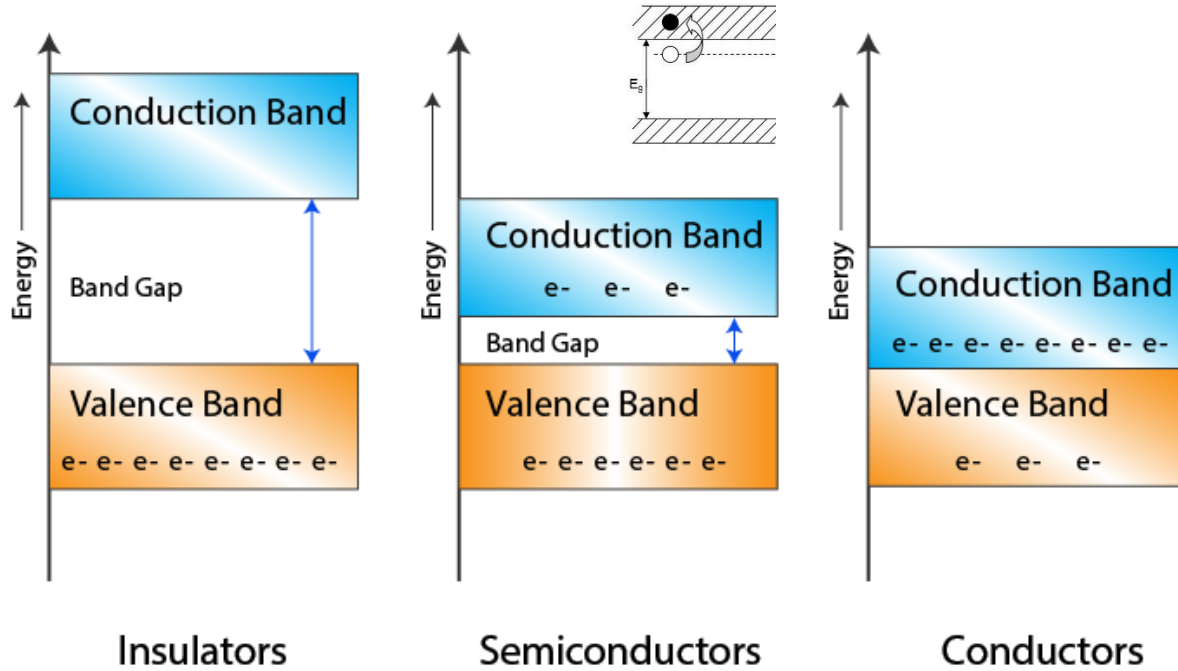
Emission Spectra of the Elements



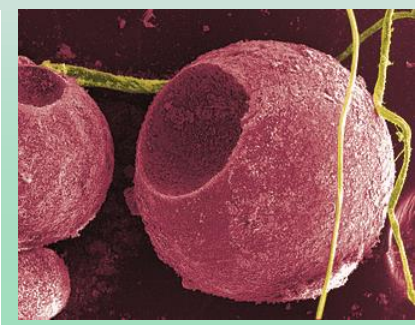
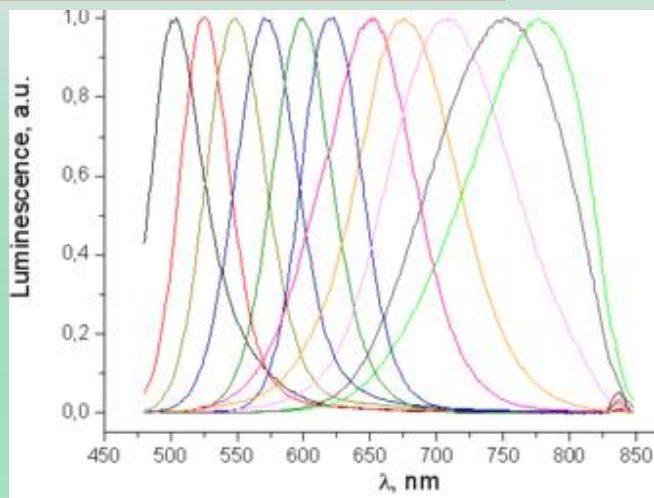
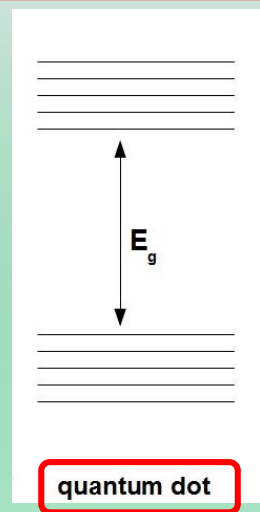
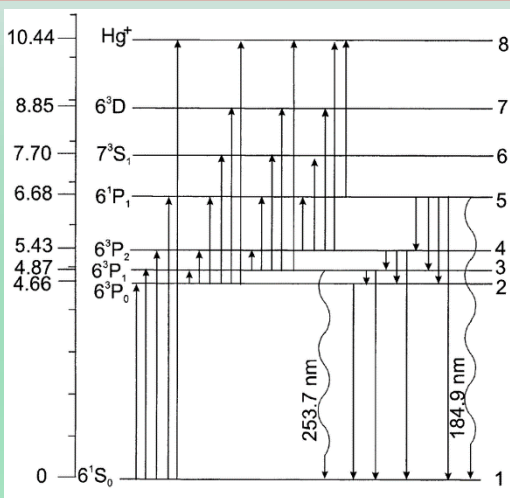
Espectros e bandas



Espectros e bandas



Quantum Dot Technology Patently Apple
<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

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**, vários processos podem provocar excitação e subsequente des-excitação **com emissão de fótons**

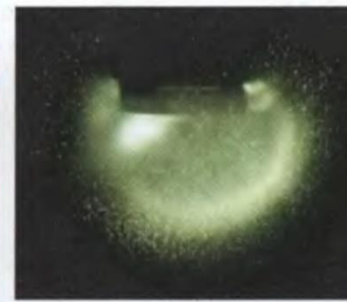
Fontes que radiam por processos **não térmicos**: **fontes luminescentes**

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

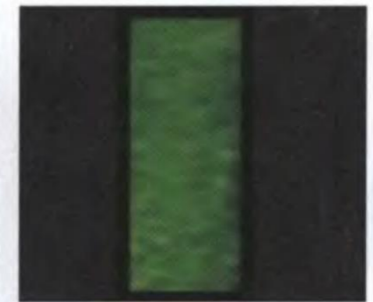
- Catodoluminescência
- Sonoluminescência
- Quimoluminescência
- Bioluminescência
- Electroluminescência
- **Fotoluminescência**



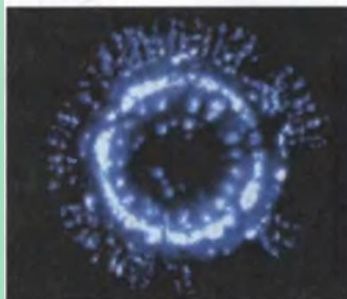
(a) Cathodoluminescence



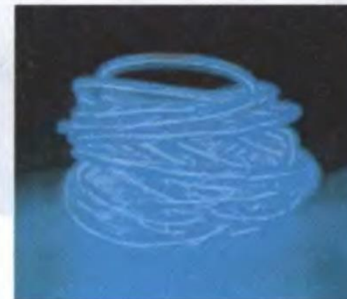
(b) Sonoluminescence



(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

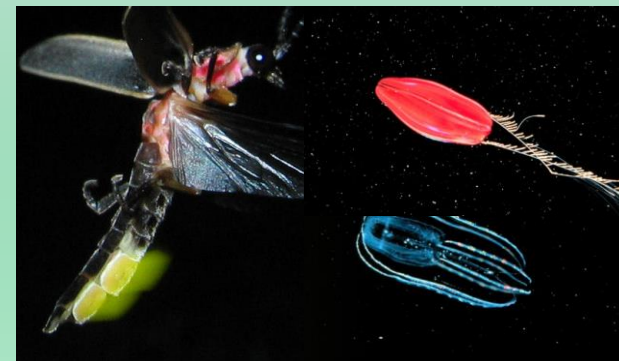
Luz emitida decorrente da absorção de fotões normalmente mais energéticos (UV, X ou g)

➤ Quimoluminescência

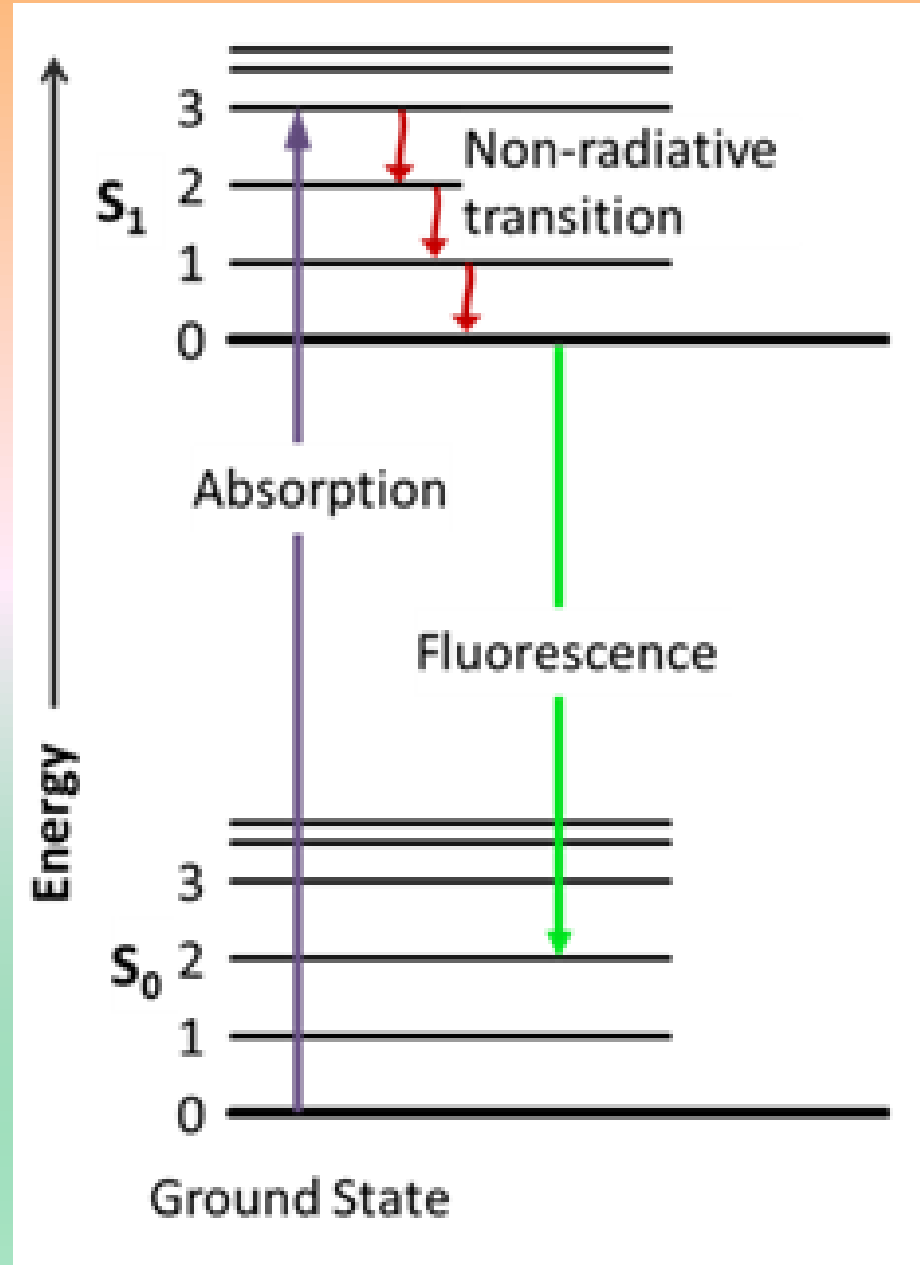
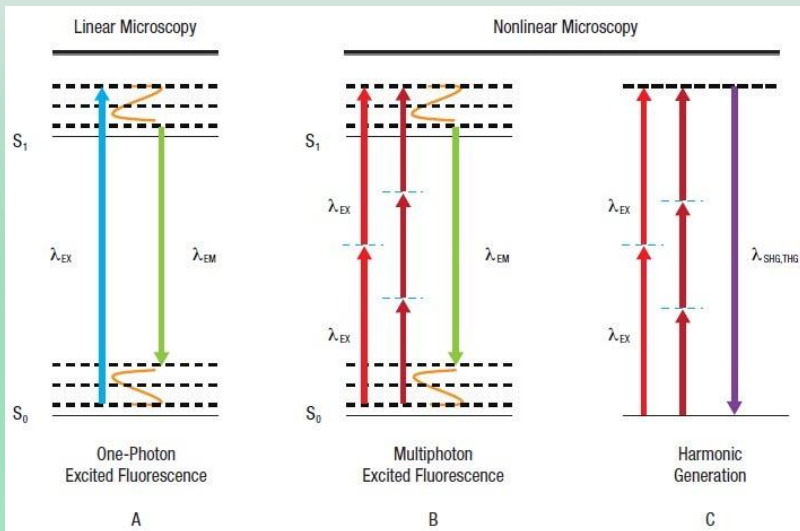
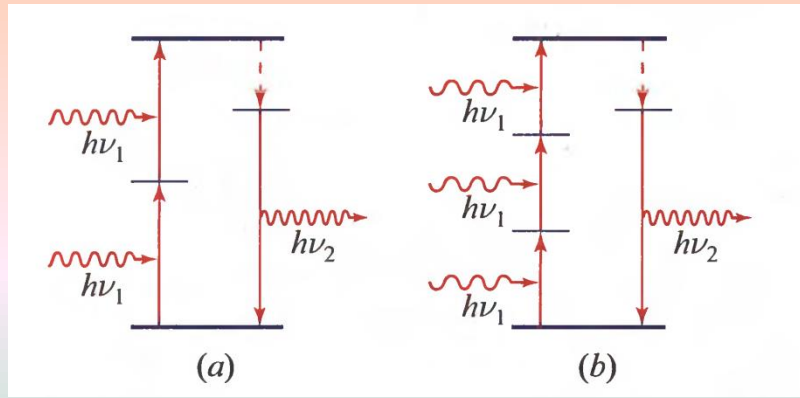
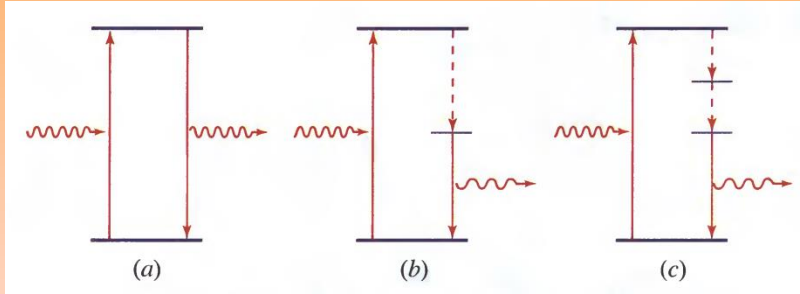
Emissão de luz decorrente de reacção química, com os produtos de reacção num estado excitado.

➤ Bioluminescência

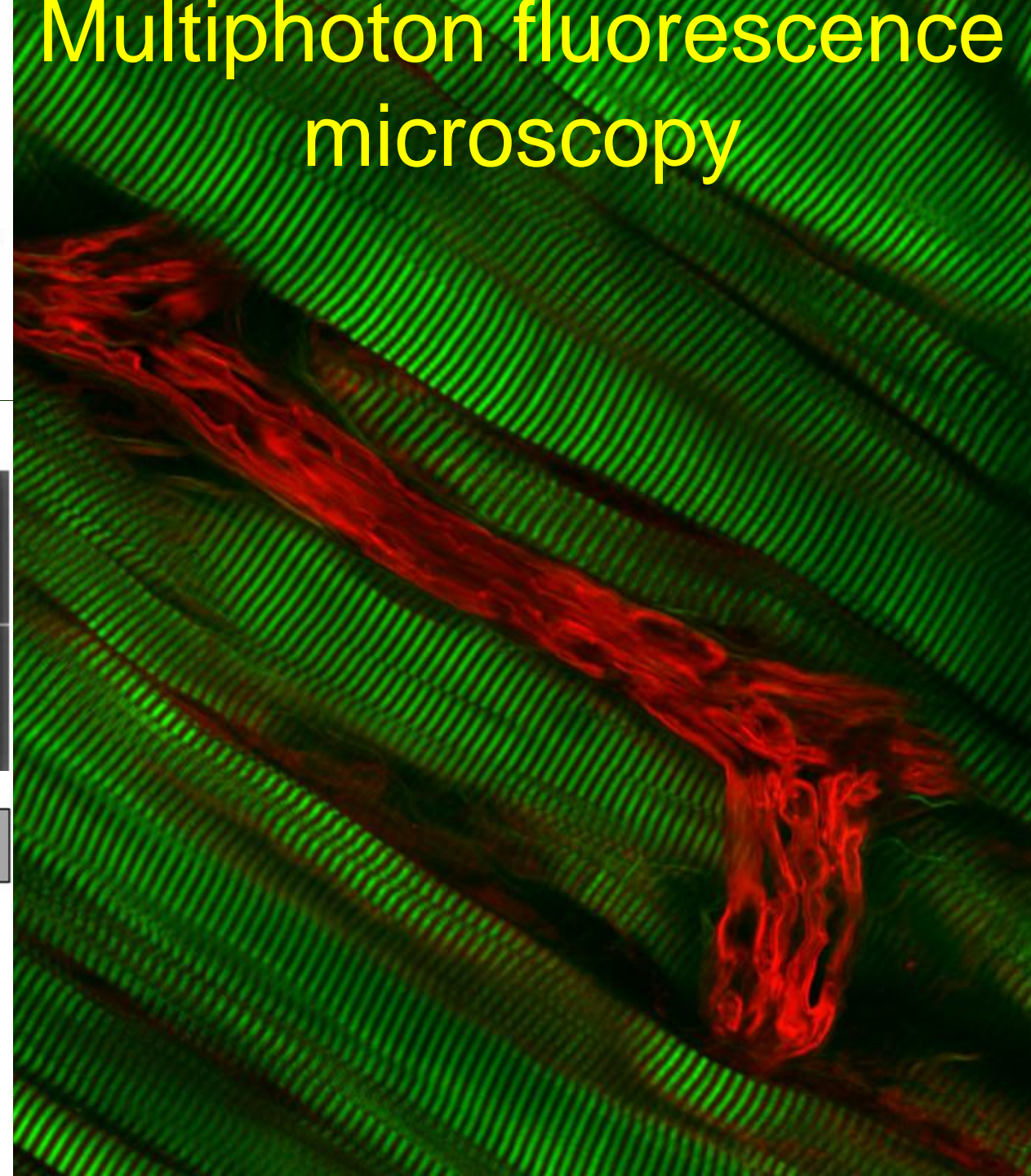
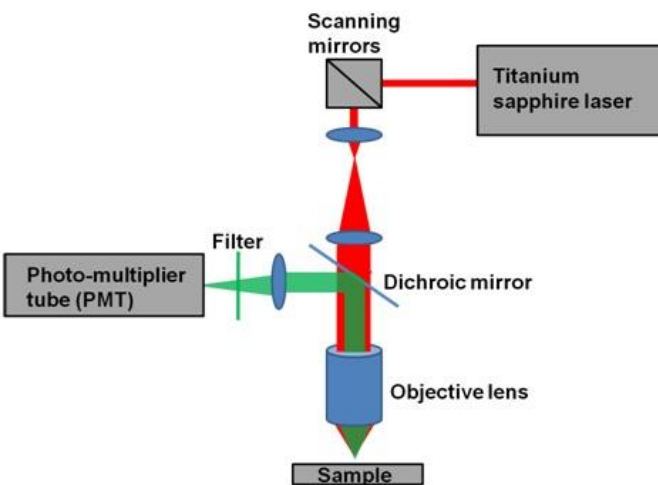
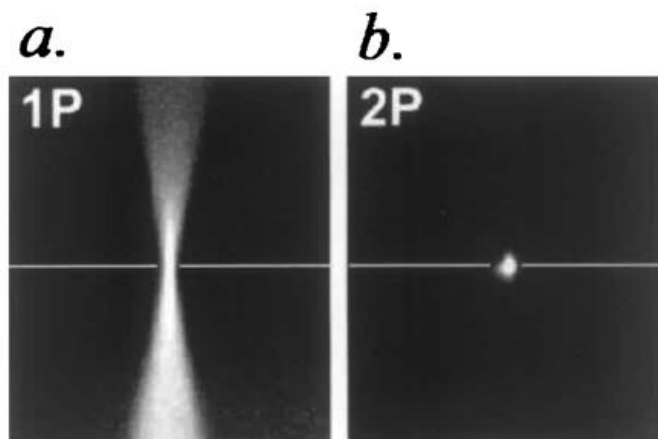
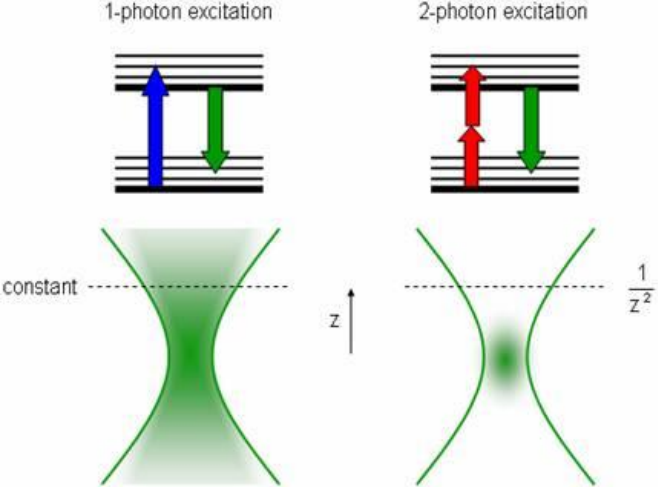
Quimoluminescência produzida por organismos vivos



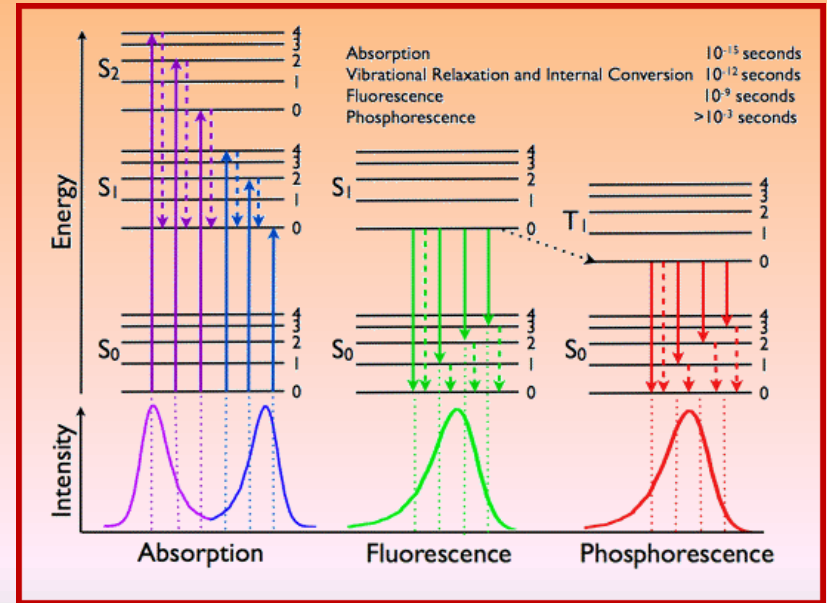
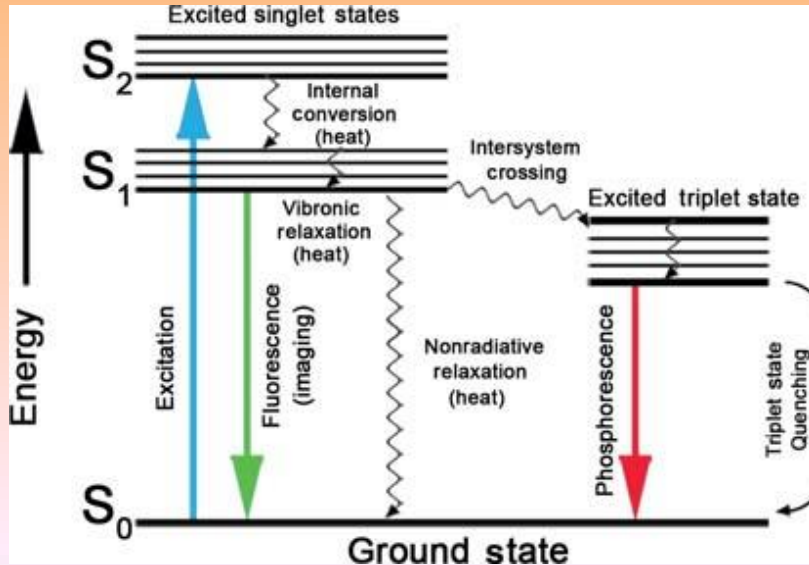
Fotoluminescência: fluorescência / fosforescência



Multiphoton fluorescence microscopy



Fotoluminescência: fluorescência / fosforescência



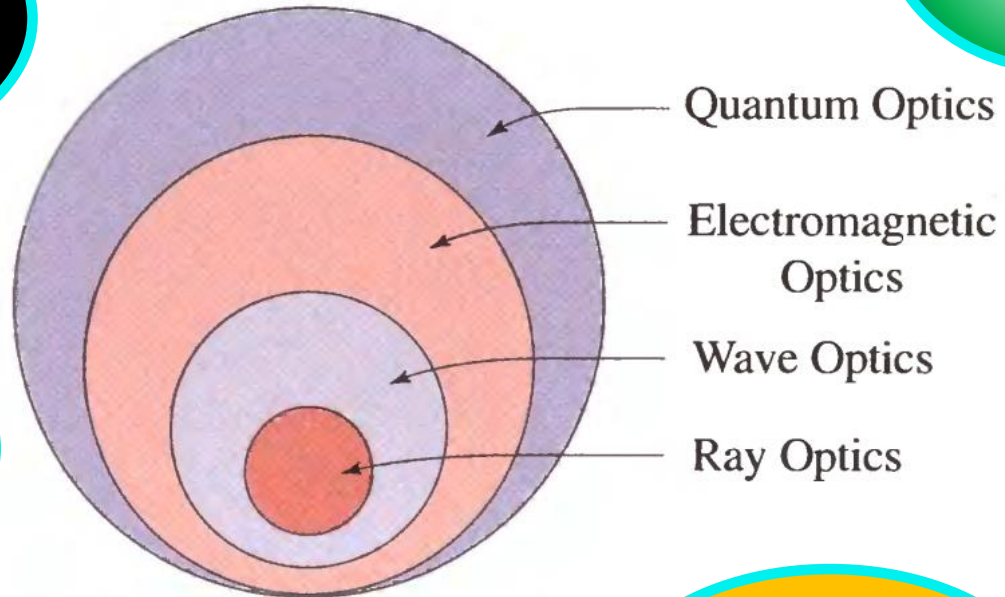
A - Paradigmas

**ELECTRO-
MAGNÉTICO**

ONDULATÓRIO

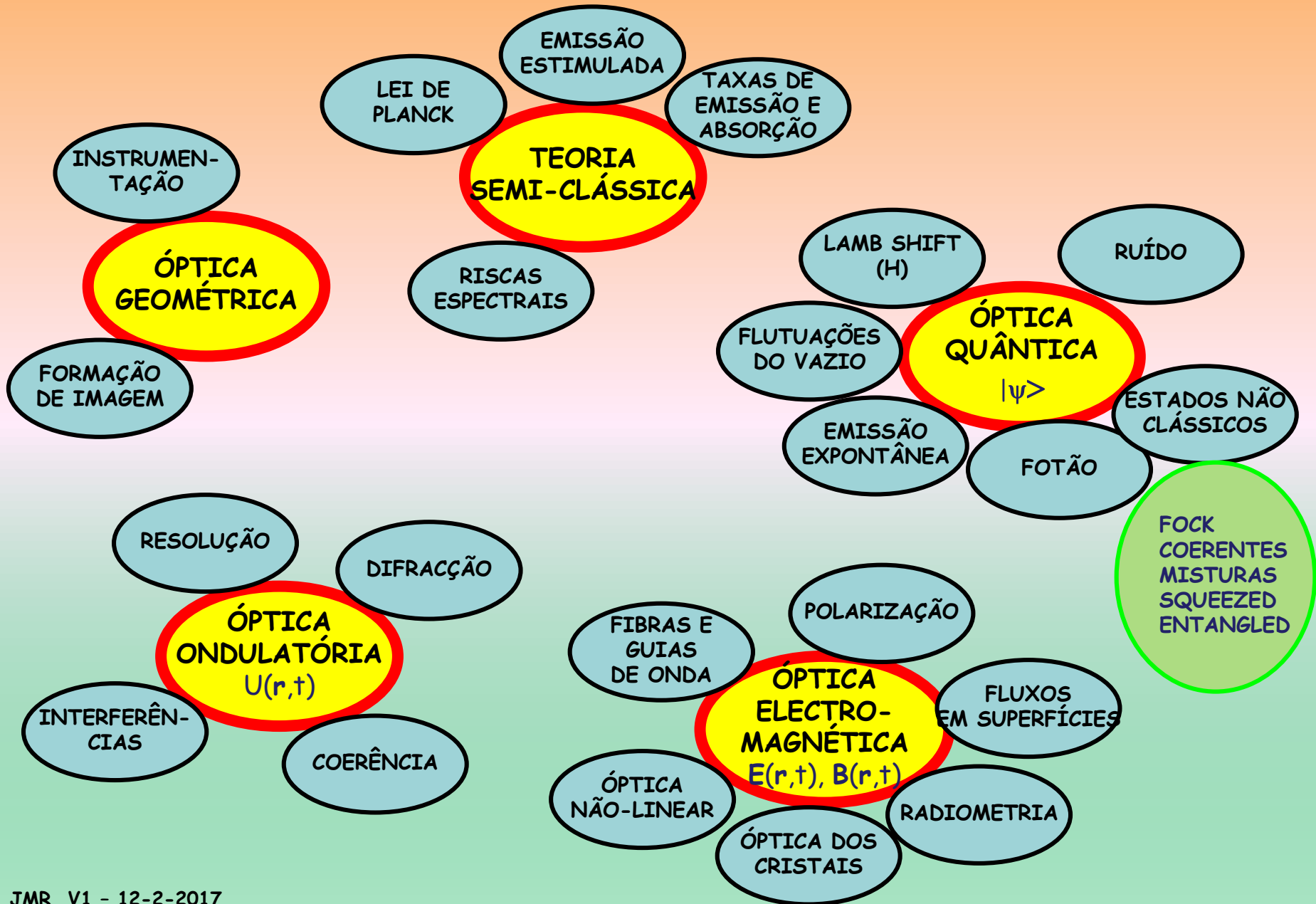
**ÓPTICA
GEOMÉTRICA**

QUÂNTICO

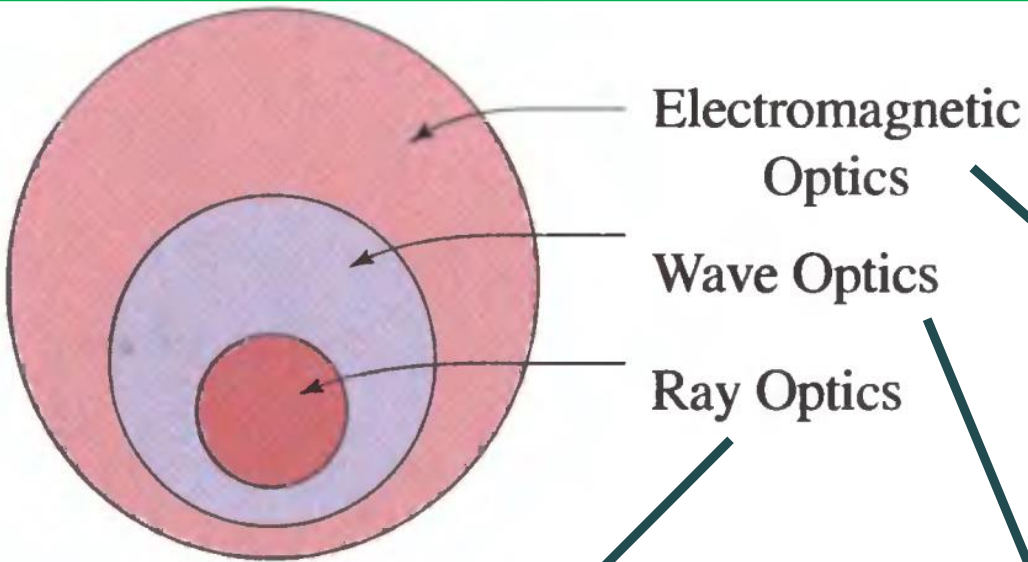


**A
RETER...**

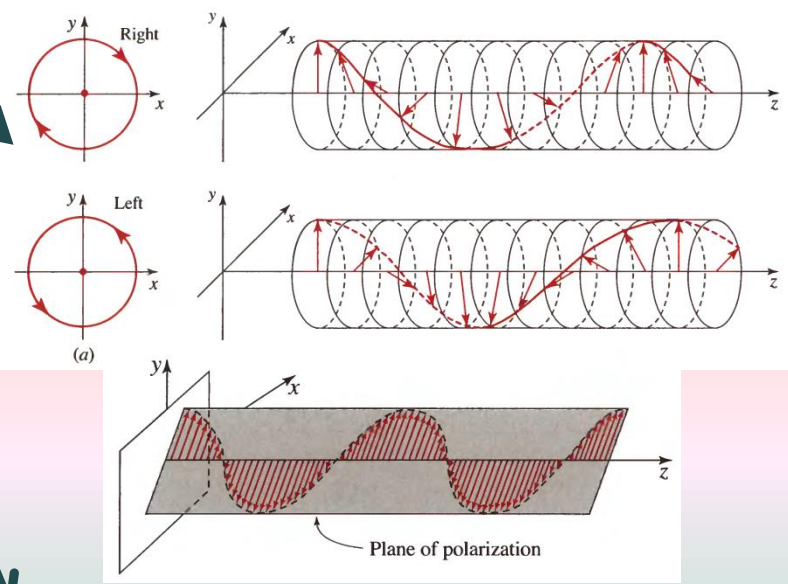
Paradigmas e Fenomenologia da Óptica



Níveis de aproximação em EM

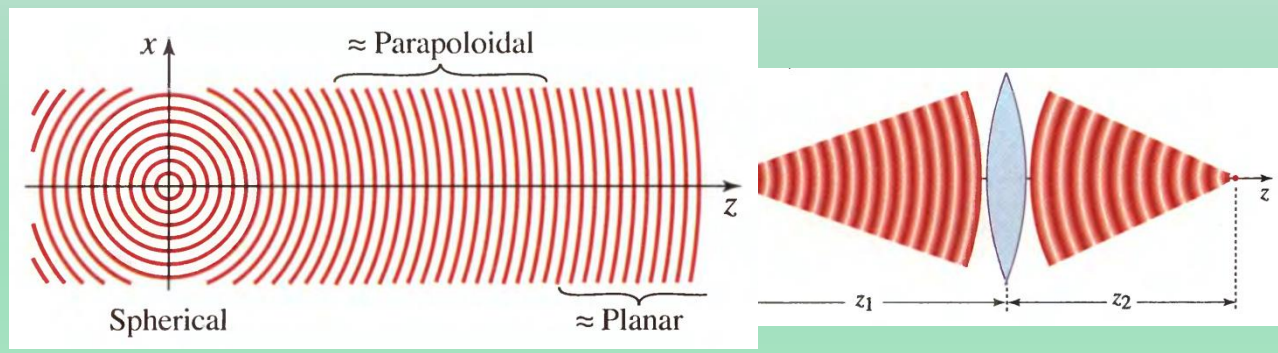
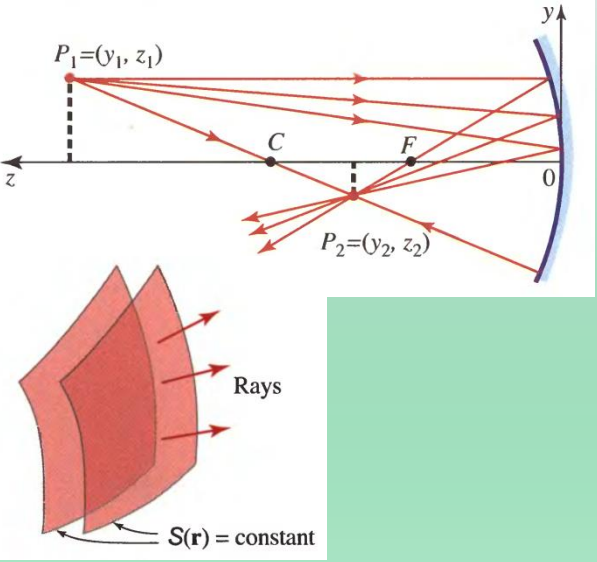


Natureza **vectorial** dos campos **E** e **H**
Polarização



A luz é descrita através de raios luminosos

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



Os fenómenos electromagnéticos são descritos por campos vectoriais $\{\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{M}\}$ que satisfazem as **equações de Maxwell**, ligados pelas **equações constitutivas** e **materiais**. Na ausência de cargas e correntes:

$$\nabla \times \mathcal{H} = \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathcal{E} = -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathcal{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathcal{B} = 0.$$

$$\mathcal{D} = \epsilon_0 \mathcal{E} + \mathcal{P}$$

$$\mathcal{B} = \mu_0 \mathcal{H} + \mu_0 \mathcal{M}.$$

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathcal{P}(\mathbf{E})$$

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathcal{M}(\mathbf{H})$$

O comportamento dos campos nas **fronteiras entre meios** deve garantir a **continuidade** das:

- componentes **tangenciais** de \mathbf{E} e \mathbf{H}
- componentes **normais** de \mathbf{D} e \mathbf{B}

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathcal{H} &= \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathcal{E} &= -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathcal{B} &= 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{D} &= \epsilon_o \mathcal{E} + \mathcal{P} \\ \mathcal{B} &= \mu_o \mathcal{H} + \mu_o \mathcal{M}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{P} &= \mathcal{P}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathcal{P}(\mathbf{E}) \\ \mathcal{M} &= \mathcal{M}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathcal{M}(\mathbf{H})\end{aligned}$$

A energia EM flui segundo a direcção do **Vector de Poynting**: $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ [W/m^2].

A **Irradiância óptica**, E , [em W/m^2] é dada por: $E = |\langle \mathbf{S} \rangle|$.

A equação da continuidade (**teorema de Poynting**), descreve como varia a densidade de energia no interior de um volume:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon_o \mathcal{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_o \mathcal{H}^2 \right) + \mathcal{E} \cdot \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial t} + \mu_o \mathcal{H} \cdot \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial t}$$

Densidades (volúmicas)
de energia

Potência necessária para
constituir dipolos

- Enquanto a luz se propagar através, ou em torno, de objectos cujas dimensões são bem superiores ao comprimento de onda (λ), a óptica ondulatória é suficiente para descrever a maior parte dos fenómenos ópticos.
- Como o λ da luz visível é **muito inferior às dimensões dos objectos** usuais, pode não ser fácil perceber fenómenos que decorram das características ondulatórias da luz.
- **Se, em determinadas circunstâncias, as 6 componentes de \mathbf{E} e de \mathbf{H} satisfazem uma e a mesma equação (de ondas) [e suas derivadas], é certamente sedutor utilizar as suas soluções escalares para procurar interpretar a fenomenologia.**
- **Um único campo escalar, $U(\mathbf{r},t)$,** representado através da **Amplitude Complexa** (**módulo** e **fase**) permite estabelecer uma ligação natural com a OG, através das superfícies de igual fase: $U(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) e^{i\Phi(\mathbf{r})}$
- **Observável:** Irradiância, E , em W/m^2 (SI).
- **Fenomenologia:** interferências, difracção, formação de imagem
- **Limites:**
 - Regiões muito próximas de objectos difractantes,
 - Bordos
 - Volumes focais
 - Fenómenos dependentes da polarização
 - Interação com materiais micro e nano-estruturados (fibras, guias de onda, cristais fotónicos...)

- Os meios são caracterizados pelo seu índice de refração, uma medida da velocidade de propagação da luz nesse meio: $c = c_0 / n$.
- Uma onda óptica é modelada por um campo escalar, $u(\mathbf{r}, t)$, solução da equação de ondas:

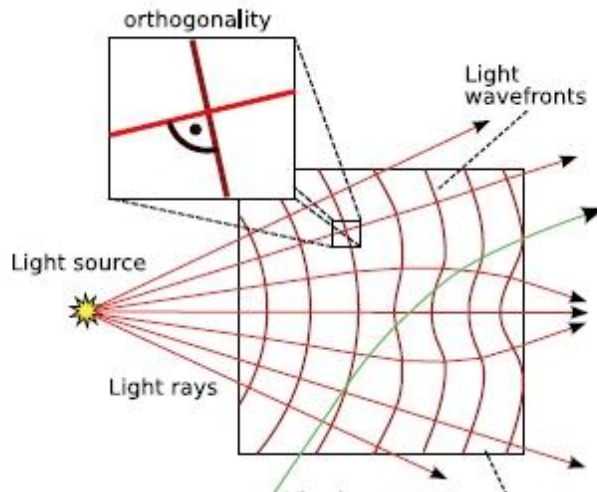
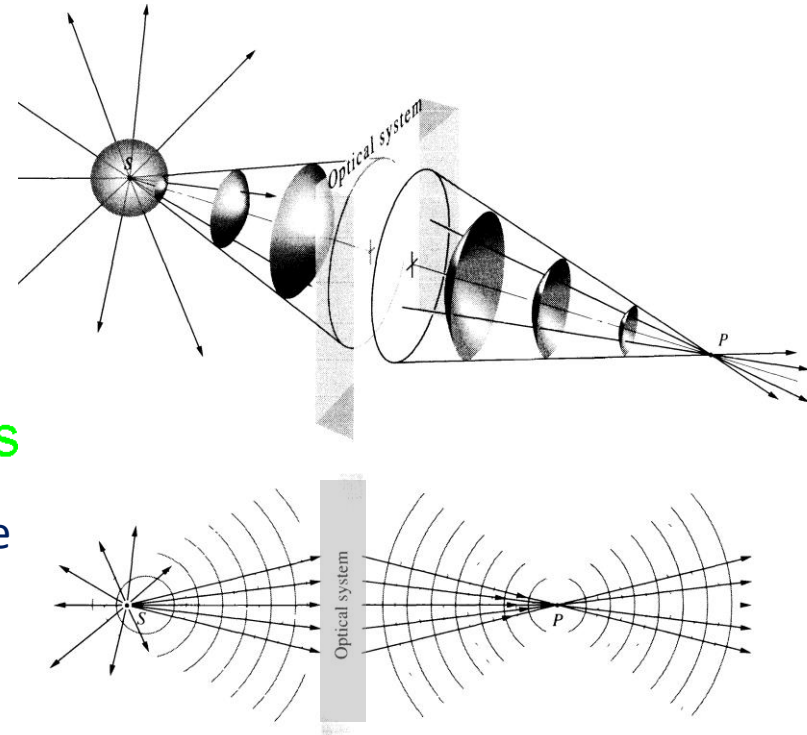
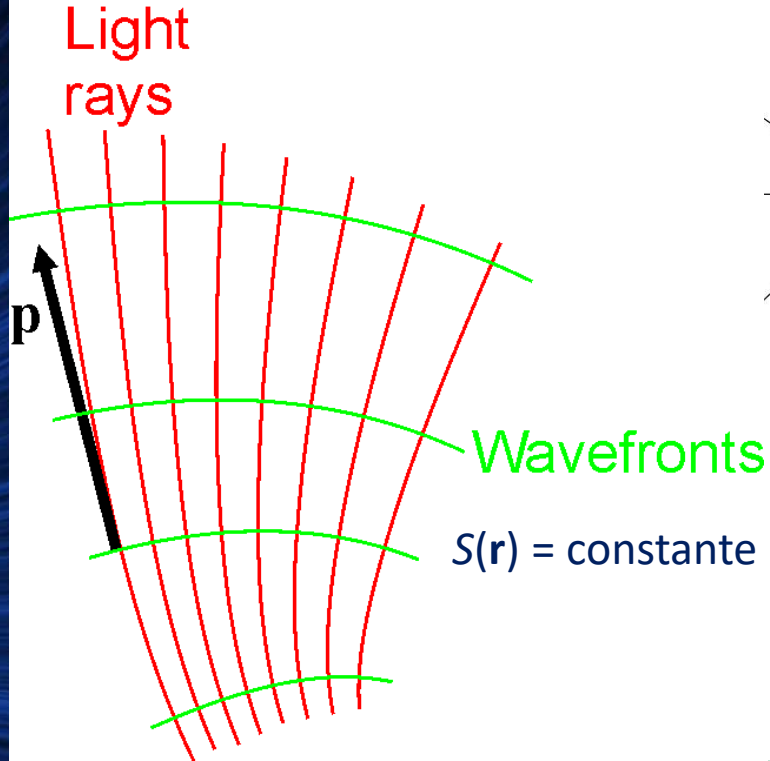
$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

- A equação de ondas é linear: o princípio da sobreposição é válido: qualquer combinação de soluções da equação de ondas é ainda uma solução.
- Na fronteira entre meios com diferentes índices de refração, a óptica ondulatória não é autónoma: tem de se recorrer à óptica electromagnética (equações de Fresnel).
- A equação de ondas é ainda válida para meios localmente homogêneos, em que o índice varia lentamente em distâncias da ordem de λ . Nestes casos, teremos $n(\mathbf{r})$ e $c(\mathbf{r})$.
- A Irradiância óptica, E - muitas vezes referida, erroneamente, por Intensidade, I (W/sr) - é :

$$E = 2\langle u^2(\mathbf{r}, t) \rangle \quad [W/m^2].$$
- O valor médio é calculado num tempo de integração / detecção, muito superior ao período da onda luminosa ($\approx 1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$).
- O fluxo (potência luminosa, W) através de uma superfície (área A) segundo a normal, é:

$$P(t) = \iint_A E(\mathbf{r}, t) dA = 2 \iint_A \langle u^2(\mathbf{r}, t) \rangle dA$$

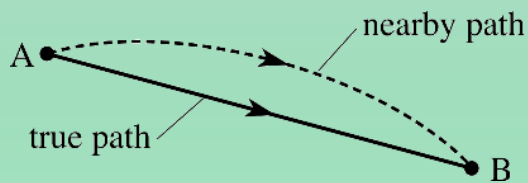


$$(\text{grad } S)^2 = n^2$$

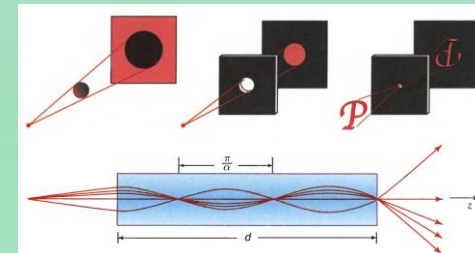
- A luz propaga-se sob a forma de **raios luminosos**.
- O meio é caracterizado por um **índice de refração**, $n = c/v$.
- O tempo de propagação de uma distância d é $d/v = nd/c$.
- O produto nd define o **Percurso Óptico**
- Em geral, num meio de índice variável, o **Percurso Óptico** entre dois pontos, A e B, $[AB]$, é dado por:

$$[AB] = \int_A^B n(\mathbf{r}) ds, \quad \text{ao longo de uma dada trajectória}$$

- **Princípio de Fermat**: De A para B, os raios luminosos seguem a **trajectória** que **minimiza** o tempo de percurso (ou Percurso Óptico):



$$\delta \left\{ \int_A^B n(\mathbf{r}) ds \right\} = 0$$



Princípio de tempo mínimo (→ tempo extremo)

- Quando se assumem campos **(E,H) monocromáticos** gerais, da forma:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r})e^{-i\omega t},$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$$

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{e}(\mathbf{r})e^{ik_0S(\mathbf{r})}$$

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{h}(\mathbf{r})e^{ik_0S(\mathbf{r})}$$

Principles of Optics
Born M, Wolf E., CUP,
Cap. 3

... em que **S(r)** representa o **Percurso Óptico** e se trabalham as equações de Maxwell para identificar eventuais restrições sobre **S(r)**, obtem-se a **Equação do Eikonal**, que **apenas constrange as normais** a **S(r)** (*n* é o índice de refração):

$$(\text{grad } \mathcal{S})^2 = n^2 \quad \left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z}\right)^2 = n^2(x, y, z)$$

- As superfícies **S(r) = constante** representam as **frentes de onda geométricas**.
- Os **raios luminosos** formam congruências normais a **S(r)**: por cada ponto P de cada frente de onda geométrica, passa um único raio luminoso que lhe é perpendicular (orientado segundo a normal à frente de onda, **N = grad S**).
- Resolver a Equação do Eikonal é determinar tais feixes de raios luminosos.
- Os campos e **feixes de raios** que decorram de soluções da Eq. do Eikonal traduzem a **aproximação da Óptica Geométrica do Electromagnetismo**.

Cada **ponto** do **objecto** gera um **feixe cónico** de raios luminosos – **feixe objecto** - com o objecto no vértice.

Os feixes são duais de famílias de **frentes de onda**: lugares geométricos de pontos atingidos pela “perturbação” luminosa em unísono.

Os pontos do objecto são **independentes** entre si.

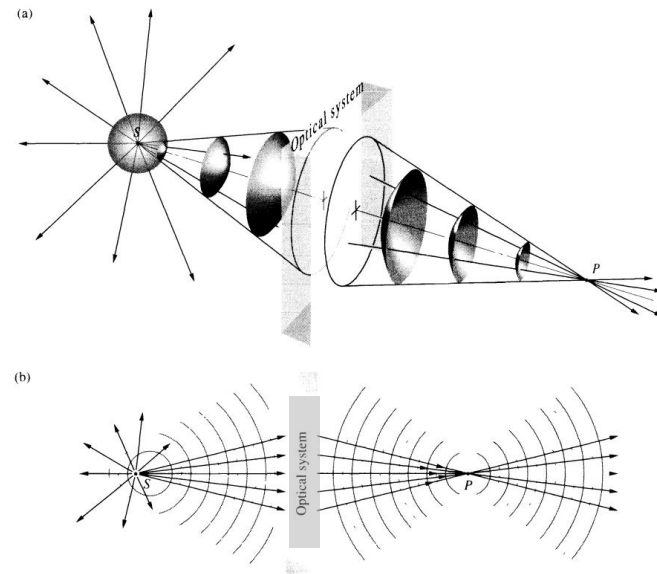
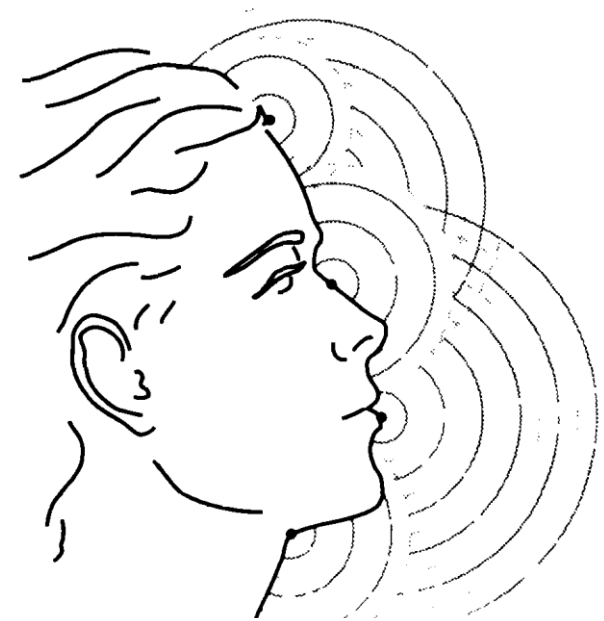
Um sistema óptico transforma **feixes objecto** em **feixes imagem**.

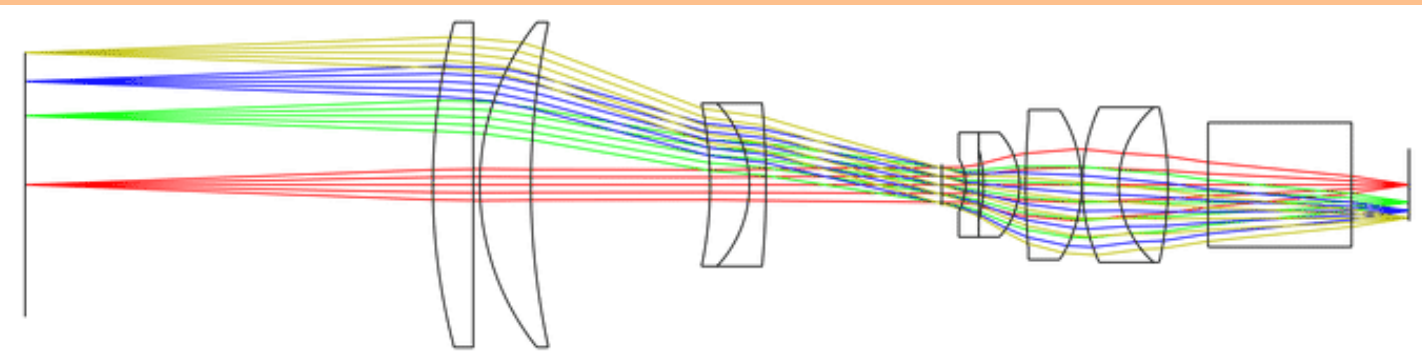
Nos sistemas ópticos **ideais**:

Os feixes imagem são **cónicos** ou “quase”...

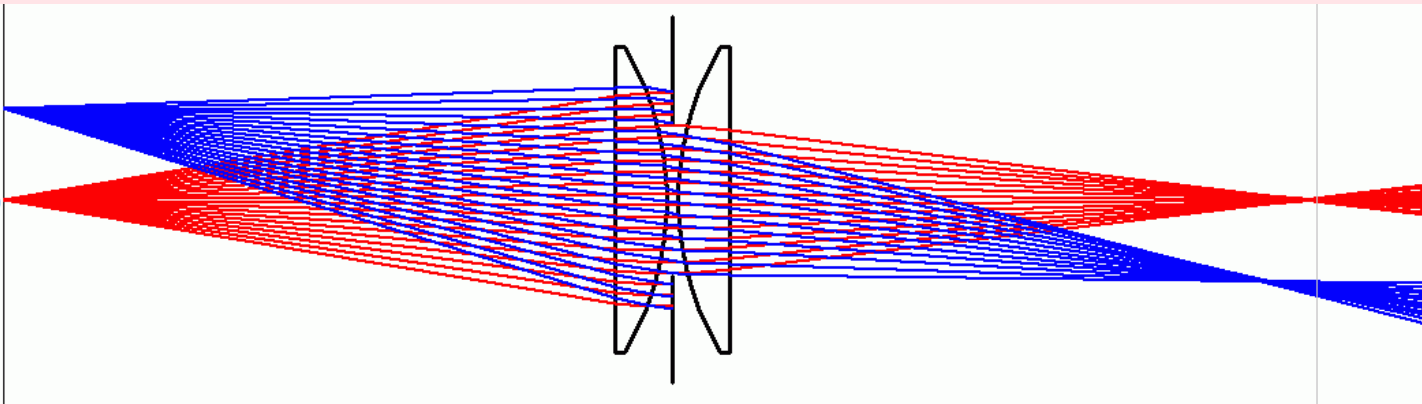
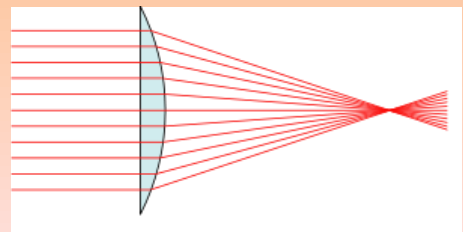
A **imagem** encontra-se no **vértice** do feixe imagem, esteja tal vértice onde se encontrar, **real** ou **virtual**.

Se os objectos se encontrem num **plano**, as imagens distribuir-se-ão **noutro plano**...: **conjugação**

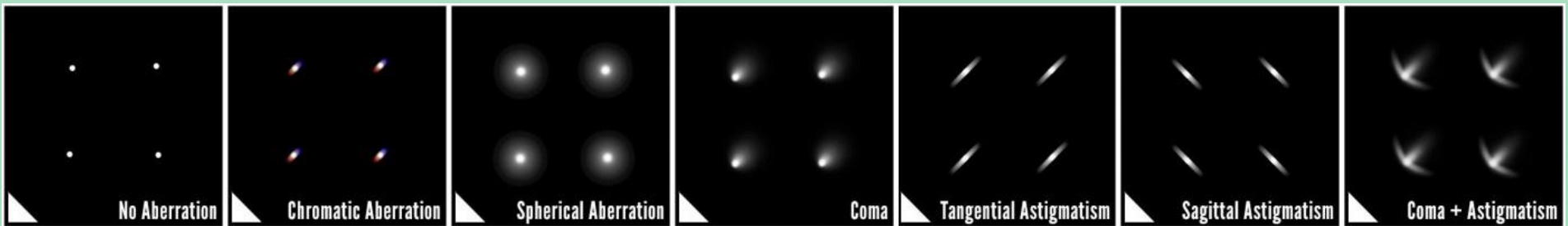
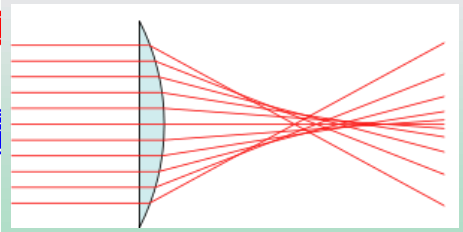




**Imagens perfeitas,
sistemas ideais**



**Imagens c/aberrações,
sistemas reais...**



No Aberration

Chromatic Aberration

Spherical Aberration

Coma

Tangential Astigmatism

Sagittal Astigmatism

Coma + Astigmatism

Roy Glauber

Nobel da Física, 2005

“Quantum Theory of Optical Coherence, Selected Papers and Lectures”

2007



- ❑ The statistical properties of **photon beams**, for example, have been discussed to date almost exclusively in classical or semiclassical terms. Such discussions may indeed be informative, but they inevitably leave open **serious questions of self-consistency**, and risk **overlooking** (*ignorar / negligenciar*) **quantum phenomena which have no classical analogs**.
- ❑ The **wave–particle duality**, which should be central to any correct treatment of photon statistics, does not survive the **transition to the classical limit**.
- ❑ The need for a more **consistent** theory has led us to begin the development of a fully **quantum-mechanical approach to the problems of photon statistics**.
- ❑ ...

- Equações de Maxwell (versão quântica)
- Matéria e radiação sujeitas a quantificação
 - Regras de quantificação típicas do oscilador harmónico.
- Interação radiação – matéria (emissão / detecção)
 - Recuperação da teoria semi-clássica (**matéria quântica, radiação clássica**)
 - Flutuações do vazio
 - Emissão espontânea
 - Estrutura hiperfina do H: levantamento da degenerescência (2s, 2p), **Lamb shift**
 - Equações de Bloch
 - Risca radiativa e factores de alargamento de risca (colisões, Doppler, saturações...); taxas de transição
- Radiação
 - Estados quânticos puros
 - Estado de “mistura”
 - Especificidades decorrentes das relações de incerteza de Heisenberg
- Correspondência com resultados clássicos

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathcal{H} &= \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathcal{E} &= -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathcal{B} &= 0.\end{aligned}$$

Mapa conceptual: Óptica Quântica

