

# Ondas Electromagnéticas e Óptica

1<sup>a</sup> & 2<sup>a</sup> aulas (13 & 15-2-2017)

José Manuel Rebordão  
João Pinto Coelho; Margarida Pires

## A disciplina: objectivos e programa

### Objectivos

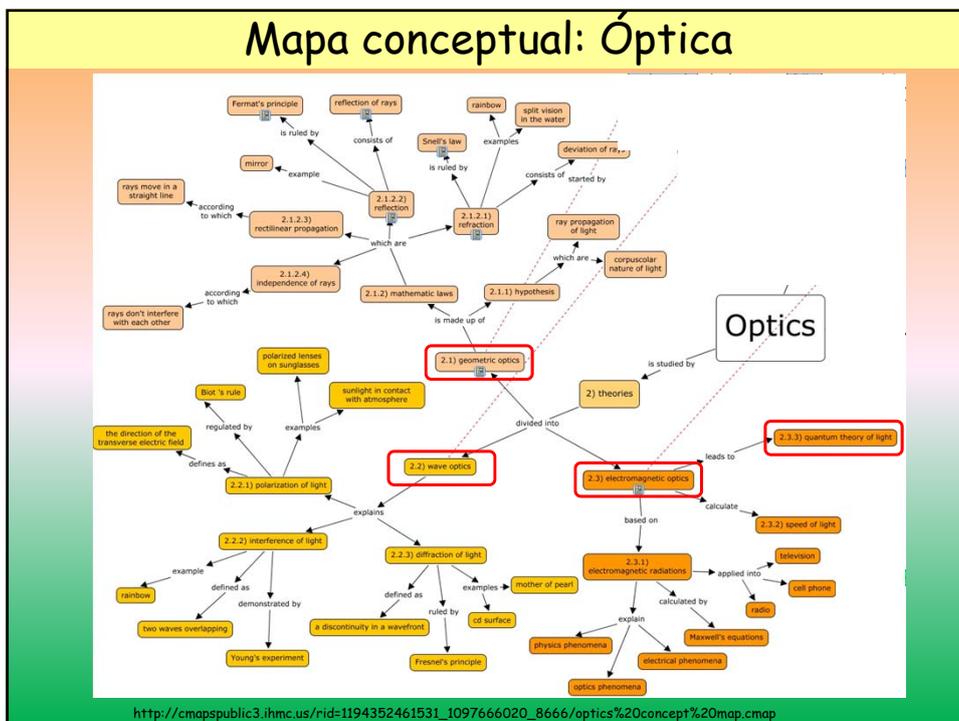
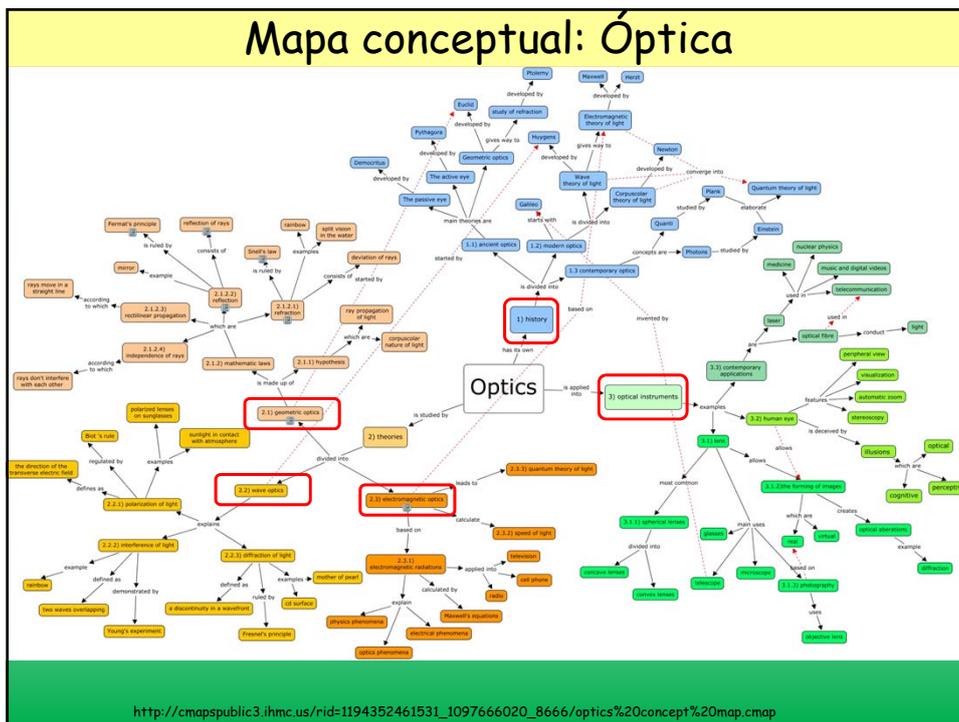
Apresentar os principais conceitos da **Óptica** na perspectiva de uma formação orientada para aplicações e para abordagens de engenharia, mas sem prejuízo de uma clara identificação da natureza fundamental dos fenómenos ópticos.

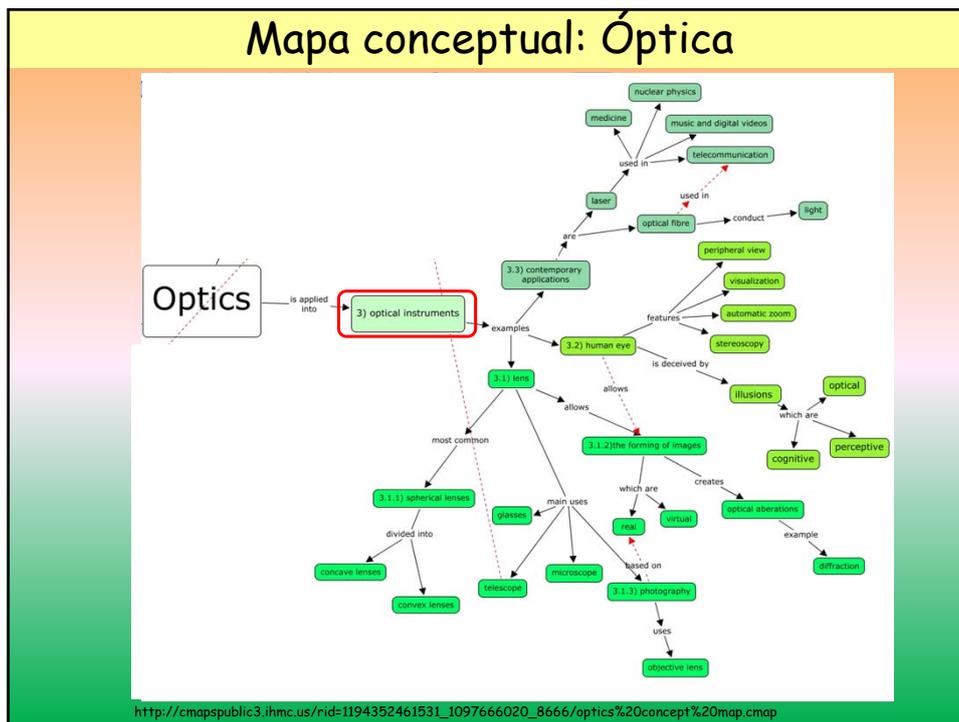
Deixar claros os **Paradigmas** que têm suportado a nossa compreensão dos fenómenos da luz, em termos de geração, interacção com a matéria, propagação e detecção.

Breve introdução ao mundo da **Fotónica**, com ênfase nas propriedades dos materiais, das fontes de energia e nas formas de utilização da energia.

### Programa

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





## Programa detalhado

- 1. Paradigmas**
  - o Paradigmas geométrico, ondulatório e vectorial
- 2. Elementos de óptica geométrica**
  - o Princípios: Fermat, Huygens
  - o Eq. dos planos conjugados e ampliações
  - o Sistemas delgados e espessos
  - o Combinação de sistemas
  - o Espelhos
  - o Aberrações
  - o Pupilas
  - o Olho: constituição, funcionamento, ametropias e compensação
  - o Outros instrumentos: microscopias, telescópios, guias de onda, ...
- 3. Conceitos de Electromagnetismo**
  - o Equações de Maxwell, eq. constitutivas
  - o Relação polarização  $P$  - campo  $E$
  - o ...

- 3. ...**
  - o Descrição EM de materiais, definições, permitividade, índice de refração; modelos
  - o Equações de onda e soluções: planas, esféricas, paraxiais, gaussianas, outras.
- 4. Propriedades e fenómenos ondulatórios**
  - o Propagação, princípio de Huygens-Fresnel
  - o Difracção, regimes de aproximação
  - o Interferências e interferómetros
  - o Equações de Fresnel
  - o (*Polarização, definição, tipos e fenómenos*)

## Programa detalhado

### 5. Radiometria e Fotometria(s)

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

### 6. Luminescência e dispersão (scattering)

- o *Luminescência e fosforescência*
- o *Distinção entre diversas formas de dispersão: Rayleigh, Raman, Brillouin*

### 7. Lasers

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

## Bibliografia

### Todos

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

Hecht, *Óptica* (Gulbenkian)

McCluney W R, *Introduction to Radiometry & Photometry*, Artech House, 1994

### Engª Biomédica e Biofísica

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

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

### Engª Física

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

### Física

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

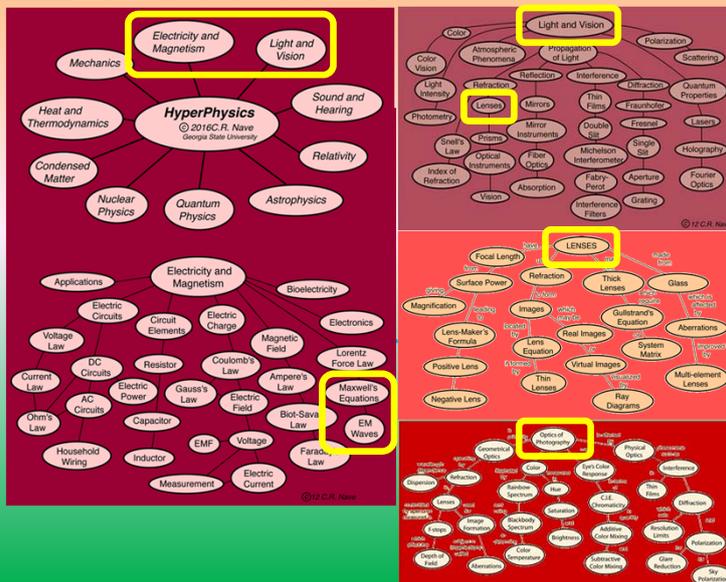
Born M, Wolf E, *Principles of Optics* (CUP)

Links a disponibilizar via FÉNIX  
pdf's disponíveis nos sítios "habituais"

(Library Genesis, ...)

## Bibliografia

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



## Aulas

### ➤ Teóricas

- **Exame:** será mais fácil para quem as frequentar...
- **Gestão de tempo:** cuidado com as avaliações intermédias, que não devem ter impactos transversais!
- **Lasers:** este tópico será coberto nas últimas 3 semanas e constitui uma parte importante do exame final
- **Slides:** não serão distribuídos. Em cada aula será claramente indicada a bibliografia seguida (com algumas exceções...)

### ➤ Teórico-práticas

- São para tirar dúvidas depois da matéria estudada
- Apenas serão distribuídas soluções de alguns dos problemas

### ➤ Dúvidas

- Horários a estabelecer e a divulgar no Fénix.
- Correio electrónico dos docentes:  
[jmrebordao@fc.ul.pt](mailto:jmrebordao@fc.ul.pt); [joao.coelho@fc.ul.pt](mailto:joao.coelho@fc.ul.pt); [mmpires@fc.ul.pt](mailto:mmpires@fc.ul.pt)

## Avaliação

Teste intermédio: 25%  
1 DE ABRIL, 2017  
 Exame: 75%

Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa  
**ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA**  
 2º SEMESTRE – 2015 / 2016  
 PROFESSORES: JOSÉ MANUEL REBORÇÃO / 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	NÚMERO

AS AFRIMAÇÕES SEQUINTE SÃO VERDADEIRAS OU FALSAS, ASSINALE V OU F NO QUADRADO CORRESPONDENTE.

1	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.	3	E1
4	EQUAÇÃO DE ONDAS		
5	A equação de ondas faz suspetar, ainda no século XIX, que a luz fosse uma onda electromagnética.	5	E1
6	EQUAÇÃO DE HELMHOLTZ		
7	A equação de Helmholtz resulta da equação de ondas quando se procuram soluções monocromáticas da equação de ondas.	7	E1
8	A equação de Helmholtz é uma equação linear, deste modo garantindo a validade do princípio de sobreposição.	8	E1
9	RELAÇÃO ENTRE O CAMPO ELÉCTRICO (E) E A DENSIDADE DE POLARIZAÇÃO (P) NOTAÇÃO: c - letra grega, OMI, minúscula. e - letra grega, EPSILON, minúscula.		
10	Em meios lineares e isotrópicos, o vector P é proporcional ao vector E, sendo a constante de proporcionalidade EPSILON OUT.	10	E1
11	A base física para a geração de uma densidade volumétrica de polarização (vector P) é a deformação das nuvens electrónicas dos átomos ou moléculas por acção de um campo eléctrico externo.	11	E1
12	OMI é a susceptibilidade dieléctrica e não tem dimensões.	12	E1
GRANDEZAS FÍSICAS QUE CARACTERIZAM UM MEIO NA PERSPECTIVA ELECTROMAGNÉTICA			
13	$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ $\mu = \mu_0 \mu_r$ $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$ $v = \frac{c}{n}$ $\lambda = \frac{c}{\nu}$ $\omega = 2\pi \nu$	13	
14	A expressão B só é válida em meios não magnéticos	14	E1
15	A expressão A representa a definição de constante dieléctrica do meio.	15	E1
PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAS			
16	A velocidade de propagação da luz diminui quando o índice de refração aumenta.	16	E1
17	Num meio dispersivo, o índice de refração não depende do comprimento de onda.	17	E1
18	Num meio dispersivo, o número de ondas é tanto maior quanto menor for a variação do índice de refração entre os dois extremos do espectro visível.	18	E1
19	Num meio com um coeficiente de atenuação de 0,5 /m, a irradiância da onda transmitida, ao fim de 1 m de propagação, é 50% da irradiância da onda incidente.	19	E1
ONDAS (NÃO GAUSSIANAS)			
20	As ondas esféricas são solução da equação de ondas, quando se procuram soluções que apenas dependam de r (r, t).	20	E1
21	As ondas monocromáticas resultam quando se impõe que a dependência temporal esteja inteiramente controlada por factor exp(iwt).	21	E1
22	NOTAÇÃO: $\phi$ é a letra grega FI, minúscula	22	E1
23	A equação de Helmholtz envolve o módulo do vector k (na fase de uma onda plana) e o parâmetro escalar $\phi$ que surge na relação de dispersão.	23	E1
ONDAS GAUSSIANAS			
24	Amplitude complexa (modo TEM <sub>00</sub> ): $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W(z)^2}\right] \exp\left[-i\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{z}{R(z)}\right)\right)\right]$	24	E1
25	Uma onda gaussiana, a função R(z) descreve o raio de curvatura da frente de onda a distância z do plano da cintura.	25	E1
26	No plano da cintura, W(z) = W0, que é o valor máximo que a largura do feixe pode tomar.	26	E1
27		27	E1

## Indicações aos Estudantes

Em cada acto de avaliação, as "Indicação aos Estudantes" serão actualizadas (→)

### Glossário

**FORMULÁRIO & SÍMBOLOS – Óptica Geométrica. Feixes Gaussianos**  
 Estes são apenas as expressões mais importantes, não se incluem possíveis relações "auxiliares" nem se explicitam os conceitos necessários para a sua aplicação.

$\alpha$ - ângulo $\beta$ - beta $\gamma$ - qui $\delta$ - delta $\epsilon$ - epsilon $\lambda$ - comprimento $\mu$ - mu $\nu$ - nu $\omega$ - omega $\theta$ - theta $\phi$ - phi $\rho$ - rho $r$ - tau $\sigma$ - sigma $\tau$ - tau $\xi$ - xi $\zeta$ - zeta	$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2$ $t_r = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$ $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$ $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ $t_t = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$ $T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$ $\delta(x) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)$ $\delta = \theta_2 - \alpha + \text{sen}^2\left[\mu^2 - \text{sen}^2(\theta_1)\right] \text{sen}(\alpha) - \text{sen}(\theta_1) \cos(\alpha)$ $n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$ $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ $\delta = (n-1)\alpha$ $\theta_2 = \frac{\delta_n + \alpha}{2}$ $n = \frac{\text{sen}(\frac{\delta_n + \alpha}{2})}{\text{sen}(\frac{\alpha}{2})}$ $\theta_{\text{max}} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ $I = \frac{2P}{\pi R^2}$ $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W(z)^2}\right] \exp\left[-i\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{z}{R(z)}\right)\right)\right]$ (TEM <sub>00</sub> )	$l = s_2$ $l' = s_1$ $\mu = n_1$ $n' = n_2$ $K = \frac{D}{R}$	$\frac{n_2}{s_2} + \frac{n_1}{s_1} = K$ $\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f}$ $\frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_1} = \frac{2}{R}$ $\frac{n_2}{s_2} + \frac{n_1}{s_1} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$ $K = \frac{n_2}{f} - \frac{n_1}{f}$ $\frac{1}{f} = (n_2 - n_1) \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{(n_2 - n_1)}{n_1} \frac{d_2}{R_2} \right]$ $\frac{1}{f} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ $\frac{1}{f_{\text{obj}}} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 R}$ $K = \frac{n_2 - n_1}{R}$ $K = \frac{2}{R}$ $\frac{1}{f_{\text{img}}} = \frac{n_2 - n_1}{n_1 R}$ $m = M_2 = -\frac{n_1'}{n_1} \frac{s_2}{s_1}$ $M_2 = \frac{R}{h} = -\frac{s_2}{s_1}$ $M_2 = -M_1^2$ $K = K_1 + K_2 = \frac{d}{n_1 R} - K_1 K_2$
---	---	---	--

## Ondas Electromagnéticas e Óptica

2º SEMESTRE – 2015 / 2016

INDICAÇÕES AOS ESTUDANTES

- A 1ª chamada de ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA terá lugar no dia **09 DE JUNHO, 4ª feira**, às 9:00h em anfiteatros do edifício CR **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:
    - I. Prática de Interferometria
    - II. Teórica e prática de Óptica Geométrica
    - III. 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):
    - I. As classificações do teste e do exame contarão, cada uma, 50% para a nota final.
    - II. O tempo de prova é, também, de 3.0 horas.
- Quem obtiver **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 **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 **gratuação 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:
  - a. Afirmações, que podem ser Verdadeiras ou Falsas;
  - b. Perguntas de escolha múltipla (4 opções).
- Respostas erradas ou respostas ambíguas contarão **pagamente**. 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 actualizadas 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:**
  - a. Teórica – Toda a matéria coberta nas aulas teóricas;
  - b. 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.

## OEM&O - Teste (1 de Abril, 2017)

Número de testes entregues: \*\*\*

Desistências: \*

### Alterações:

Pesos

T: 1x

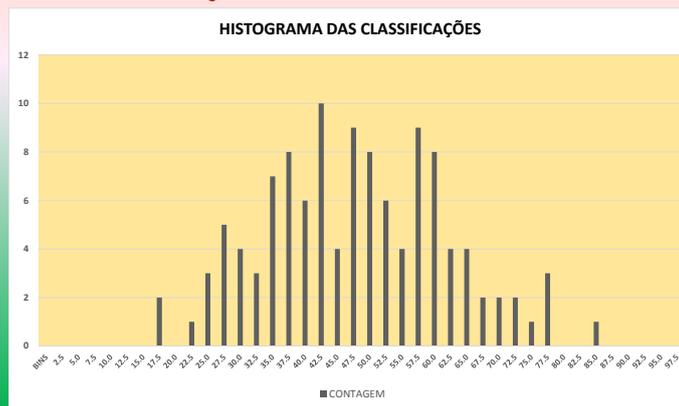
P: 2x

Respostas erradas

T: -50% → -\*\*%

P: -25% → -\*\*%

Distribuição das classificações: \*\* → \*\*. Média: \*\*

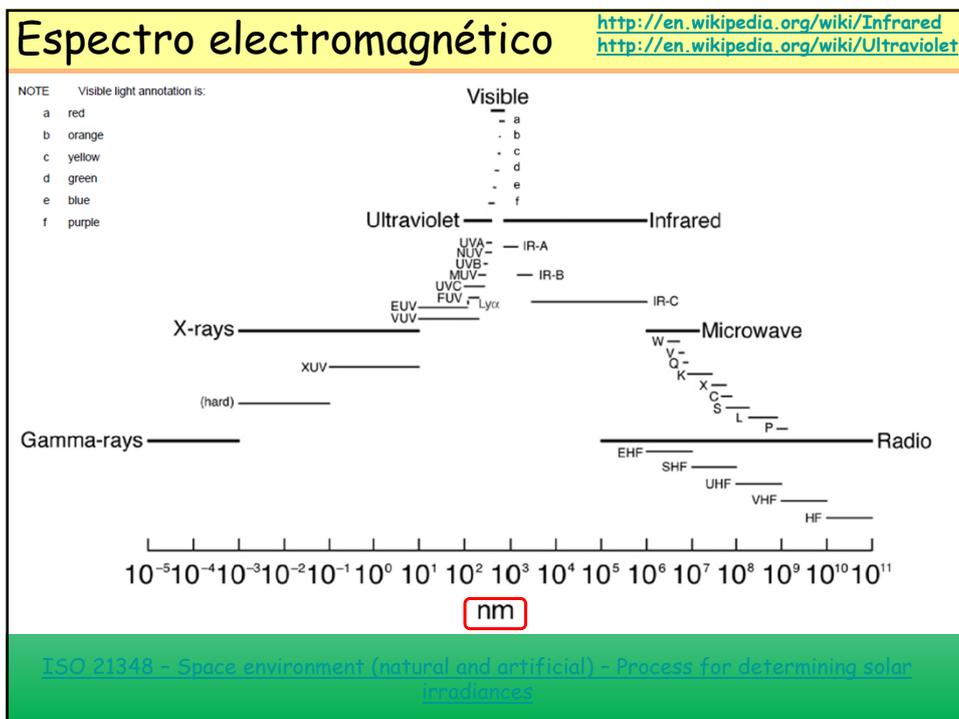
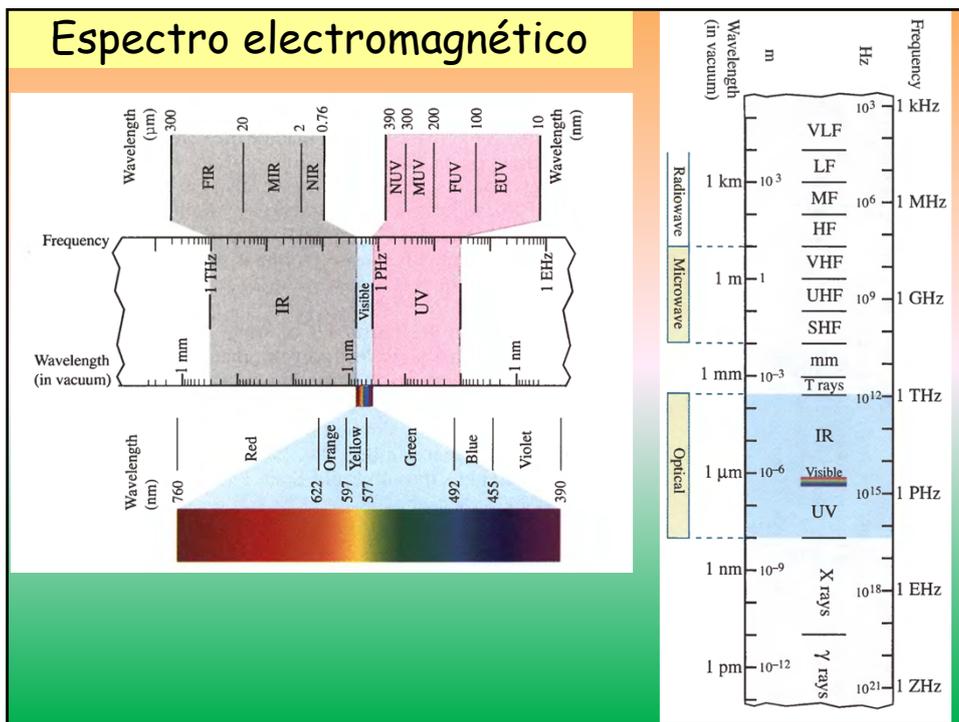


## Aulas de dúvidas

\*\* de março (\*<sup>a</sup>f) - \*\*h

\*\* de junho (\*<sup>a</sup>f) - \*\*h

Sala \*.\*.\*\*



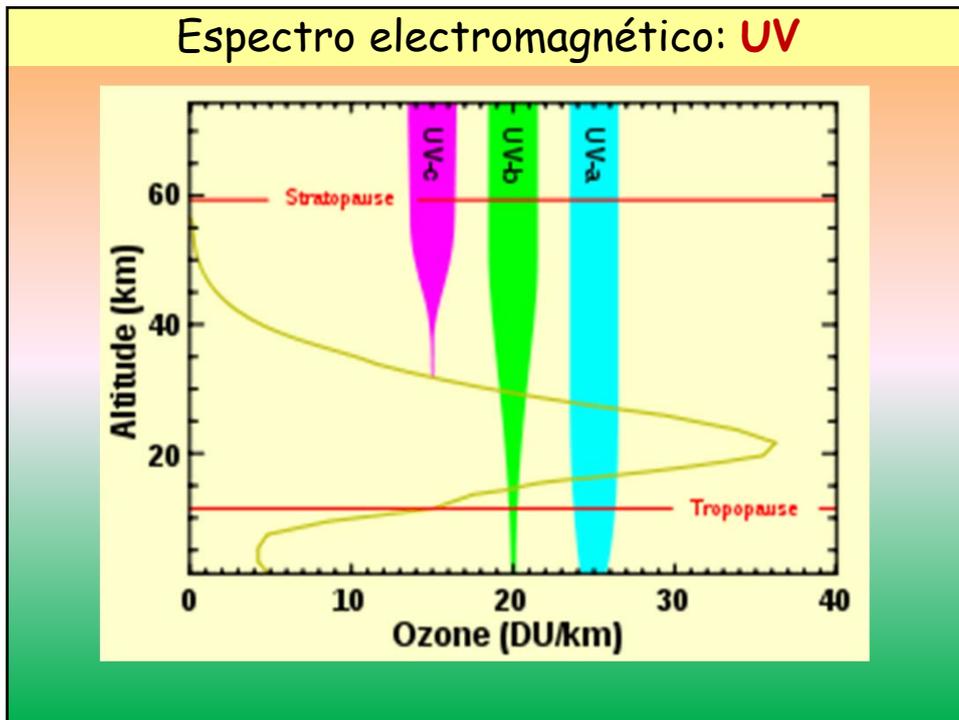
## Espectro EM

**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	$100 \leq \lambda < 400$	$100\ \text{nm} \leq \lambda < 400\ \text{nm}$	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- $\alpha$	$121 \leq \lambda < 122$	$121\ \text{nm} \leq \lambda < 122\ \text{nm}$	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	$380 \leq \lambda < 760$	$380\ \text{nm} \leq \lambda < 760\ \text{nm}$	optical
		$380 \leq \lambda < 450$	$380\ \text{nm} \leq \lambda < 450\ \text{nm}$	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	$760 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$760\ \text{nm} \leq \lambda < 1,00\ \mu\text{m}$	Near Infrared
	IR-A	$760 \leq \lambda < 1\ 400$	$760\ \mu\text{m} \leq \lambda < 1,40\ \mu\text{m}$	Middle Infrared
	IR-B	$1\ 400 \leq \lambda < 3\ 000$	$1,40\ \mu\text{m} \leq \lambda < 3,00\ \mu\text{m}$	Far infrared
	IR-C	$3\ 000 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$3,00\ \mu\text{m} \leq \lambda < 1,00\ \text{mm}$	
Microwave		$1\ 000\ 000 \leq \lambda < 15\ 000\ 000$	$1,00\ \text{mm} \leq \lambda < 15,00\ \text{mm}$	
	I'	$3,00 \times 10^8 \leq \lambda < 5,35 \times 10^8$	$3,00\ \text{mm} \leq \lambda < 5,35\ \text{mm}$	$(100,0 \geq \nu > 56,0)\ \text{GHz}$
	I''	$5,35 \times 10^8 \leq \lambda < 6,52 \times 10^8$	$5,35\ \text{mm} \leq \lambda < 6,52\ \text{mm}$	$(56,0 \geq \nu > 46,0)\ \text{GHz}$
	Q	$6,52 \times 10^8 \leq \lambda < 8,33 \times 10^8$	$6,52\ \text{mm} \leq \lambda < 8,33\ \text{mm}$	$(46,0 \geq \nu > 36,0)\ \text{GHz}$
	K	$8,33 \times 10^8 \leq \lambda < 2,75 \times 10^7$	$8,33\ \text{mm} \leq \lambda < 27,5\ \text{mm}$	$(36,0 \geq \nu > 10,90)\ \text{GHz}$
	X	$2,75 \times 10^7 \leq \lambda < 7,69 \times 10^7$	$27,50\ \text{mm} \leq \lambda < 57,70\ \text{mm}$	$(10,90 \geq \nu > 5,20)\ \text{GHz}$
	C	$4,84 \times 10^7 \leq \lambda < 7,69 \times 10^7$	$48,40\ \text{mm} \leq \lambda < 76,90\ \text{mm}$	$(6,20 \geq \nu > 3,90)\ \text{GHz}$
	S	$5,77 \times 10^7 \leq \lambda < 1,93 \times 10^8$	$57,70\ \text{mm} \leq \lambda < 193,00\ \text{mm}$	$(5,20 \geq \nu > 1,55)\ \text{GHz}$
	Z	$1,93 \times 10^8 \leq \lambda < 7,69 \times 10^8$	$193,00\ \text{mm} \leq \lambda < 769,00\ \text{mm}$	$(1,550 \geq \nu > 0,390)\ \text{GHz}$
	P	$7,69 \times 10^8 \leq \lambda < 1,33 \times 10^9$	$769,00\ \text{mm} \leq \lambda < 1,33\ \text{m}$	$(0,390 \geq \nu > 0,225)\ \text{GHz}$
		$100\ 000 \leq \lambda < 100\ 000\ 000\ 000$	$0,10\ \text{mm} \leq \lambda < 100\ \text{m}$	measurements: $(1\ 000\ 000 \leq \lambda < 10\ 000\ 000\ 000\ \text{nm})$
	Radio			
EHF		$1,00 \times 10^8 \leq \lambda < 1,00 \times 10^7$	$1,00\ \text{mm} \leq \lambda < 10,00\ \text{mm}$	Extremely High Frequency $(300 \geq \nu > 30)\ \text{GHz}$
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 $(30 \geq \nu > 3)\ \text{GHz}$
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 $(3\ 000 \geq \nu > 300)\ \text{MHz}$
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 $(300 \geq \nu > 30)\ \text{MHz}$
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 $(30 \geq \nu > 3)\ \text{MHz}$

## 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: IR

NAME		WAVELENGTH	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 <a href="#">fiber optic</a> telecommunication because of low attenuation losses in the SiO <sub>2</sub> 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 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 <a href="#">infrared signature</a> 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. <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 μm	1.2 - 80 meV	see also <a href="#">far-infrared laser</a> and <a href="#">far infrared</a> .

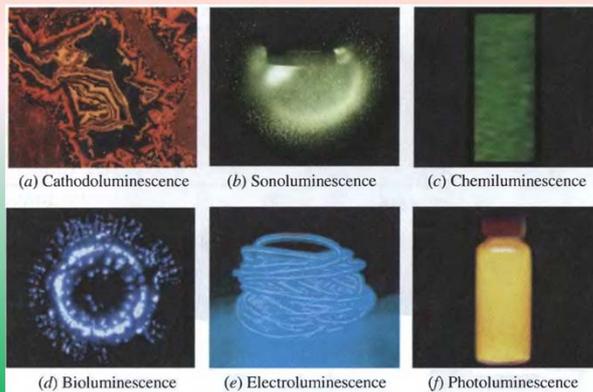
## Luminescência

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



## 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 fótons normalmente mais energéticos (UV, X ou g)

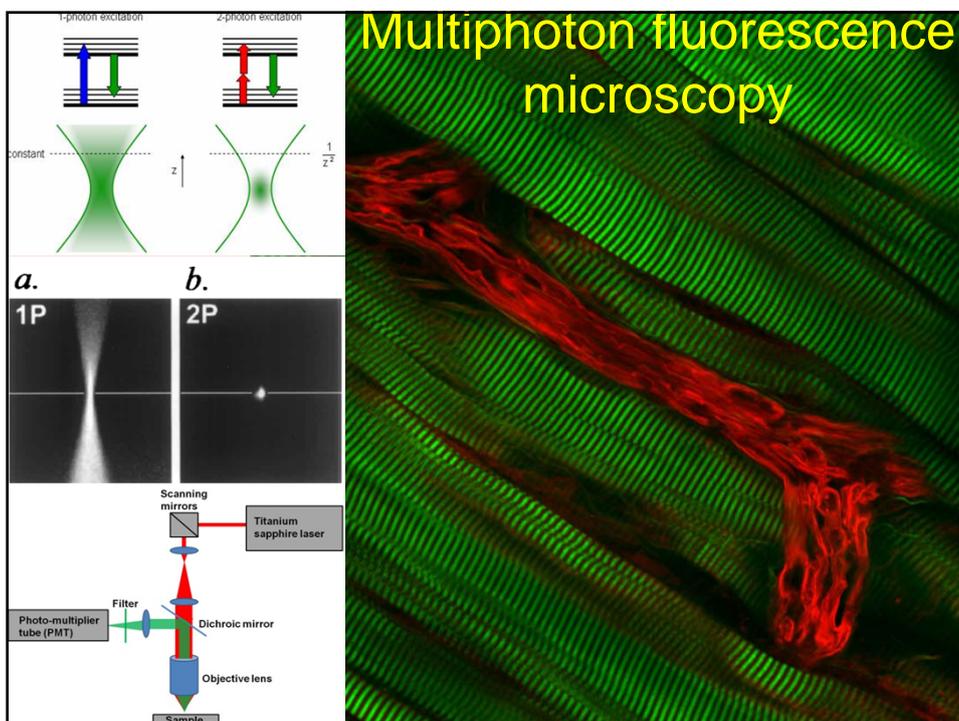
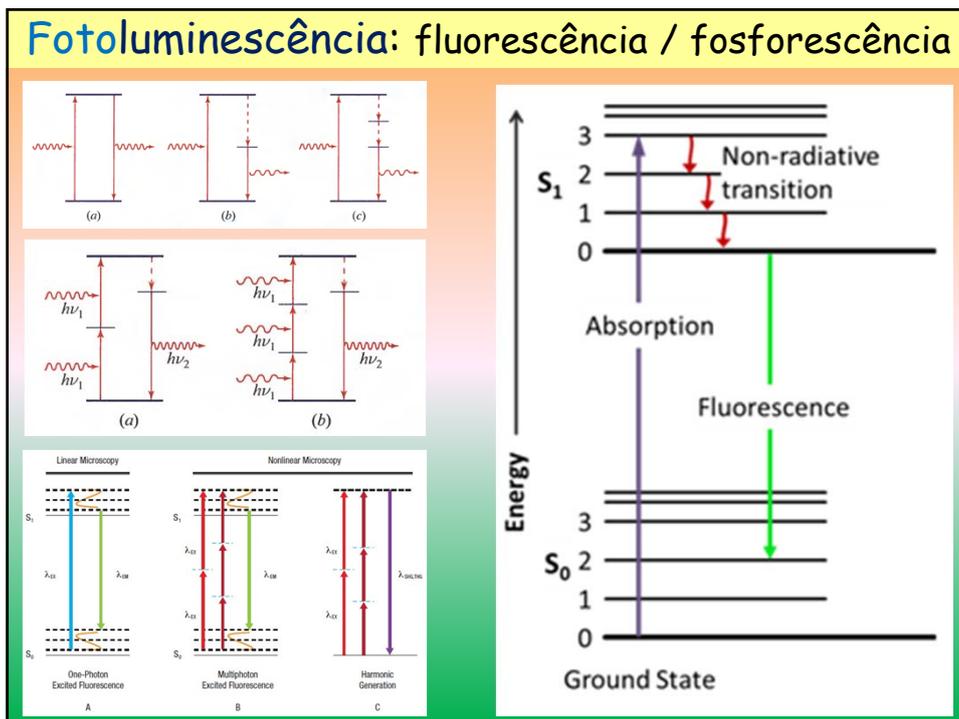
### ➤ Quimoluminescência

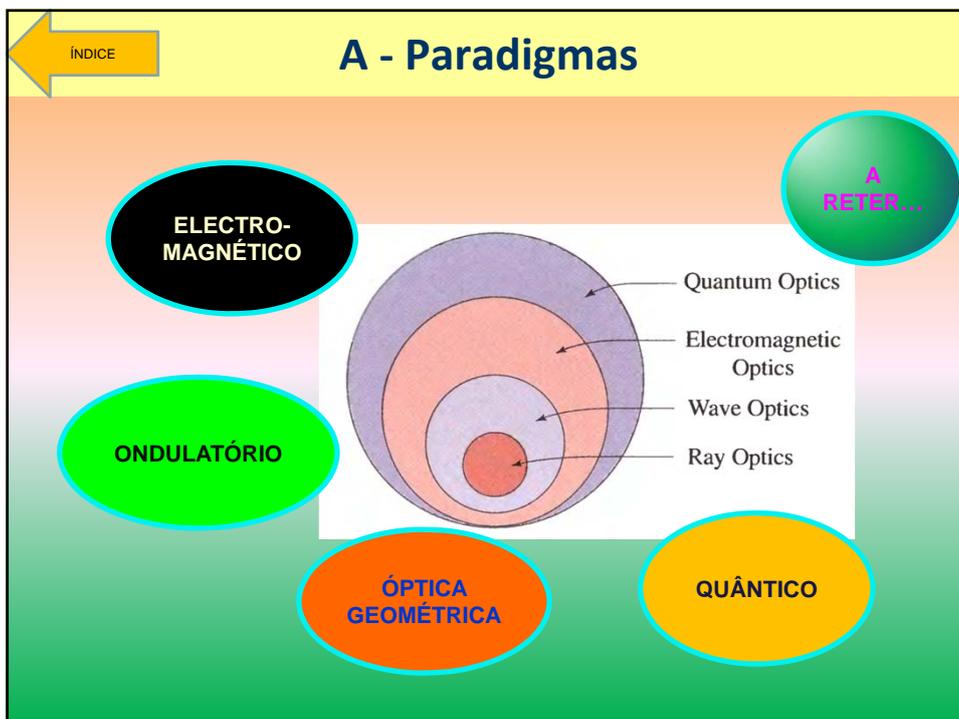
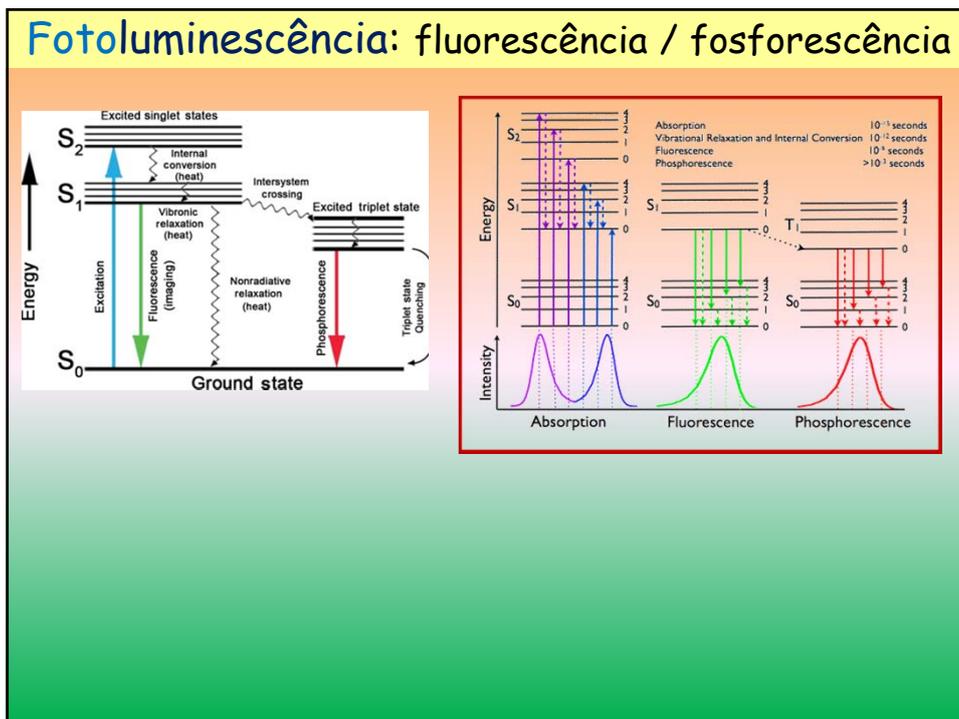
Emissão de luz decorrente de reacção química, com os produtos de reacção num estado excitado.

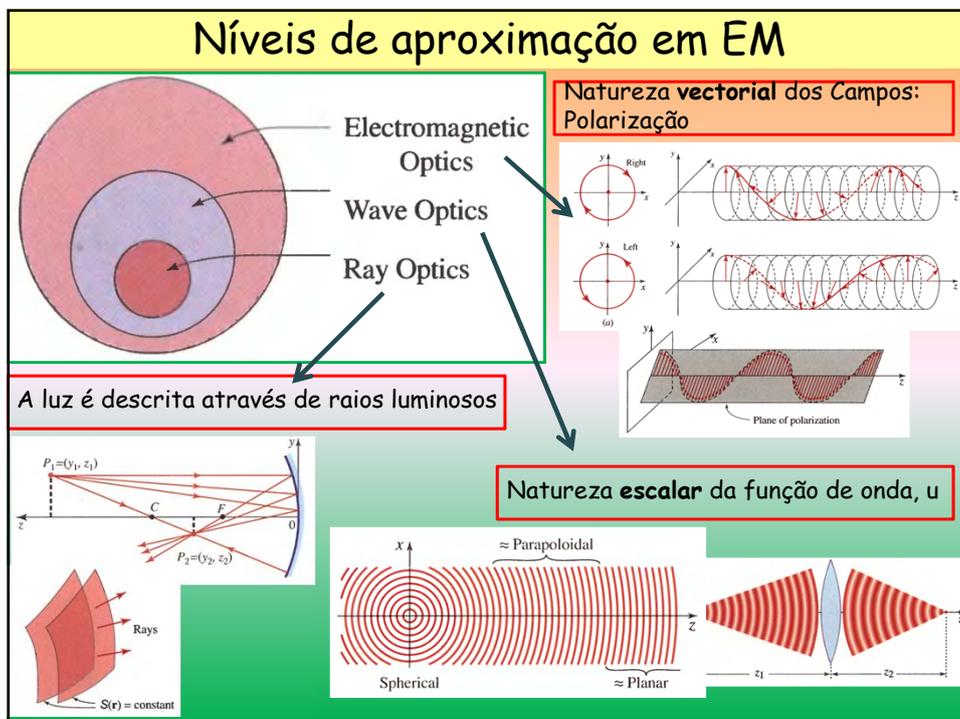
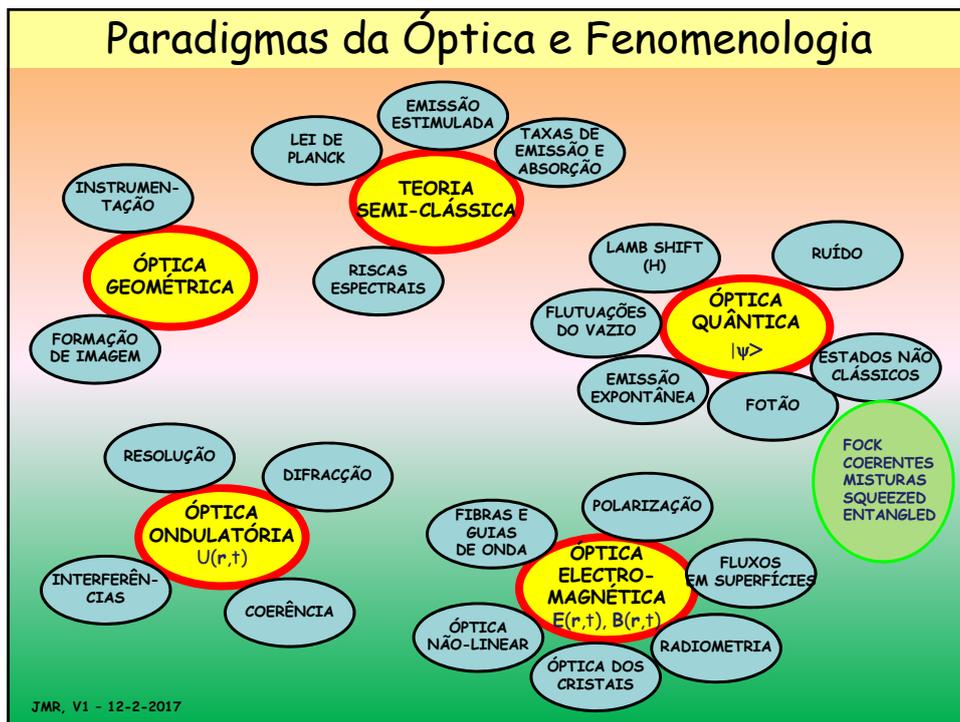
### ➤ Bioluminescência

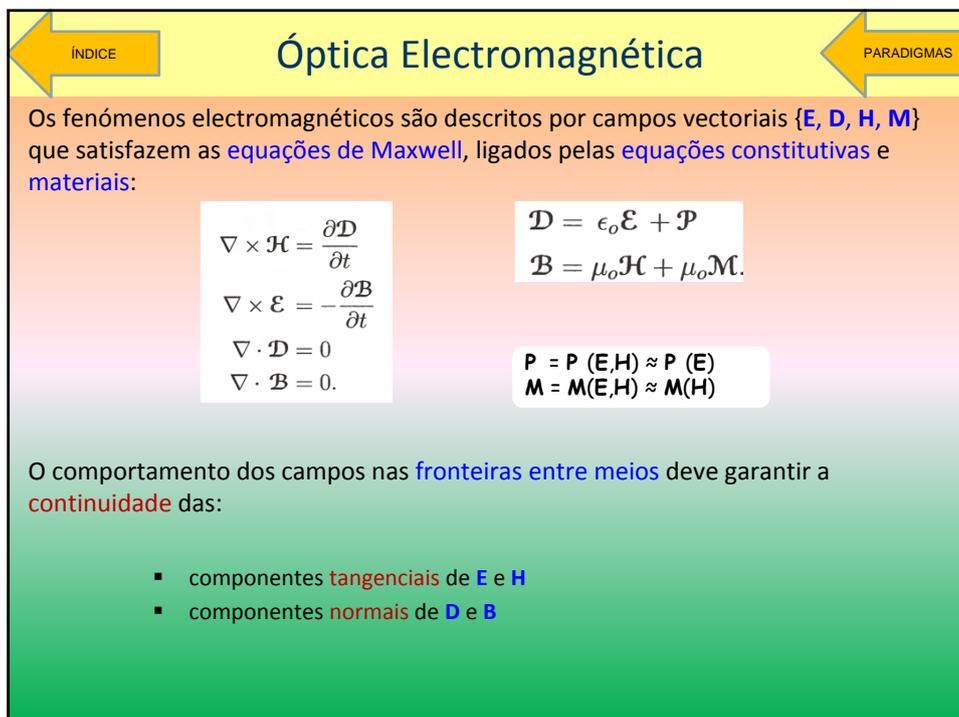
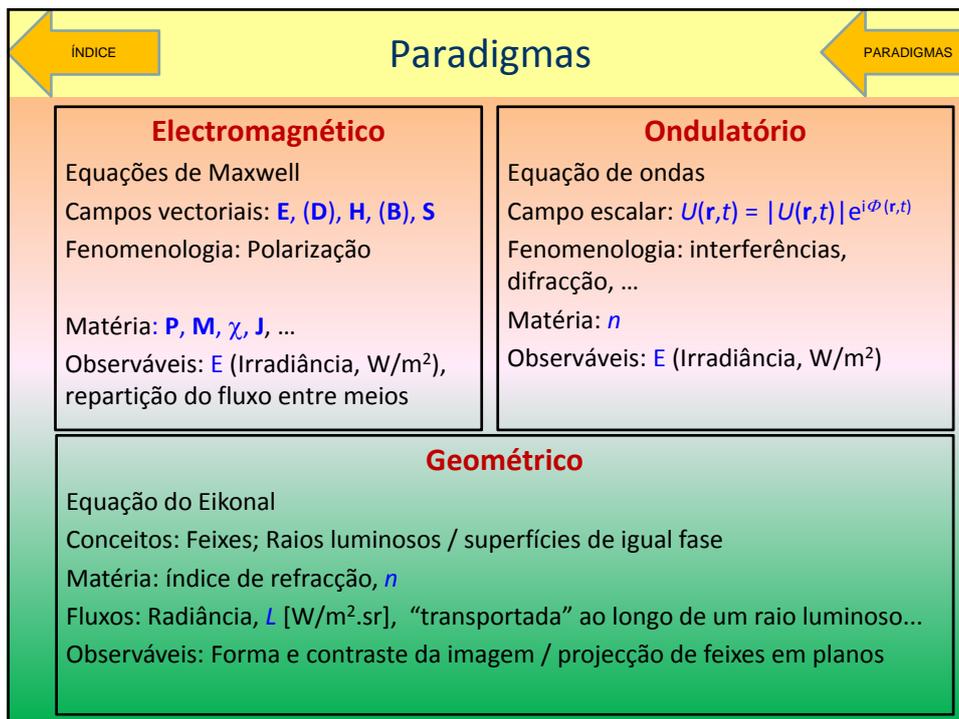
Quimoluminescência produzida por organismos vivos











ÍNDICE

## Óptica Electromagnética

PARADIGMAS

$\nabla \times \mathcal{H} = \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t}$ $\nabla \times \mathcal{E} = -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \mathcal{D} = 0$ $\nabla \cdot \mathcal{B} = 0.$	$\mathcal{D} = \epsilon_o \mathcal{E} + \mathcal{P}$ $\mathcal{B} = \mu_o \mathcal{H} + \mu_o \mathcal{M}.$
$\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathbf{P}(\mathbf{E})$ $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \approx \mathbf{M}(\mathbf{H})$	

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

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

A equação da continuidade (**teorema de Poynting**), identifica de que forma 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

ÍNDICE

## Óptica Ondulatória

PARADIGMAS

- Enquanto a luz se propagar através, ou em torno, de objectos cujas dimensões são bem superiores ao comprimento de onda ( $\lambda$ ), a óptica ondulatória é suficiente para descrever a maior parte dos fenómenos ópticos.
- Como o  $\lambda$  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<sup>2</sup> (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...)

**Óptica Ondulatória - Princípios**

INDICE PARADIGMAS

- 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  $\lambda$ . 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:
 
$$P(t) = \iint E(\mathbf{r}, t) dA = 2 \iint \langle u^2(\mathbf{r}, t) \rangle dA$$

**Óptica Geométrica**

INDICE PARADIGMAS

Light rays

Wavefronts

$S(\mathbf{r}) = \text{constante}$

orthogonality

Light source

Light rays

Light wavefronts

Optical system

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

**OG - Princípios**

INDICE PARADIGMAS

- 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**
- O Percurso Óptico entre dois pontos, A e B,  $[AB]$ , é dado por:
 
$$[AB] = \int_A^B n(\mathbf{r}) ds,$$
 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)**



**Raios luminosos e frentes de onda**

INDICE PARADIGMAS

- Quando se assumem campos **(E,H) monocromáticos** gerais, da forma:
 
$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0(\mathbf{r})e^{-i\omega t}, & \mathbf{E}_0 &= \mathbf{e}(\mathbf{r})e^{ik_0S(\mathbf{r})} \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{H}_0(\mathbf{r})e^{-i\omega t}, & \mathbf{H}_0 &= \mathbf{h}(\mathbf{r})e^{ik_0S(\mathbf{r})} \end{aligned}$$

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

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

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

- As superfícies  $S(\mathbf{r}) = \text{constante}$  representam as **frentes de onda geométricas**.
- Os **raios luminosos** formam congruências normais a  $S(\mathbf{r})$ : 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,  $\mathbf{N} = \text{grad } S$ ).
- 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**.

← ÍNDICE

## OG - Objecto / Imagem

← PARADIGMAS

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 uníssono.

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**

← ÍNDICE

## OG - Conjugação

← PARADIGMAS

**Imagens perfeitas, sistemas ideais**

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

No Aberration

Chromatic Aberration

Spherical Aberration

Coma

Tangential Astigmatism

Sagittal Astigmatism

Coma + Astigmatism

← ÍNDICE

## Óptica Quântica

← PARADIGMAS

**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**.
- ❑ ...

← ÍNDICE

## Óptica Quântica

← PARADIGMAS

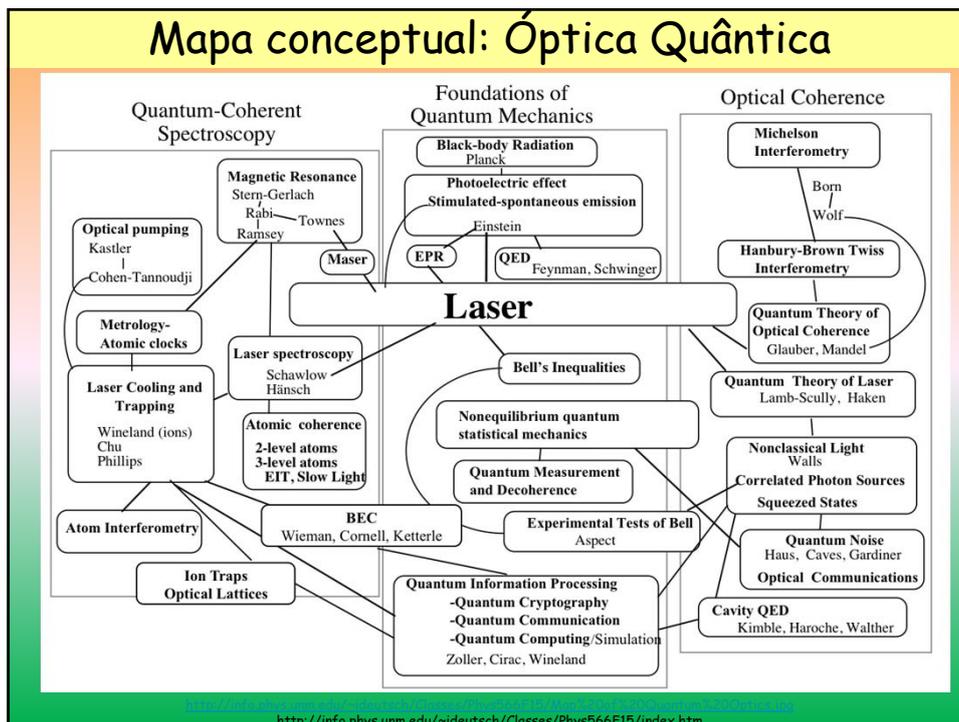
- Equações de Maxwell (versão quântica)
- Matéria e radiação sujeitas a quantificação
  - Regras de quantificação típicas do oscilador harmónico.
- Interação radiação – matéria (emissão / detecção)
  - Recuperação da teoria semi-clássica (matéria quântica, radiação clássica)
  - Flutuações do vazio
    - Emissão espontânea
    - Estrutura hiperfina do H: levantamento da degenerescência (2s, 2p), **Lamb shift**
  - Equações de Bloch
    - Risco radiativa e factores de alargamento de risco (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

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

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

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

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



← ÍNDICE

## A reter...

← PARADIGMAS

- A OEM é a teoria **vectorial** da luz, e a única que explica os fenómenos dependentes da **polarização** e incorpora as propriedades dos **materiais**.
- A OEM estabelece as referências para as matérias relativas a **energia** / fluxos.
- A OO traduz a aproximação da Óptica EM para fenómenos que não dependam da **polarização** da luz, e em regiões afastadas de focos, bordos, ... (à escala de  $\lambda$ ).
- A OO explora o facto de, em condições muito gerais, as 6 componentes de **E** e **H** obedecerem à mesma **equação escalar de ondas**, cuja solução, a **Amplitude Complexa**,  $U(r,t)$ , contempla um **módulo** e um **argumento**, a fase.
- A OG representa a aproximação da OEM para campos monocromáticos cujas **fases espaciais** satisfaçam a Equação do **Eikonal**.
- Em OG, a representação dos fenómenos é dual: **raios** e **frentes de onda**.
- As frentes de onda (OG) correspondem, no essencial, às superfícies de igual fase (OO).
- **Equações:** Maxwell, de ondas, do Eikonal.
- **Princípios:** Huygens-Fresnel, Fermat, Huygens.
- O **fotão** não tem lugar nos paradigmas clássicos... Em OEM e em OO há modelos de ondas (**ondículas**, **ôndulas**) que asseguram **confinamento** e comportamento como ondas ...