

Ondas Electromagnéticas e Óptica

José Manuel Rebordão
João Pinto Coelho

A disciplina: objetivos 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.

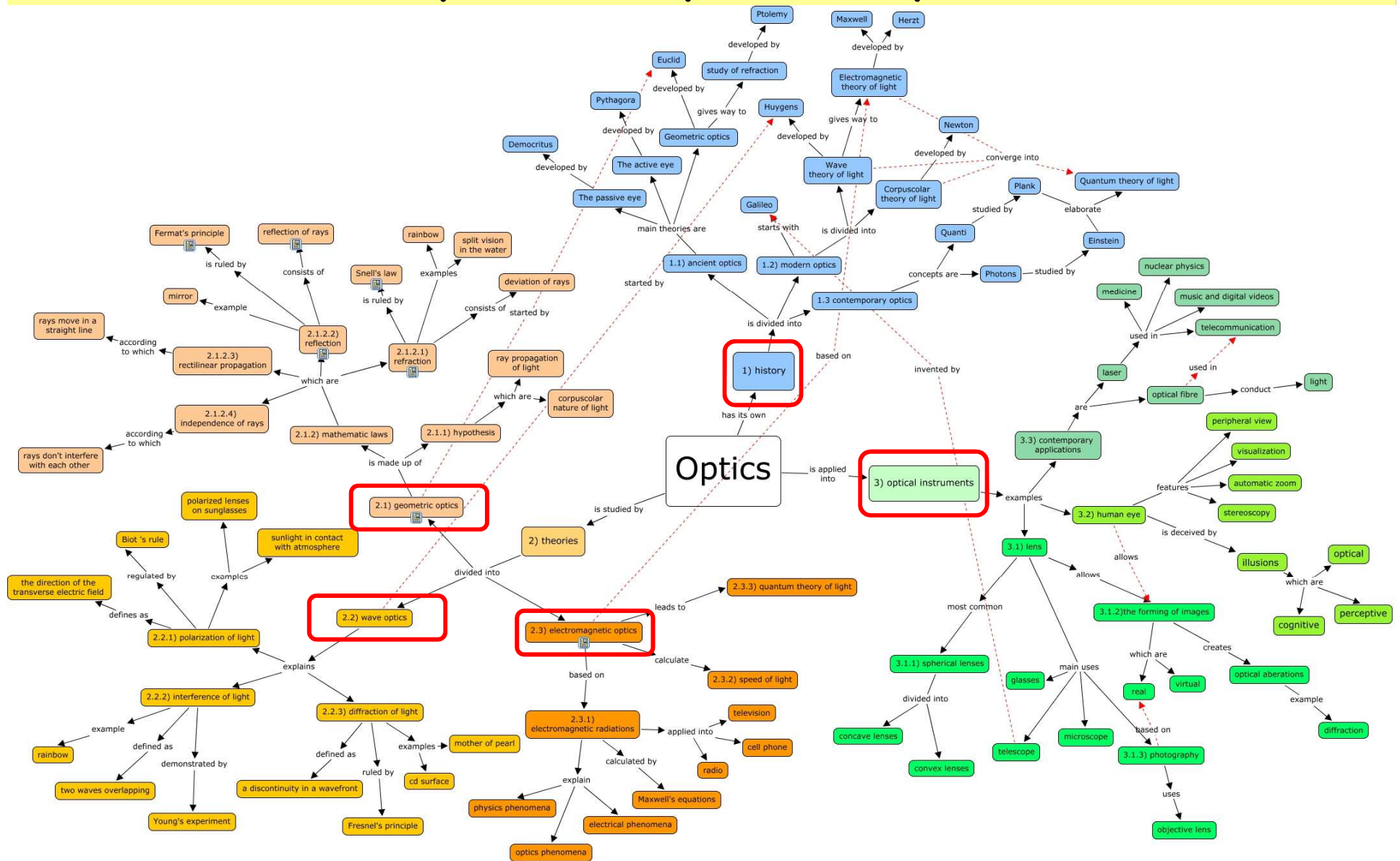
Deixar claros os **Paradigmas** que têm suportado a nossa compreensão dos fenómenos da luz, em termos de geração, interacção com a matéria, propagação e detecção.

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

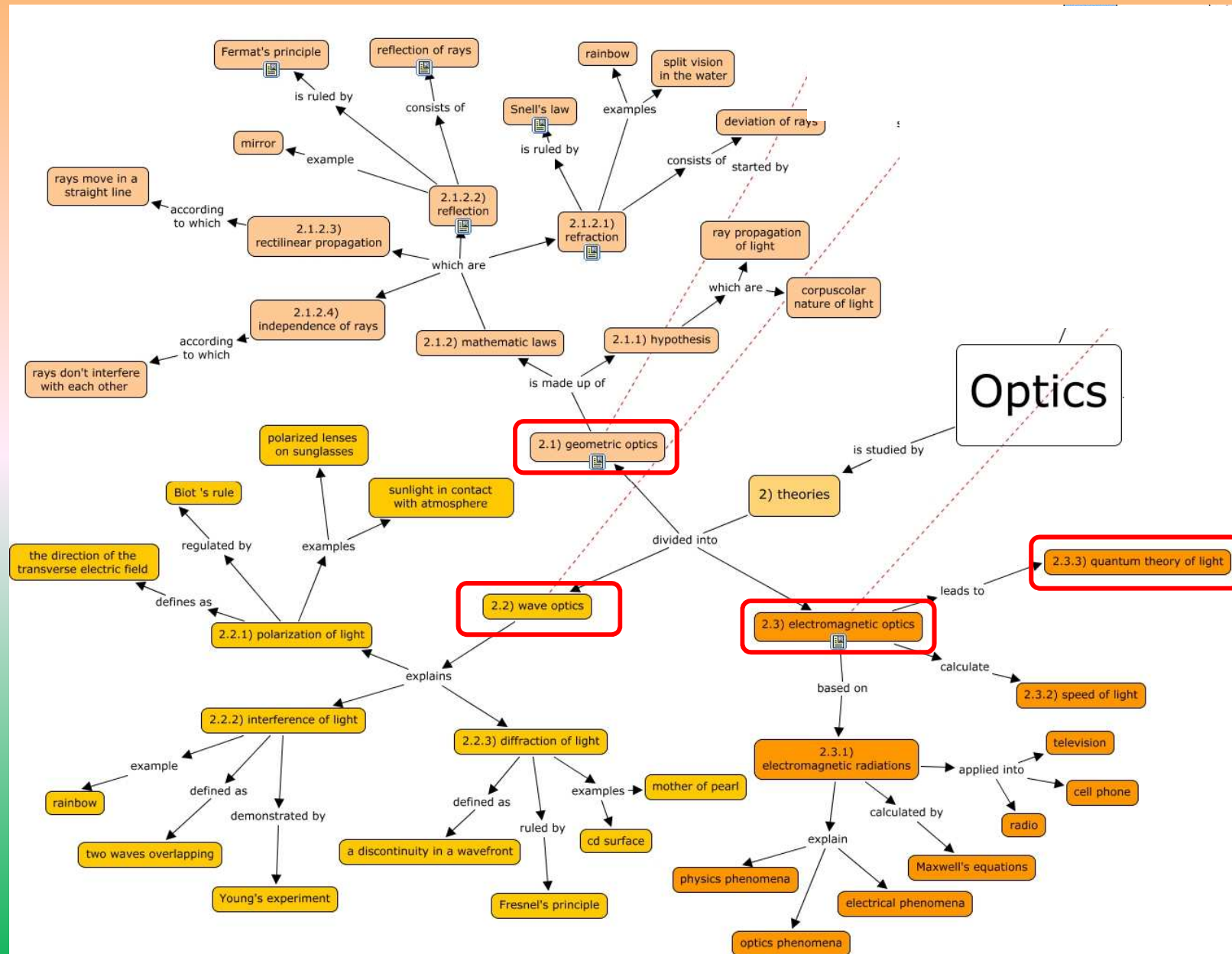
Programa

- 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

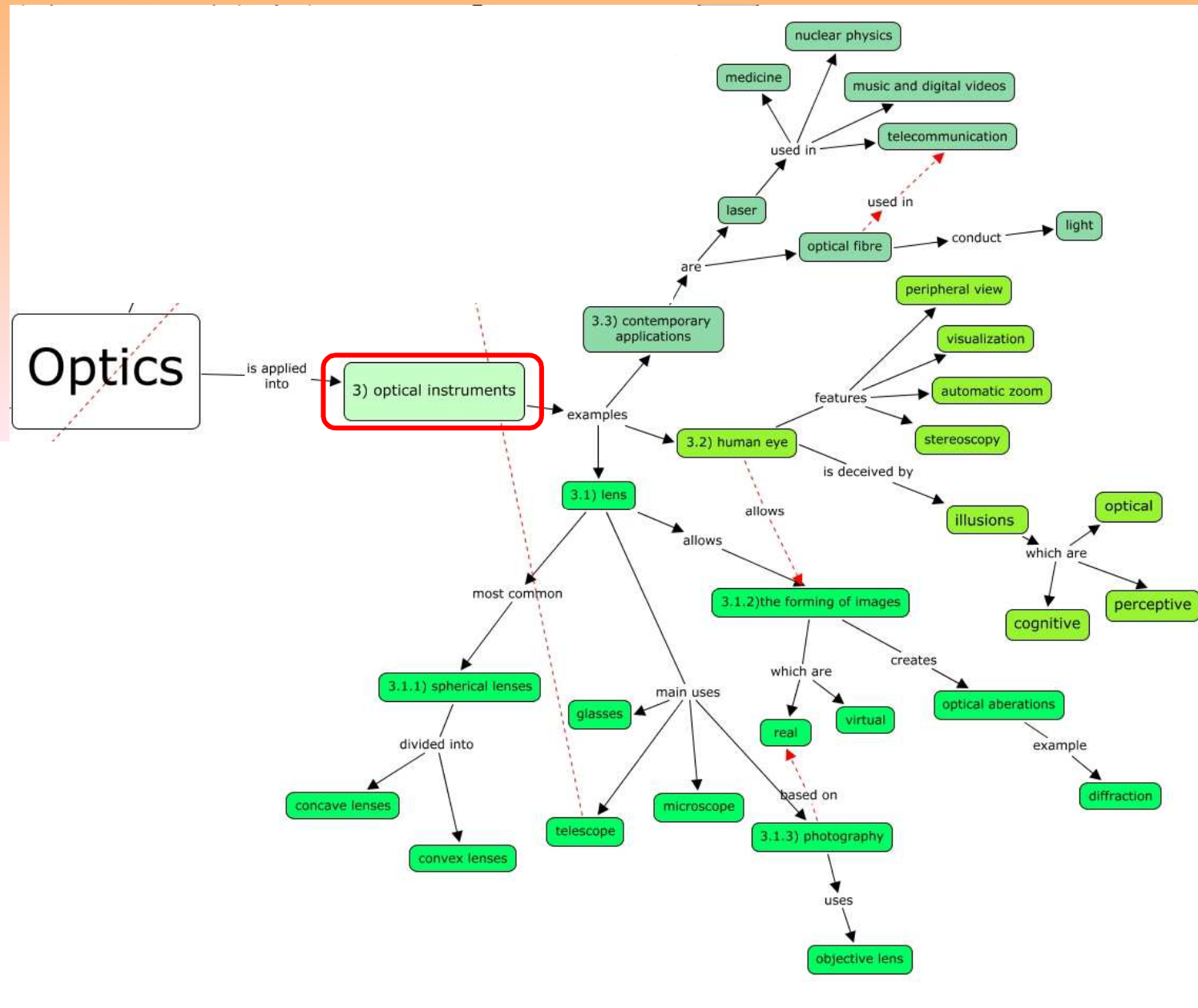
Mapa conceptual: Óptica



Mapa conceptual: Óptica



Mapa conceptual: Óptica



Programa detalhado

1. Paradigmas

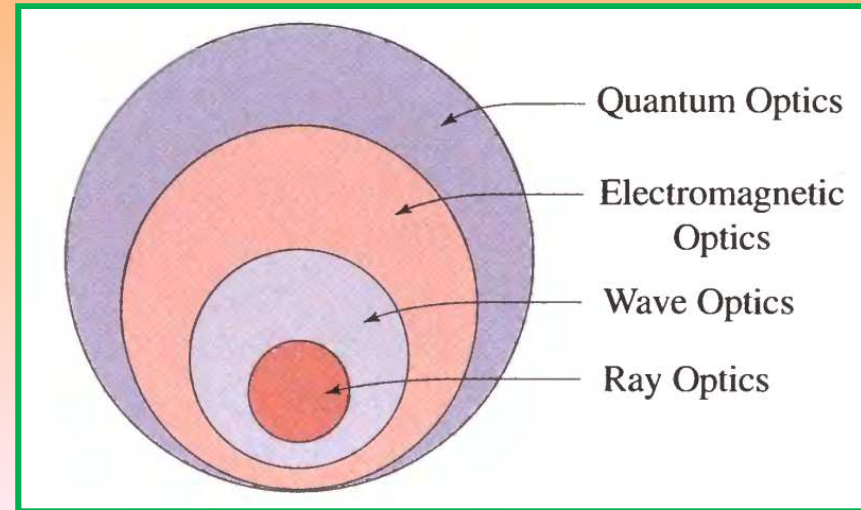
- Geométrico, ondulatório, vectorial, quântico

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
- Difraccção, regimes de aproximação
- Interferências e interferómetros

Programa detalhado

5. Óptica Electromagnética

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

6. Radiometria e Fotometria(s)

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

7. Lasers

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

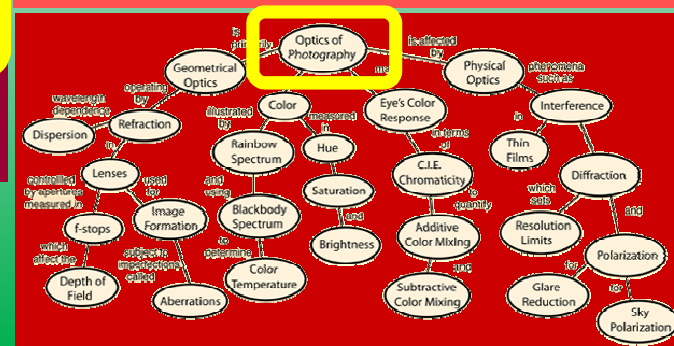
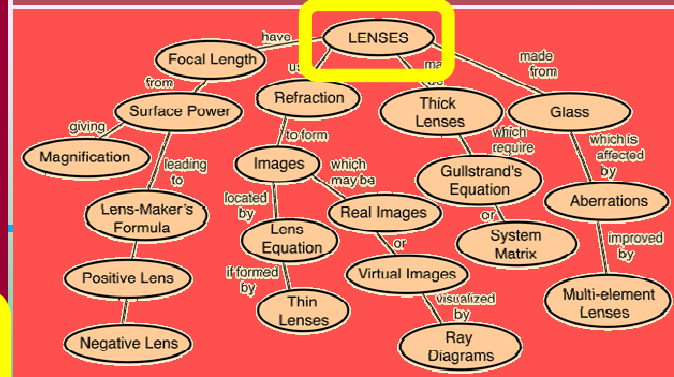
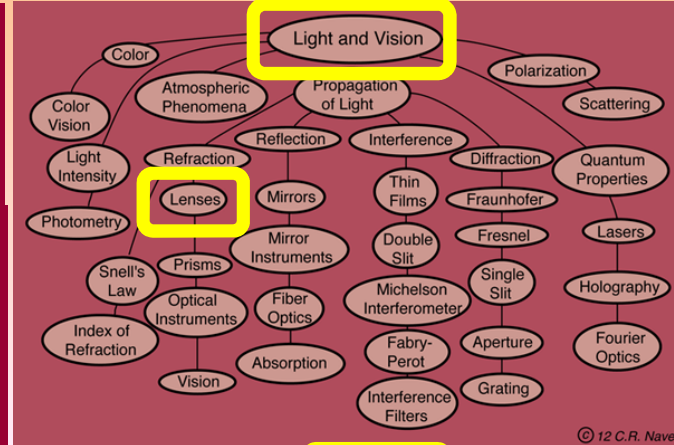
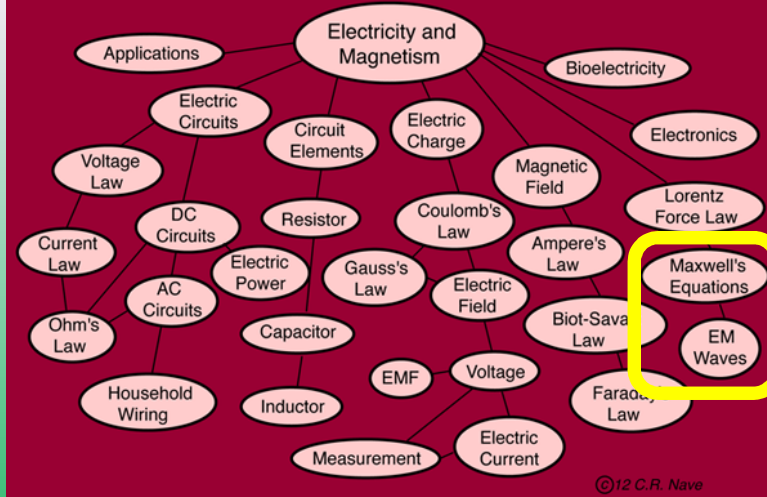
Born M, Wolf E, **Principles of Optics** (CUP)

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

- **Exames:** serão muito mais fáceis 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 2-3 semanas e constitui uma parte importante do exame final
- **Slides:** **não** serão distribuídos, com algumas excepções. Em cada aula será claramente indicada a bibliografia seguida.

➤ Teórico-práticas

- São para tirar dúvidas depois da matéria estudada...
- Os problemas serão distribuídos com antecedência
- Apenas serão distribuídas soluções de alguns problemas...

➤ Aulas de Dúvidas

- Podem ser solicitadas pelos alunos, em qualquer momento → delegados!
- Horários a estabelecer e a divulgar no Fénix.

➤ Correio electrónico dos docentes

jmrebordao@fc.ul.pt; joao.coelho@fc.ul.pt

Avaliação

Teste intermédio: 25 - 30%

14 DE ABRIL, 2018

Sábado

A confirmar...

Exame: 70 - 75%

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 NÚMERO

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.	<input type="checkbox"/>	3 E1					
4	EQUAÇÃO DE ONDAS							
5	A equação de ondas fez suspeitar, ainda no século XIX, que a luz fosse uma onda electromagnética.	<input type="checkbox"/>	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.	<input type="checkbox"/>	7 E1					
8	A equação de Helmholtz é uma equação linear, deste modo garantindo a validade do princípio de sobreposição.	<input type="checkbox"/>	8 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 isotrópicos, o vector P é proporcional ao vector E, sendo a constante de proporcionalidade EPSO.QUI.	<input type="checkbox"/>	10 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.	<input type="checkbox"/>	11 E1					
12	QUI é a susceptibilidade dieléctrica e não tem dimensões.	<input type="checkbox"/>	12 E1					
GRANDEZAS FÍSICAS QUE CARACTERIZAM UM MEIO NA PERSPECTIVA ELECTROMAGNÉTICA								
13	$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 1 + \chi$	$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 + \chi}$	$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{\mu_0 \epsilon_0}}$	$v = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$	$n^2 - 1 = \chi$	$\epsilon = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$		
	A	B	C	D	E	F		
14	A expressão B só é válida em meios não magnéticos	<input type="checkbox"/>	14 E1					
15	A expressão A representa a definição de constante dieléctrica do meio.	<input type="checkbox"/>	15 E1					
PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS MATERIAIS								
17	A velocidade de propagação da luz diminui quando o índice de refração aumenta.	<input type="checkbox"/>	17 E1					
18	Num meio dispersivo, o índice de refração não depende do comprimento de onda.	<input type="checkbox"/>	18 E1					
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.	<input type="checkbox"/>	19 E1					
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.	<input type="checkbox"/>	20 E1					
ONDAS (NÃO GAUSSIANAS)								
22	As ondas esféricas são solução da equação de ondas, quando se procuram soluções que apenas dependam de r = r .	<input type="checkbox"/>	22 E1					
23	As ondas monocromáticas resultam quando se impõe que a dependência temporal esteja inteiramente contida no factor exp(iwt).	<input type="checkbox"/>	23 E1					
24	NOTAÇÃO: w é a letra grega OMEGA, minúscula. A equação de Helmholtz impõe que o módulo do vector k (na fase de uma onda plana) é o parâmetro escalar k que surge na relação de dispersão.	<input type="checkbox"/>	24 E1					
ONDAS GAUSSIANAS								
25	Amplitude complexa (modo TEM ₀₀): $U(\rho, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] e^{-i\left[kz + \frac{\Delta\phi}{2R(z)} - \zeta(z)\right]}$							
26	Numa onda gaussiana, a função R(z) descreve o raio de curvatura da frente de onda à distância z do plano da cintura.	<input type="checkbox"/>	26 E1					
27	No plano da cintura, W(z) = W0, que é o valor máximo que a largura do feixe pode tomar.	<input type="checkbox"/>	27 E1					

INDICAÇÕES AOS ESTUDANTES

1. A 1ª chamada de ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS E ÓPTICA terá lugar no dia **14** DE JUNHO, 4ª feira, às 9:00h em anfiteatros do edifício CS: **A DEFINIR**
2. A duração total do exame será de 3.0 horas (não havendo tolerância adicional).
3. Trata-se de uma prova SEM CONSULTA, à excepção do formulário fornecido no início da prova
4. Quem realizou o teste com **classificação superior ou igual a 50%**:
 - a. Pode 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
 - b. Pode realizar a totalidade da prova, desta forma tornando irrelevante a classificação do teste.
 - c. 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.
5. Quem obteve **classificação inferior a 50%** no teste, deverá realizar a totalidade da prova.
6. O exame da 2ª chamada incidirá sempre sobre a totalidade da matéria, sendo irrelevante a classificação do teste.
7. Os alunos terão à sua disposição folhas de papel branco para preparar as suas respostas.
8. 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".
9. 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.
10. A presença visível de qualquer objecto com capacidades de comunicação Wireless / Bluetooth junto do aluno dará lugar à **anulação do teste ou do exame**.
11. Quaisquer outros objectos pessoais (mochilas, casacos, etc) serão depositados junto do quadro da sala.
12. Os alunos podem manter uma garrafa de água, mas não poderão sair e regressar da sala durante o teste.
13. A prova será constituída por perguntas de dois tipos:
 - a. Afirmações, que podem ser Verdadeiras ou Falsas;
 - b. Perguntas de escolha múltipla (4 opções).
14. 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.
15. As respostas serão assinaladas a **caneta** (não a lápis), no enunciado do teste.
16. Todos os alunos, incluindo os que desistam, têm de **devober o enunciado aos docentes quando saírem da sala**.
17. **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.
18. **Será distribuído** um **Formulário** com fórmulas principais relativas a: feixes gaussianos, óptica geométrica e equações de Fresnel.

Indicações aos Estudantes

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

Glossário

α – alfa
β – beta
γ – qui
δ – delta
ε – epsi
λ – lambda
μ – miu
ν – nu
π – pi
θ – theta
ρ – rho
τ – tau
ω – omega
Ω – OMÉGA
ξ – qsi

Refracção

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\theta_{\text{crítico}} = \text{asin}(n_2 / n_1)$$

$$\theta_{\text{Brewster}} = \text{atan}(n_2 / n_1)$$

FORMULÁRIO

Prismas

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

$$\delta_{11} = (\delta_m + \alpha) / 2$$

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

Equações de Fresnel

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

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

$$r_{\parallel} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i - \cos \theta_t}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \cos \theta_t}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \cos \theta_t}$$

$$R_{\perp} = r_{\perp}^2$$

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2$$

$$T_{\perp} = \frac{4 n_1 n_2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_1 + n_2)^2}$$

$$T_{\parallel} = \frac{4 n_1 n_2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{(n_1 - n_2)^2}$$

$\tan \theta_t = n_1 / n_2$
 $\sin \theta_t = n_1 / n_2$

Óptica Geométrica

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

$$K = \frac{1}{R}$$

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

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

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

$$K_{\text{L-objeto}} = (n_1 - n_{\text{meio}}) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

Ondas paraxiais

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

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

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

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

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

Modos de Bessel

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

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

Comprimento de onda (nm)	Índice de refração	Índice de refração	Índice de refração
400	1.500	1.500	1.500
500	1.480	1.480	1.480
600	1.460	1.460	1.460
700	1.450	1.450	1.450
800	1.440	1.440	1.440
900	1.430	1.430	1.430
1000	1.420	1.420	1.420

Olho humano

OEM&O - Teste (14 de abril, 2018)

Número de testes entregues: ***

Desistências: *

Alterações:

Pesos

T: 1x

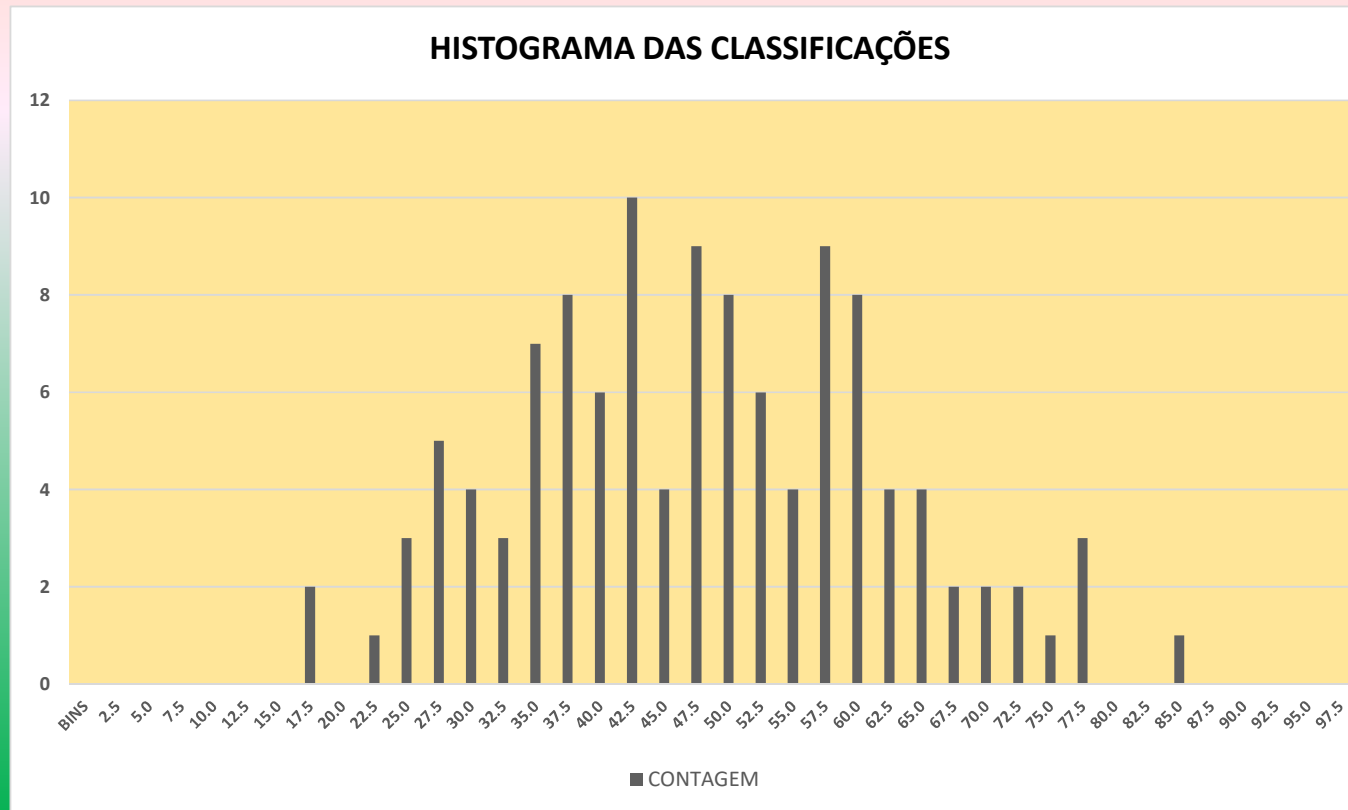
P: 2x

Respostas erradas

T: -50% → -**%

P: -25% → -**%

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



Aulas de dúvidas

**** de março (*af) – **h**

**** de junho (*af) – **h**

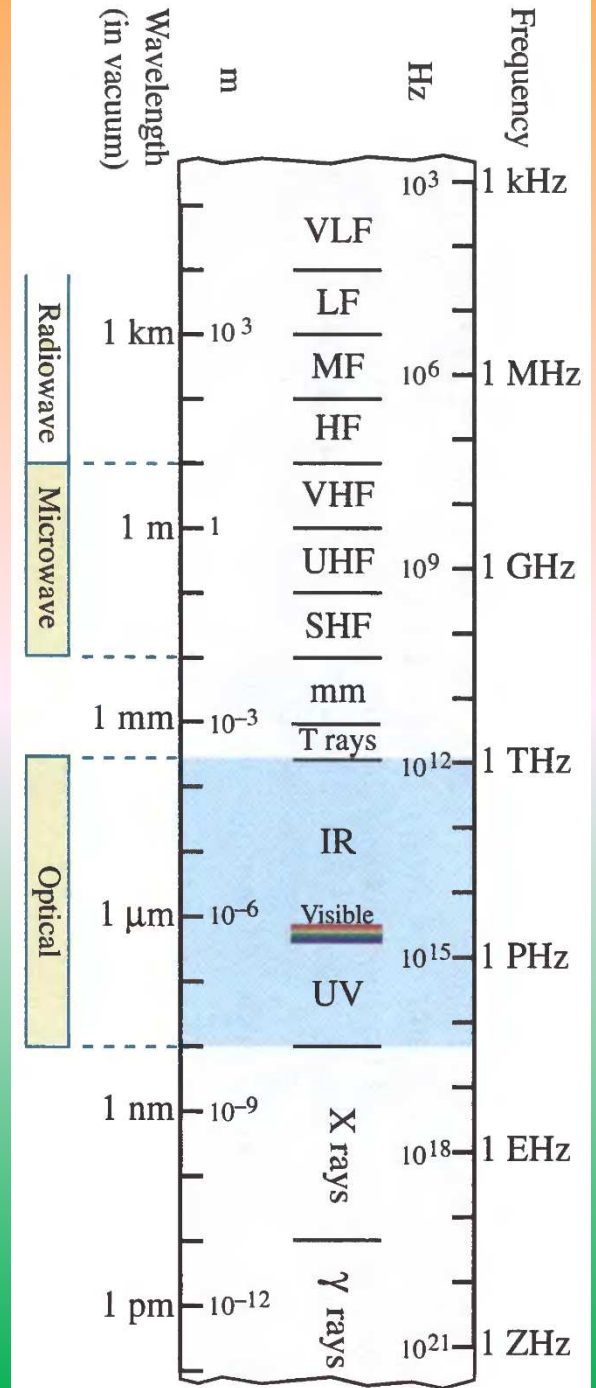
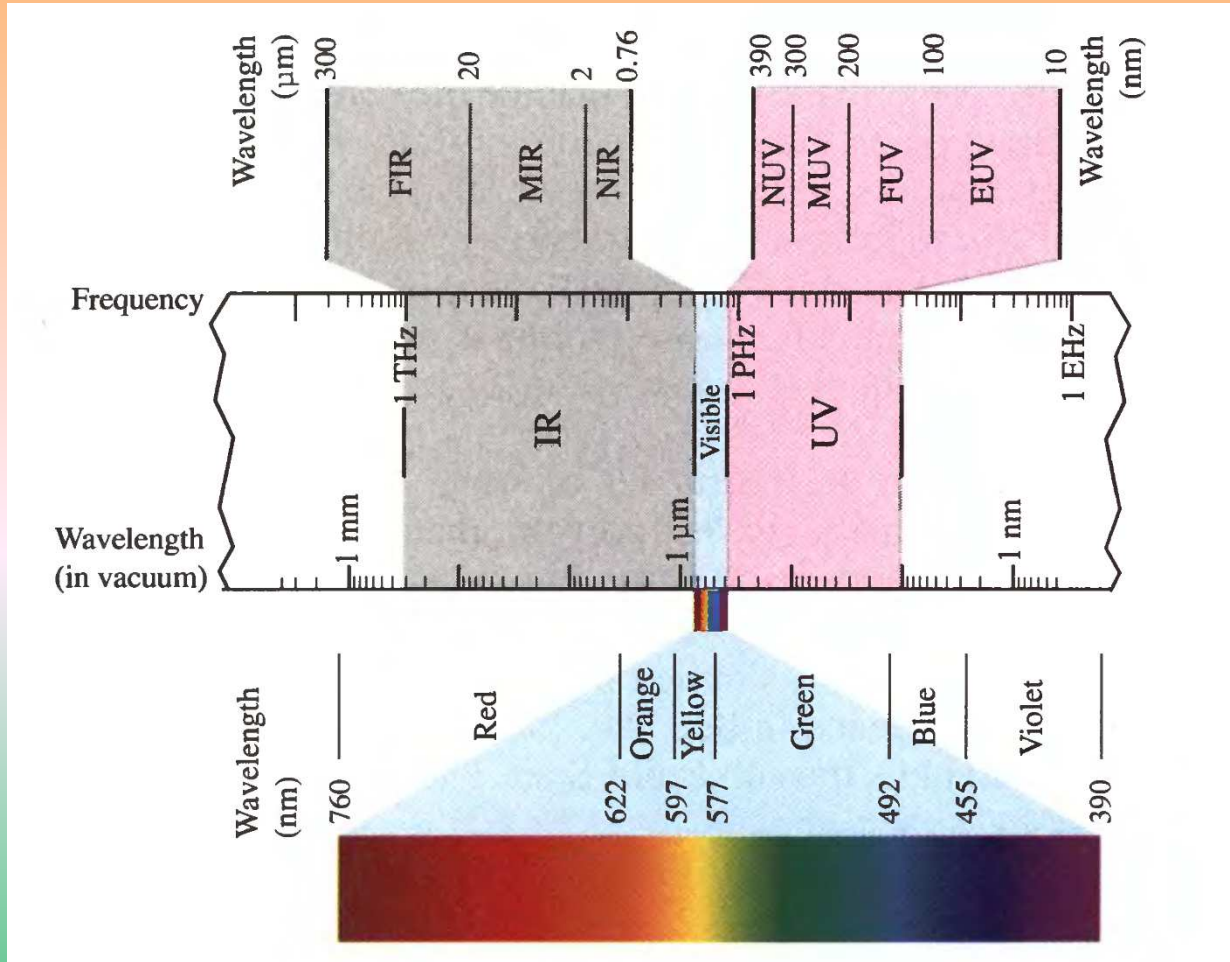
**** de junho (*af) – **h**

**** de junho (*af) – **h**

**** de junho (*af) – **h**

Sala *.*.*

Espectro electromagnético

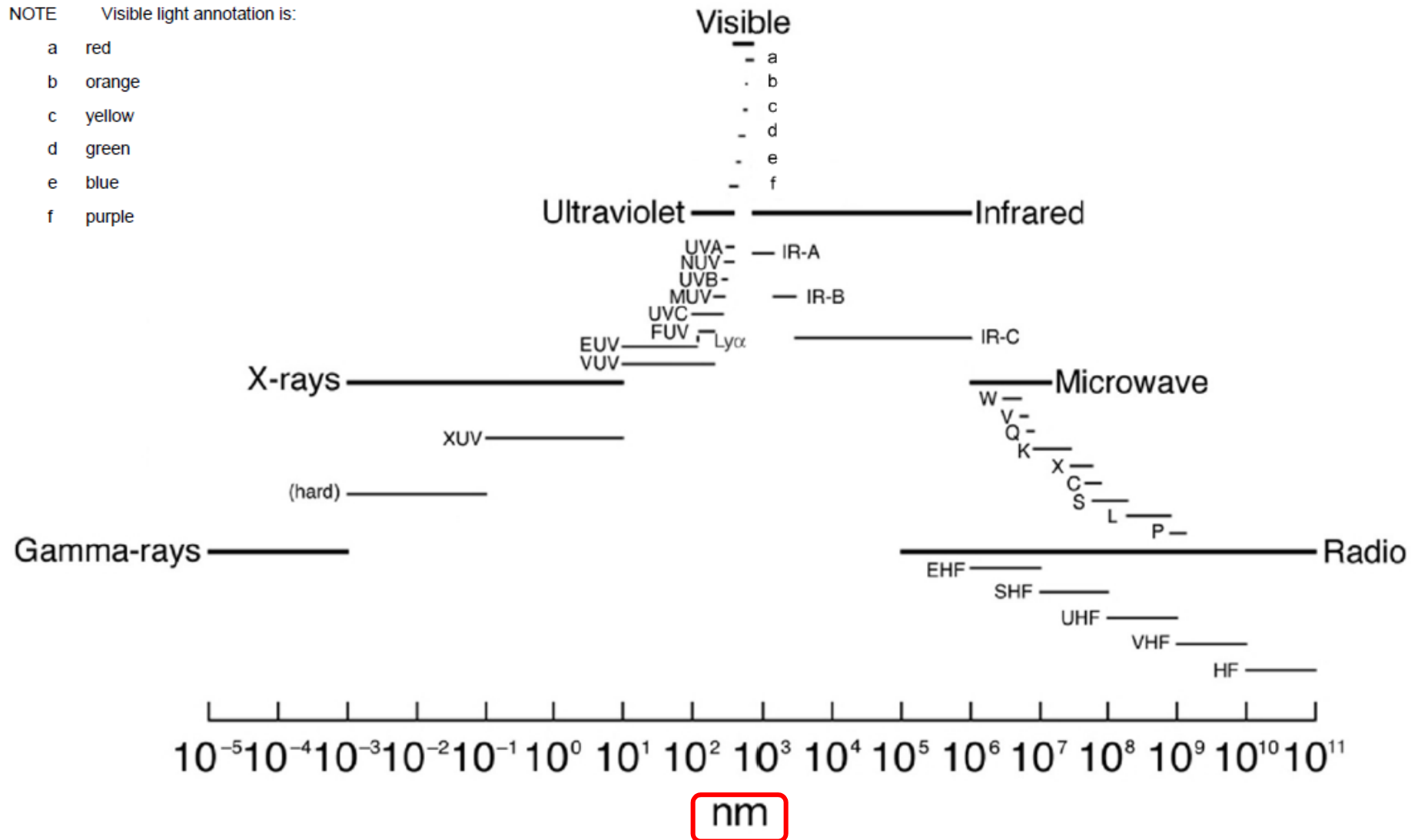


Espectro electromagnético

<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

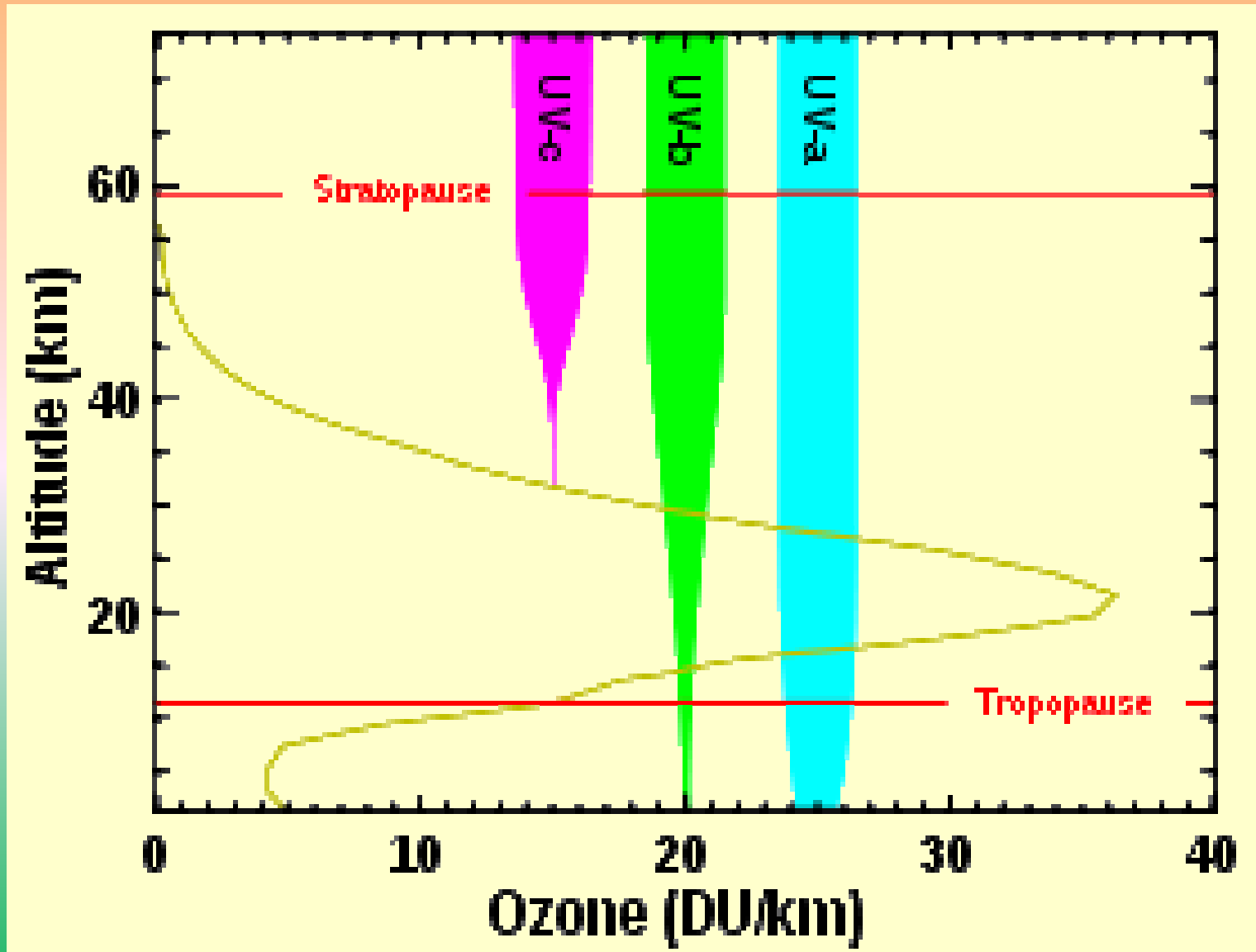
ISO 21348 -
Space
environment
(natural and
artificial) -
Process for
determining
solar
irradiances

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	
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	
Infrared		$610 \leq \lambda < 760$	$610\ \text{nm} \leq \lambda < 760\ \text{nm}$	red	
		$760 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$760\ \text{nm} \leq \lambda < 1,00\ \text{mm}$		
		$760 \leq \lambda < 1\ 400$	$760\ \text{nm} \leq \lambda < 1,40\ \mu\text{m}$	Near Infrared	
		$1\ 400 \leq \lambda < 3\ 000$	$1,40\ \mu\text{m} \leq \lambda < 3,00\ \mu\text{m}$	Middle Infrared	
Microwave		$3\ 000 \leq \lambda < 1\ 000\ 000$	$3,00\ \mu\text{m} \leq \lambda < 1,00\ \text{mm}$	Far infrared	
		$1\ 000\ 000 \leq \lambda < 15\ 000\ 000$	$1,00\ \text{mm} \leq \lambda < 15,00\ \text{mm}$		
		W	$3,00 \times 10^6 \leq \lambda < 5,35 \times 10^6$	$3,00\ \text{mm} \leq \lambda < 5,35\ \text{mm}$	$(100,0 \geq \nu > 56,0)$ GHz
		V	$5,35 \times 10^6 \leq \lambda < 6,52 \times 10^6$	$5,35\ \text{mm} \leq \lambda < 6,52\ \text{mm}$	$(56,0 \geq \nu > 46,0)$ GHz
		Q	$6,52 \times 10^6 \leq \lambda < 8,33 \times 10^6$	$6,52\ \text{mm} \leq \lambda < 8,33\ \text{mm}$	$(46,0 \geq \nu > 36,0)$ GHz
		K	$8,33 \times 10^6 \leq \lambda < 2,75 \times 10^7$	$8,33\ \text{mm} \leq \lambda < 27,5\ \text{mm}$	$(36,00 \geq \nu > 10,90)$ GHz
		X	$2,75 \times 10^7 \leq \lambda < 5,77 \times 10^7$	$27,50\ \text{mm} \leq \lambda < 57,70\ \text{mm}$	$(10,90 \geq \nu > 5,20)$ GHz
		C	$4,84 \times 10^7 \leq \lambda < 7,69 \times 10^7$	$48,40\ \text{mm} \leq \lambda < 76,90\ \text{mm}$	$(6,20 \geq \nu > 3,90)$ GHz
		S	$5,77 \times 10^7 \leq \lambda < 1,93 \times 10^8$	$57,70\ \text{mm} \leq \lambda < 193,00\ \text{mm}$	$(5,20 \geq \nu > 1,55)$ GHz
		L	$1,93 \times 10^8 \leq \lambda < 7,69 \times 10^8$	$193,00\ \text{mm} \leq \lambda < 769,00\ \text{mm}$	$(1,550 \geq \nu > 0,390)$ GHz
Radio		$7,69 \times 10^8 \leq \lambda < 1,33 \times 10^9$	$769,00\ \text{mm} \leq \lambda < 1,33\ \text{m}$	$(0,390 \geq \nu > 0,225)$ GHz	
		$100\ 000 \leq \lambda < 100\ 000\ 000\ 000$	$0,10\ \text{mm} \leq \lambda < 100\ \text{m}$	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	

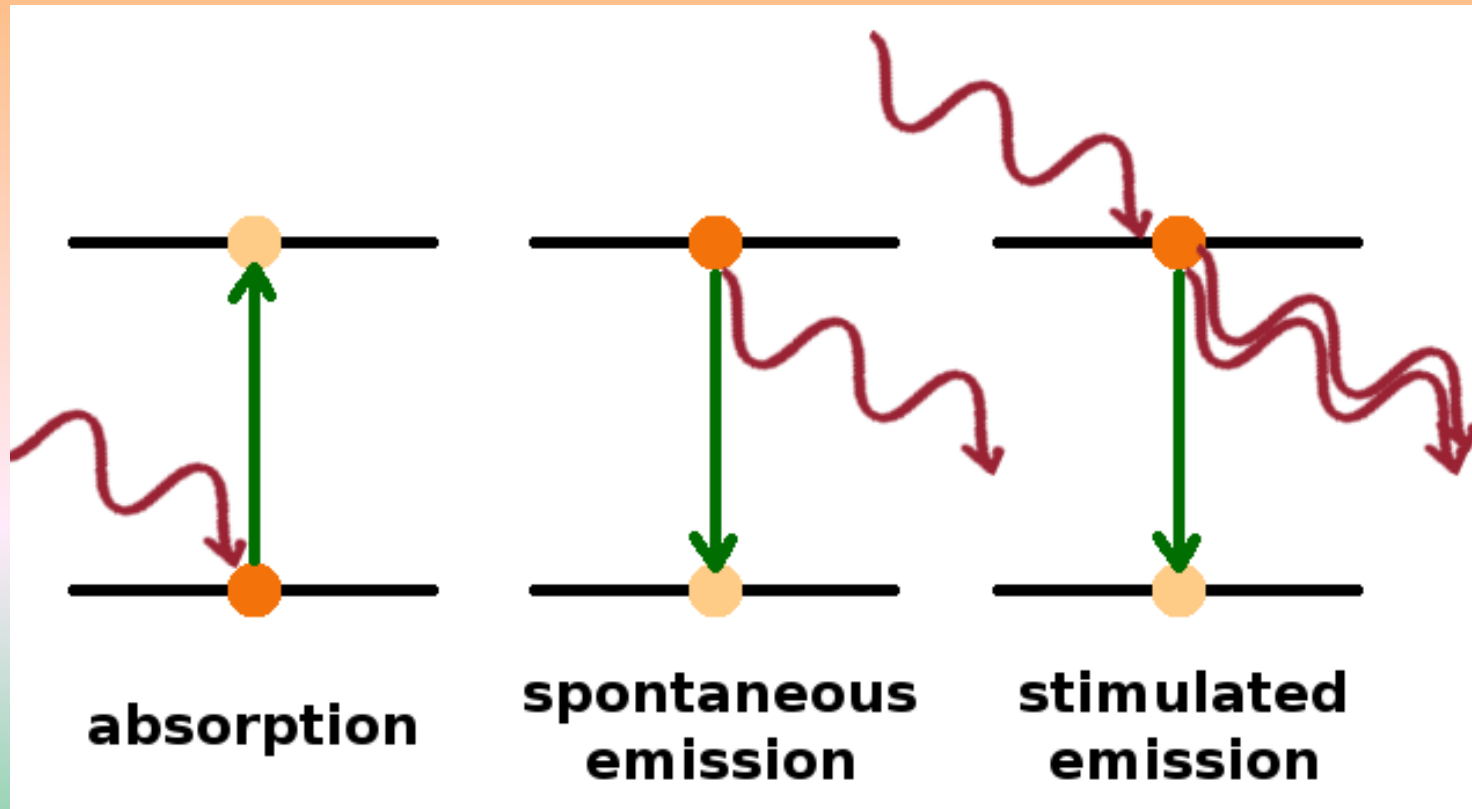
Espectro electromagnético: UV



Espectro electromagnético: 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 .

Absorção e emissão de radiação



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**

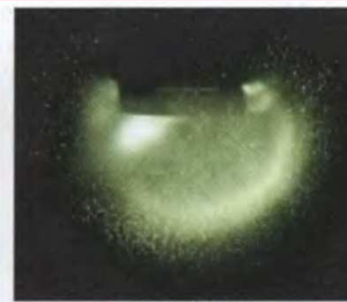
Fontes que radiam por processos **não térmicos**: **fontes luminescentes**

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

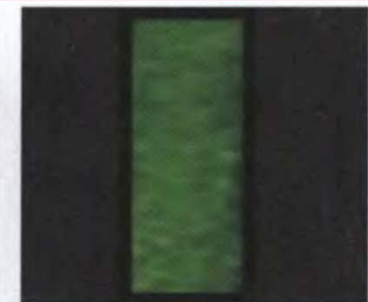
- Catodoluminescência
- Sonoluminescência
- Quimoluminescência
- Bioluminescência
- Electroluminescência
- Fotoluminescência



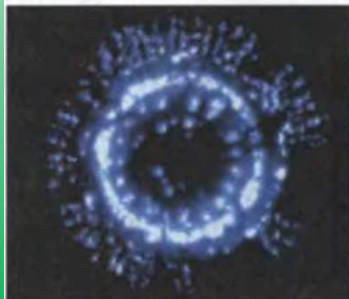
(a) Cathodoluminescence



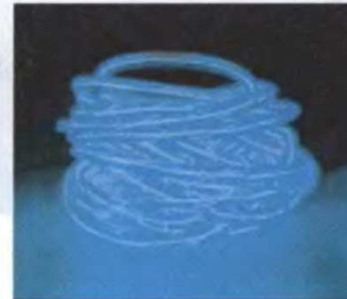
(b) Sonoluminescence



(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

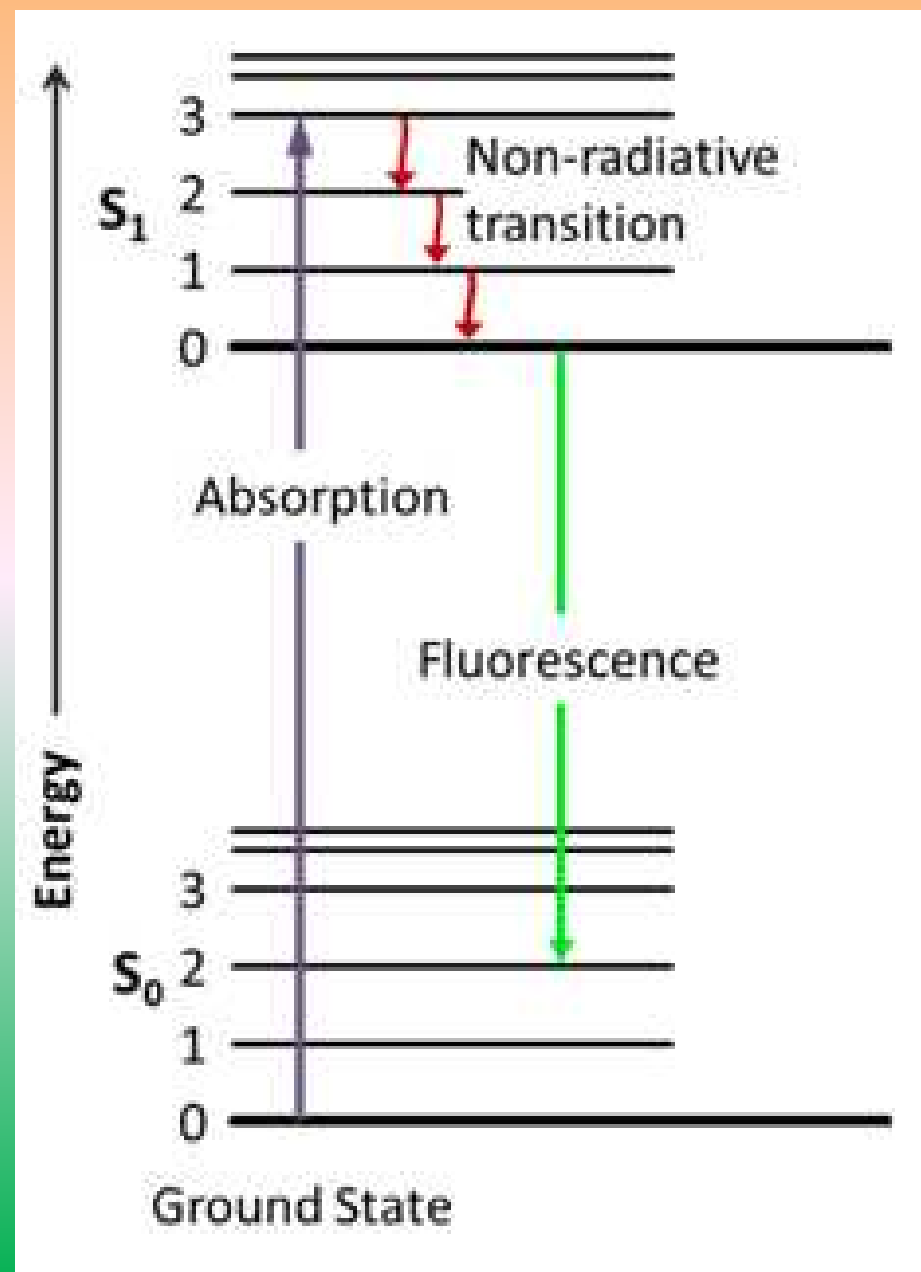
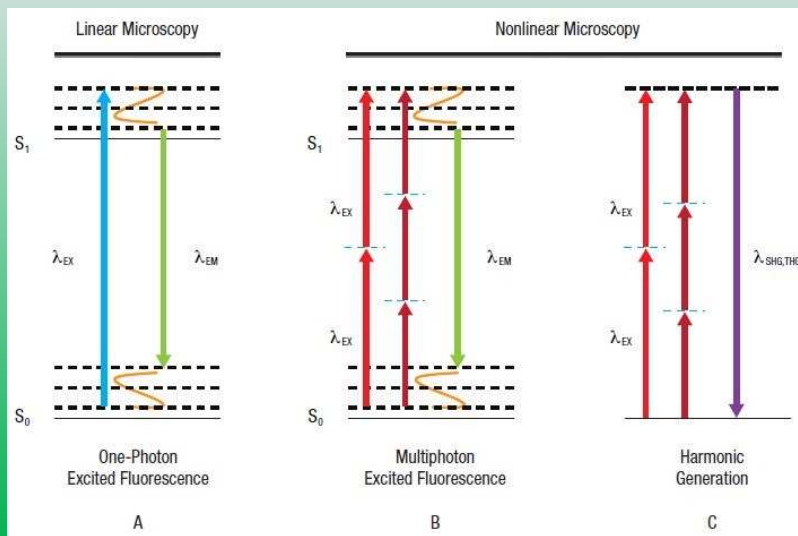
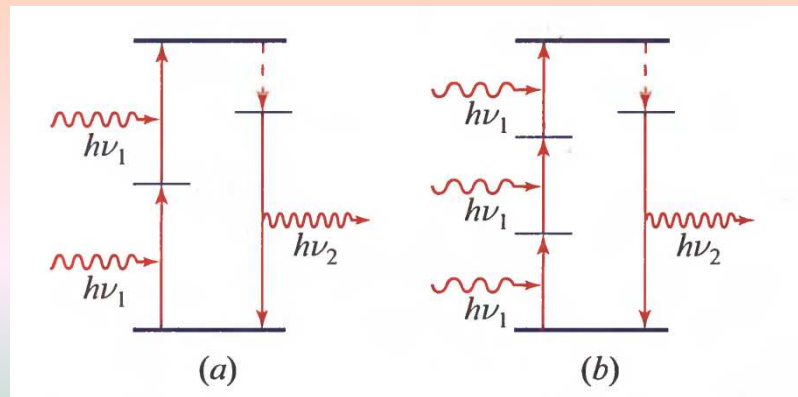
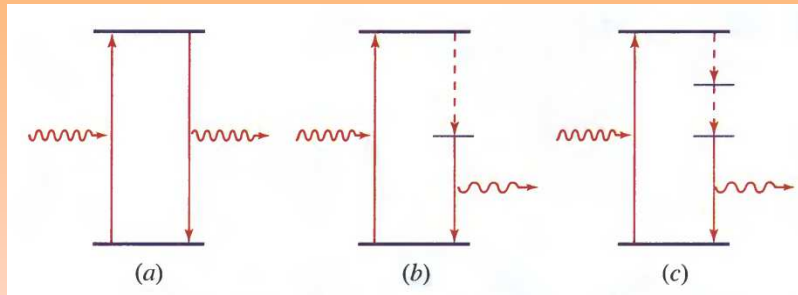
Emissão de luz decorrente de reacção química, com os produtos de reacção num estado excitado.

➤ Bioluminescência

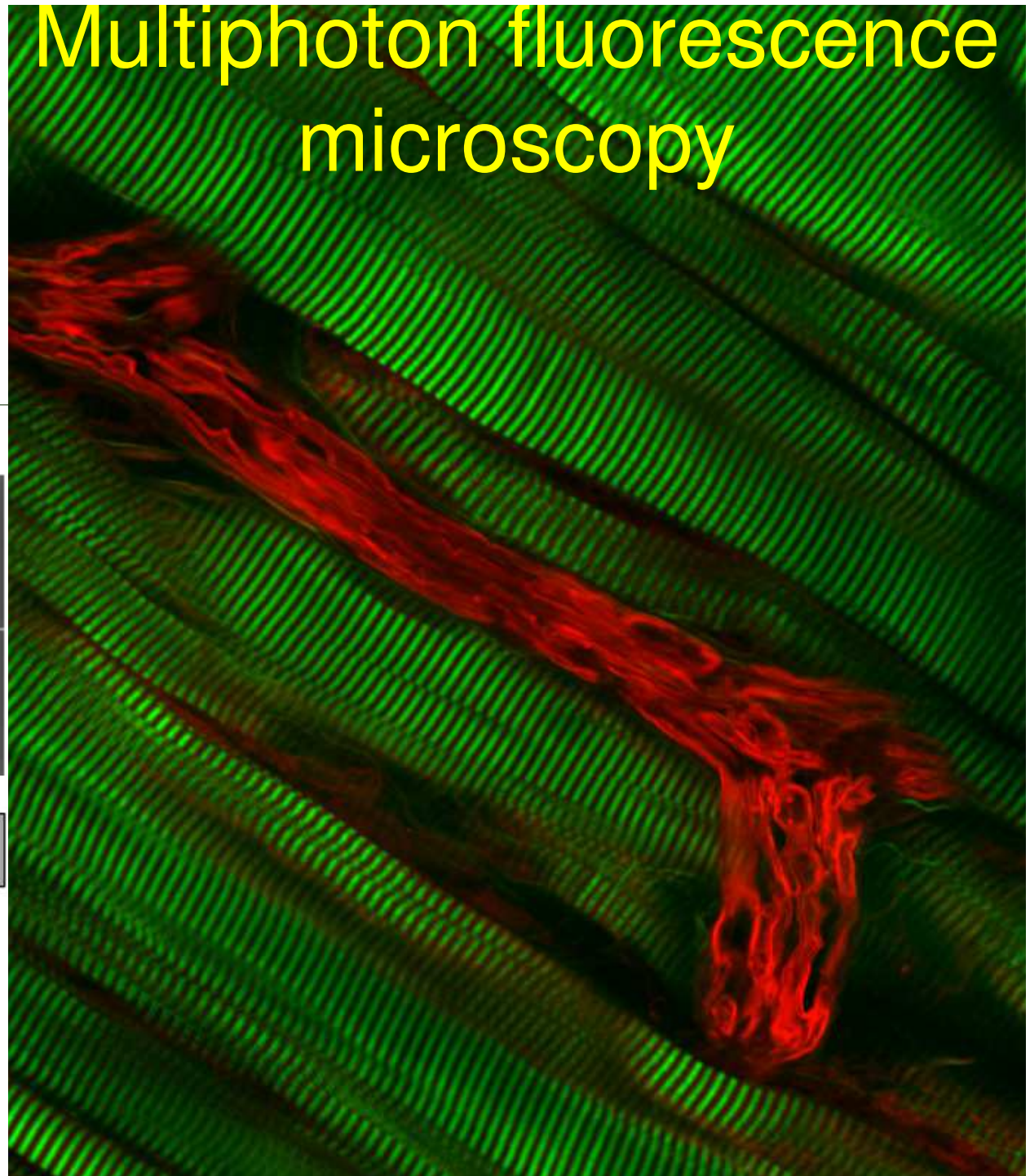
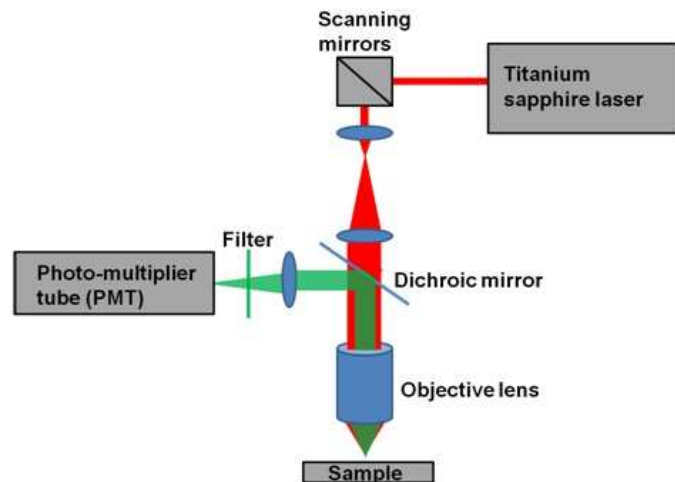
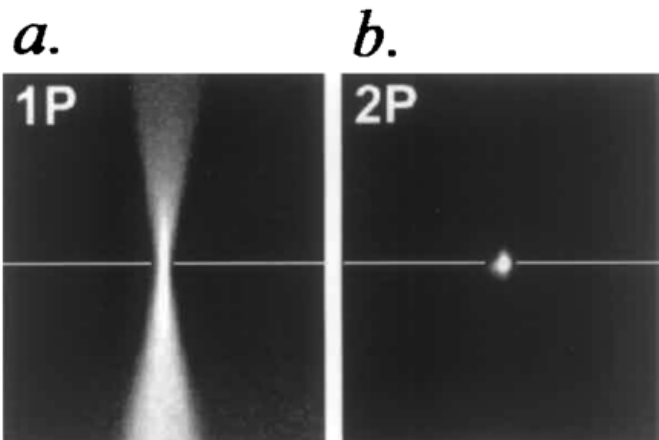
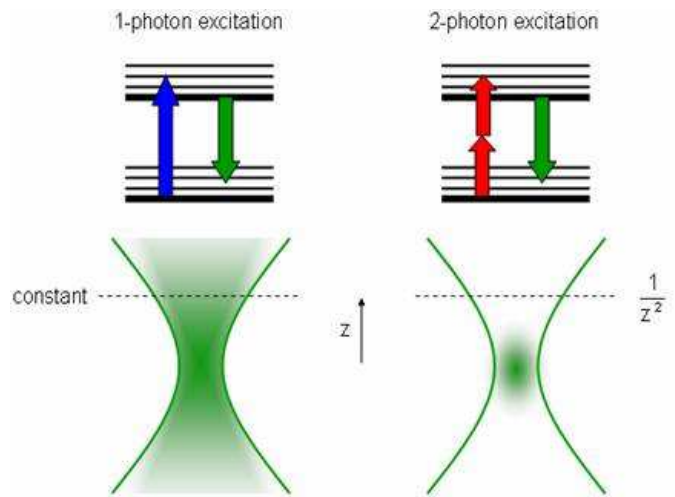
Quimoluminescência produzida por organismos vivos



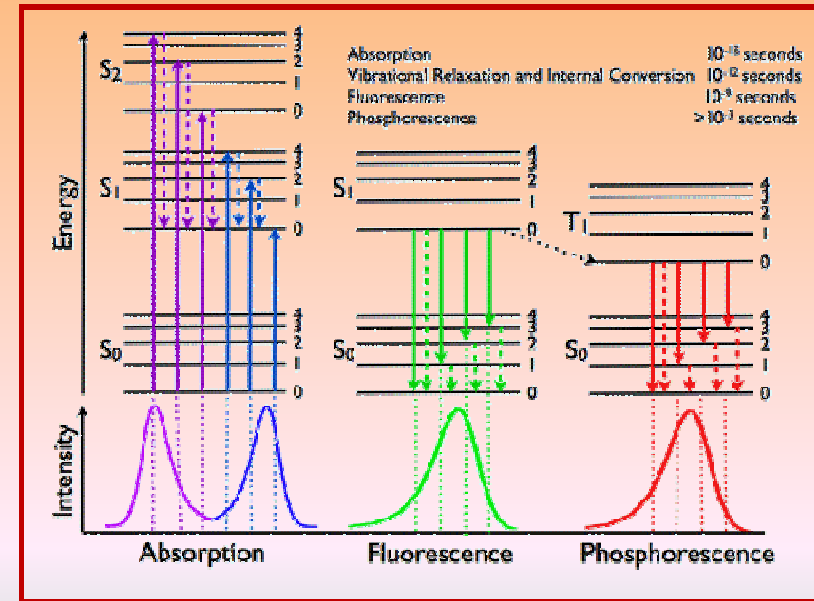
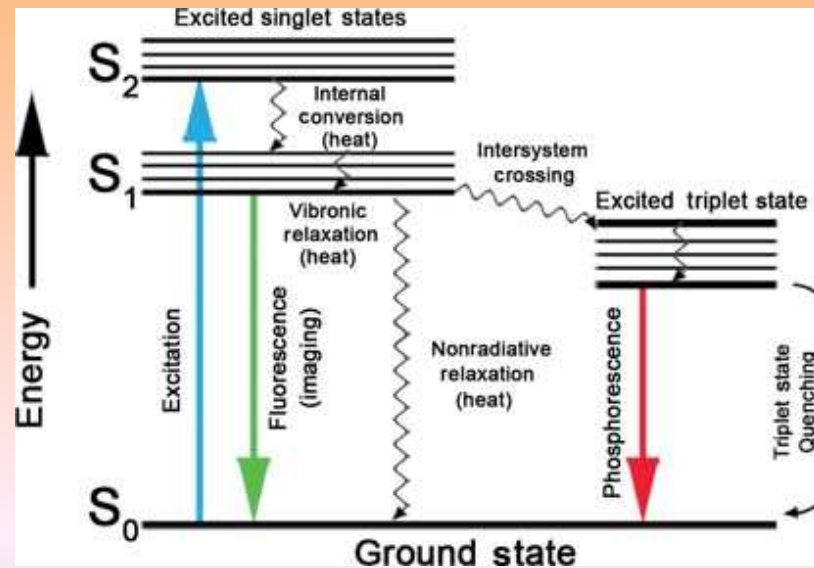
Fotoluminescência: fluorescência / fosforescência



Multiphoton fluorescence microscopy



Fotoluminescência: fluorescência / fosforescência

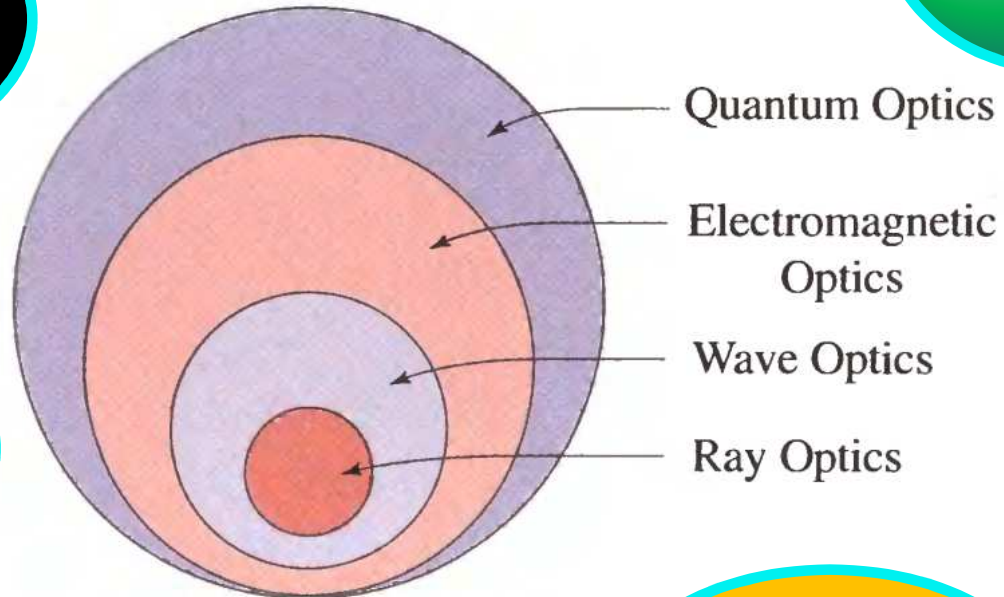


A - Paradigmas

A
RETER...

ELECTRO-
MAGNÉTICO

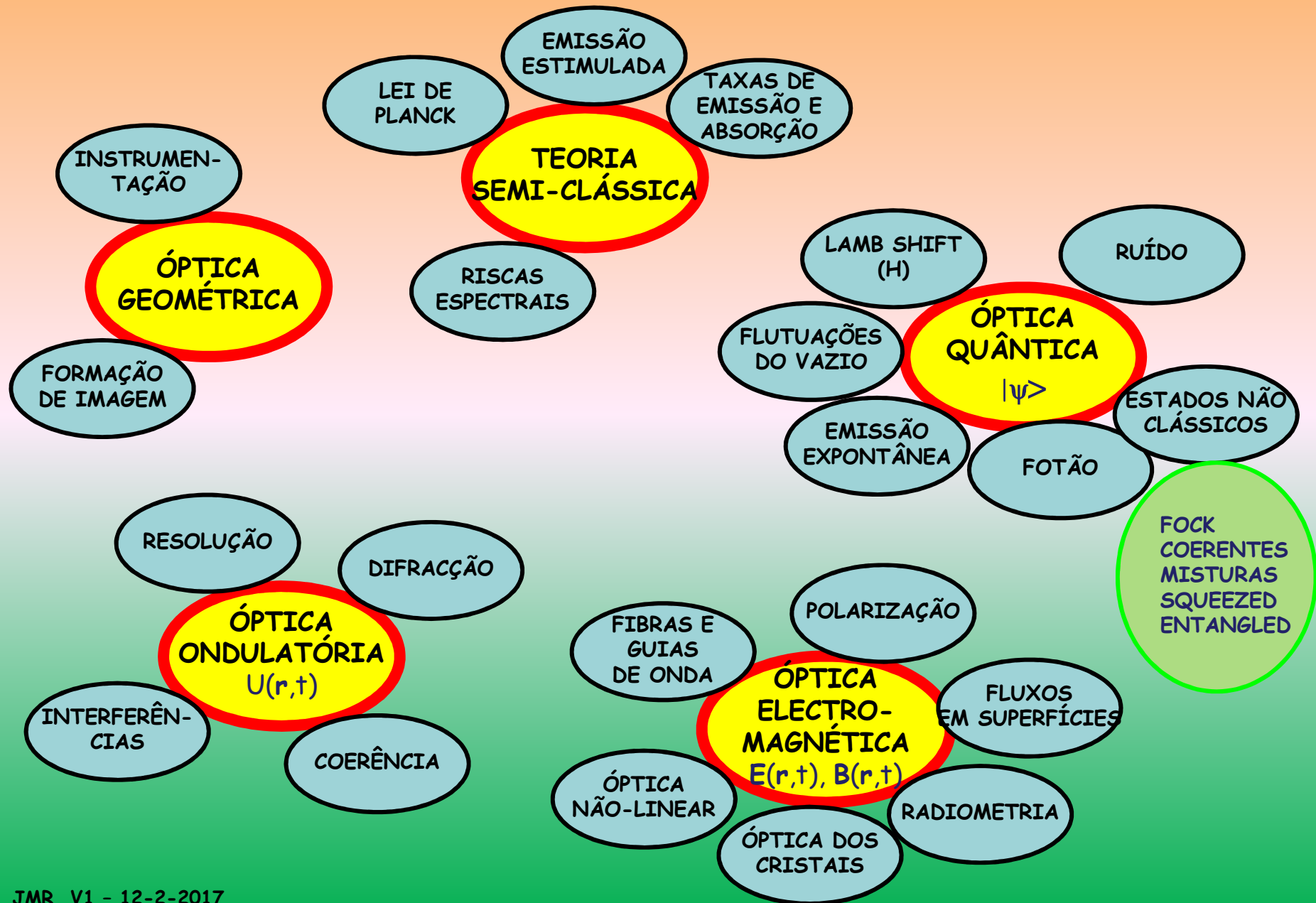
ONDULATORIO



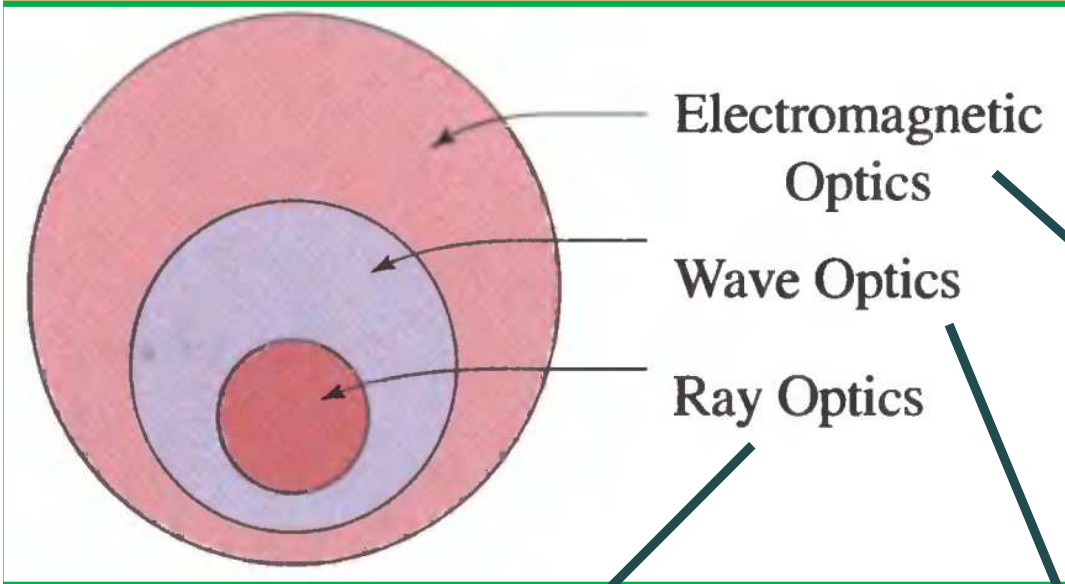
ÓPTICA
GEOMÉTRICA

QUÂNTICO

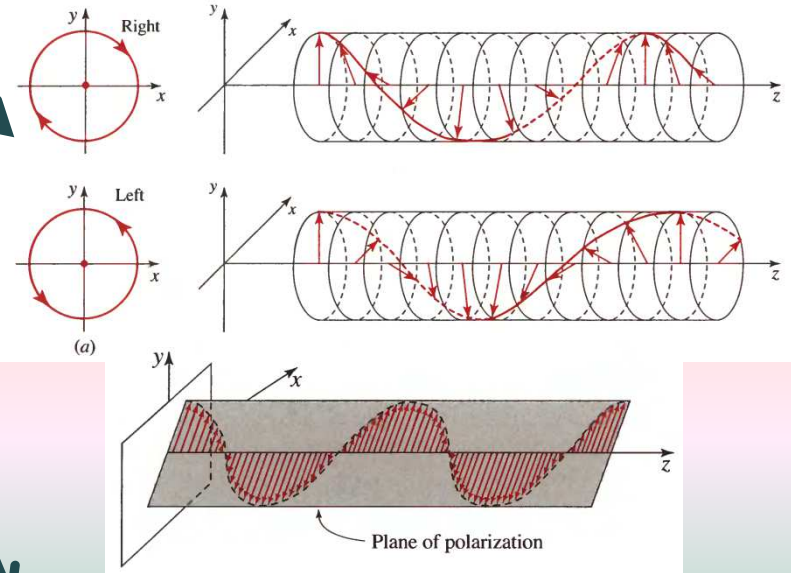
Paradigmas e Fenomenologia da Óptica



Níveis de aproximação em EM

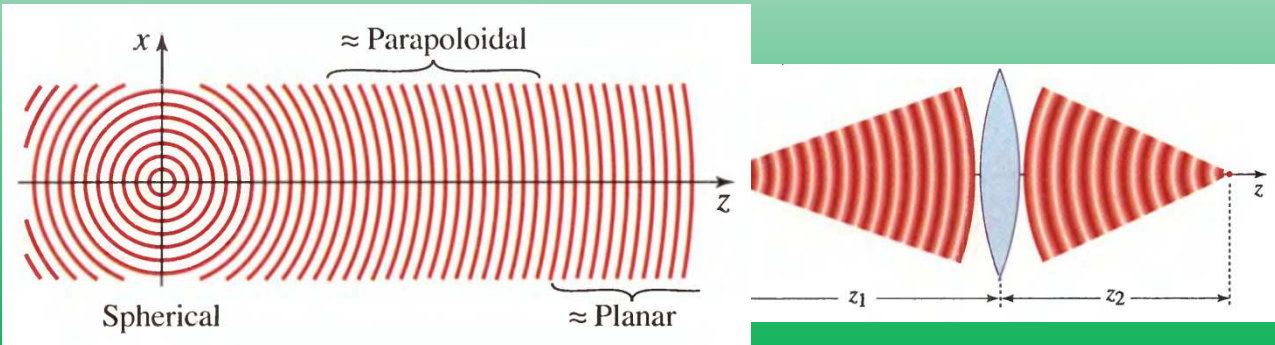
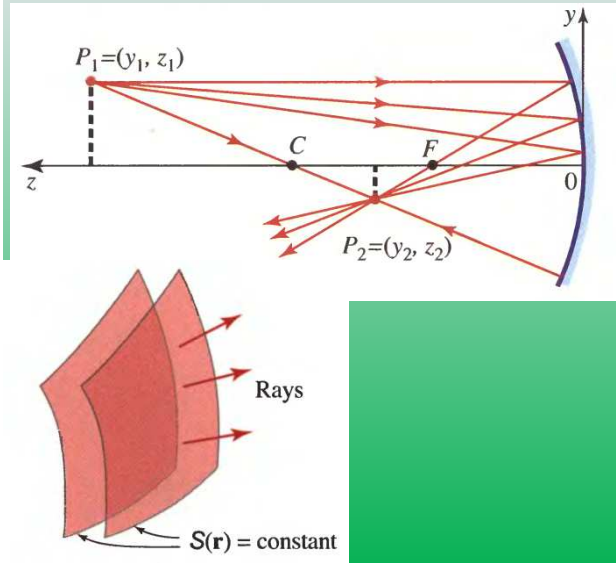


Natureza **vectorial** dos campos **E** e **H**:
Polarização



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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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}

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

$$\nabla \cdot \mathcal{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 \mathcal{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mathcal{H}^2 \right) + \mathcal{E} \cdot \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial t} + \mu_0 \mathcal{H} \cdot \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial t}$$

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:

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

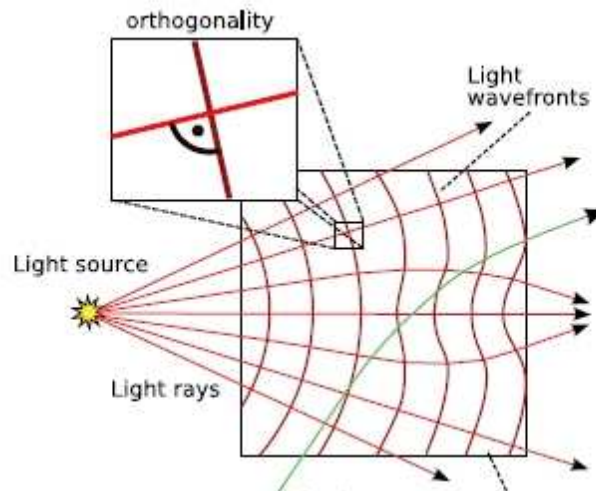
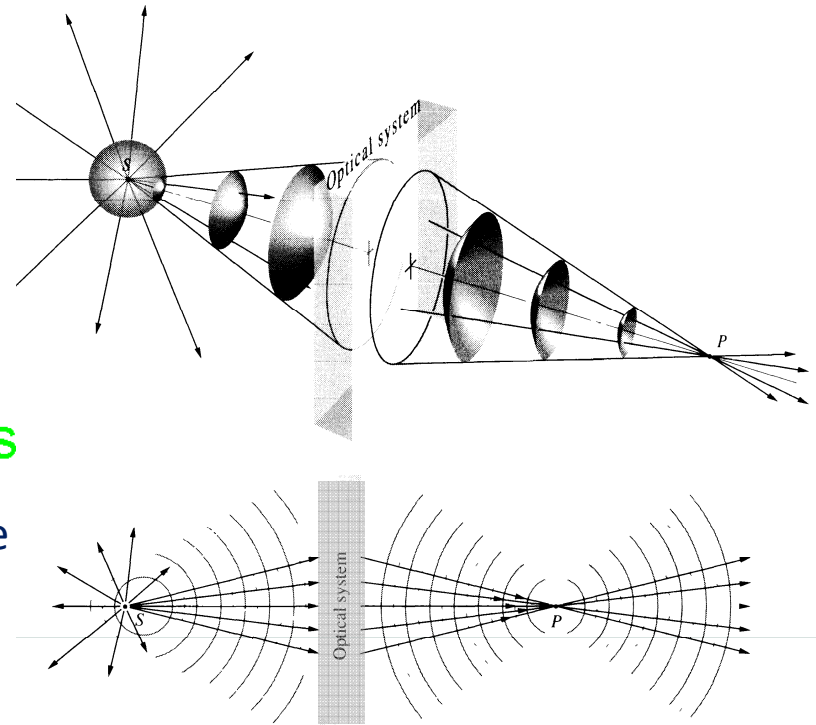
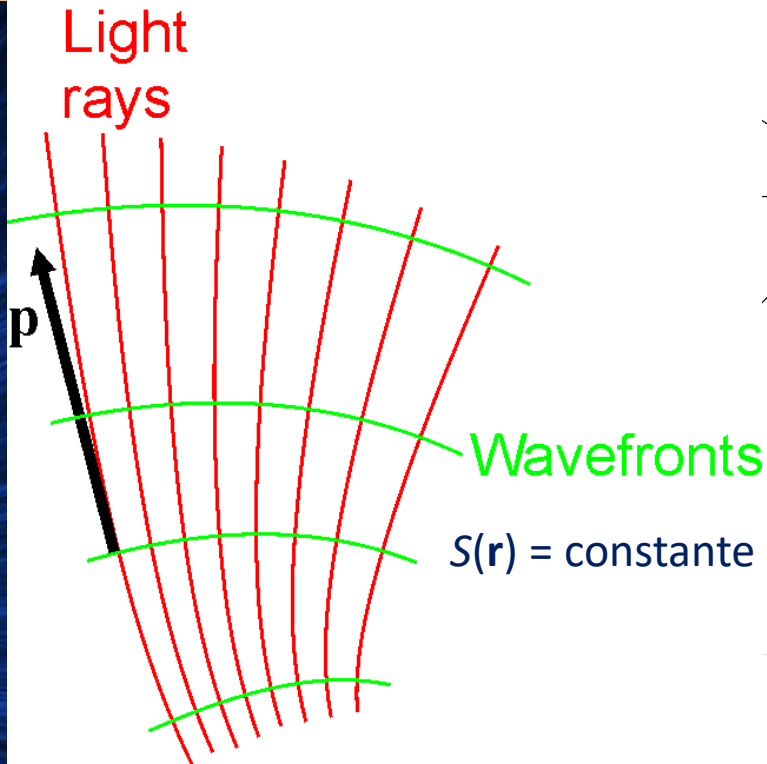
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

- 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 homogéneos, 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:

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

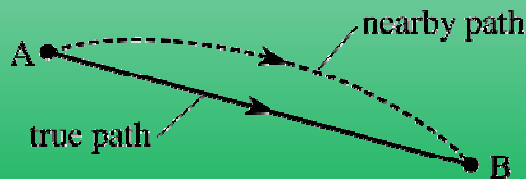


$$(\text{grad } S)^2 = n^2$$

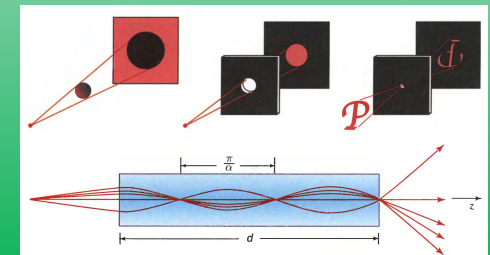
- A luz propaga-se sob a forma de **raios luminosos**.
- O meio é caracterizado por um **índice de refração**, $n = c/v$.
- O tempo de propagação de uma distância d é $d/v = nd/c$.
- O produto nd define o **Percurso Óptico**
- Em geral, num meio de índice variável, o **Percurso Óptico** entre dois pontos,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

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

- **Princípio de Fermat**: De A para B, os raios luminosos seguem a **trajetória** 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 **Percorso 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):

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

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

- 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 uníssono.

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

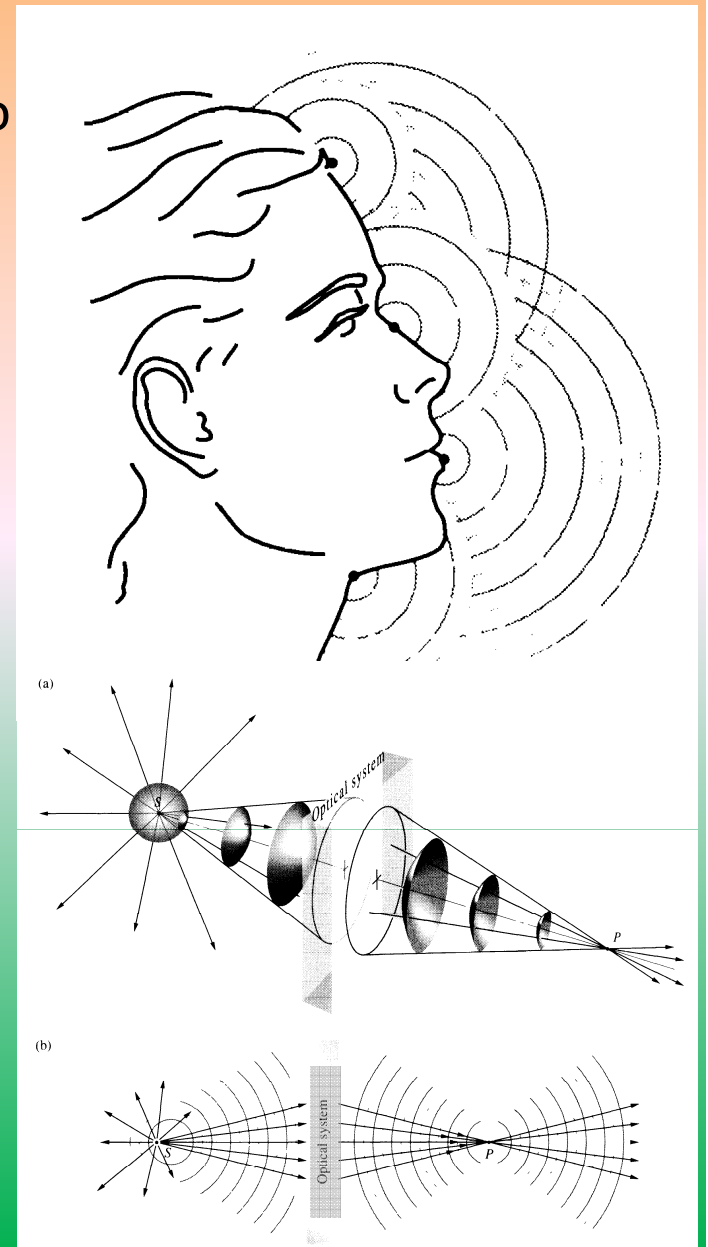
Um sistema óptico transforma **feixes objecto** em **feixes imagem**.

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**

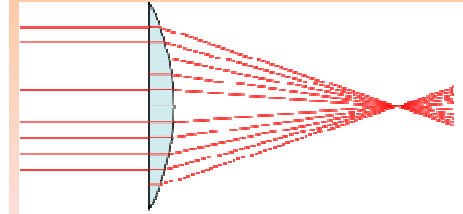


ÍNDICE

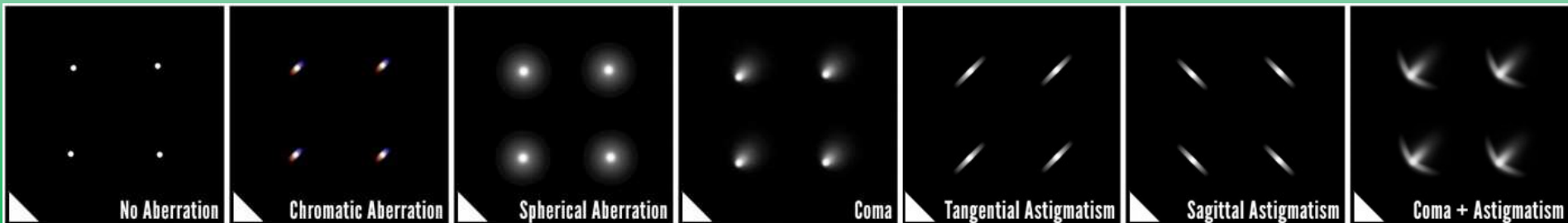
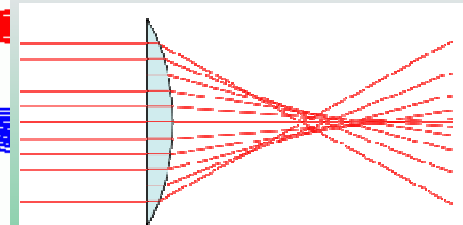
OG - Conjugação

PARADIGMAS

Imagens perfeitas,
sistemas ideais



Imagens c/aberrações,
sistemas reais...



Roy Glauber

Nobel da Física, 2005

“Quantum Theory of Optical Coherence, Selected Papers and Lectures”
2007

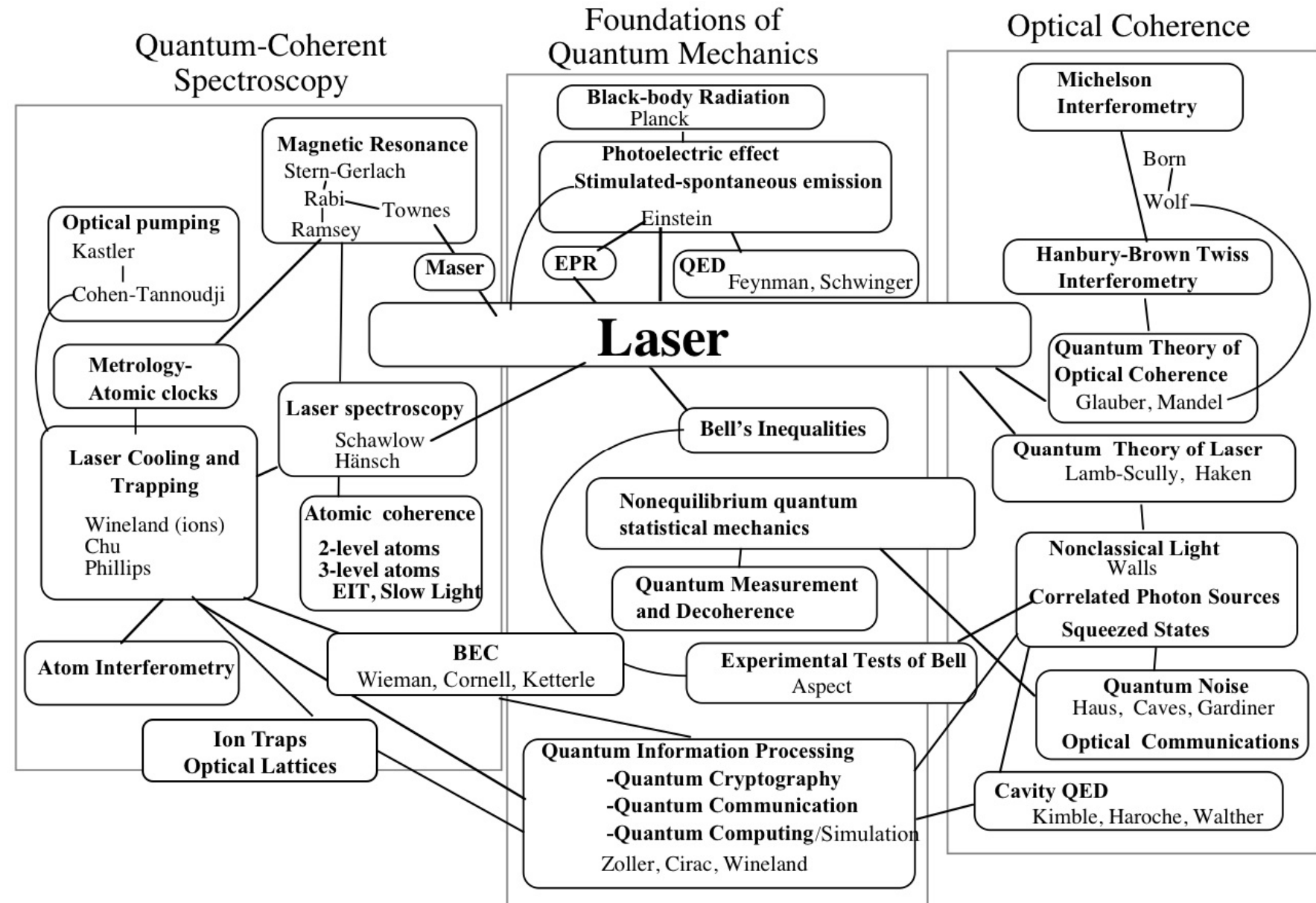


- ❑ The statistical properties of **photon beams**, for example, have been discussed to date almost exclusively in classical or semiclassical terms. Such discussions may indeed be informative, but they inevitably leave open **serious questions of self-consistency**, and risk **overlooking** (*ignorar / 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
 - 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

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

Mapa conceptual: Óptica Quântica



Electromagnético

Equações de Maxwell

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

Fenomenologia: Polarização

Matéria: \mathbf{P} , \mathbf{M} , χ , \mathbf{J} , ...

Observáveis: E (Irradiância, W/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: E (Irradiância, W/m^2)

Geométrico

Equação do Eikonal

Conceitos: Feixes; Raios luminosos / superfícies de igual fase

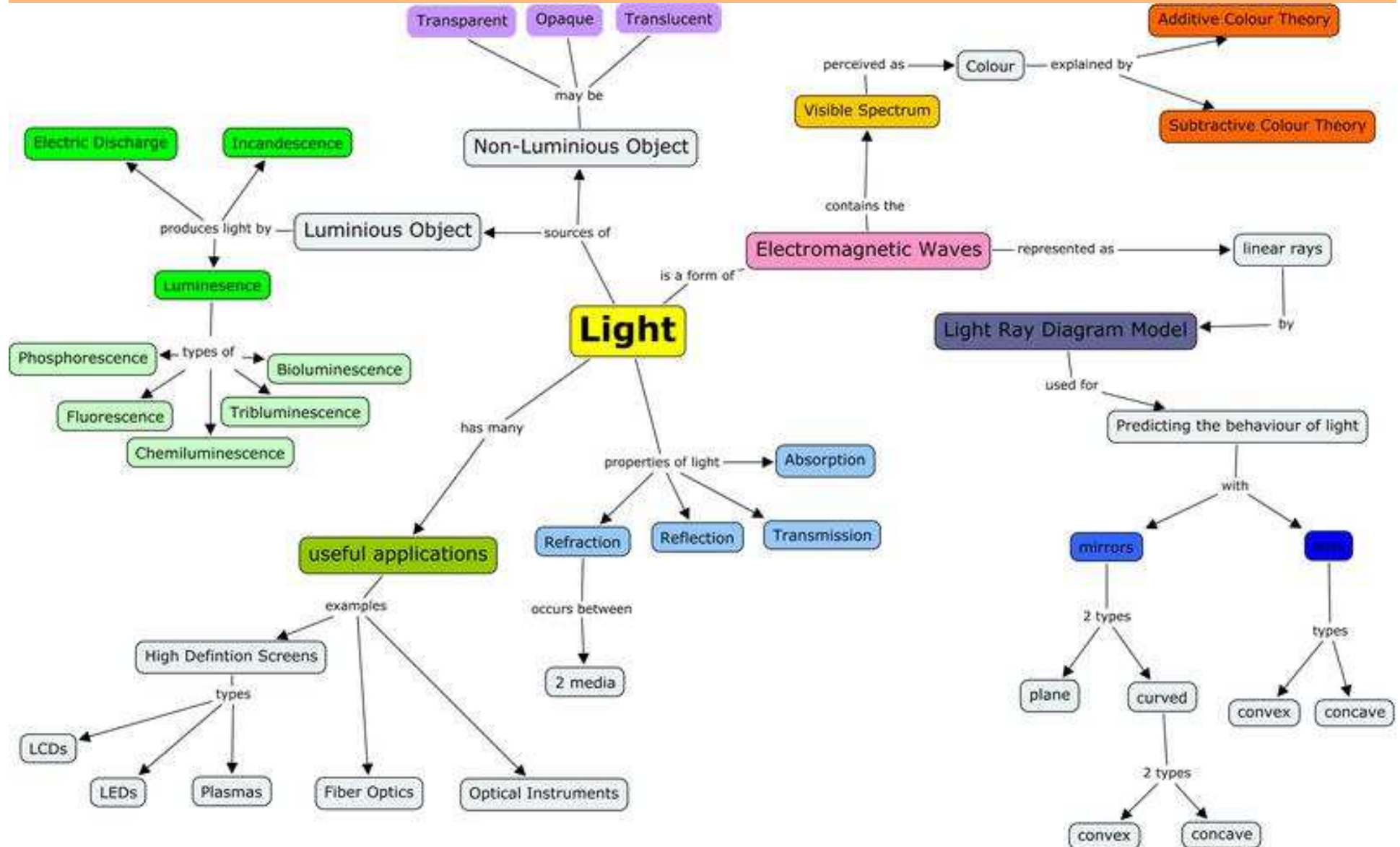
Matéria: índice de refração, n

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

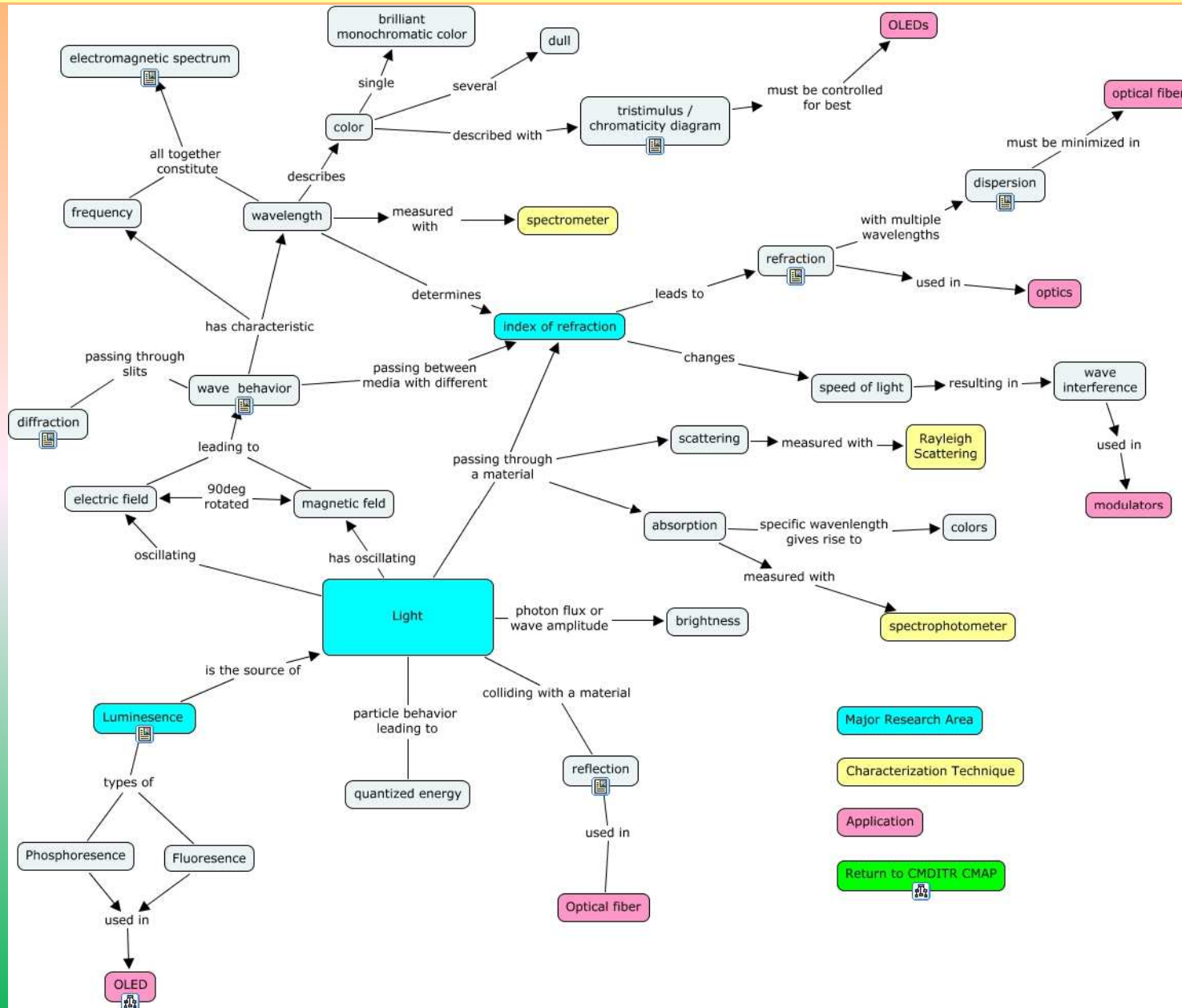
Observáveis: Forma e contraste da imagem / projecção de feixes em planos

- 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 λ).
- 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**, **$U(\mathbf{r}, t)$** , 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 ...

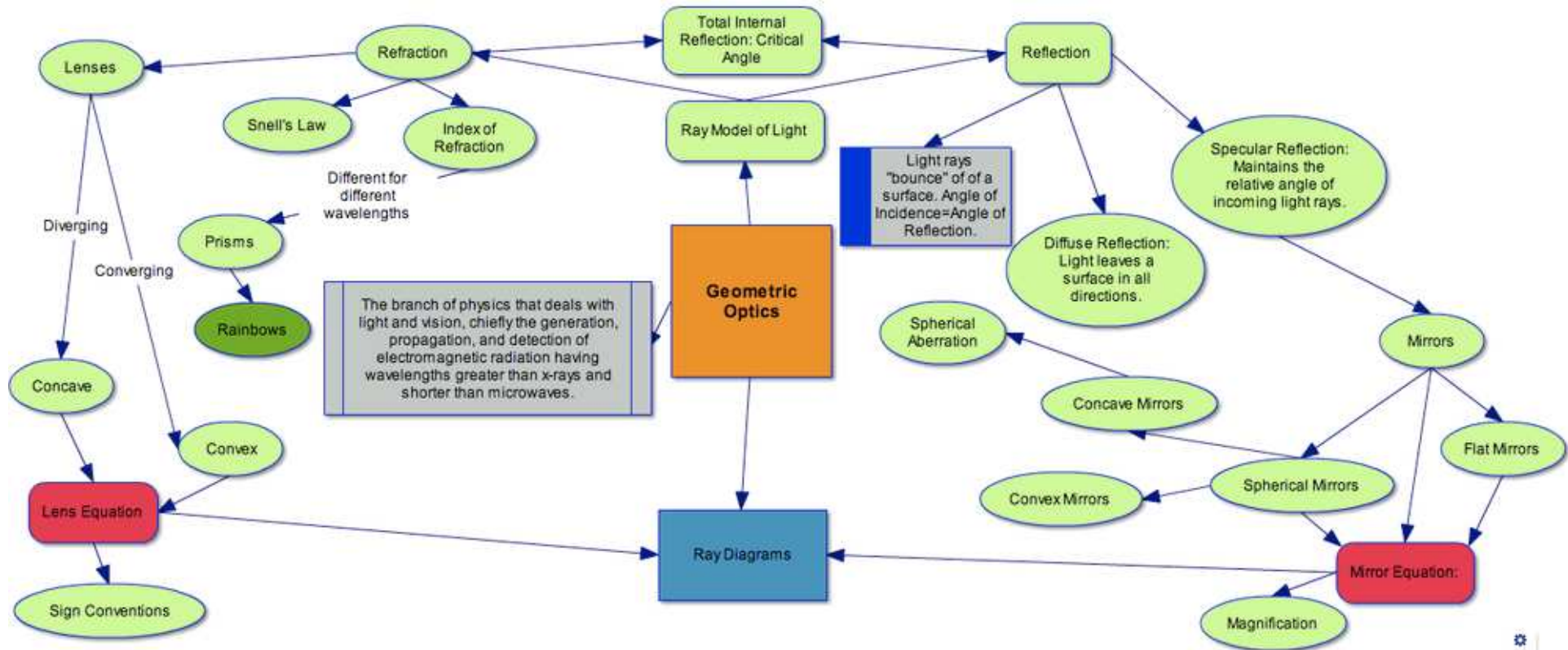
Mapa conceptual: Óptica



Mapa conceptual: Óptica

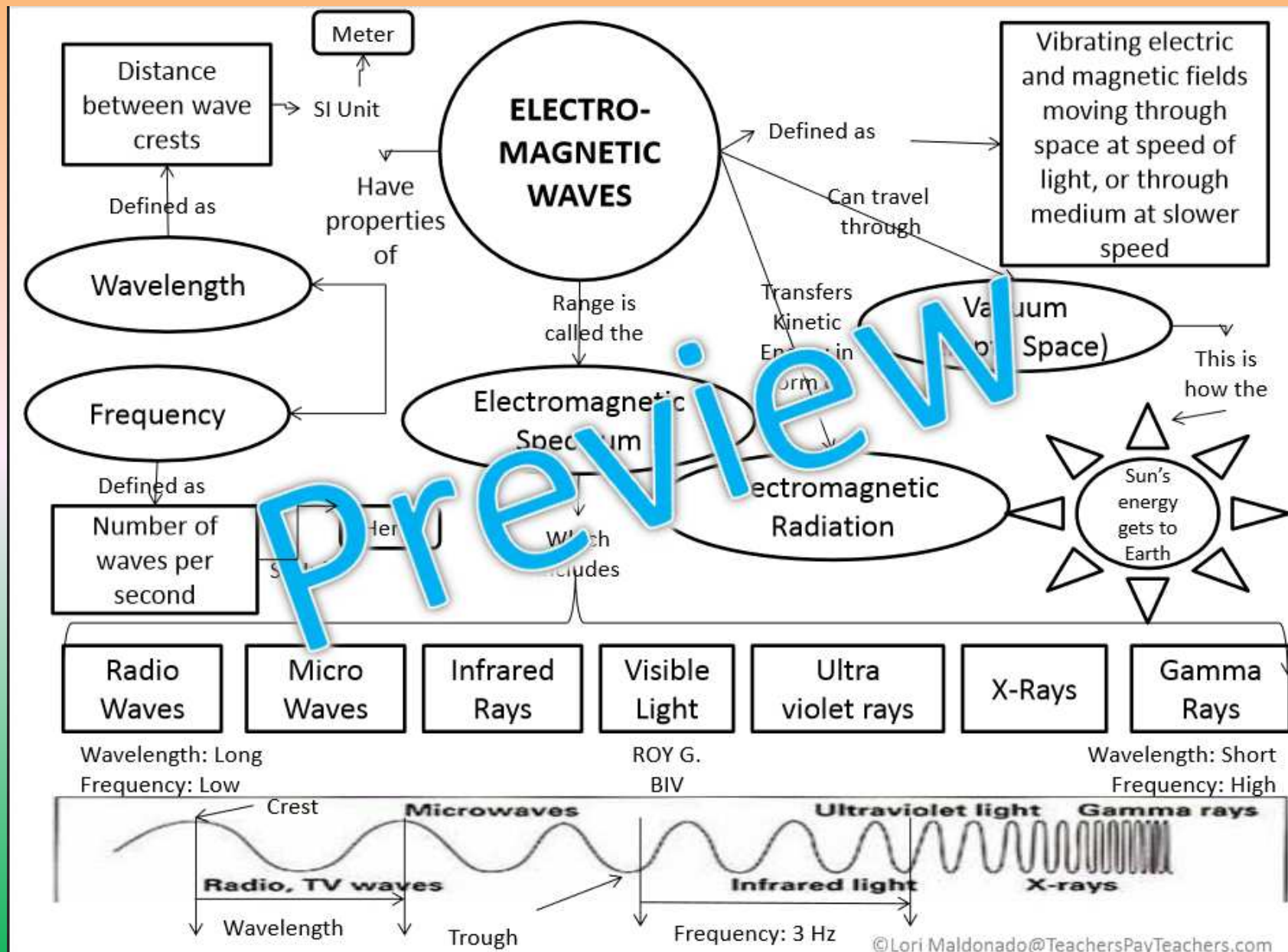


Mapa conceptual: Óptica Geométrica



https://hartfordapphysics.wikispaces.com/file/view/Picture_10.png/133167653/999x423/Picture_10.png

Mapa conceptual: Ondas Electromagnéticas



Mapa conceptual: Luz

