

Optoelectronică

Curs 3

2018/2019

Disciplina 2018/2019

- ▶ 2C/1L Optoelectronică **OPTO**
- ▶ **Minim 7 prezente curs + laborator**
- ▶ Curs – conf. **Radu Damian**
 - an IV μ E
 - Vineri 8-11, P5
 - E – 70% din nota
 - **20% test la curs**, saptamana 4-5?
 - probleme + (2p prez. curs) + (3 teste) + (bonus activitate)
 - toate materialele permise
- ▶ Laborator – **sl. Daniel Matasaru**
 - an IV μ E
 - Marti 14-16
 - Joi 8-12 par/impar
 - L – 30% din nota (+Caiet de laborator)

Orar 2018/2019

▶ Curs

- Vineri 8–11, P5
- **2C ⇒ 3C**
 - $14 * 2/3 \approx 9.33$
 - $9 \div 10$ C

Bibliografie

- ▶ <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>
- ▶ Irinel Casian-Botez, "Structuri Optoelectronice", Ed. "CANOVA", Iasi 2001, ISBN 973-96099-2-9
- ▶ Behzad Razavi - Design of Integrated Circuits for Optical Communications, Mc Graw Hill
~~<http://rf-opto.etti.tuiasi.ro/docs/opto/>~~
- ▶ IBM - Understanding Optical Communications: on-line <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>
- ▶ Radu Damian, I Casian, D Matăsaru - „Comunicatii Optice” , Indrumar de laborator, 2005

Fotografii



Date:

Grupa	5304 (2015/2016)
Specializarea	Tehnologii si sisteme de telecomunicatii
Marca	5184

[Trimite email acestui student](#) | [Adauga acest student la lista \(0\)](#)

Detalii curente

Finantare	Buget
Bursa	Fara Bursa

Observatii



Date:

Grupa	5304 (2015/2016)
Specializarea	Tehnologii si sisteme de telecomunicatii
Marca	5184

[Acceseaza ca acest student](#)

Note obtinute

Disciplina	Tip	Data	Descriere	Nota	Puncte	Obs.
TW	Tehnologii Web					
	N	17/01/2014	Nota finala	10	-	
	A	17/01/2014	Colocviu Tehnologii Web 2013/2014	10	7.55	
	B	17/01/2014	Laborator Tehnologii Web 2013/2014	9	-	
	D	17/01/2014	Tema Tehnologii Web 2013/2014	9	-	



Date:

Grupa	5304 (2015/2016)
Specializarea	Tehnologii si sisteme de telecomunicatii
Marca	5244

[Trimite email acestui student](#) | [Adauga acest student la lista \(0\)](#)

Detalii curente

Finantare	Buget
Bursa	Bursa de Studii

Observatii

Fotografii

Start Didactic Master Colectiv Cercetare **Studenti** Admin

Note Lista Studenti Fotografii Statistici

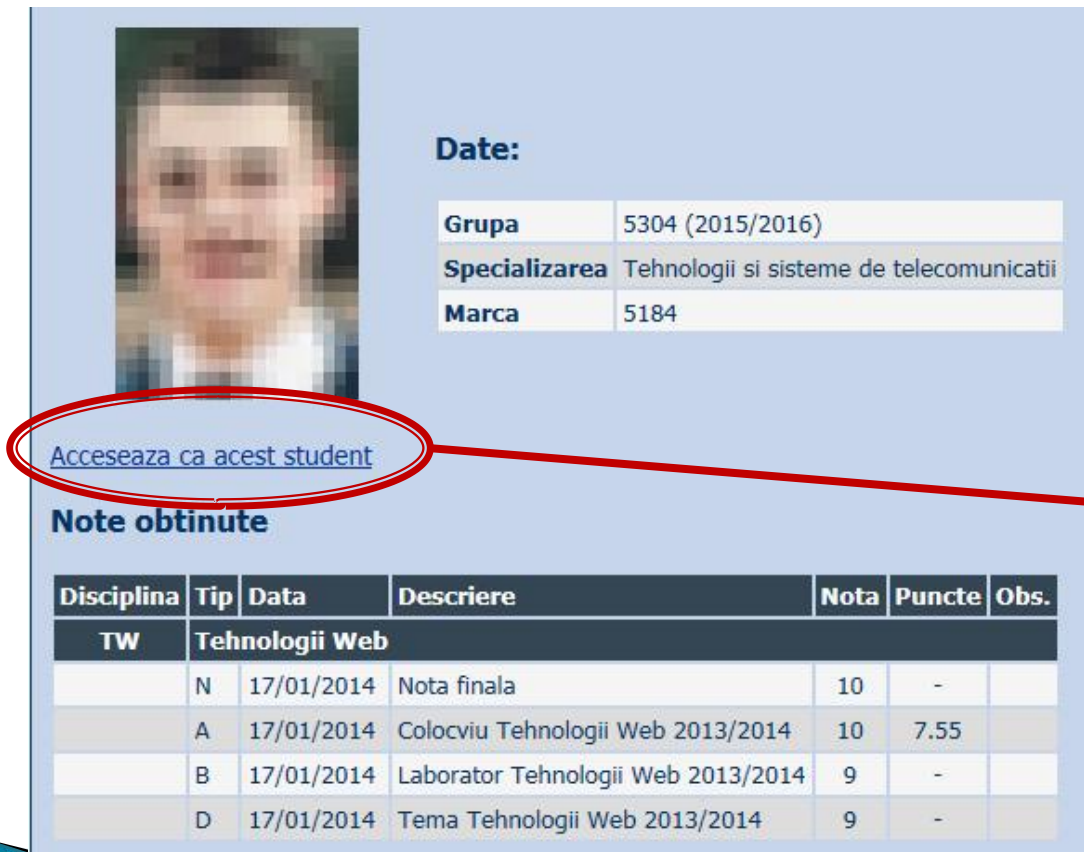
Grupa 5403

Nr. Student	Prezent	Nr. Student	Prezent	Nr. Student	Prezent
1 ANGHIELUS IONUT-MARIUS	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	2 ANTIGHIN FLORIN-RAZVAN	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	3 ANTONICA BIANCA	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:
4 APOSTOL PAVEL-MANUEL	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	5 BALASCA IULIAN-PETRU	<input checked="" type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	6 BOSTAN ANDREI-PETRIKA	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:
7 BOTEZAT EMANUEL	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	8 BUTUNOI GEORGE-MADALIN	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	9 CHILEA SALUCA-MARIA	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:
10 CHERITOIU ECATERINA	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	11 COJOC MARIUS	<input checked="" type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:	12 COJOCARI AURA-FLORINA	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:

Nr. Student	Prezent
2 <u>ANTIGHIN FLORIN-RAZVAN</u>	<input type="checkbox"/> Puncte: 0 Nota: 0 Obs:

Acces

▶ Personalizat



Student profile card showing a blurred photo, a 'Date:' section with a table of personal information, a link 'Acceseaza ca acest student' circled in red, and a 'Note obtinute' table.

Date:

Grupa	5304 (2015/2016)
Specializarea	Tehnologii si sisteme de telecomunicatii
Marca	5184

[Acceseaza ca acest student](#)

Note obtinute

Disciplina	Tip	Data	Descriere	Nota	Puncte	Obs.
TW	Tehnologii Web					
N		17/01/2014	Nota finala	10	-	
A		17/01/2014	Colocviu Tehnologii Web 2013/2014	10	7.55	
B		17/01/2014	Laborator Tehnologii Web 2013/2014	9	-	
D		17/01/2014	Tema Tehnologii Web 2013/2014	9	-	



Login form with fields for Name, Email, and Verification Code, a verification code '344bd9f', and a 'Trimite' button. Red circles highlight the Email and Verification Code fields.

Nume

Email

Cod de verificare

344bd9f

Trimite

Reprezentare logaritmică

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (P_2 / P_1)$$

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10} (P / 1 \text{ mW})$$

$$0 \text{ dB} = 1$$

$$+ 0.1 \text{ dB} = 1.023 (+2.3\%)$$

$$+ 3 \text{ dB} = 2$$

$$+ 5 \text{ dB} = 3$$

$$+ 10 \text{ dB} = 10$$

$$-3 \text{ dB} = 0.5$$

$$-10 \text{ dB} = 0.1$$

$$-20 \text{ dB} = 0.01$$

$$-30 \text{ dB} = 0.001$$

$$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$$

$$3 \text{ dBm} = 2 \text{ mW}$$

$$5 \text{ dBm} = 3 \text{ mW}$$

$$10 \text{ dBm} = 10 \text{ mW}$$

$$20 \text{ dBm} = 100 \text{ mW}$$

$$-3 \text{ dBm} = 0.5 \text{ mW}$$

$$-10 \text{ dBm} = 100 \mu\text{W}$$

$$-30 \text{ dBm} = 1 \mu\text{W}$$

$$-60 \text{ dBm} = 1 \text{ nW}$$

$$[\text{dBm}] + [\text{dB}] = [\text{dBm}]$$

$$[\text{dBm/Hz}] + [\text{dB}] = [\text{dBm/Hz}]$$

$$[\text{x}] + [\text{dB}] = [\text{x}]$$

Calculul atenuarii

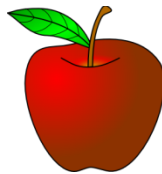
$$\text{Pierderi} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\text{Pierderi [dB]} = [-] 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

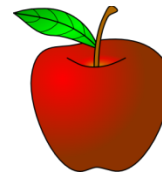
$$\text{Pierderi [dB]} = [-] (P_{out} [\text{dBm}] - P_{in} [\text{dBm}])$$



=



-



$$\text{Atenuare [dB/km]} = \frac{\text{Pierderi [dB]}}{\text{lungime [km]}}$$

Recapitulare

Introducere

Capitolul 1

Aplicatii majore

▶ Comunicatii

- Infrarosu (InGaAsP)

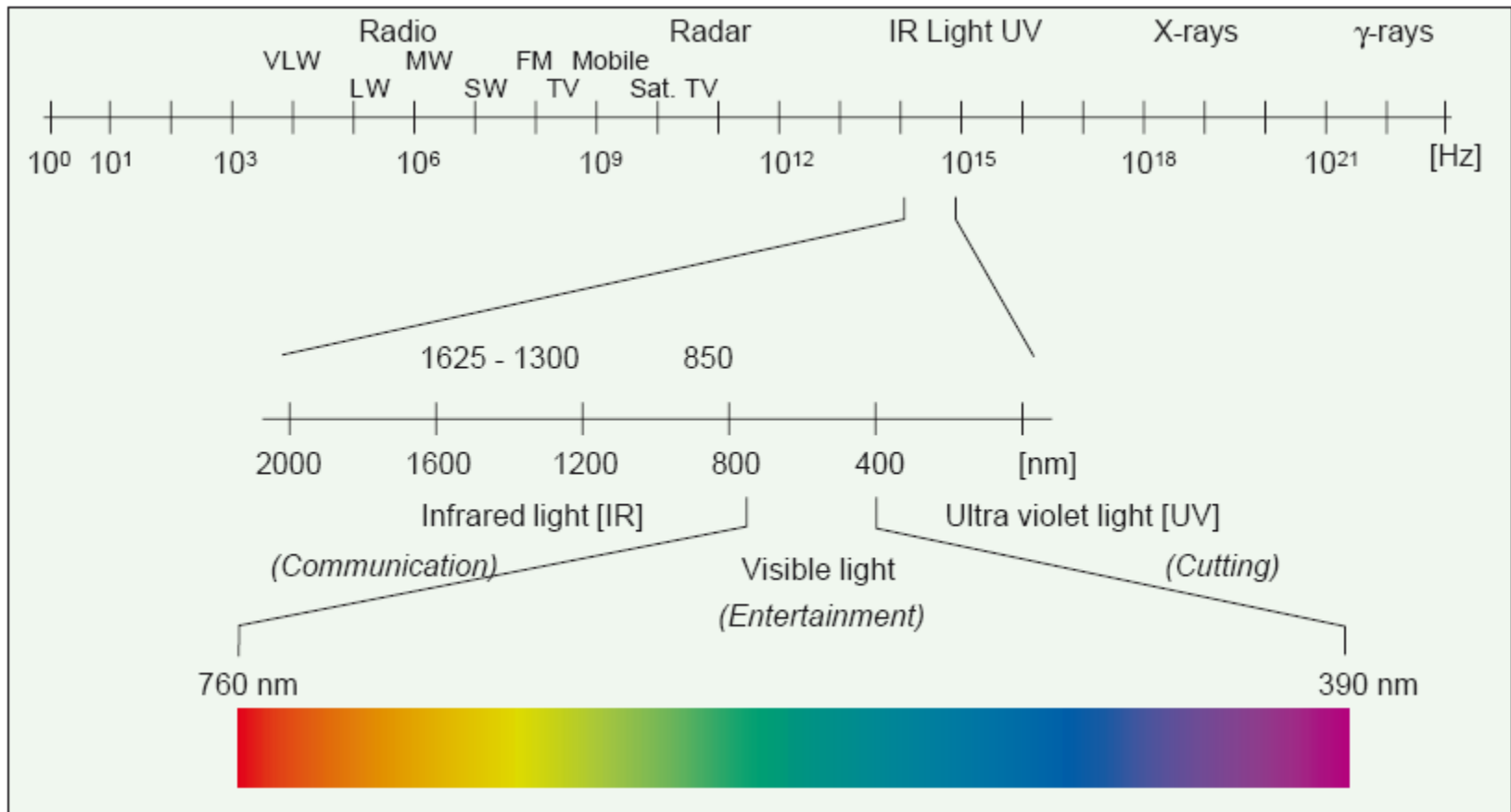
▶ Vizibil

- Spectru vizibil (GaAlAs)

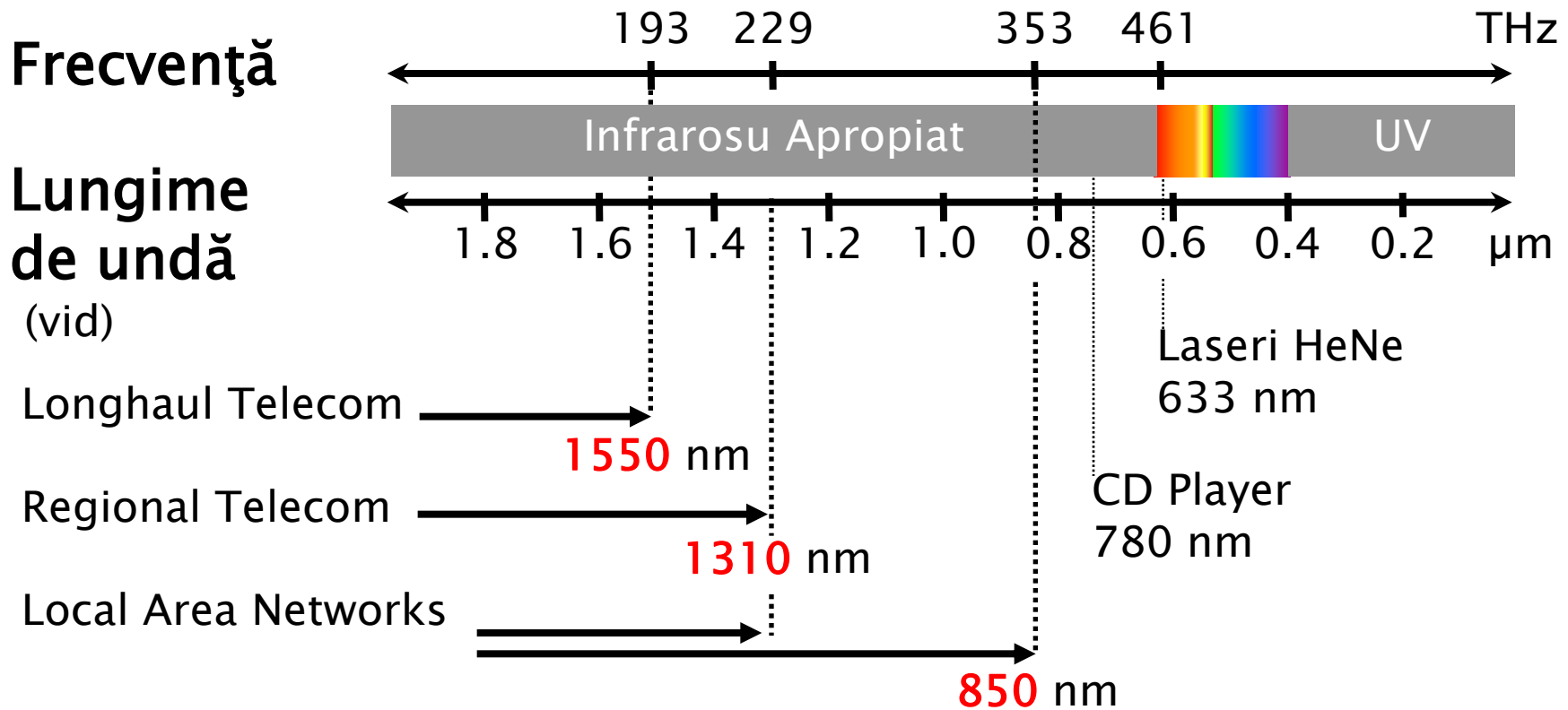
▶ Iluminare

- Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

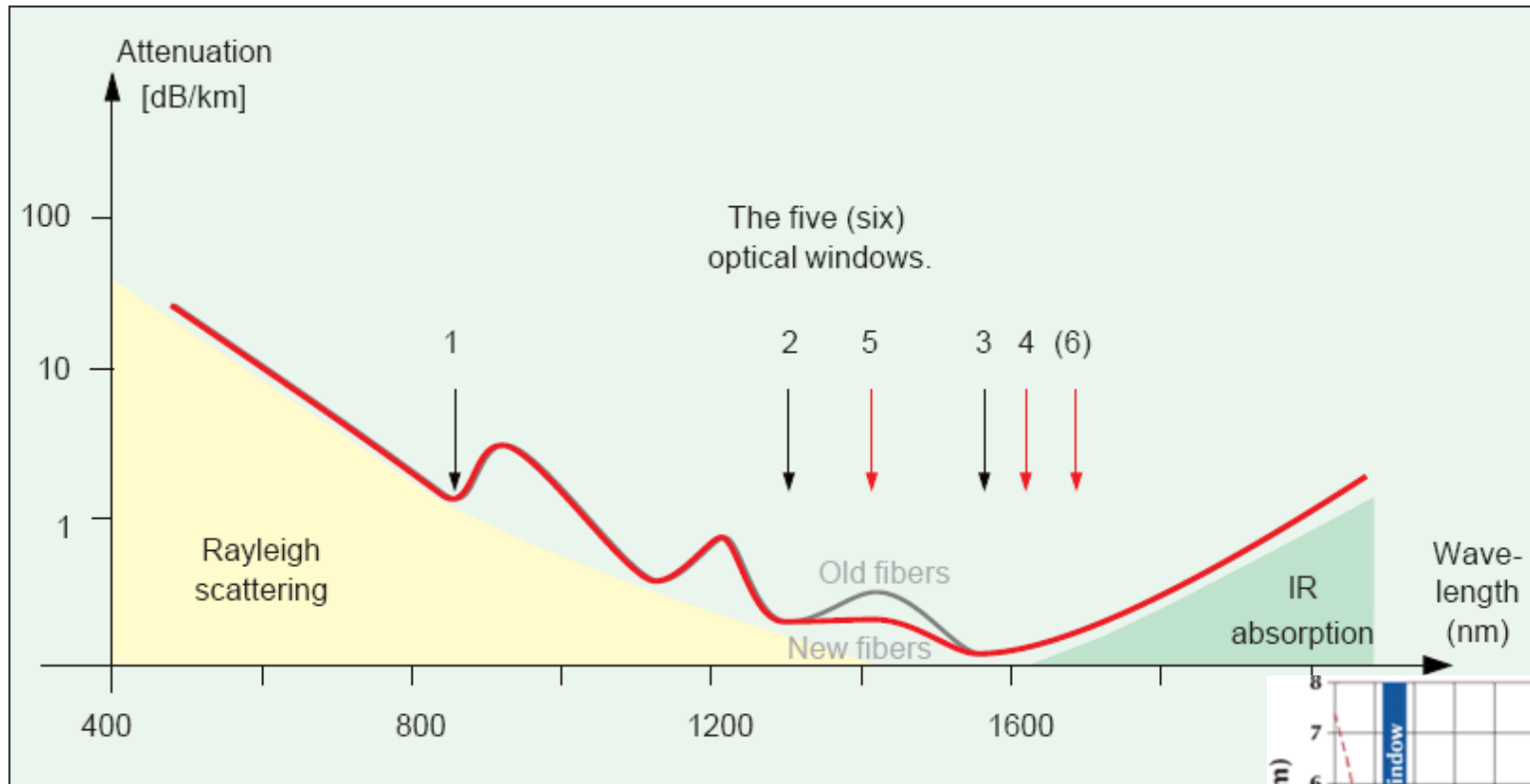
Spectrul electromagnetic



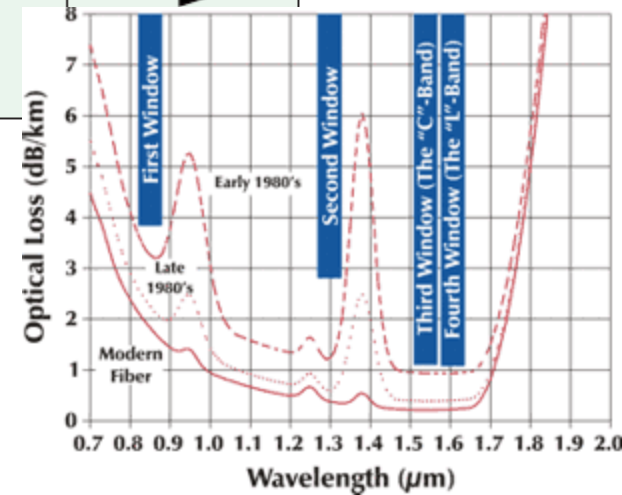
Benzi de lucru in comunicațiile optice



Atenuarea în fibra optică (SiO₂)



850nm, 1310nm, 1550nm



Aplicatii majore

- ▶ Comunicatii
 - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
 - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Illuminare
 - Putere ridicata, lumina alba (GaN)

Premiul Nobel, Fizica, 2014



The image is a graphic announcement for the Nobel Prize in Physics 2014. It features a blue background with a gold Nobel Prize medal icon in the top left. The text is in both Swedish and English. At the top, it says "Nobelpriset i fysik 2014" and "The Nobel Prize in Physics 2014". Below this, the Swedish text "Nobelpriset i fysik 2014" is prominently displayed. To the right is the logo of the Royal Swedish Academy of Sciences, "KUNGL. VETENSKAPSKAS AKADEMIEN". Three portraits of the laureates are shown in a row: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, and Shuji Nakamura. Each portrait is accompanied by their name and affiliation. Below the portraits is the Swedish citation: "För uppfinningen av effektiva blå lysdioder vilka möjliggjort ljusstarka och energisnåla vita ljuskällor". Below that is the English translation: "For the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources". At the bottom left is the date "2014-10-07" and at the bottom right is the copyright notice "© Kungl. Vetenskapsakademien".

Nobelpriset i fysik 2014

The Nobel Prize in Physics 2014

KUNGL. VETENSKAPSKAS AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Isamu Akasaki
Meijo University, Nagoya, Japan
Nagoya University, Japan

Hiroshi Amano
Nagoya University, Japan

Shuji Nakamura
University of California,
Santa Barbara, CA, USA

"För uppfinningen av effektiva blå lysdioder vilka möjliggjort ljusstarka och energisnåla vita ljuskällor"

"For the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"

2014-10-07

© Kungl. Vetenskapsakademien

Aplicatii majore

- ▶ Comunicatii
 - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
 - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
 - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

Lumina ca undă electromagnetică

Capitolul 2

Ecuatiile lui Maxwell

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

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

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

▶ Ecuatii constitutive

$$D = \varepsilon \cdot E$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$J = \sigma \cdot E$$

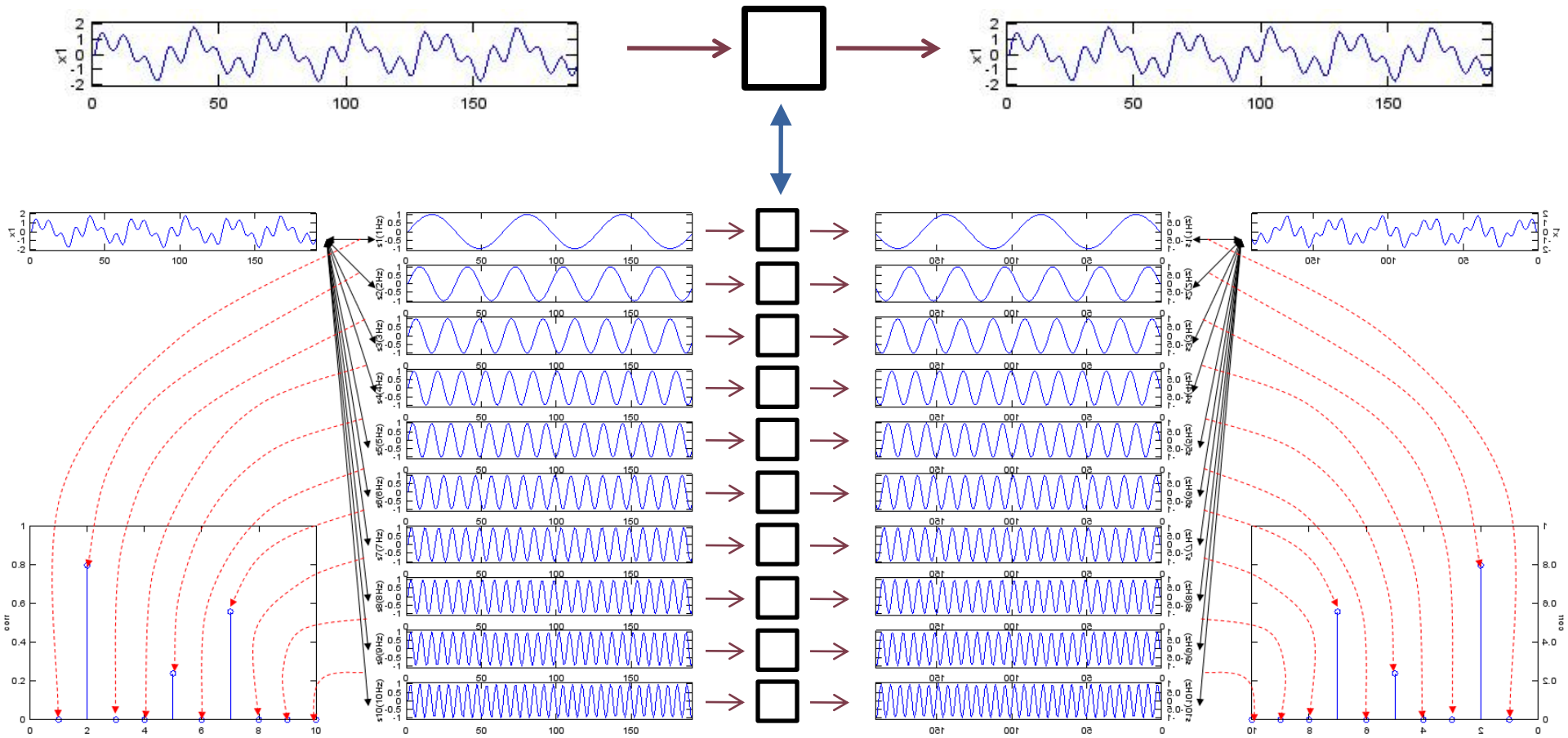
▶ In vid

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99790 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Modelle matematiche



$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

$$G(\omega)[F(\omega)]$$

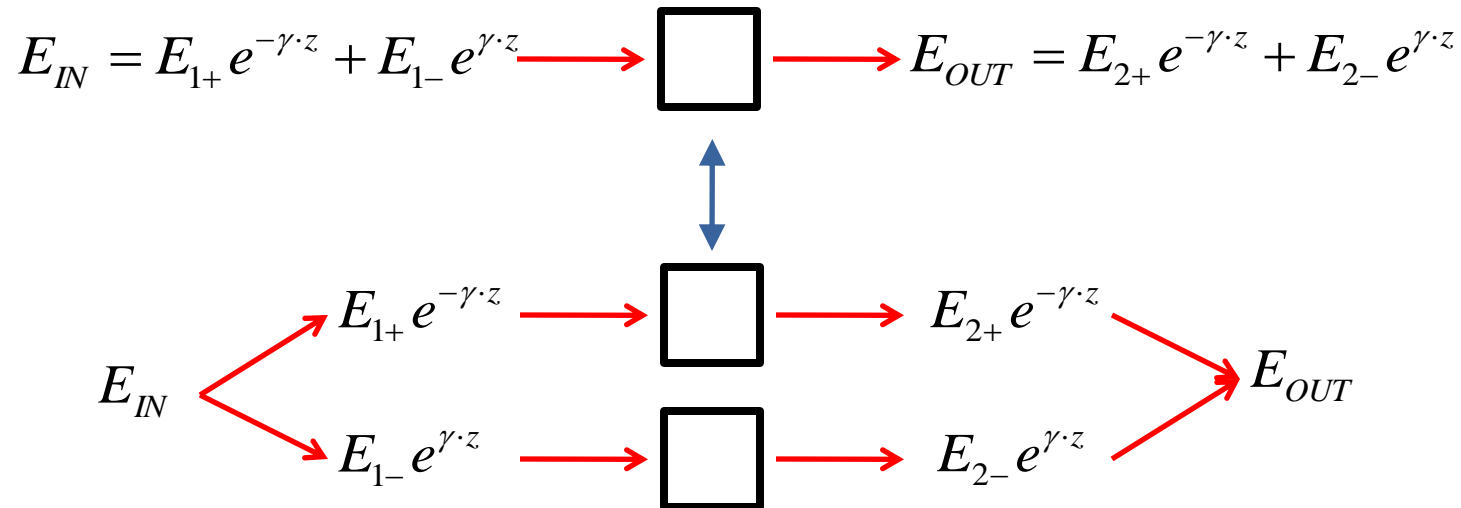
$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

Modele matematice

► cazuri particulare in care exista rezolvare analitica

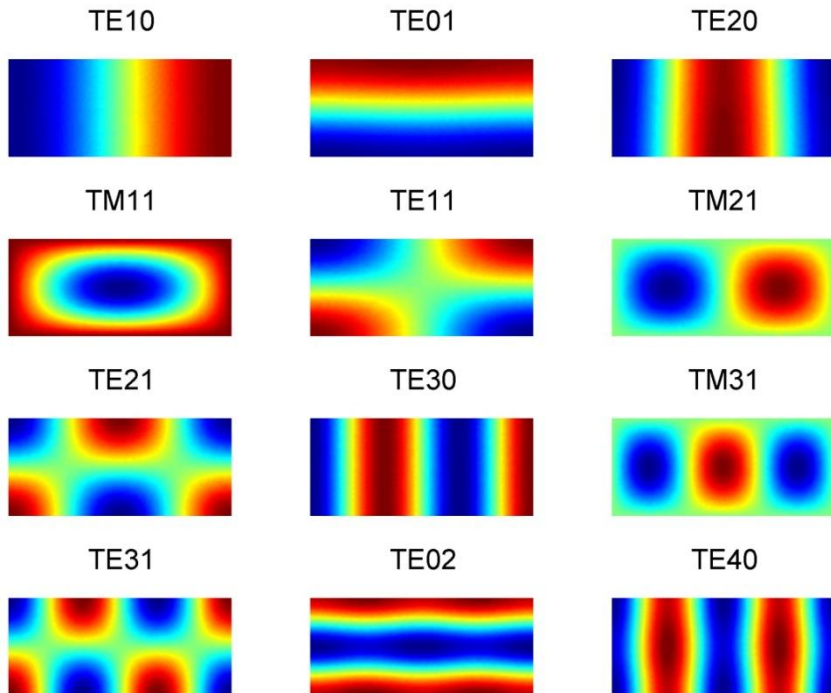
- unda
 - incidenta
 - reflectata
- unda
 - directa
 - inversa

$$E_y = E^+ \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{j(\omega t - \beta \cdot z)} + E^- \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot e^{j(\omega t + \beta \cdot z)}$$

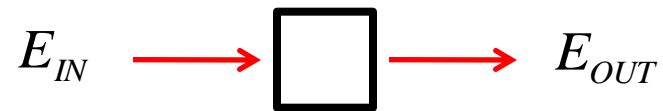


Modele matematice

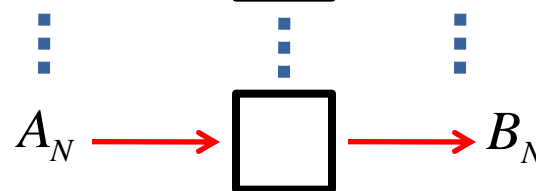
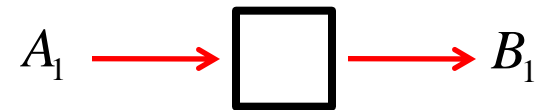
- ▶ cazuri particulare in care exista rezolvare analitica
 - moduri in medii delimitate



$$E = \sum_1^{\infty} A_i \cdot Mod_i \quad A_i = \langle E, Mod_i \rangle$$



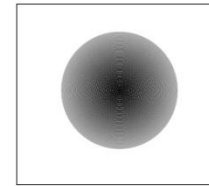
$$A_i = \langle E_{IN}, Mod_i \rangle$$



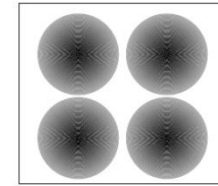
$$E_{OUT} = \sum_1^N B_i \cdot Mod_i$$

Moduri in fibra

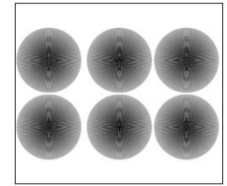
- ▶ Moduri in ghid rectangular



TEM₀₀

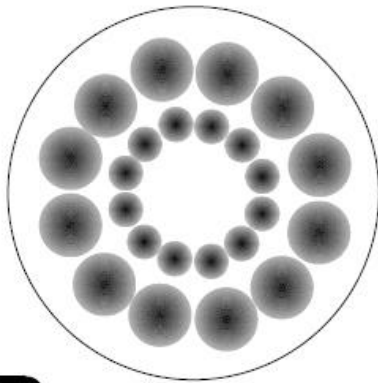


TEM₁₁

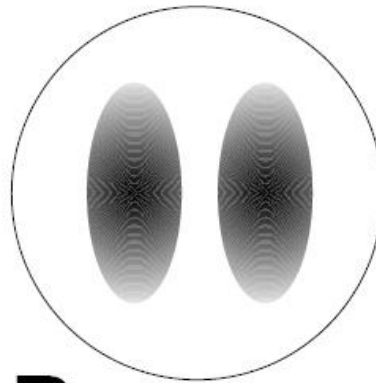


TEM₂₁

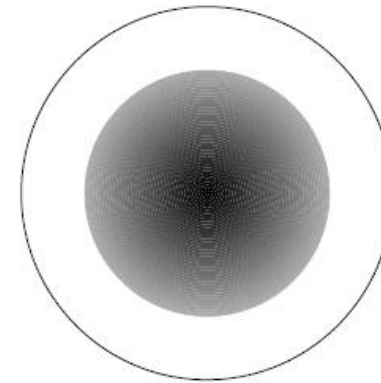
- ▶ Moduri linear polarizate in fibra



LP₆₂

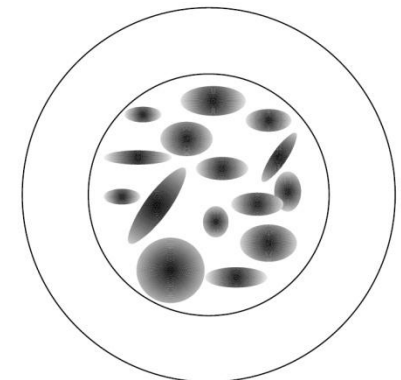


LP₁₁



LP₀₁

“Sparkle” pattern



Parametri, dependenta de mediu

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,99790 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$n = 1$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c_0}{f}$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{n}$$

$$c = \frac{c_0}{n}$$

$n = \sqrt{\varepsilon_r}$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{n \cdot f} = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$\lambda = \lambda(n)$$

$$f = \text{indep.}$$

ITU G.692

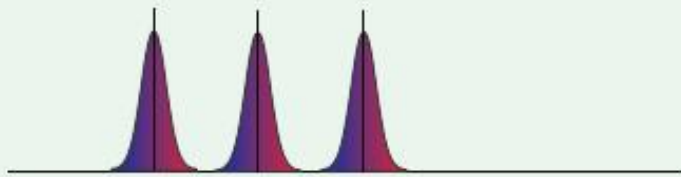
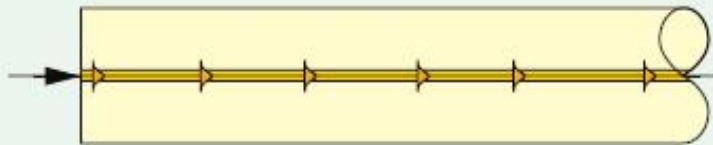
"the allowed channel frequencies are based on a 50 GHz grid with the reference frequency at 193.10 THz"

SI

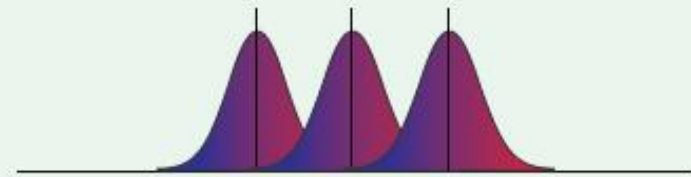
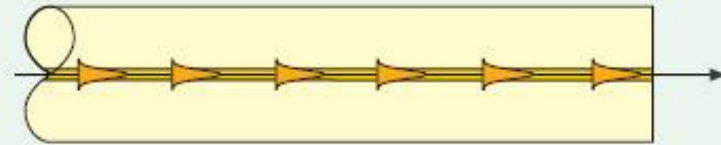
"a source that emits monochromatic radiation of frequency $540 \cdot 10^{12}$ Hz"

Dispersie

> 50 km Single-mode step index
< 10 km Multimode graded index
< 1 km Multimode step index



Transmission:
Well-defined pulses but not absolutely monochromatic.
Typical spectral width < 0.8 nm

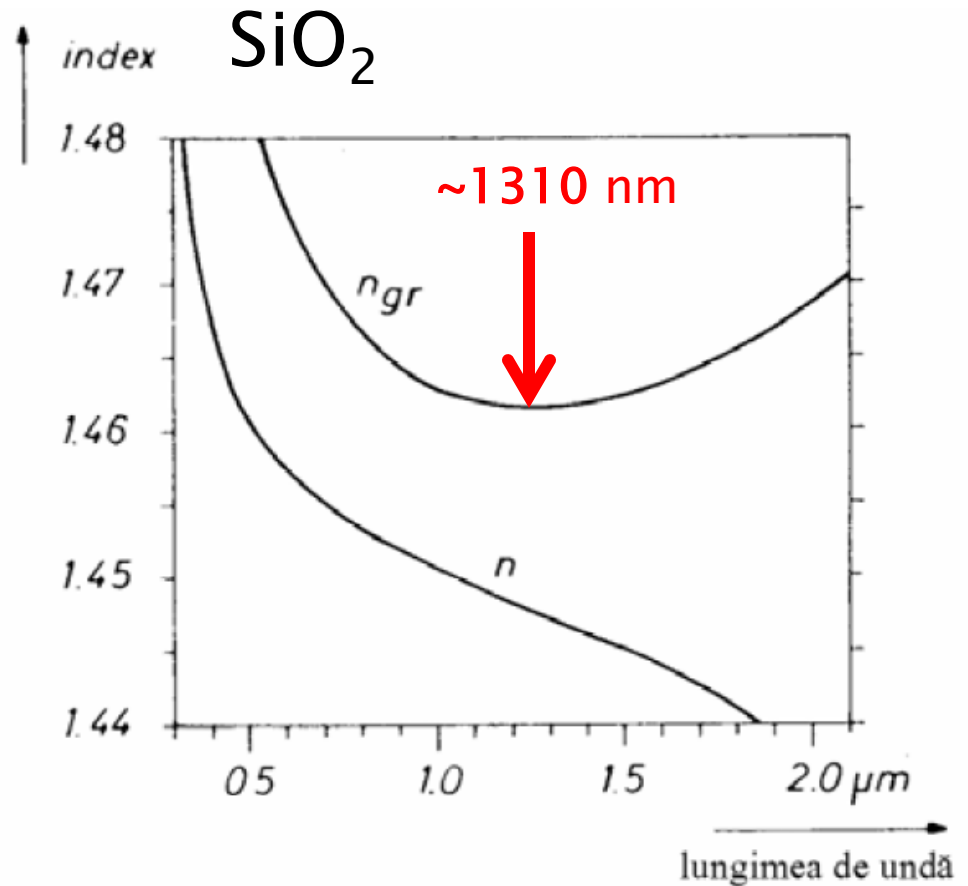


Reception:
Pulse broadening caused by the laser's spectral width and the difference between the refractive indices of the red and blue ends of the light pulse.

Dispersie normala

$$n_{gr} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

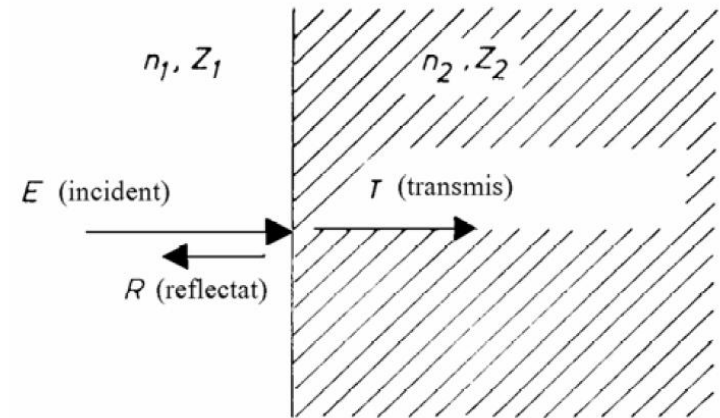
$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dn_{gr}}{d\lambda}$$



Transmisia puterii între medii

- ▶ incidenta normala
- ▶ reflexia in amplitudine

$$Z = \frac{Z_0}{n} \quad \Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$



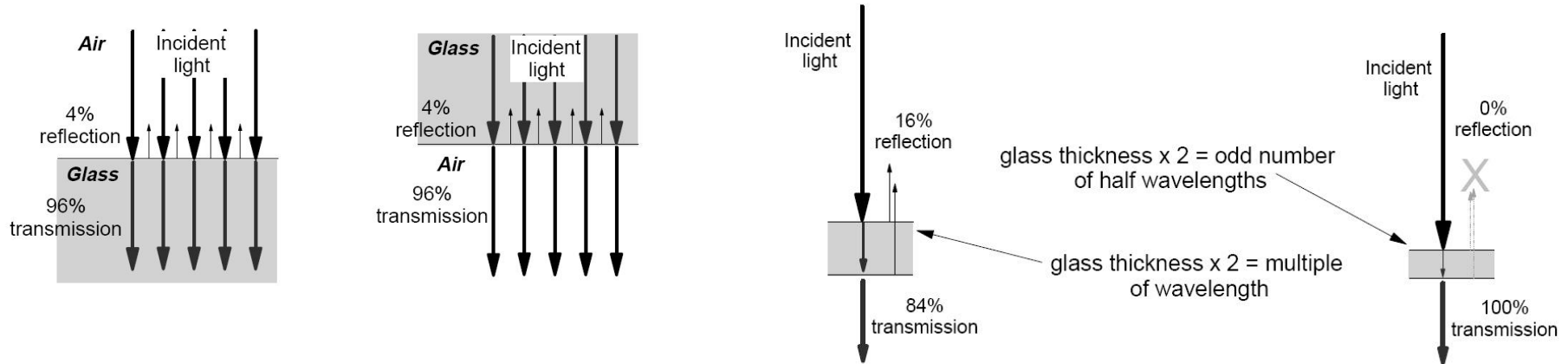
- ▶ densitatea de putere proportionala cu patratul amplitudinii câmpului

$$r = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad t = \left(\frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right)^2$$

- ▶ interfata aer–sticla ($n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$)

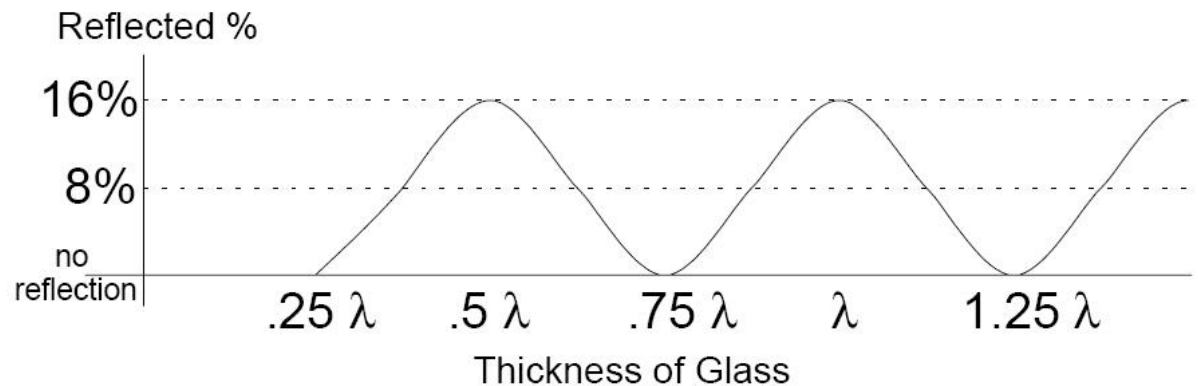
$$r = 0.04 = 4\%$$

Transmisia printr-o lamela



$$\Gamma = \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} = 0.2; \quad r = \Gamma^2 = 0.04 = 4\% \quad \Gamma_{\max} = 0.2 + 0.2; \quad r_{\max} = \Gamma_{\max}^2 = 0.16 = 16\%$$

- ▶ apare interferența între diversele unde reflectate
- ▶ se adună câmpurile nu puterile
- ▶ lamele antireflexive



Polarizarea luminii

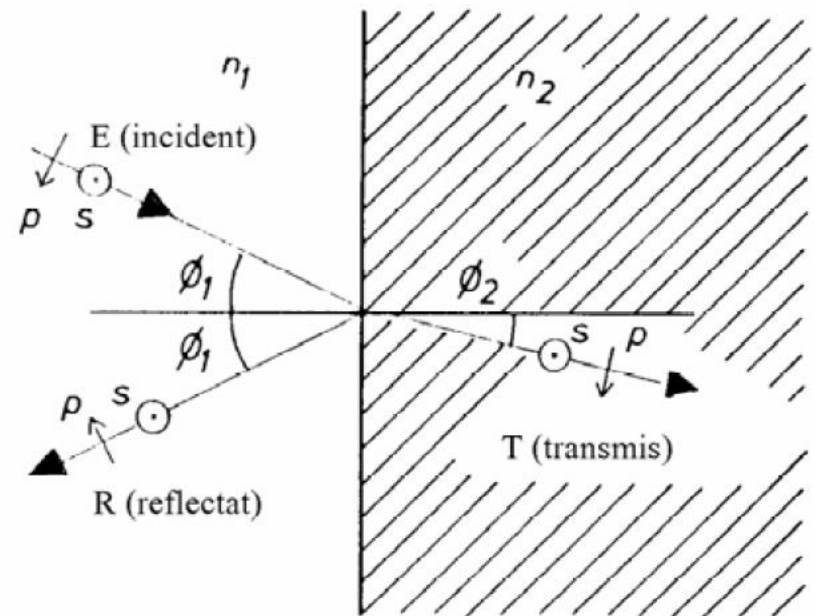
- ▶ incidenta oblica
- ▶ reflexiile in amplitudine a campului:

$$r_s = -\frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{\sin(\phi_1 + \phi_2)}$$

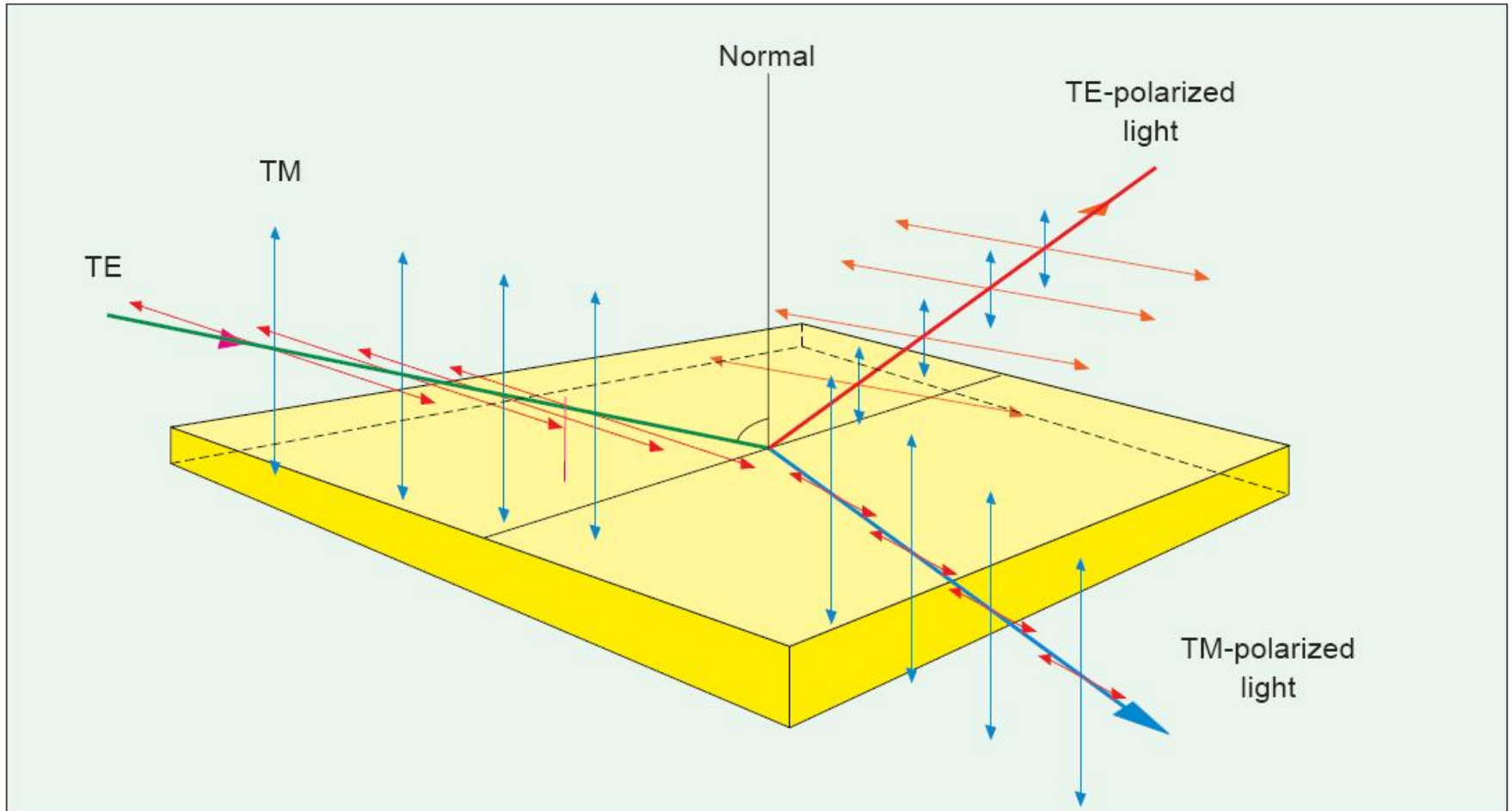
$$r_p = \frac{\tan(\phi_1 - \phi_2)}{\tan(\phi_1 + \phi_2)}$$

$$t_s = \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2)}$$

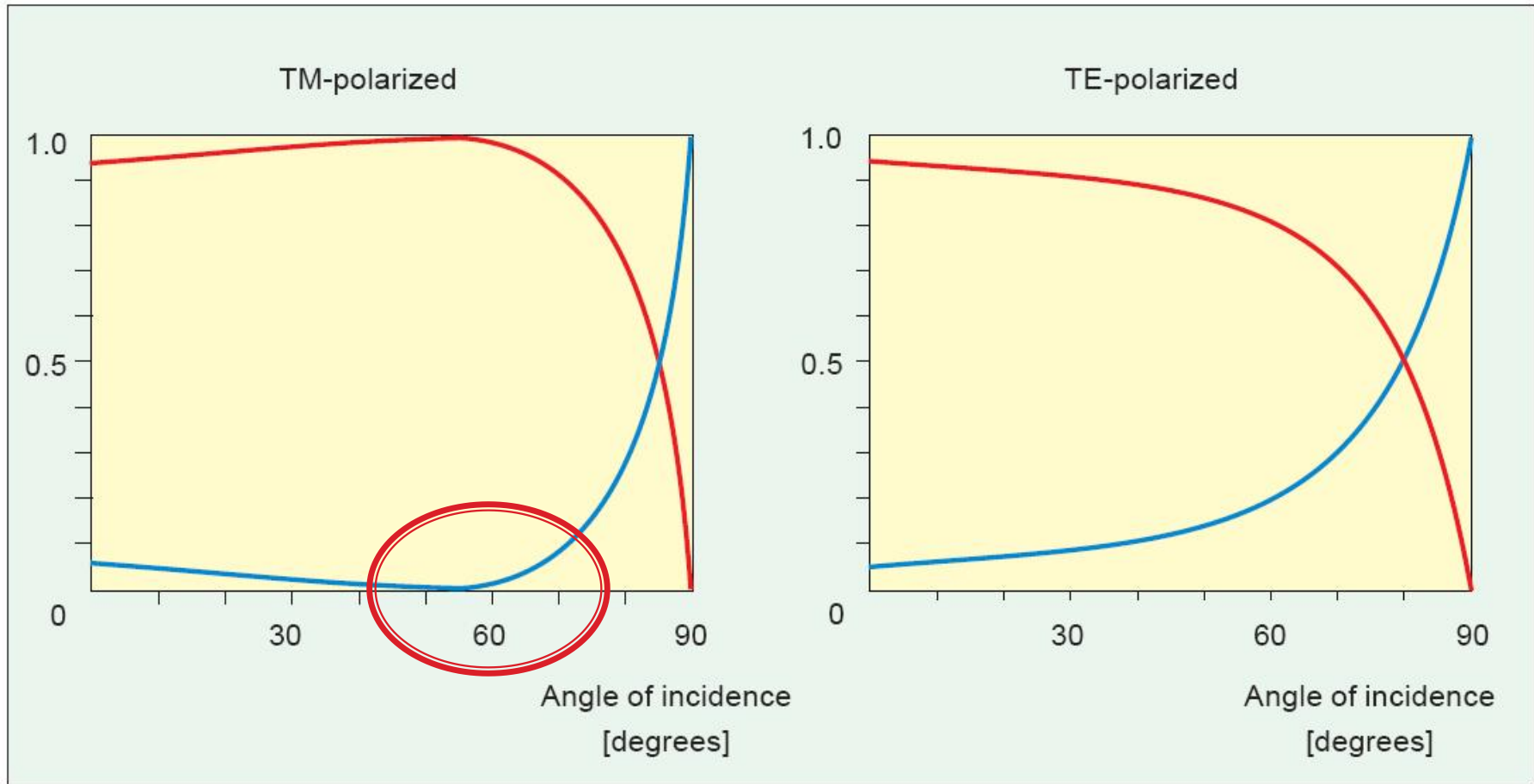
$$t_p = \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2) \cos(\phi_1 - \phi_2)}$$



Polarizarea luminii



Polarizarea luminii



Unghi Brewster

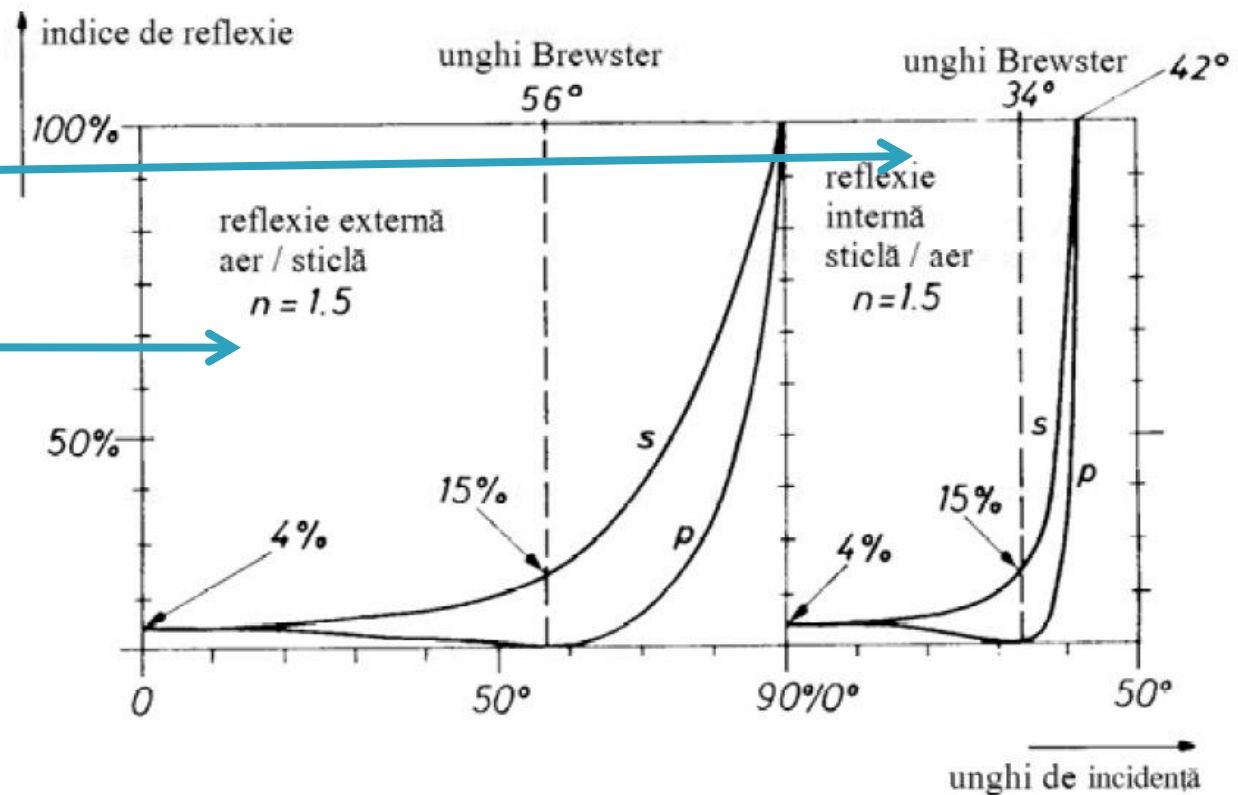
$$r_p = 0 \Rightarrow \tan(\phi_1 + \phi_2) \rightarrow \infty \Rightarrow \phi_1 + \phi_2 = \frac{\pi}{2}$$

$$n_1 \cdot \sin \phi_1 = n_2 \cdot \sin \phi_2 = n_2 \cdot \cos \phi_1$$

$$\phi_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\phi_B = 34^\circ$$

$$\phi_B = 56^\circ$$



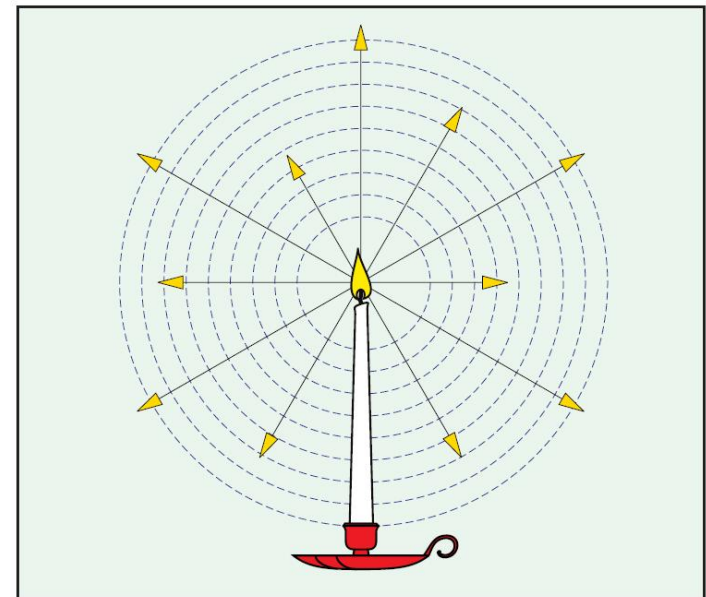
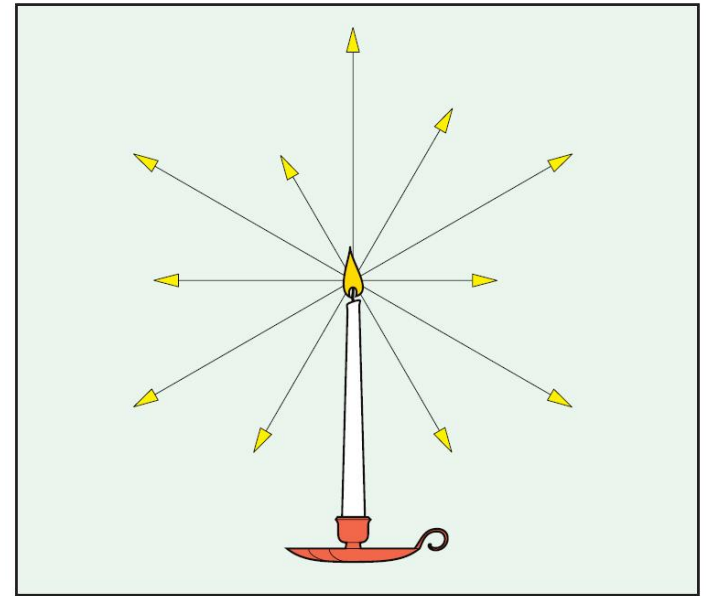
Optică geometrică

(tot) Capitolul 2

Raze de lumina

- ▶ Lumina este constituita din raze care se propaga in linie dreapta in medii omogene
- ▶ Sursa omnidirecțională: emite similar in toate direcțiile
- ▶ Densitatea de energie luminoasa descrește invers proporțional cu pătratul distantei fata de sursa (energia se împarte uniform pe suprafața întregii sfere)

$$P = \frac{P_0}{r^2}$$

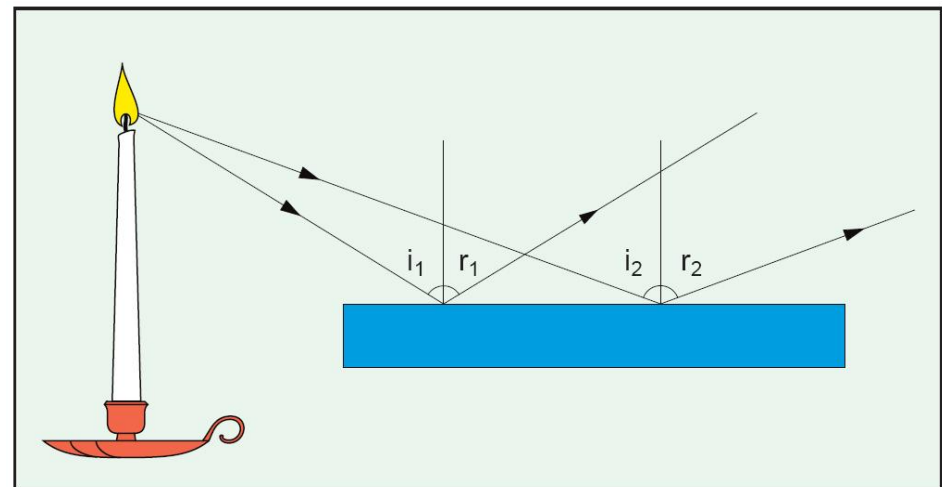


Reflexia luminii

- ▶ la suprafata de separatie dintre doua medii, (o parte din) lumina se intoarce in mediul de incidenta
- ▶ unghiul dintre raza incidenta si normala (ϕ_i) este egal cu unghiul dintre raza reflectata si normala (ϕ_r)

▶ Legea reflexiei

$$\phi_i = \phi_r$$



Refractia luminii

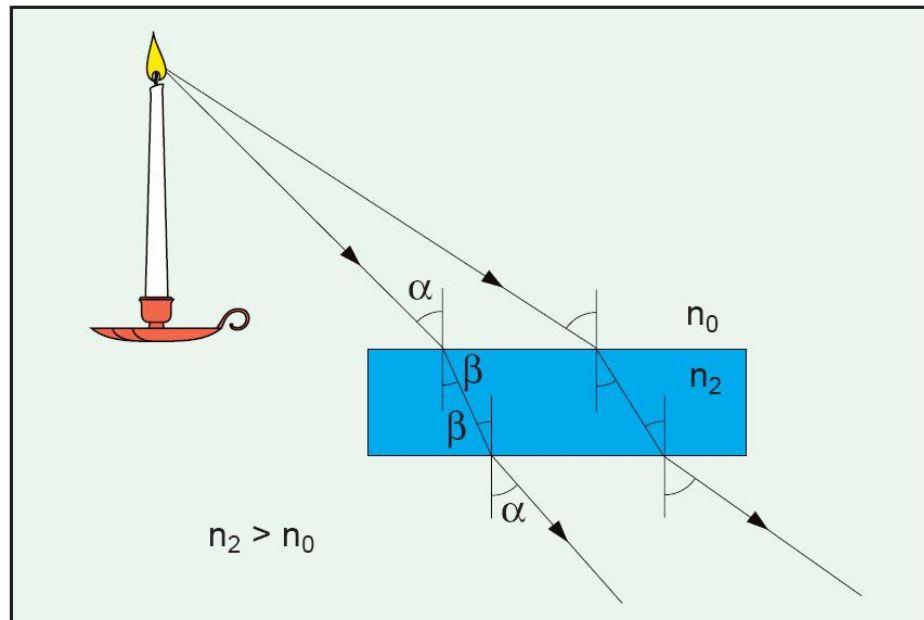
- ▶ la suprafața de separație dintre doua medii, (o parte din) lumina se (poate) propaga in mediul de transmisie sub un unghi diferit de unghiul incident
- ▶ la trecerea in medii mai “dense” (optic) lumina se apropie de normala
- ▶ la trecerea in medii mai “puțin dense” (optic) lumina se depărtează de normala

▶ Legea lui Snell (a refracției)

$$n_1 \cdot \sin \phi_i = n_2 \cdot \sin \phi_R$$

ϕ_i - unghi incident (in n_1)

ϕ_R - unghi de refracție (in n_2)



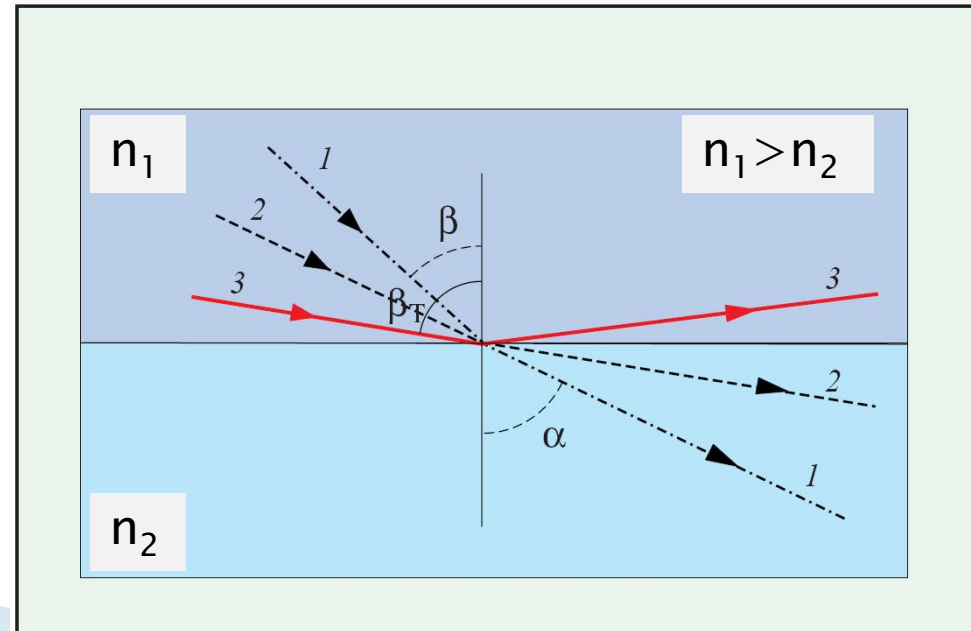
Reflexia totala

- ▶ Apare **numai când** lumina se propaga dintr-un mediu mai dens optic într-un mediu mai puțin dens
- ▶ La intersecția luminii cu suprafața de separație a doua medii se întâlnesc în general raze reflectate **și** raze refractate
- ▶ Pentru un unghi de incidență numit **unghi critic**, raza refractată se obține în lungul suprafeței de separație
- ▶ Pentru orice unghi mai mare decât unghiul critic există numai raza reflectată

$$n_1 > n_2; \quad \phi_R = 90^\circ$$

$$n_1 \cdot \sin \phi_C = n_2$$

$$\phi_C = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

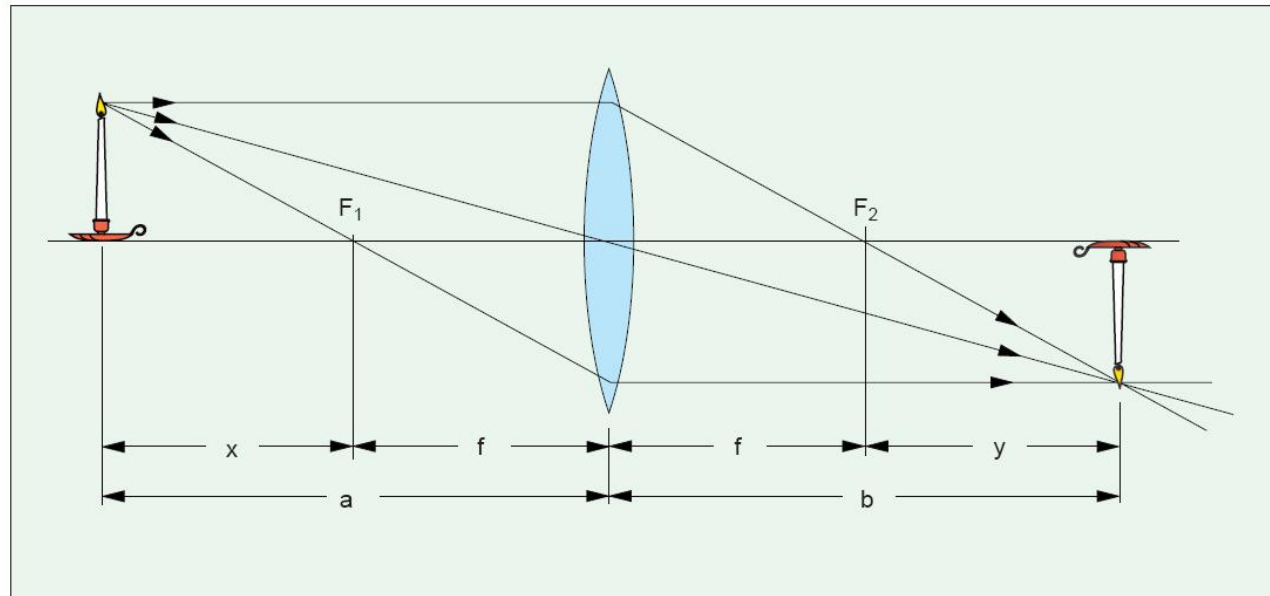


Lentile

- ▶ Razele de lumina paralele sunt concentrate intr-un punct numit focar, aflat la **distanța focala** de planul lentilei
- ▶ O sursa omnidirectională poziționată în focar va permite obținerea unui fascicul paralel

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$x \cdot y = f^2$$



Probleme

- ▶ Într-un LASER Fabry-Perrot, coerența luminii este obținută prin reflexii succesive ale luminii între două oglinzi paralele, separate de o distanță egală cu un multiplu a jumătate de lungime de undă ce se dorește emisă. Interferența constructivă și coerența dintre lumina incidentă și reflectată asigură amplificarea numai a luminii care îndeplinește această condiție. Se dorește realizarea unei diode LASER cu lungimea de undă $\lambda_0 = 1305\text{nm}$ utilizând un material cu $\epsilon_{r1} = 10.80$.



Probleme

- ▶ Care trebuie să fie distanța între oglinzi dacă se alege în așa fel încât să corespundă la 380 jumătăți de lungime de undă? (1 p)
- ▶ Dacă oglinda este realizată prin inserarea în material a unei lamele dintr-un dielectric cu $n_2 = 2.23$, ce procent din lumină incidentă părăsește zonă activă dintre cele două oglinzi la fiecare reflexie? (1 p)
- ▶ Dacă în total se emit 3 linii spectrale corespunzătoare selectării luminii la care distanța dintre oglinzi calculată la a) este egală cu $(380 - 1)$, (380) , $(380 + 1)$ jumătăți de lungime de undă, care este lățimea spectrală în domeniul frecvență a diodei? Valoarea trebuie exprimată în GHz. (2 p)
- ▶ Care este unghiul Brewster de obținere a luminii liniar polarizate pentru trecerea din materialul cu $\epsilon_{r1} = 10.80$ în aer. (1 p)
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

Probleme

- ▶ Într-un material cu indicele de refracție $n_1 = 3.75$ se interpune un strat de material (2) cu $\epsilon_{r2} = 5.20$ pentru a realiza o oglindă parțial reflectantă la realizarea unui LASER cu $\lambda_0 = 950\text{nm}$. Înălțimea stratului (2) este aleasă pentru reflectivitate maximă la incidență normală.
 - Care este înălțimea cea mai mică a stratului (2) pentru a obține acest efect? (2p)
 - Ce procent din puterea incidentă este întoarsă în materialul (1)? (1p)
 - O radiație care sosește cu înclinația de 41.2° față de normala la suprafața de separație, va trece din mediul (1) în mediul (2)? (1p)
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

Continuare

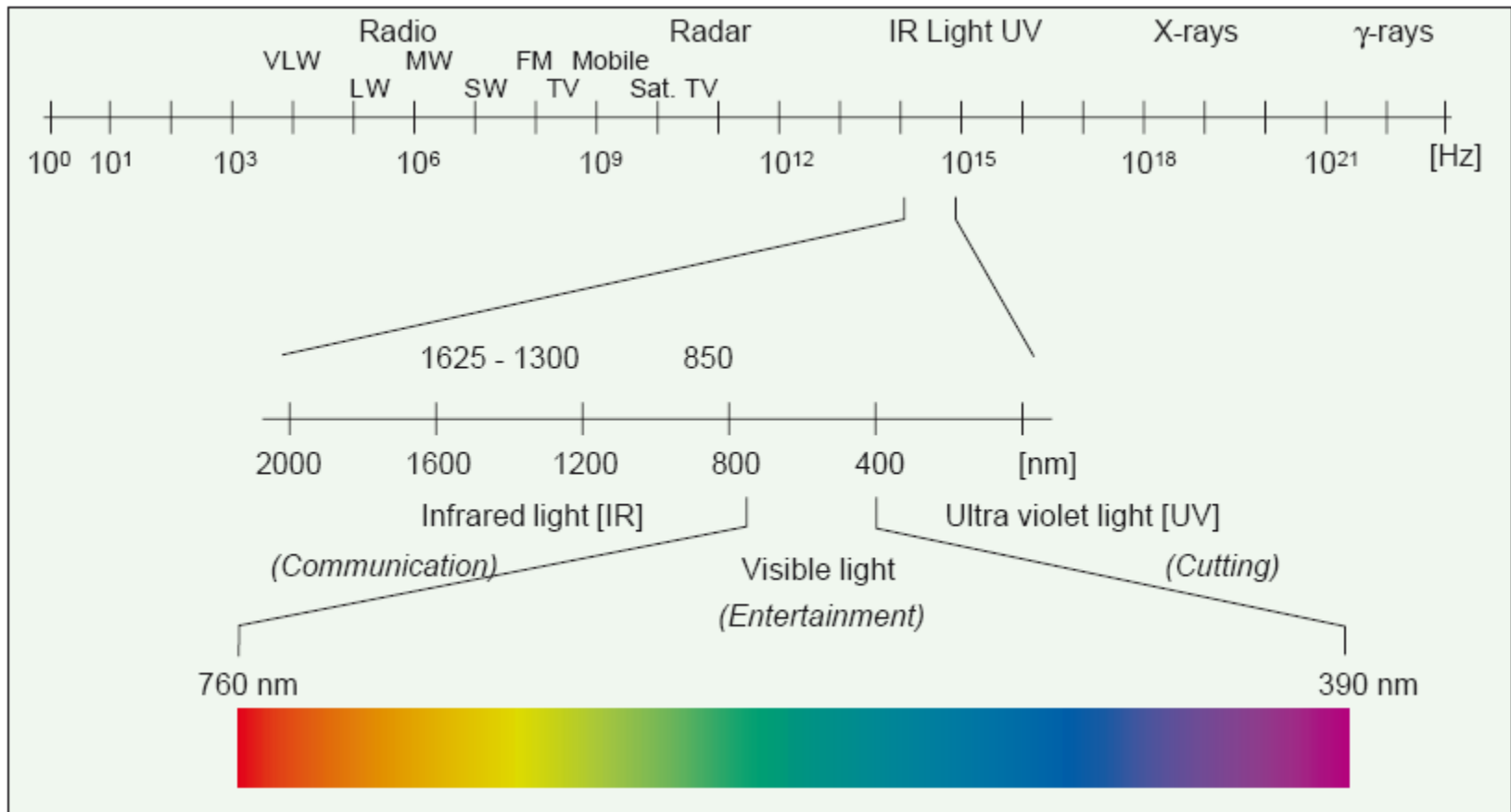
Fotometrie și radiometrie

Capitolul 3

Aplicatii majore

- ▶ Comunicatii
 - Infrarosu (InGaAsP)
- ▶ Vizibil
 - Spectru vizibil (GaAlAs)
- ▶ Iluminare
 - Putere ridicata, lumina alba (GaInN)

Spectrul electromagnetic



O alta dualitate

- ▶ In optoelectronica, lumina poate fi privita din doua puncte de vedere
 - energetic (efect asupra dispozitivului)
 - uman (efect asupra ochiului)
- ▶ Dualitatea mărimilor implicate
 - energetice
 - luminoase
- ▶ Candela (cd) **este** una din cele 7 mărimi fundamentale ale SI
 - Cd = intensitatea luminoasa a unei surse ce emite o radiație monocromatica cu frecventa $540 \cdot 10^{12}$ Hz ($\lambda = 555\text{nm}$ in vid) si are o intensitate radianta de $1/683$ W/sr

Flux energetic

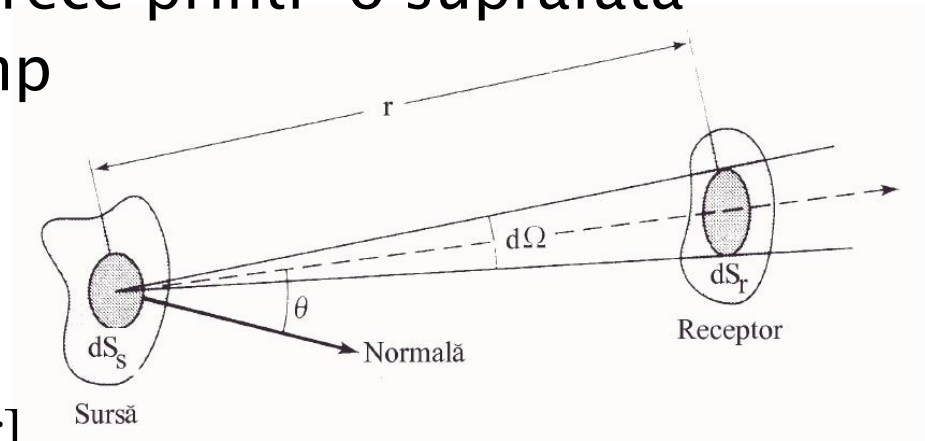
► Flux energetic al luminii

- viteza cu care energia trece printr-o suprafata
- energie/unitatea de timp
- unitatea SI – W

$$\Phi_e = \frac{dE}{dt} \quad [W]$$

► Unghi solid

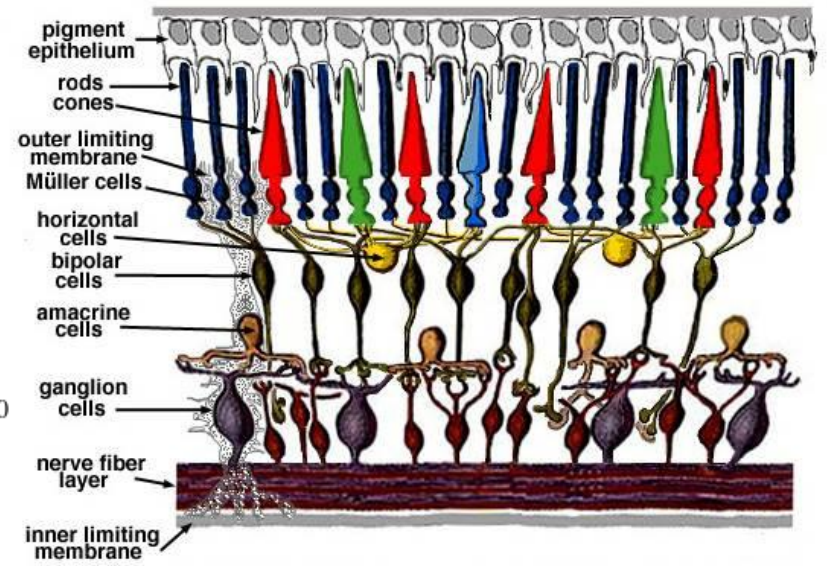
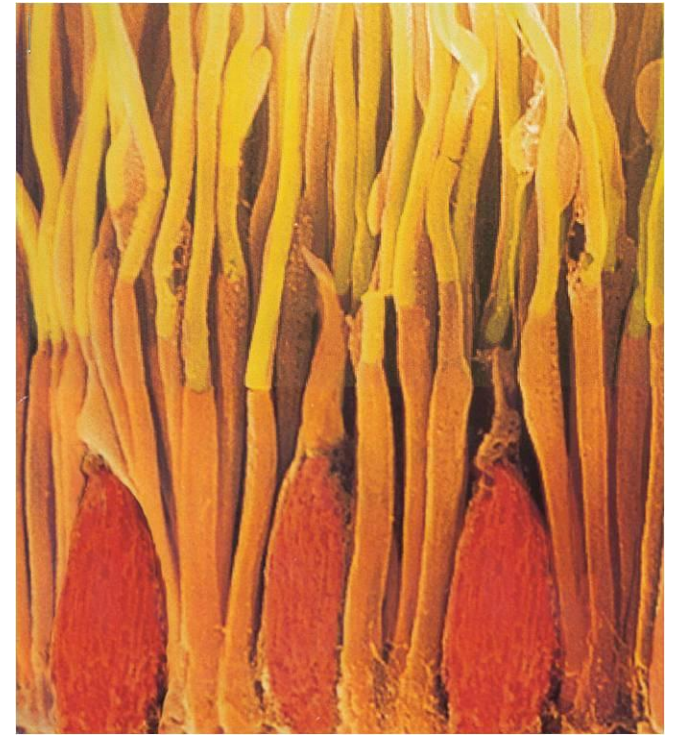
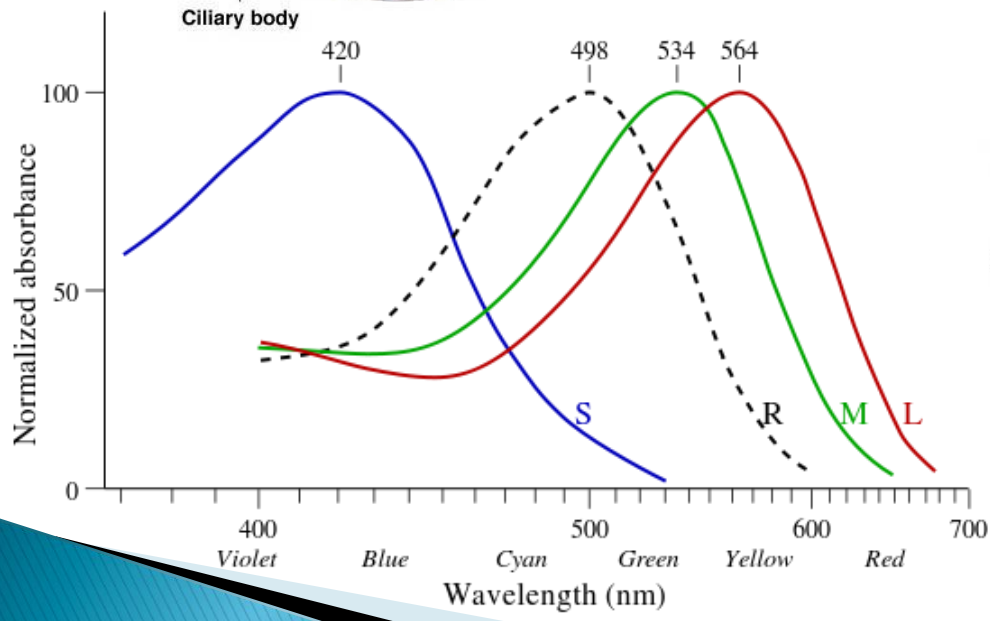
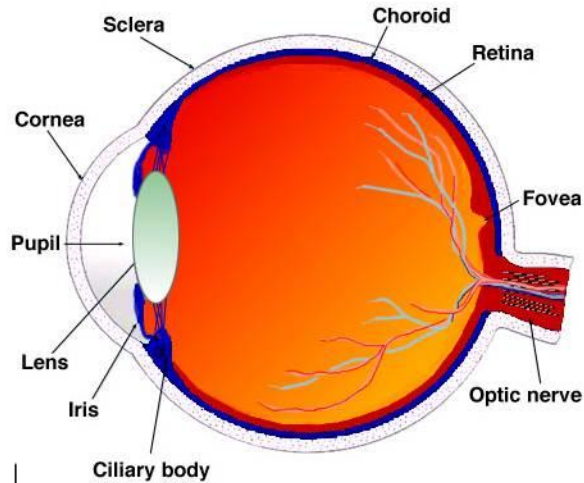
- definitie $\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [sr]$
- valoarea maxima, sfera: $\Omega = 4\pi \text{ sr}$
- pentru con cu deschiderea la varf 2ϕ : $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \phi)$
- pentru unghiuri mici: $\Omega = \pi \cdot \phi^2$



Flux luminos

- ▶ Flux luminos, definitie
 - o masura a puterii luminoase percepute de om
- ▶ Unitate de masura – $lm = \text{lumen}$
 - In SI de unitati **lumenul** este definit ca fluxul luminos al unei surse luminoase punctiforme cu intensitatea luminoasa de o candela intr-un unghi solid egal cu 1 sr.
 - la $\lambda = 555\text{nm}$ $\Phi_e = 1\text{W} \Leftrightarrow \Phi_v = 683\text{lm}$
- ▶ Dualitate pentru toate marimile implicate
 - radiometrie – indice “e”
 - fotometrie – indice “v”
- ▶ La alte lungimi de unda se tine cont de sensibilitatea relativa medie a ochiului uman

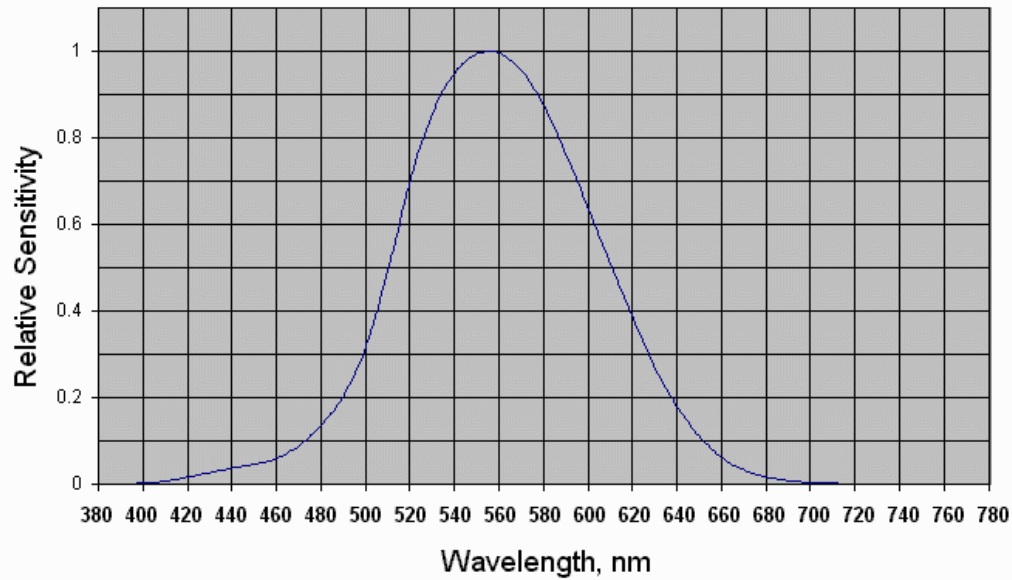
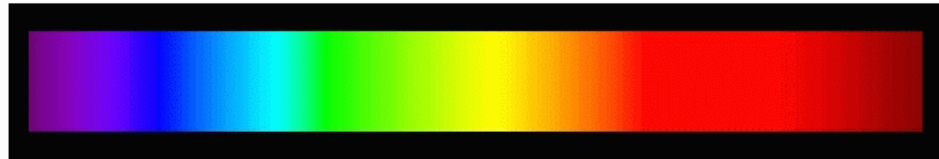
Ochiul uman



Standarde

- ▶ Se incearca definirea omului “standard”
- ▶ CIE – Commission Internationale de l'Éclairage
 - 1931 – luminozitatea relativa standard $V(\lambda)$ – **fotopic**
 - 1951 – luminozitatea relativa standard $V(\lambda)$ – **scotopic**
 - 1978 – Vos
 - 2005 – Sharpe, Stockman, Jagla, Jägle
 - 2008 – CIE $V(\lambda)$ – fotopic (~Sharpe)
- ▶ Sensibilitatea maxima a ochiului uman
 - vedere diurna (**fotopic**), $\lambda=555$ nm, $\eta_v = 683$ lm/W
 - vedere nocturna (**scotopic**), $\lambda=507$ nm, $\eta_v = 1700$ lm/W

CIE $V(\lambda)$



Response of Human Eye Versus Wavelength
(Data from the 1988 C.I.E. Photopic Luminous Efficiency Function)

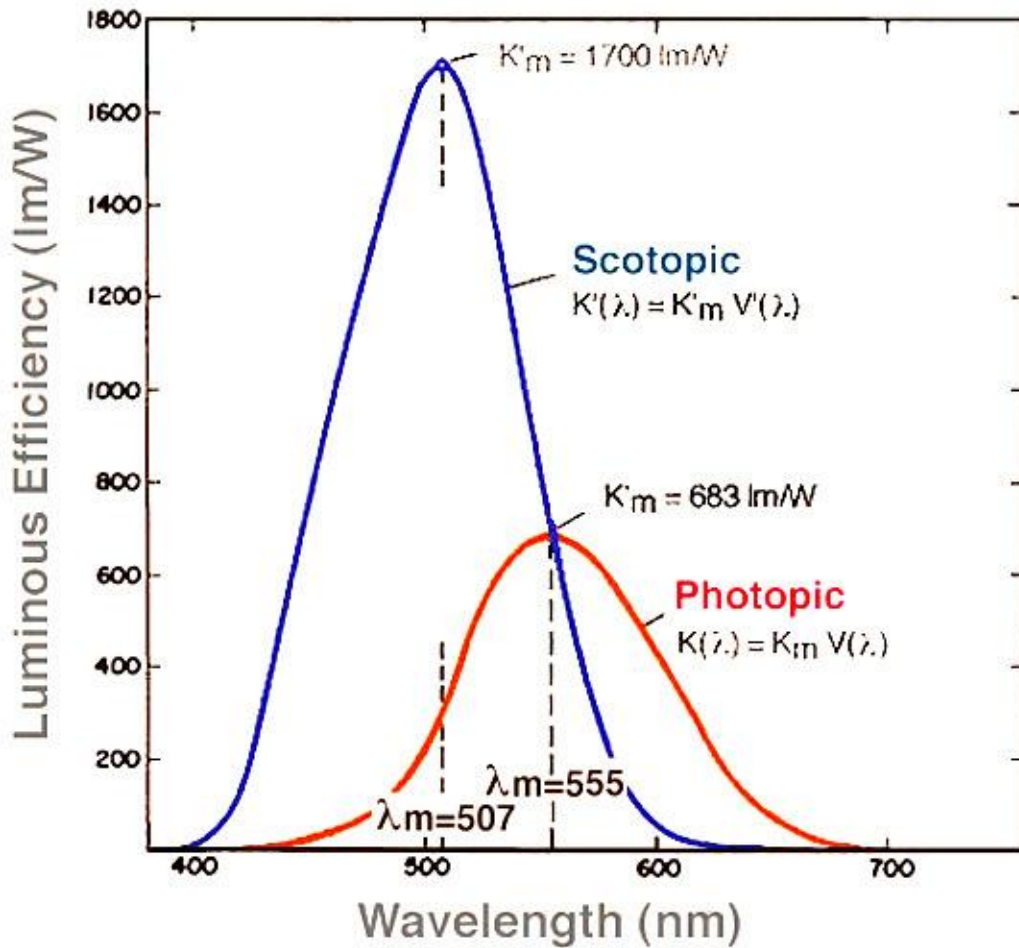


Figure 9. The scotopic and the photopic curves of spectral luminous efficacy (non-normalised values).

effect Purkinje

Curbe normalizate CIE

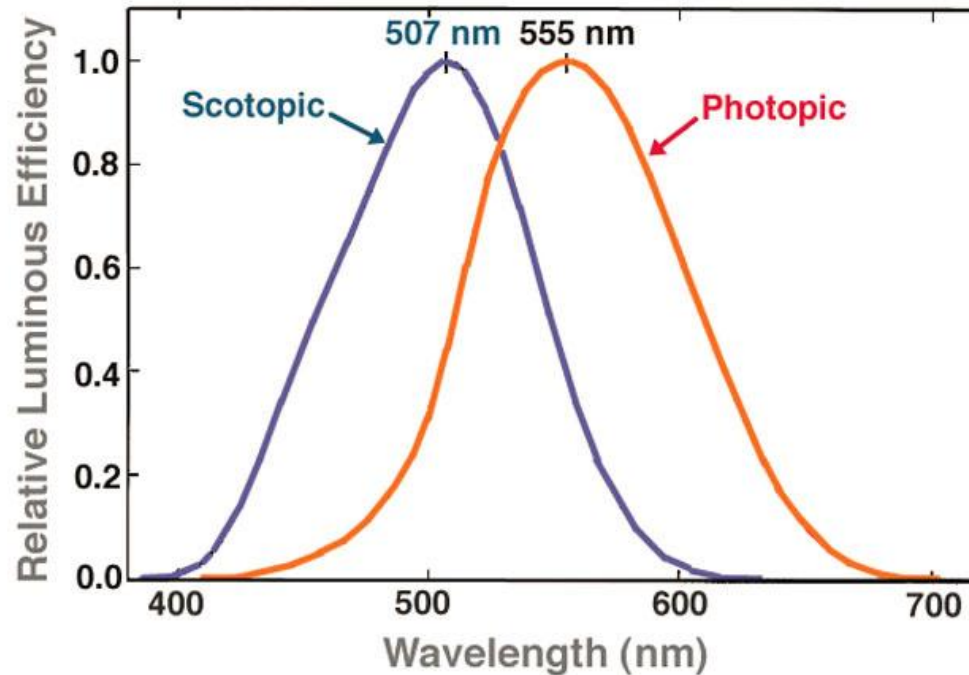


Figure 10. The scotopic and the photopic curves of relative spectral luminous efficiency as specified by the CIE (normalised values).

CIE $V(\lambda)$

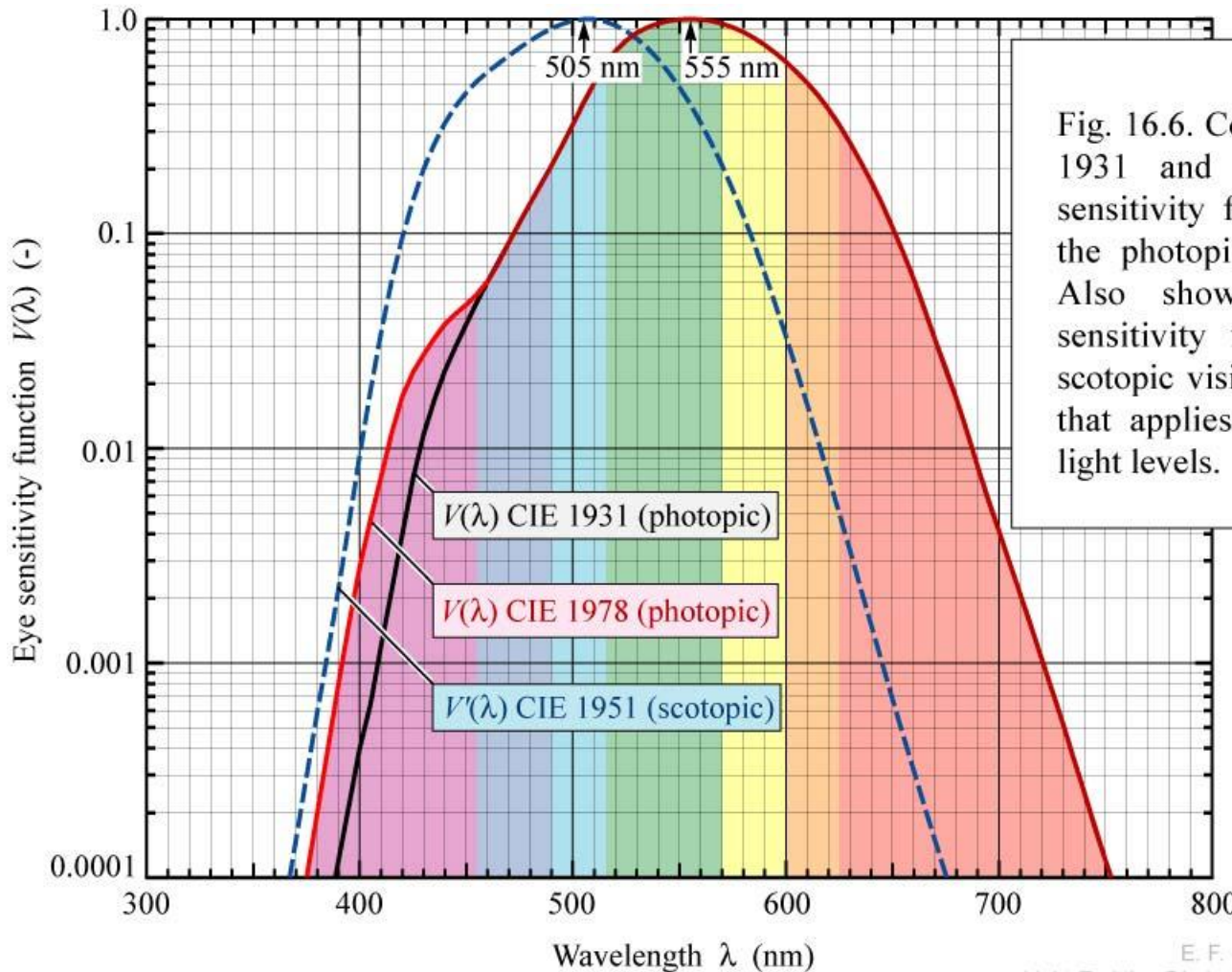
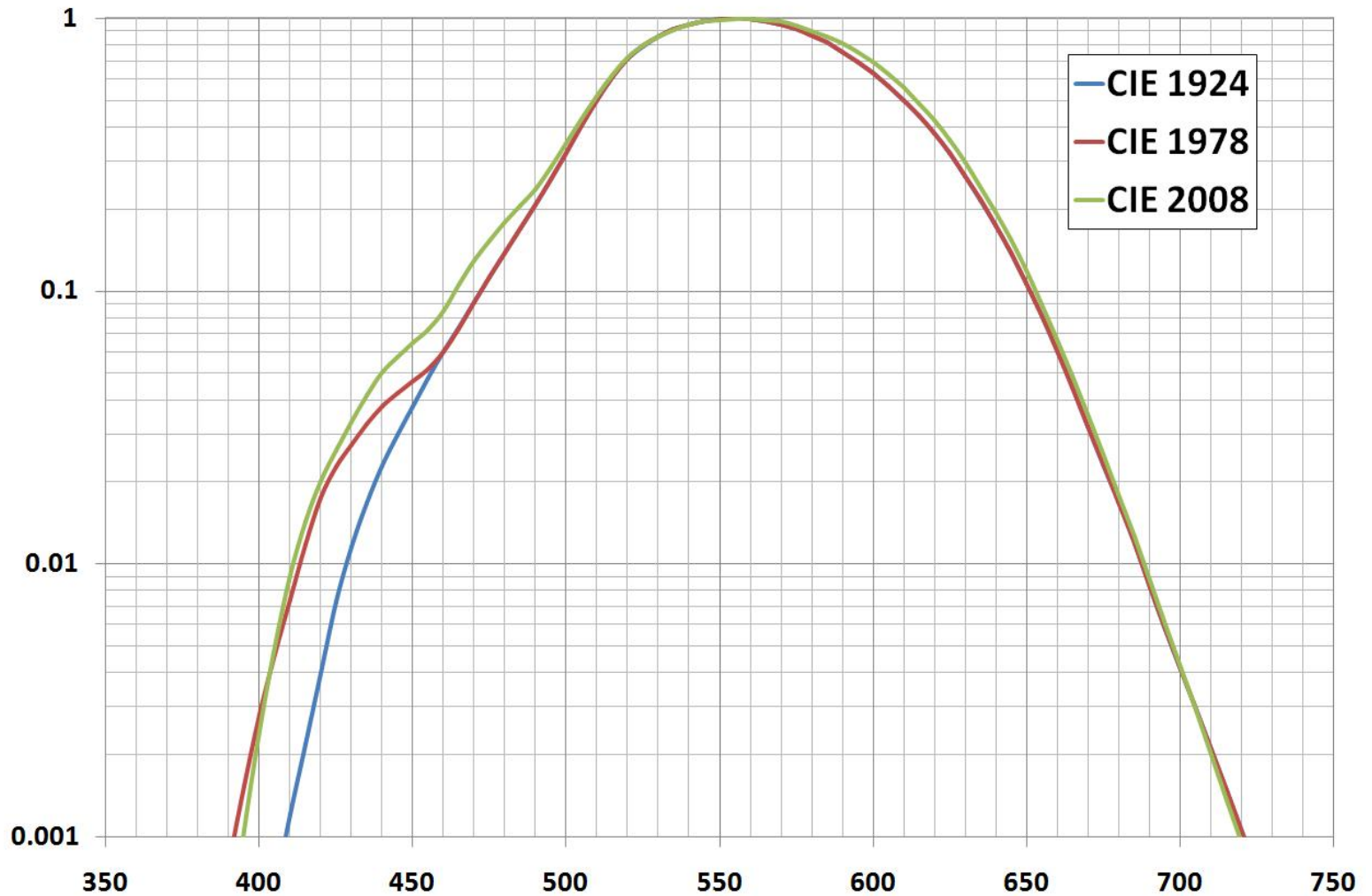
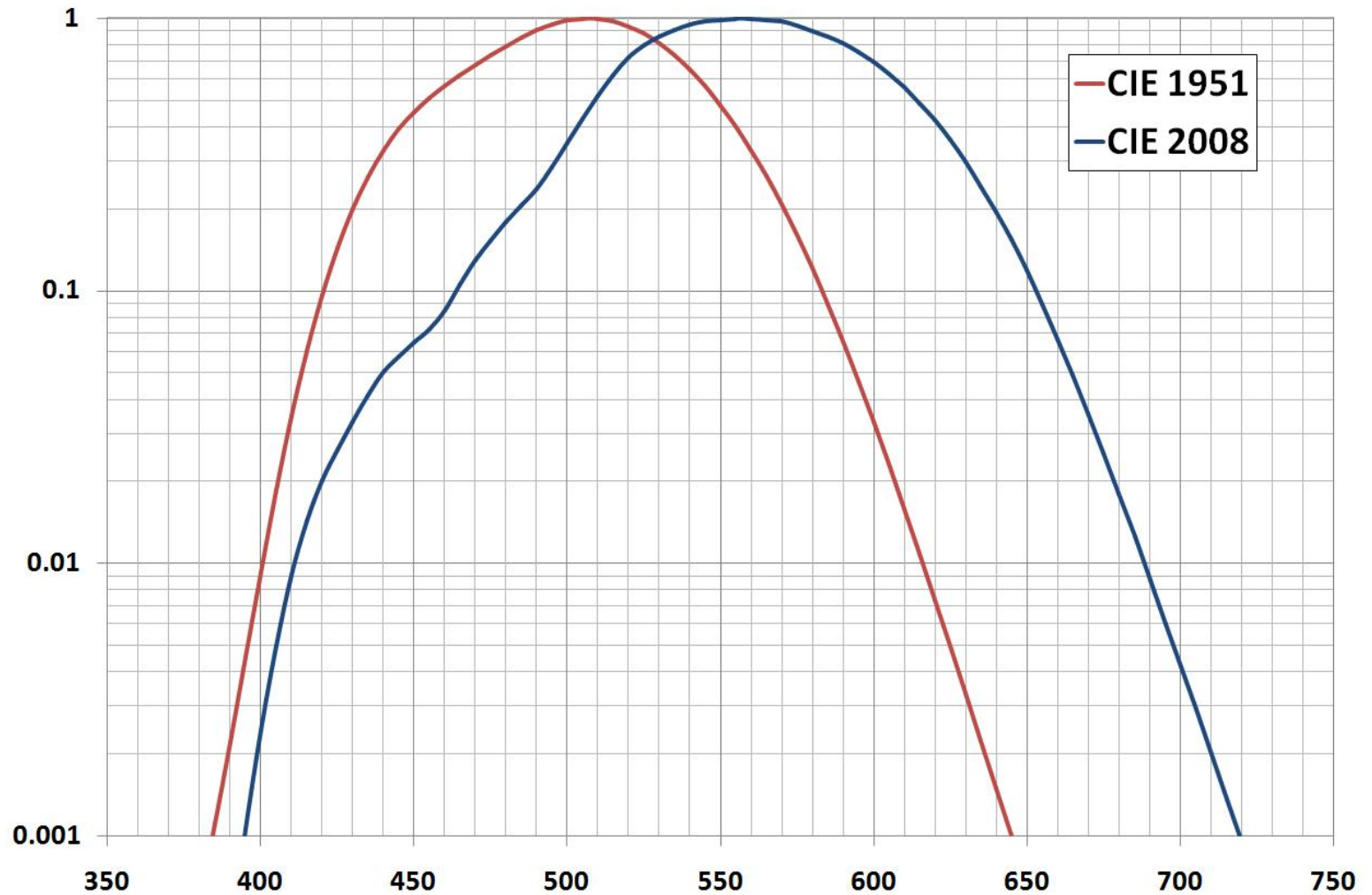


Fig. 16.6. Comparison of CIE 1931 and CIE 1978 eye sensitivity function $V(\lambda)$ for the photopic vision regime. Also shown is the eye sensitivity function for the scotopic vision regime, $V'(\lambda)$, that applies to low ambient light levels.

CIE $V(\lambda)$ fotopic



CIE $V(\lambda)$ fotopic / scotopic



Sensibilitate luminoasa $V(\lambda)$

	λ	fotopic CIE 1924	fotopic CIE 2008	scotopic CIE 1951
Violet	400	0.000396	0.00245219	0.00929
Indigo	445	0.0298	0.0574339	0.3931
Albastru	475	0.1126	0.153507	0.734
Verde	510	0.503	0.520497	0.997
Galben	570	0.952	0.973261	0.2076
Portocaliu	590	0.757	0.811587	0.0655
Rosu	650	0.107	0.119312	0.000677

CIE V(λ) 1931

La Commission internationale de l'Éclairage recommande, pour l'usage général, les valeurs suivantes, comme valeurs provisoires pour le facteur de visibilité.

Longueur d'onde (m μ)	Facteur de Visibilité relative(m μ)	Longueur d'onde	Facteur de Visibilité relative	Longueur d'onde (m μ)	Facteur de Visibilité relative
400	0.0004	530	0.862	650	0.107
10	0012	40	954	60	061
20	0040	550	995	70	032
30	0116	60	995	80	017
40	023	70	952	90	0082
450	038	80	870	700	0041
60	060	90	757	10	0021
70	091	600	631	20	00105
80	139	10	503	30	00052
90	208	20	381	40	00025
500	323	30	265	750	00012
10	503	40	175	60	00006
20	710				

Relatie radiometrie/fotometrie

- ▶ Pentru radiatii monocromatice

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \Phi_e [W] \cdot V(\lambda) \quad [lm] \quad \Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \cdot \Phi_e [W] \cdot V'(\lambda) \quad [lm]$$

- ▶ Pentru radiatii complexe:

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda = 683 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

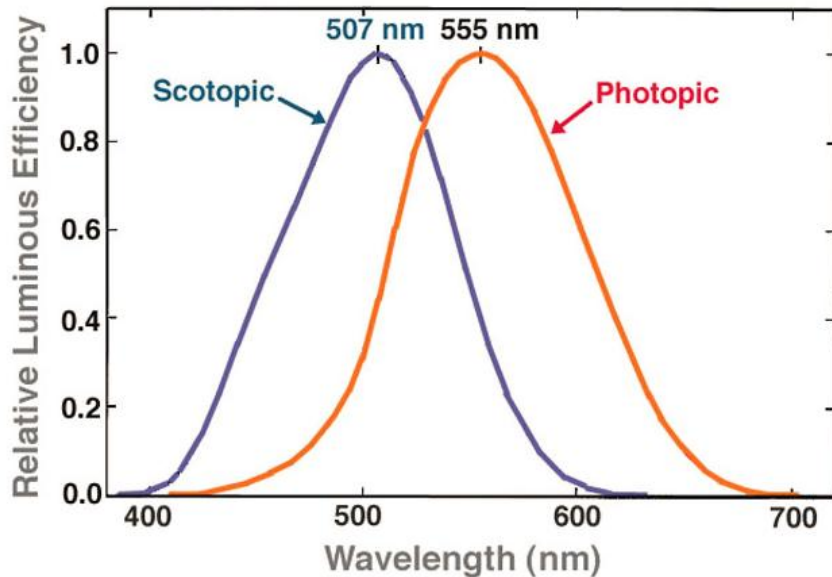
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda = 1700 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V'(\lambda) d\lambda \quad [lm]$$

- ▶ De cele mai multe ori, sursele sunt discrete, λ_i

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad [lm]$$

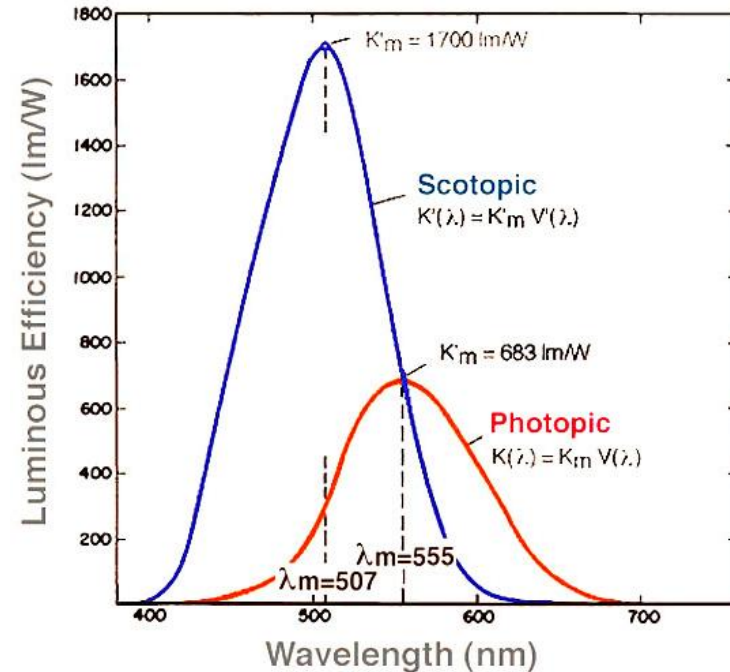
$$\Phi'_v = 1700 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V'(\lambda_i) \quad [lm]$$

Relatie radiometrie/fotometrie



$$0 \leq V(\lambda) \leq 1$$

$$0 \leq V'(\lambda) \leq 1$$



$$0 \leq \eta_v \leq K_m = 683 \text{ lm/W}$$

$$0 \leq \eta'_v \leq K'_m = 1700 \text{ lm/W}$$

Relatie radiometrie/fotometrie

▶ Eficienta luminoasa maxima

- scotopic: $K_m' = 1700 \text{ lm/W @ } 505 \text{ nm}$
- fotopic: $K_m = 683 \text{ lm/W @ } 555 \text{ nm}$
 - **683.002** lm/W; $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ($\lambda = 555.016 \text{ nm}$)

▶ Eficienta luminoasa

$$\eta_v = \frac{\Phi_v [\text{lm}]}{\Phi_e [\text{W}]} = K_m \cdot V(\lambda) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda)$$

$$\eta_v' = \frac{\Phi_v' [\text{lm}]}{\Phi_e [\text{W}]} = K_m' \cdot V'(\lambda) = 1700 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V'(\lambda)$$

▶ Functiile de sensibilitate luminoasa $V(\lambda)$, $V'(\lambda)$ sunt **normalizate** (valoarea 1 pentru sensibilitate maxima)

- Sensibilitate luminoasa = Eficienta luminoasa relativa

Eficiența luminoasă, η_v [lm/W]

	λ	fotopic CIE 1924	Sharpe 2005	scotopic CIE 1951
Violet	400	0	2	16
Indigo	445	20	40	668
Albastru	475	77	108	1248
Verde	510	344	361	1695
Galben	570	650	659	353
Portocaliu	590	517	541	111
Rosu	650	73	77	1

Radiometrie / fotometrie – fotopic

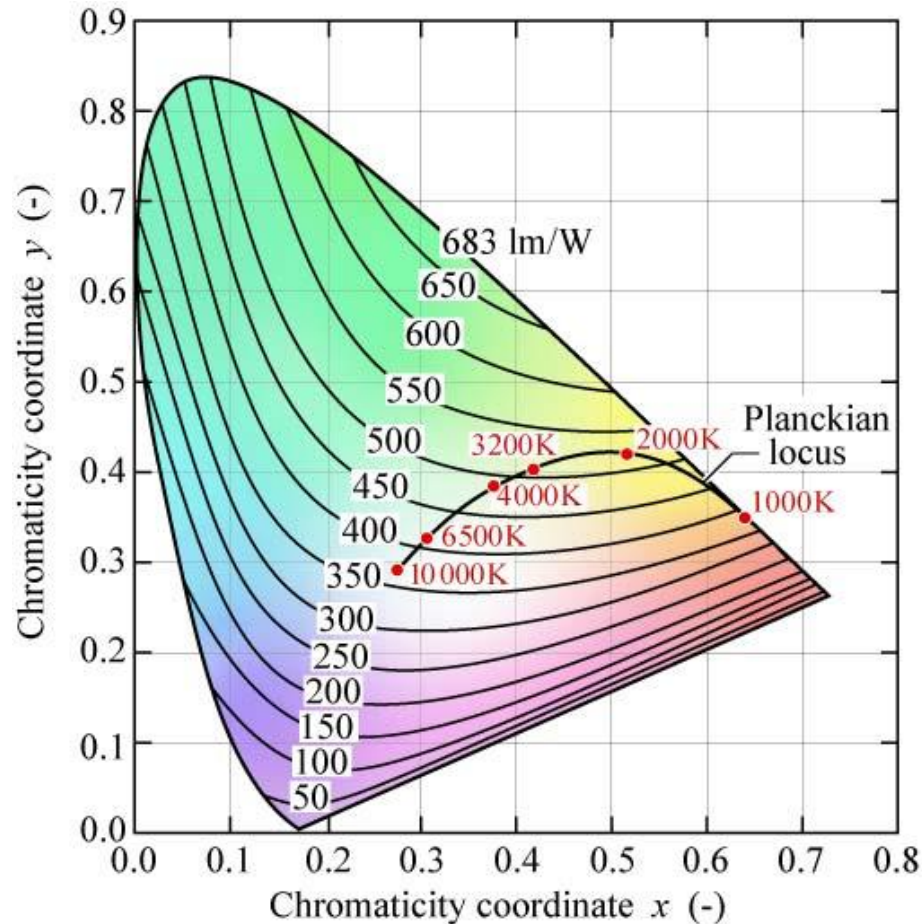
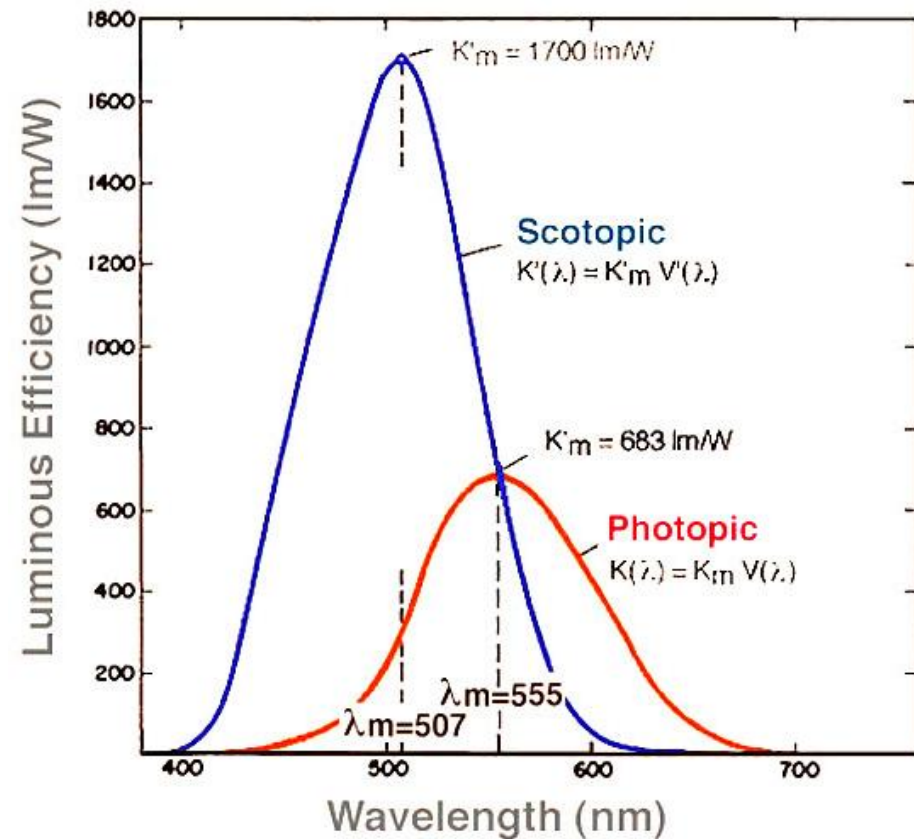
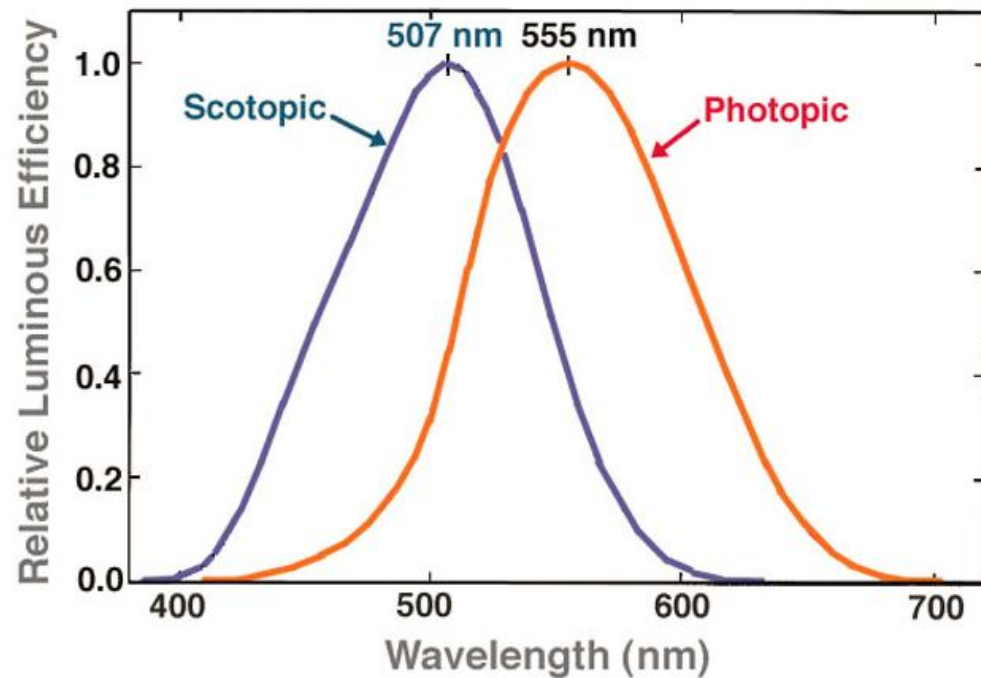


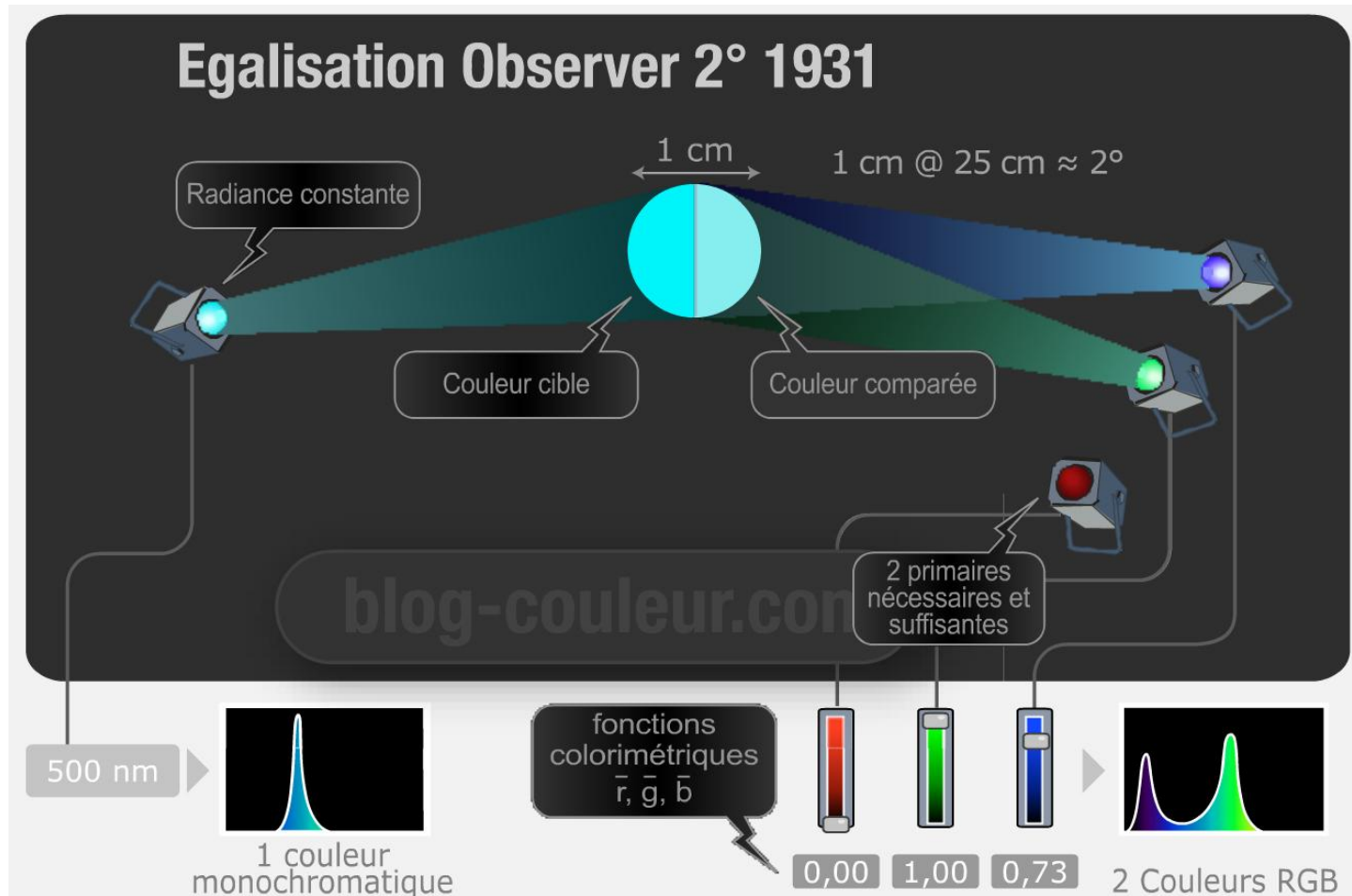
Fig. 16.8. Relation of maximum possible luminous efficacy (lumens per optical Watt) and chromaticity in the CIE 1931 x, y chromaticity diagram (adopted from MacAdam, 1950).

$$\eta_v(\lambda) \quad [\text{lm/W}]$$

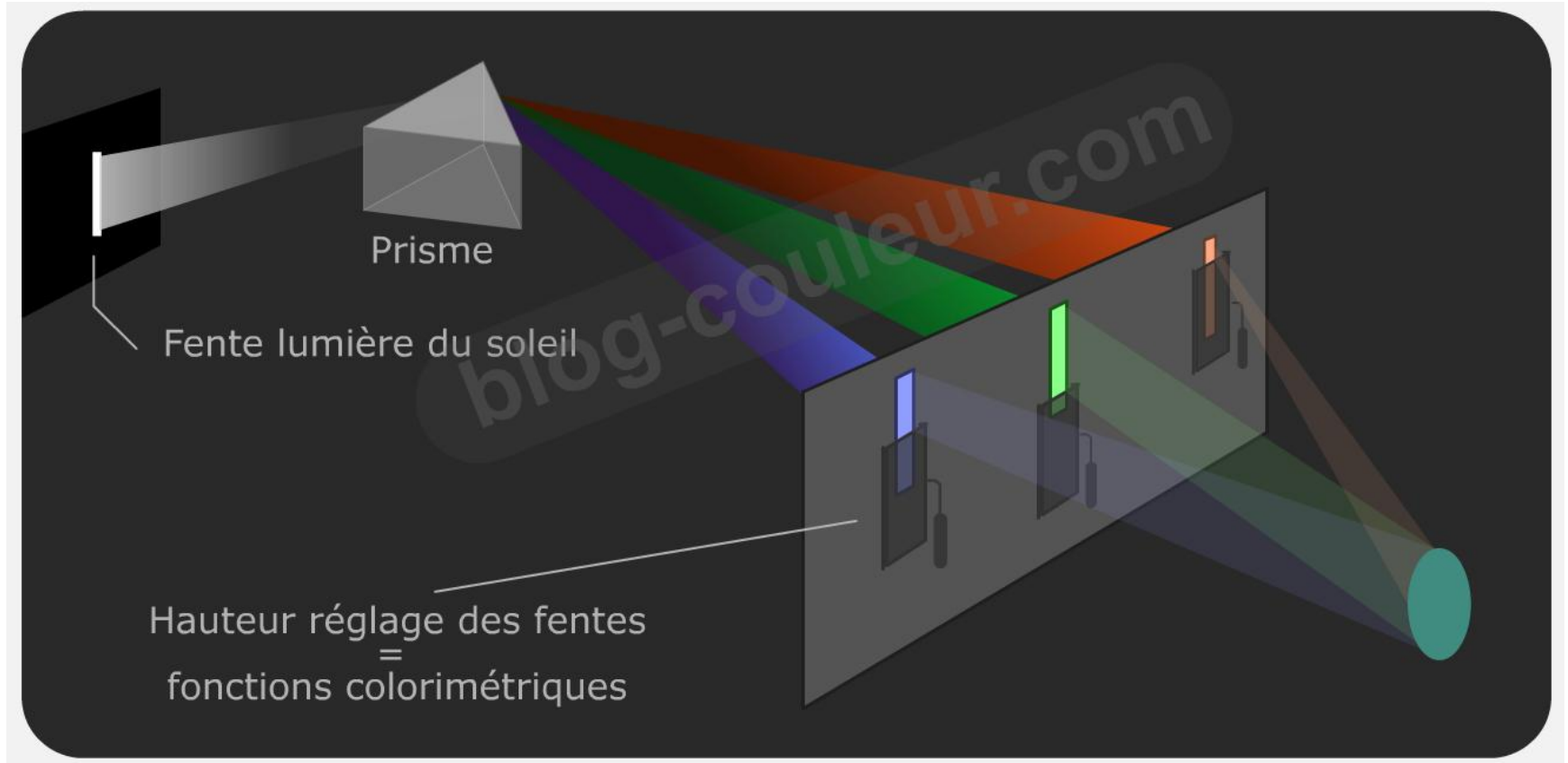
Relatie radiometrie/fotometrie



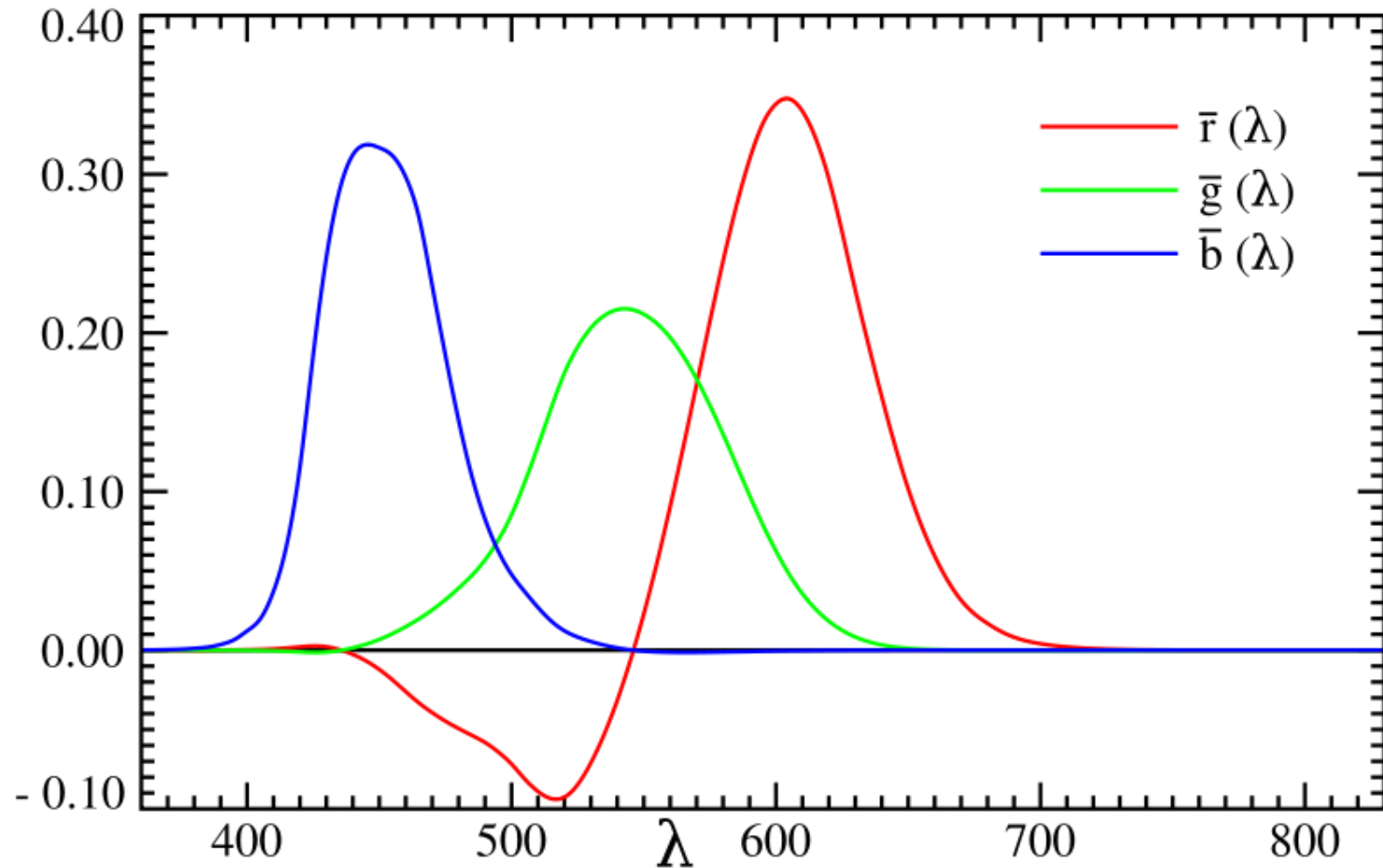
CIE xyz 1931



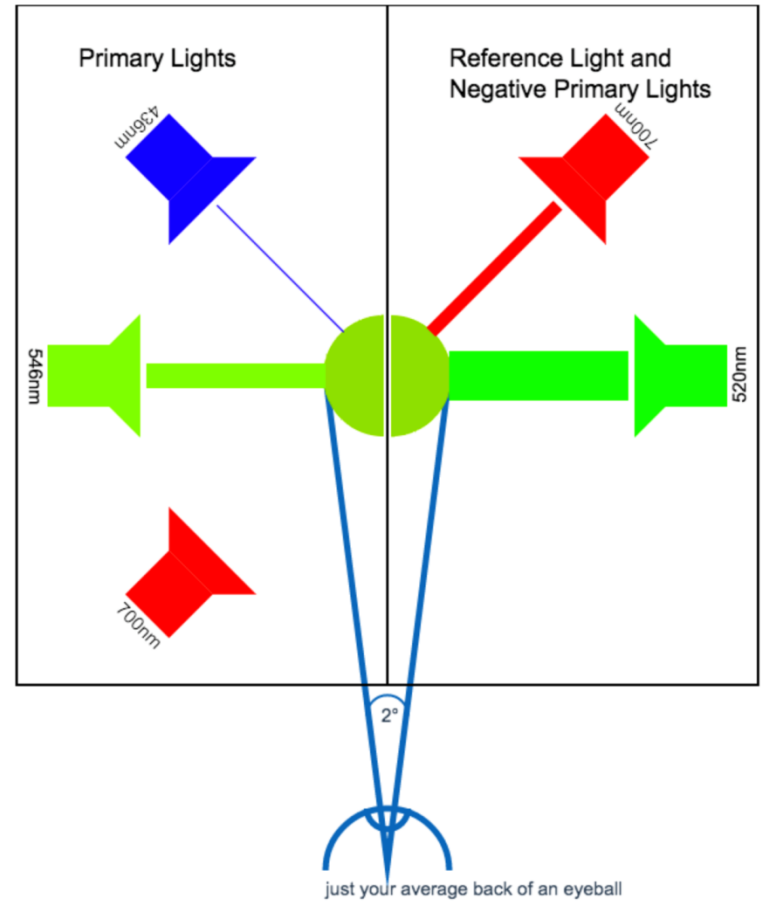
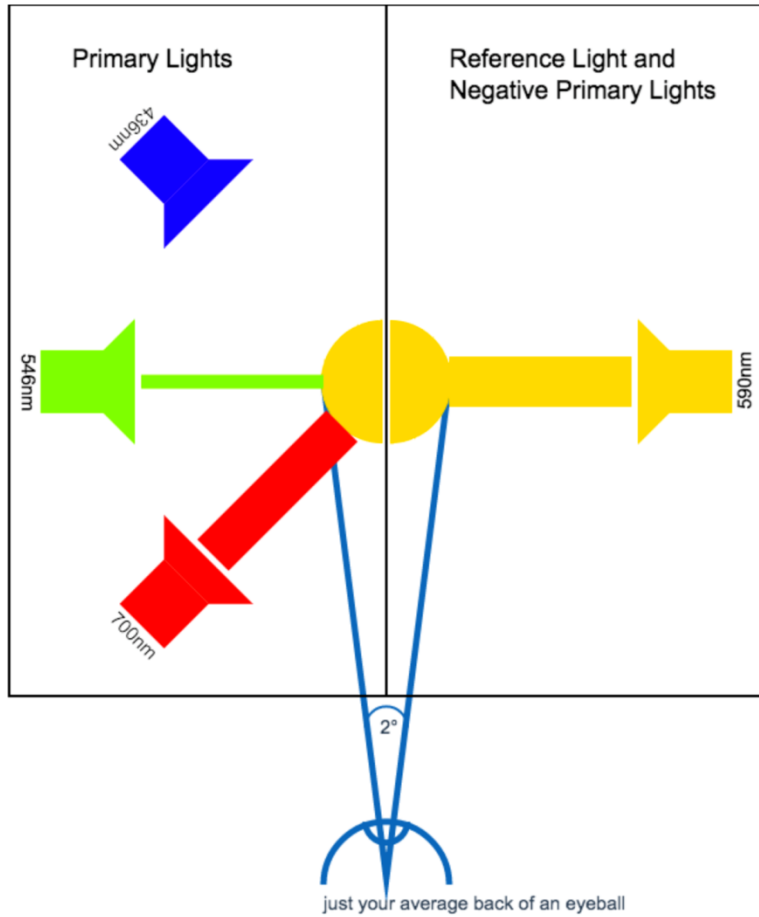
CIE xyz 1931



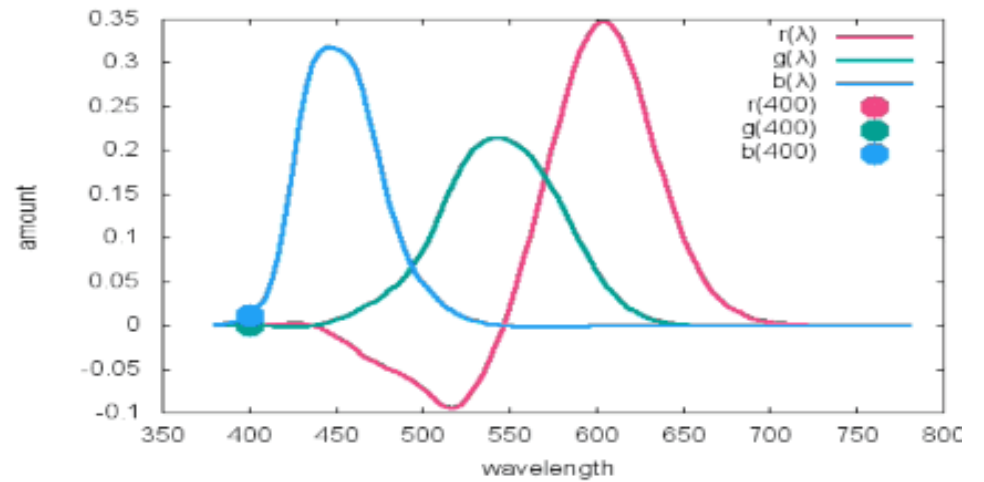
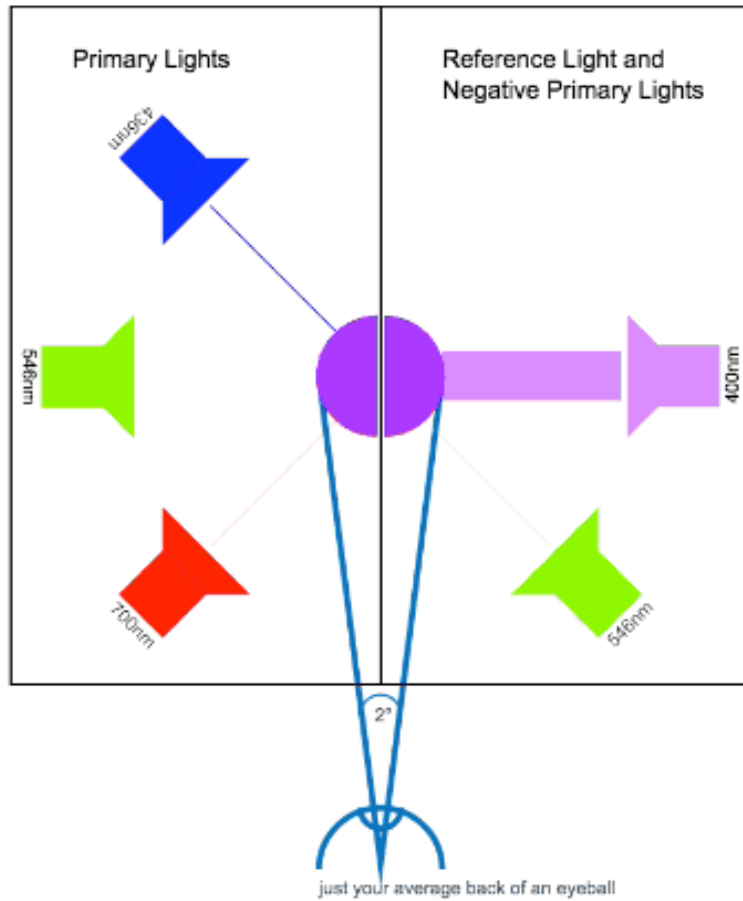
Cantitatea din culorile primare pentru aceeași senzație de culoare



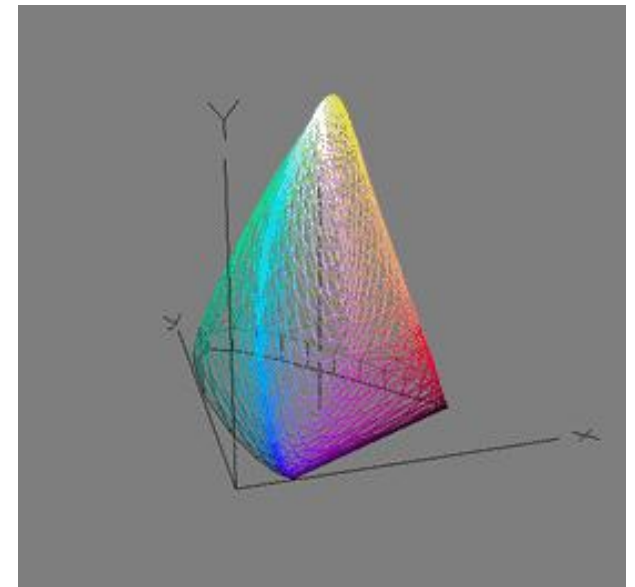
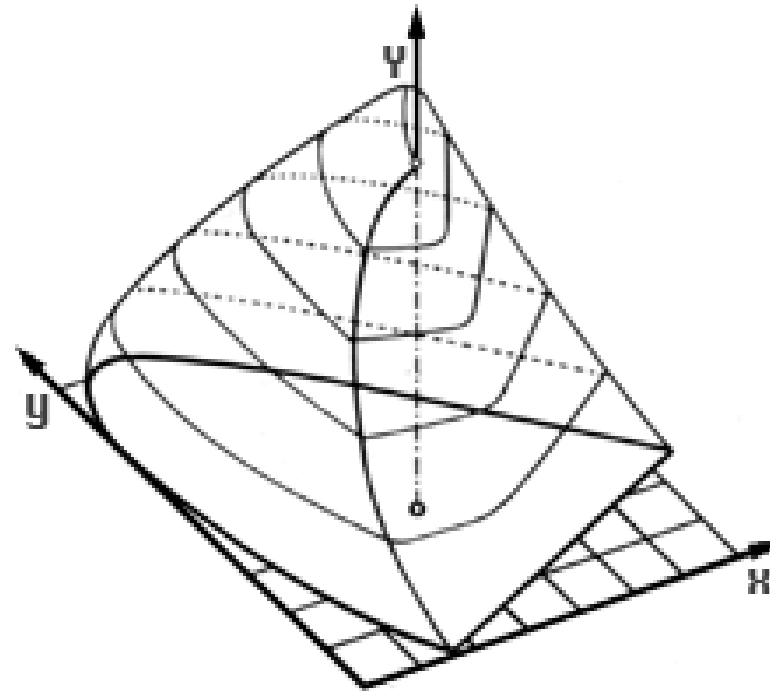
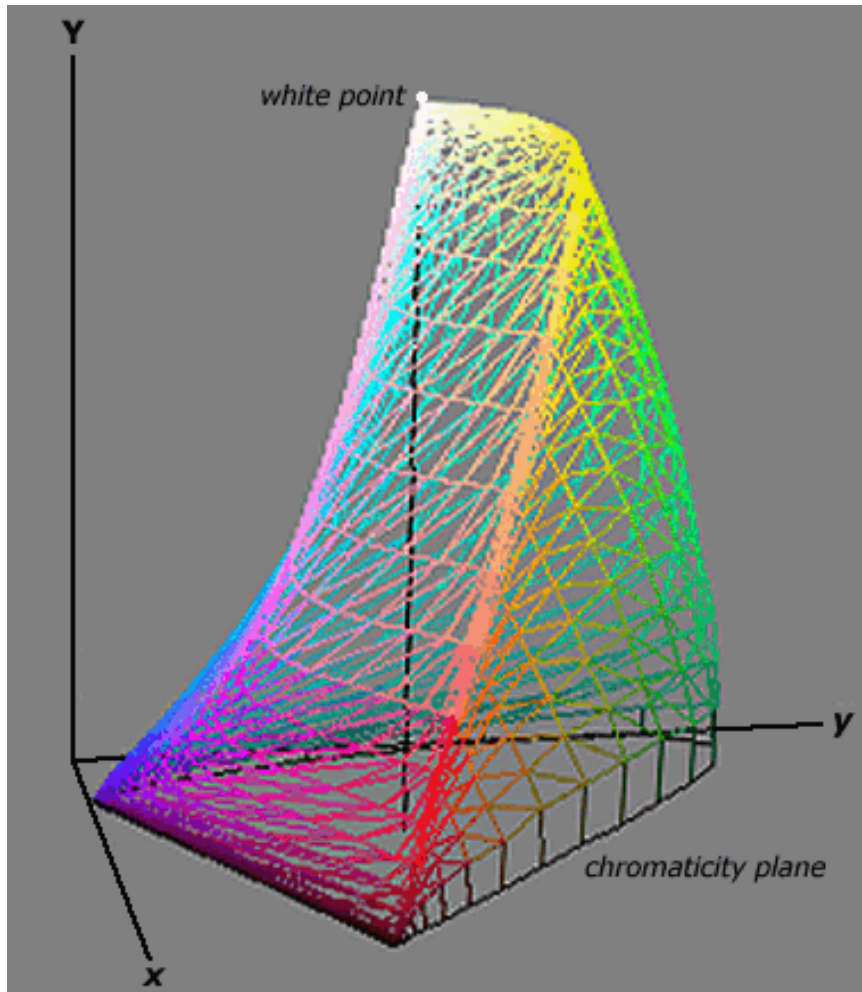
CIE xyz1931



CIE 1931

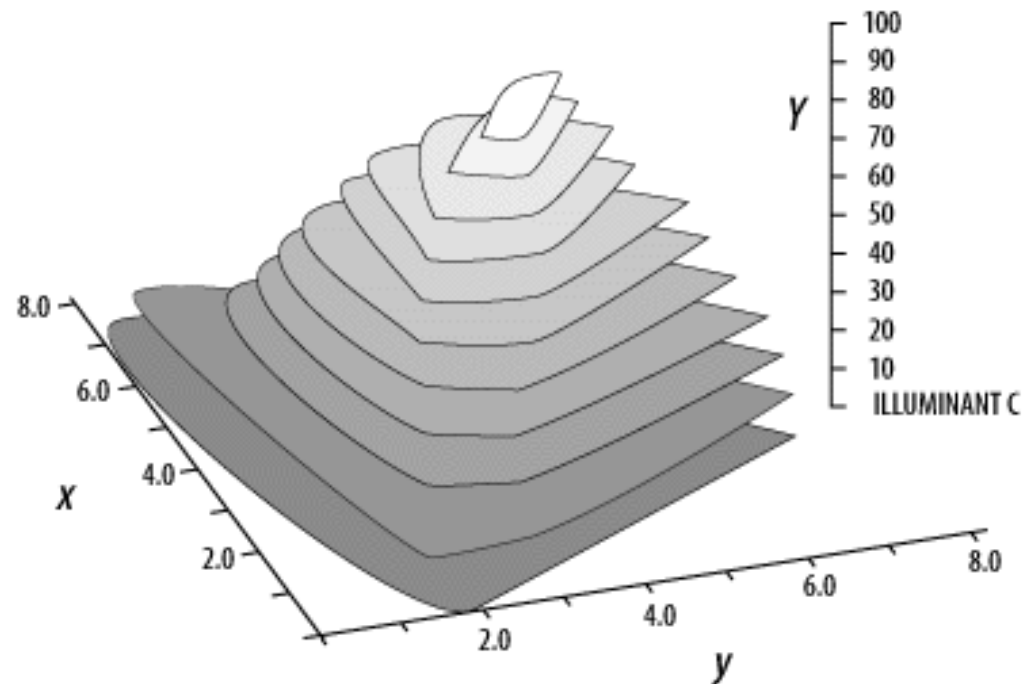


CIE xyz 1931

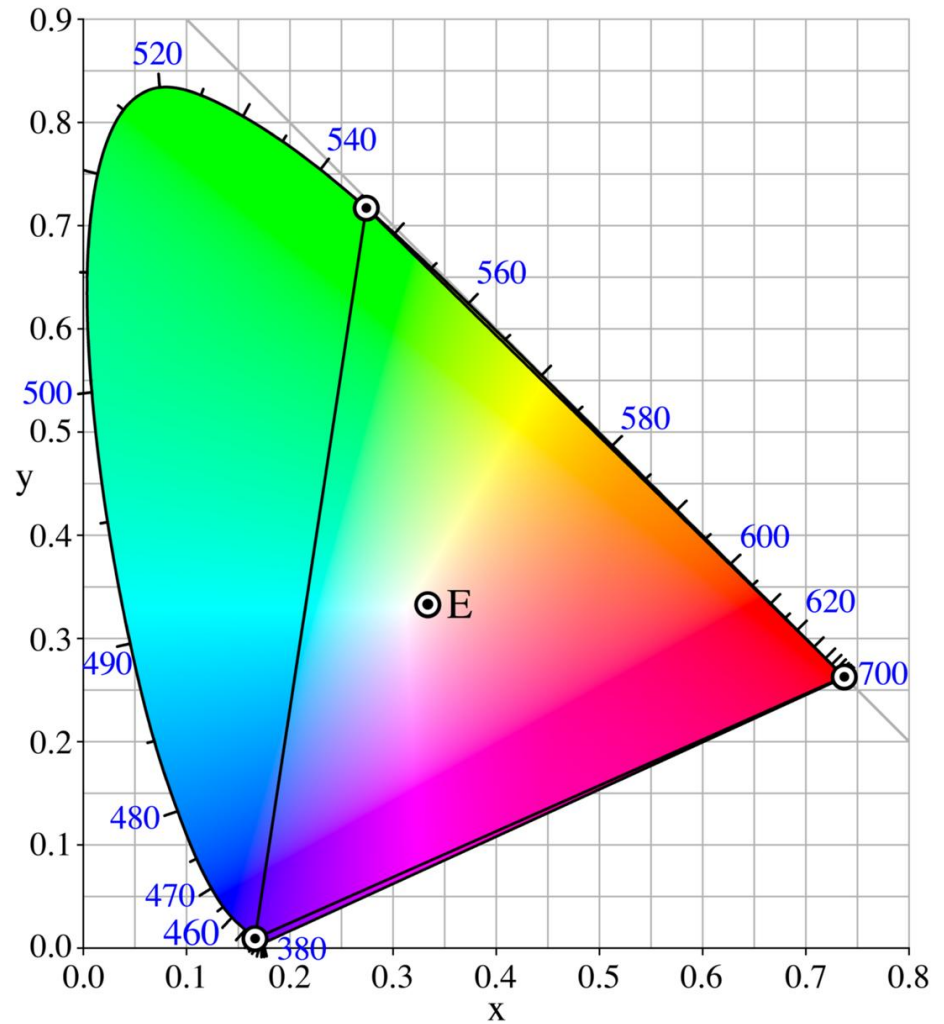
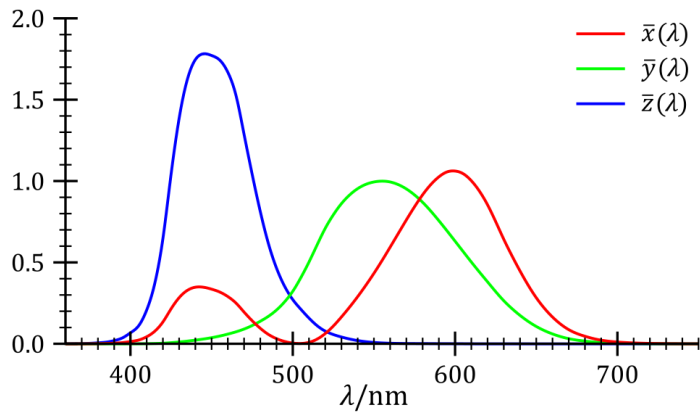


CIE xyz 1931

- ▶ Se alege una din axe ($xyY \rightarrow Y$) ca fiind cea a luminozitatii culorii
 - gri si alb sunt culori diferite
 - gri este un “alb” de luminozitate scazuta

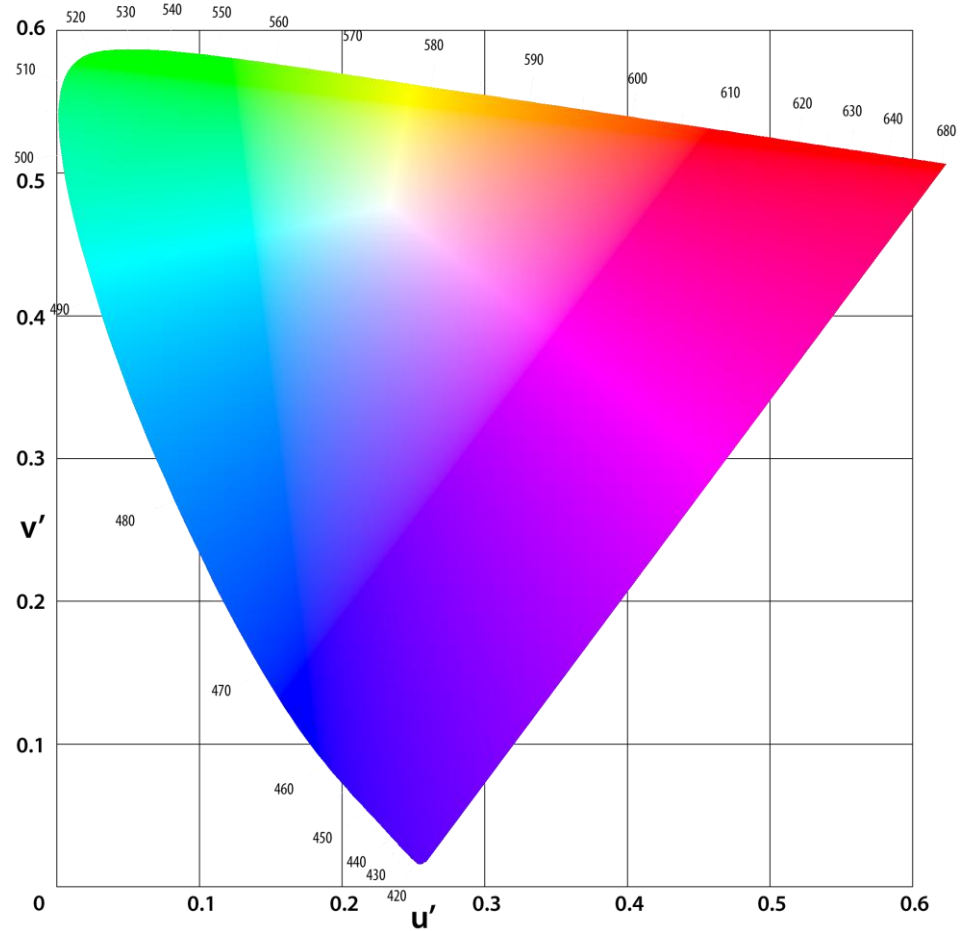


CIE xy 1931



CIELUV 1976

- ▶ uniformitatea percepției, a "diferenței de culoare"



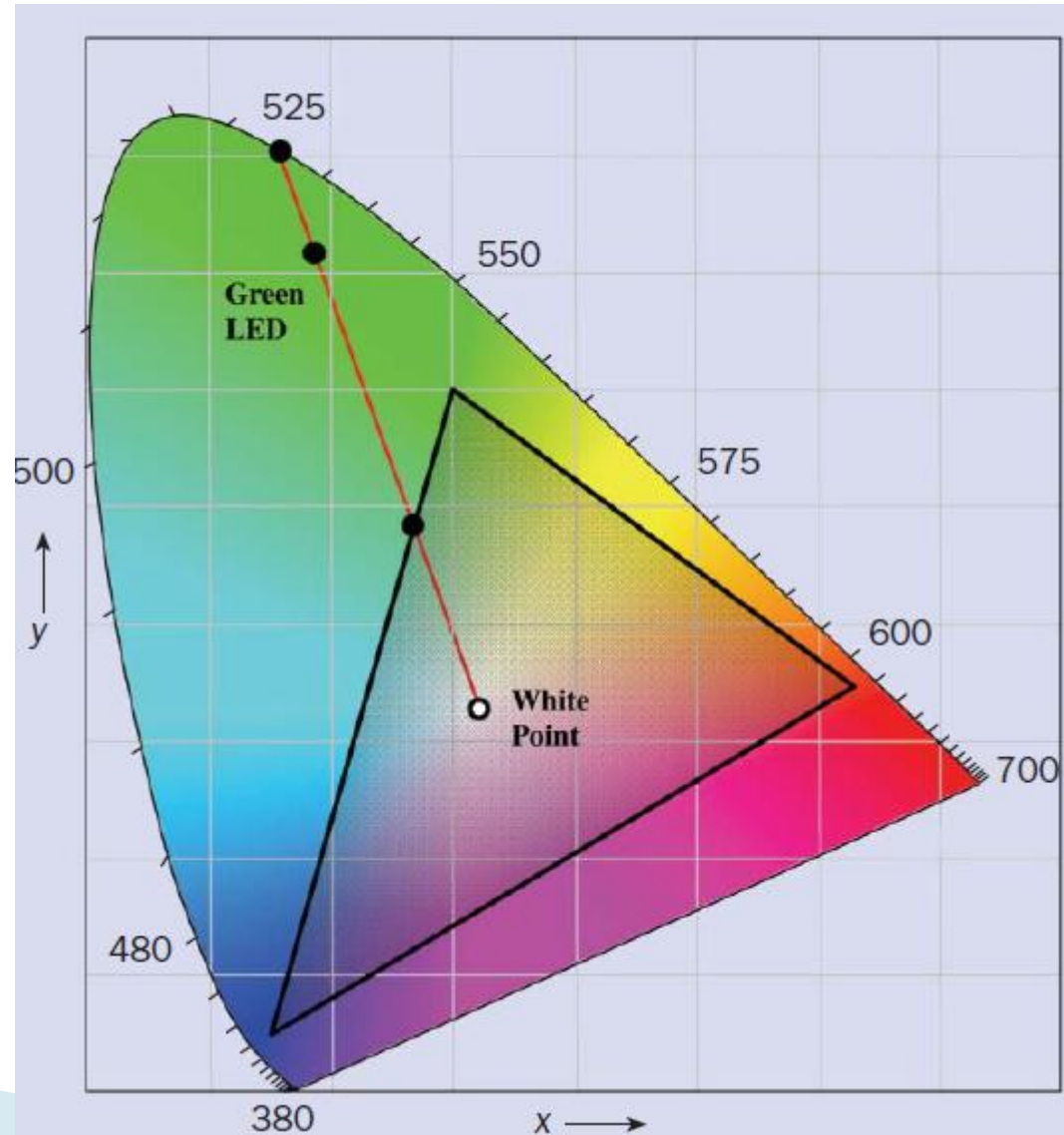
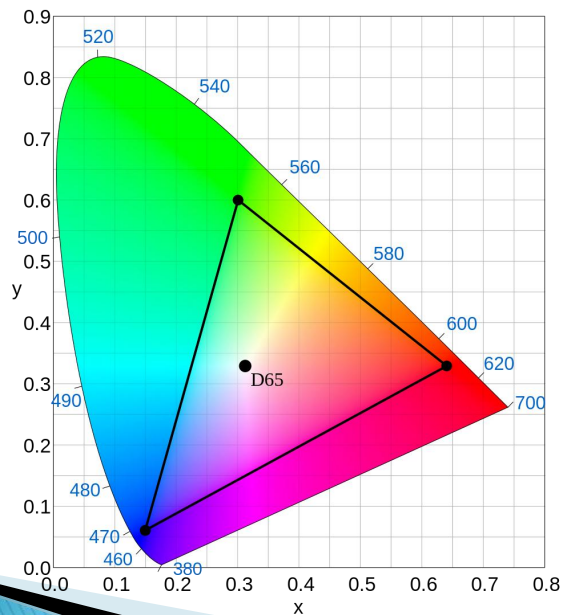
ITU-R BT.709



ITU-R BT.709 phosphor properties

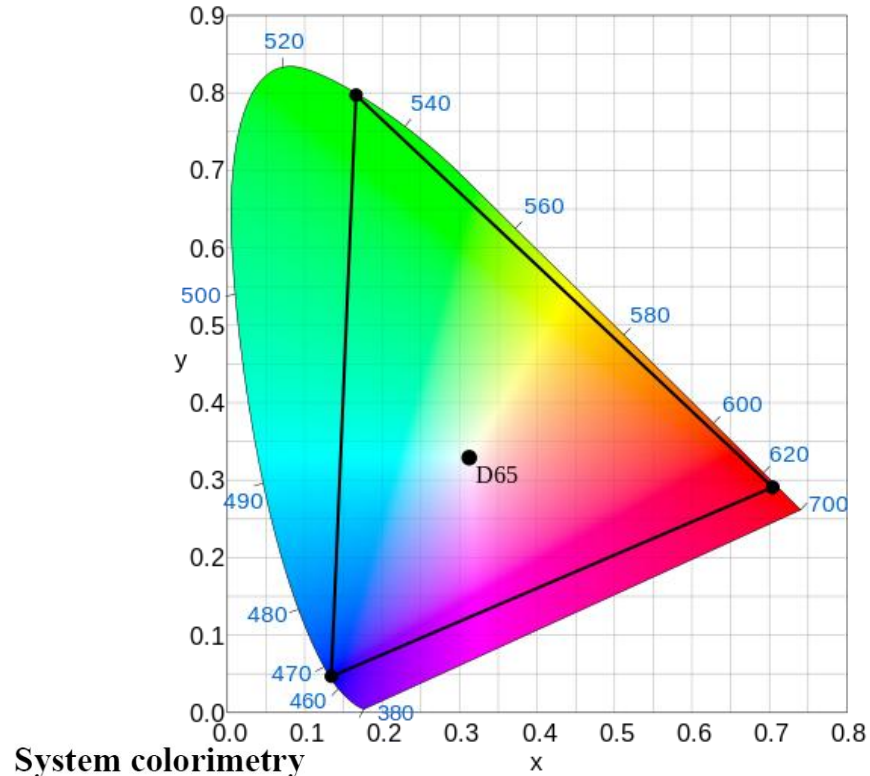
Phosphor	x	y
Red	0.640	0.330
Green	0.300	0.600
Blue	0.150	0.060

Data refers to xy chromaticity co-ordinates of ITU-R BT.709 phosphors which are used in most CRT displays [1].



ITU-R BT.2020

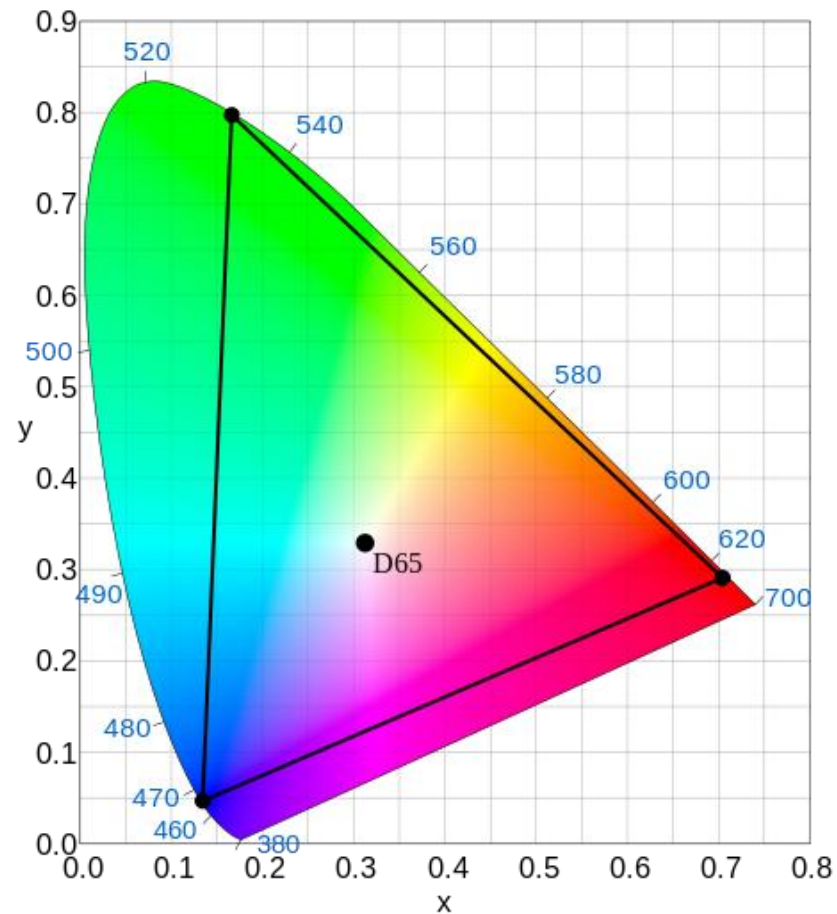
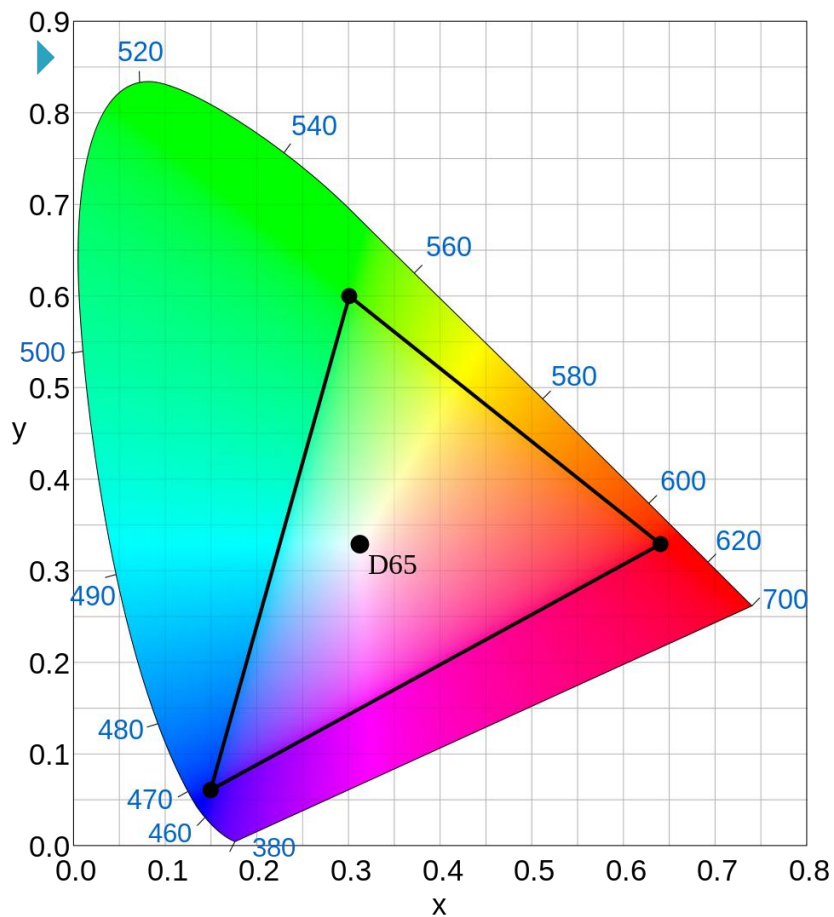
- ▶ Parameter values for ultra-high definition television systems
- ▶ UHDTV



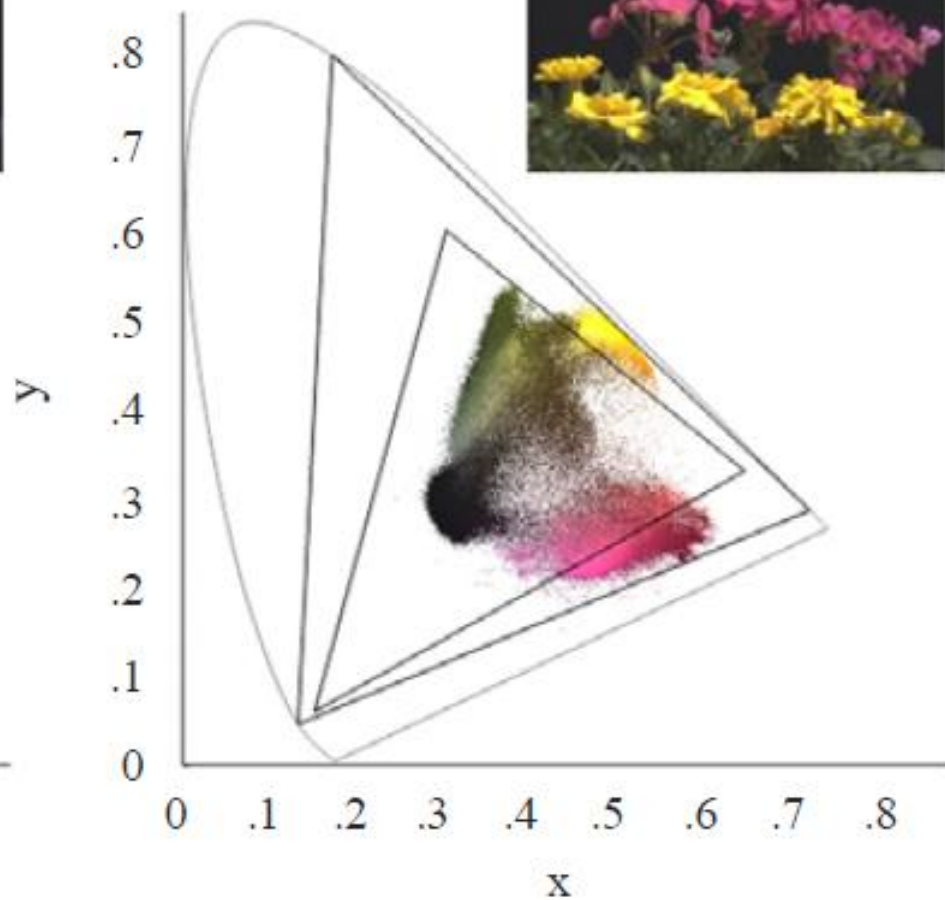
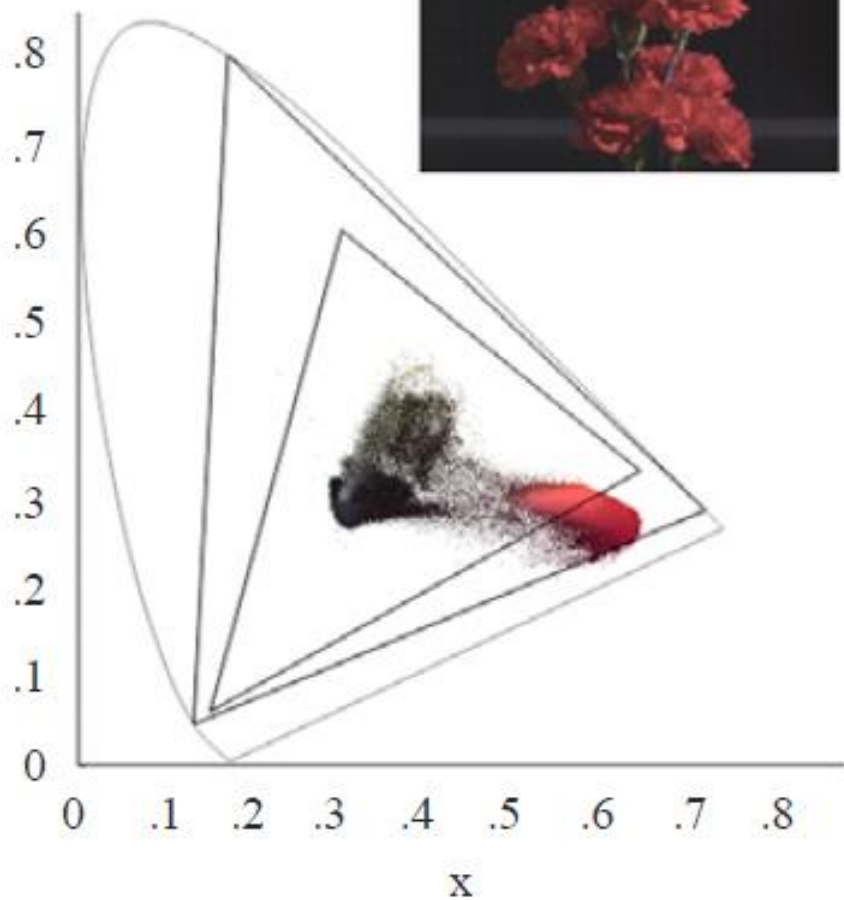
Parameter	Values		
Opto-electronic transfer characteristics before non-linear pre-correction	Assumed linear ⁽¹⁾		
Primary colours and reference white ⁽²⁾	Chromaticity coordinates (CIE, 1931)	x	y
	Red primary (R)	0.708	0.292
	Green primary (G)	0.170	0.797
	Blue primary (B)	0.131	0.046
	Reference white (D65)	0.3127	0.3290

⁽¹⁾ Picture information can be linearly indicated by the tristimulus values of RGB in the range of 0-1.

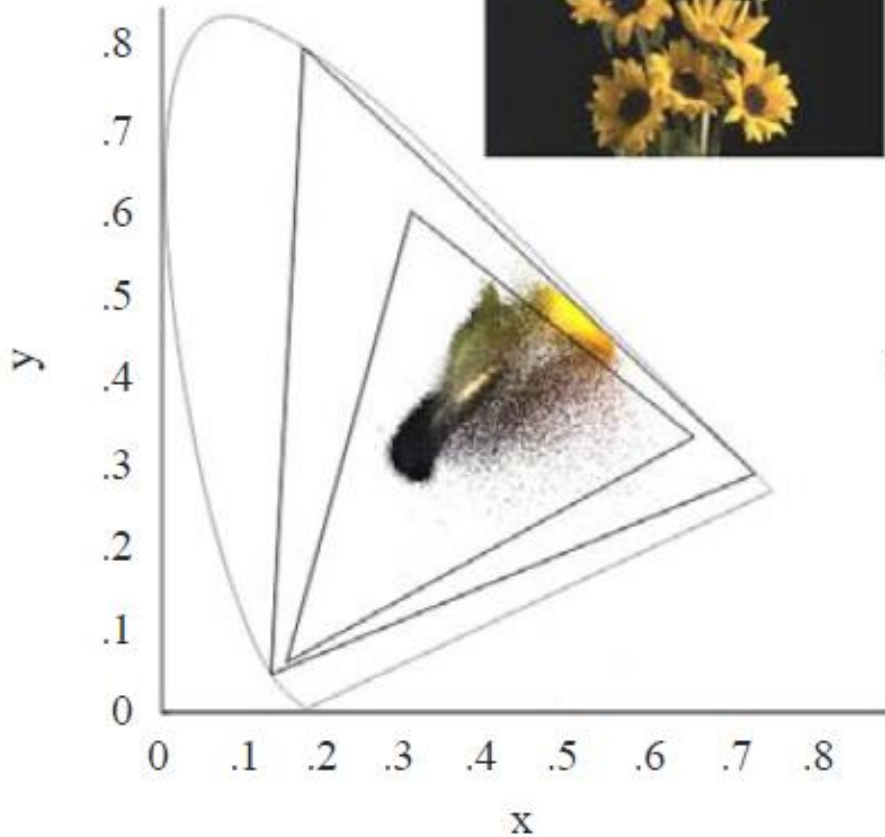
ITU-R BT.709/.2020



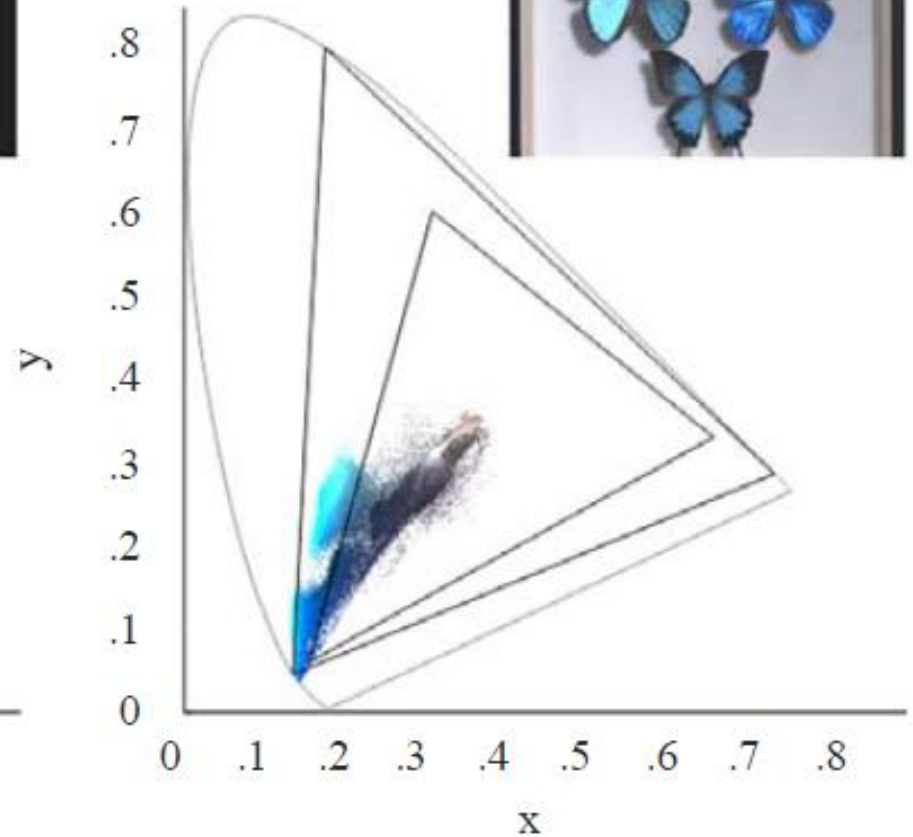
ITU-R BT.709/.2020



ITU-R BT.709/.2020



c) Sunflower



(d) Butterfly

Determinarea lungimii de unda dominante

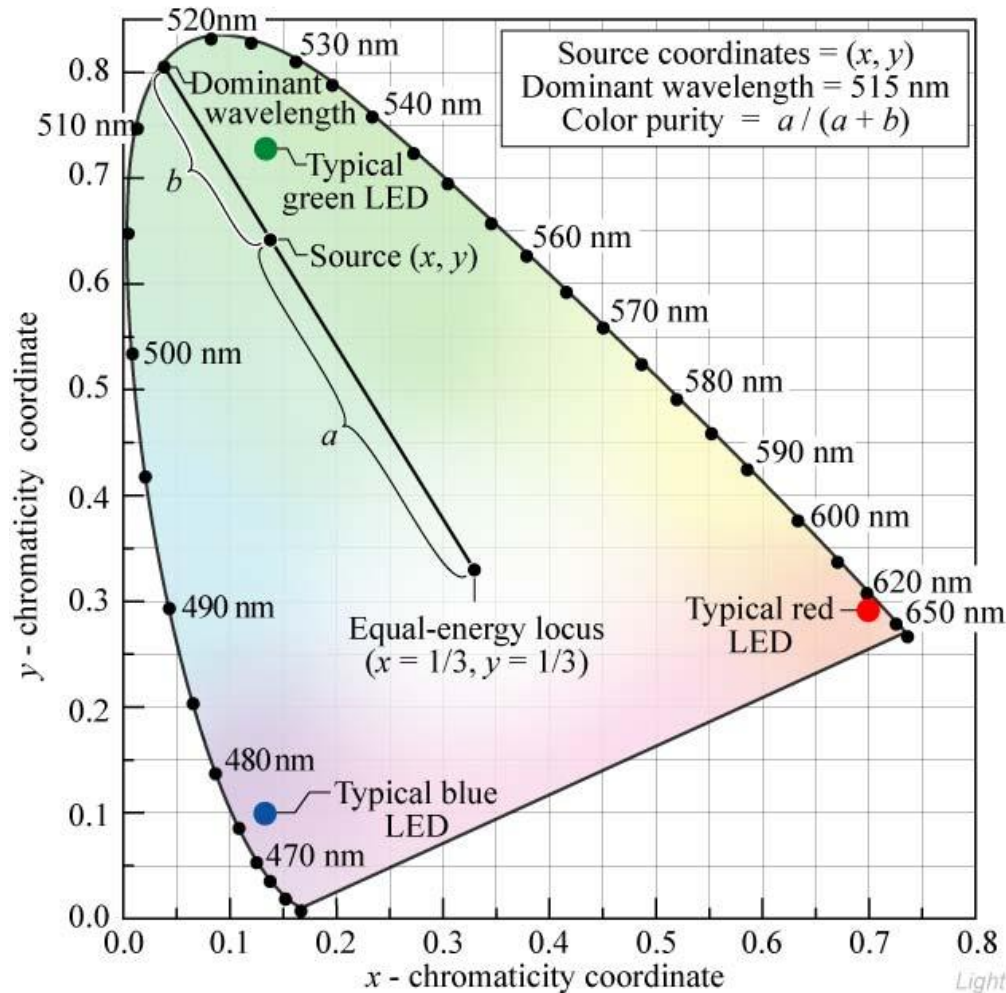
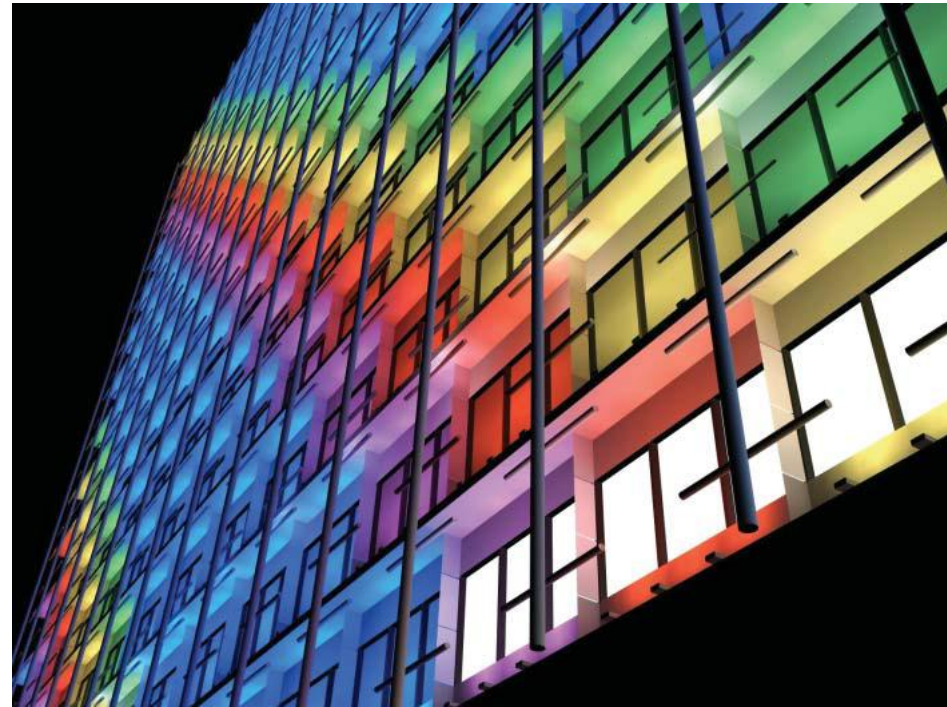


Fig. 17.8. Chromaticity diagram showing the determination of the *dominant color* and *color purity* of a light source with chromaticity coordinates (x, y) using the equal-energy locus ($x = 1/3, y = 1/3$) as the white-light reference. Also shown are typical locations of blue, green, and red LEDs.

ITU-R BT.709

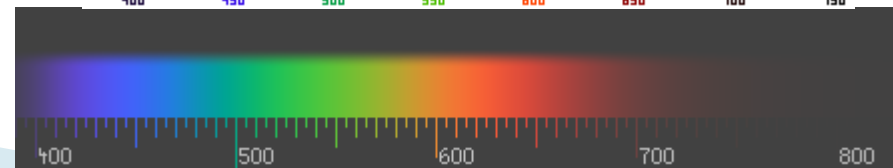
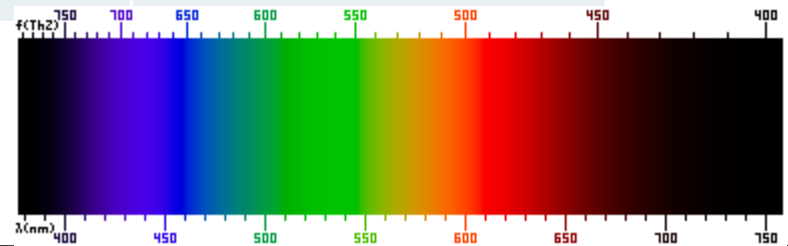


RGB values for Luxeon LEDs

LED color	Dominant wavelength λ_D (nm)	RGB values
Royal blue	455	0.05, 0.00, 0.95
Blue	470	0.00, 0.11, 0.89
Cyan	505	0.00, 0.63, 0.37
Green	530	0.00, 0.77, 0.23
Amber	590	0.70, 0.30, 0.00
Red-orange	615	0.97, 0.00, 0.03
Red	625	0.92, 0.00, 0.08

Culori – lungime de unda

Culoare	Lungime de unda	Frecventa
Rosu	~ 700-630 nm	~ 430-480 THz
Portocaliu	~ 630-590 nm	~ 480-510 THz
Galben	~ 590-560 nm	~ 510-540 THz
Verde	~ 560-490 nm	~ 540-610 THz
Albastru	~ 490-450 nm	~ 610-670 THz
Violet	~ 450-400 nm	~ 670-750 THz



Interpretarea standard a culorilor

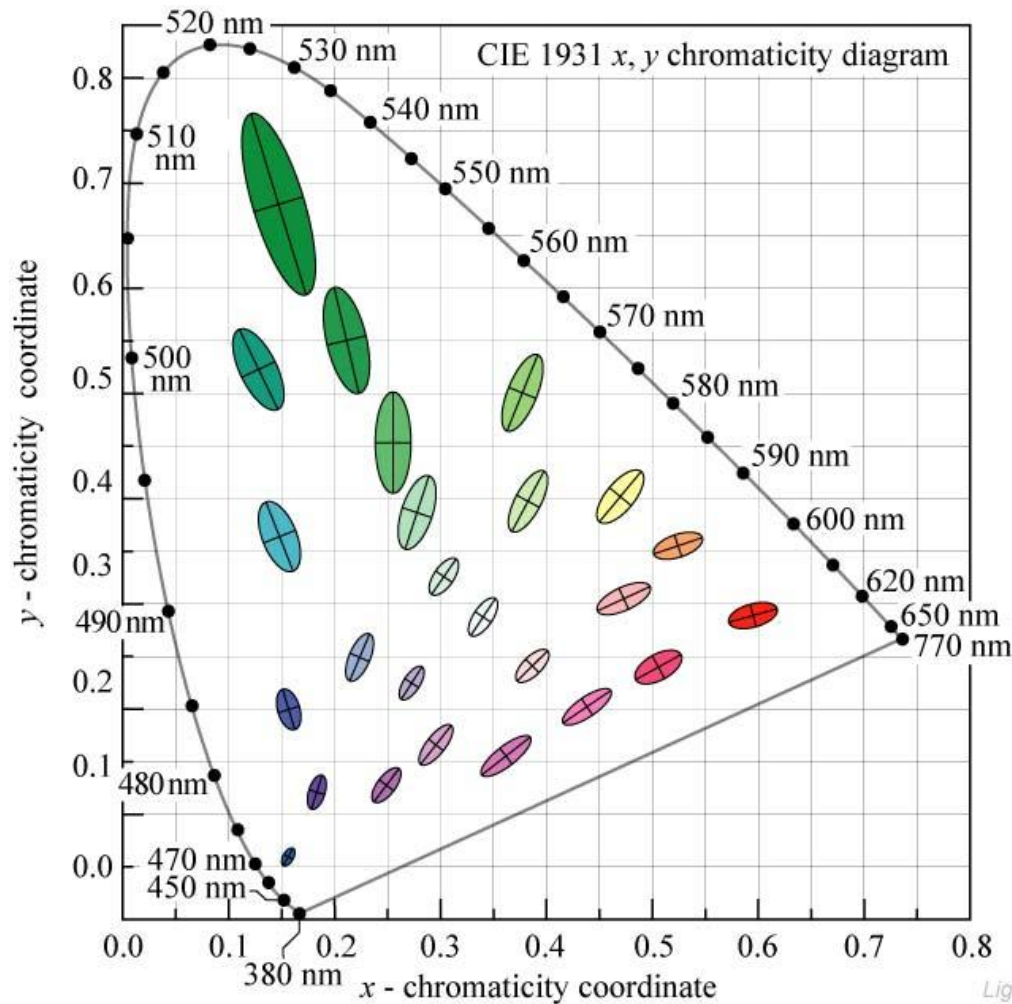


Fig. 17.5. MacAdam ellipses plotted in the CIE 1931 (x , y) chromaticity diagram. The axes of the ellipses are ten times their actual lengths (after MacAdam, 1943; Wright, 1943; MacAdam, 1993).

Black body

▶ Legea lui Planck

- Intensitatea radiatiei electromagnetice (radianta spectrala) a corpului absolut negru (absoarbe in totalitate radiatiile incidente)
- Lege universală, independentă de material, forma etc.

$$I_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot T \cdot \lambda}} - 1}$$

Temperatura de culoare

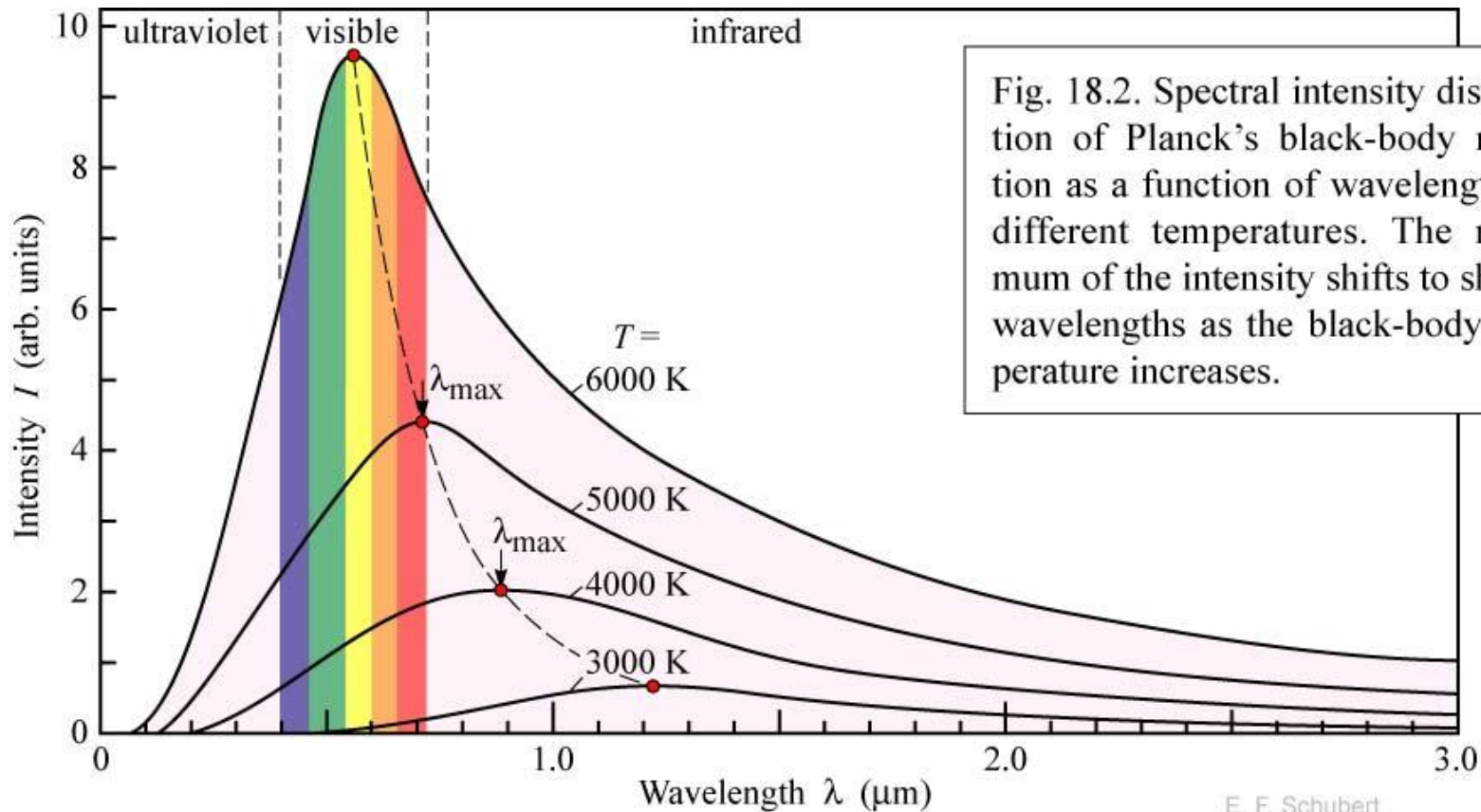
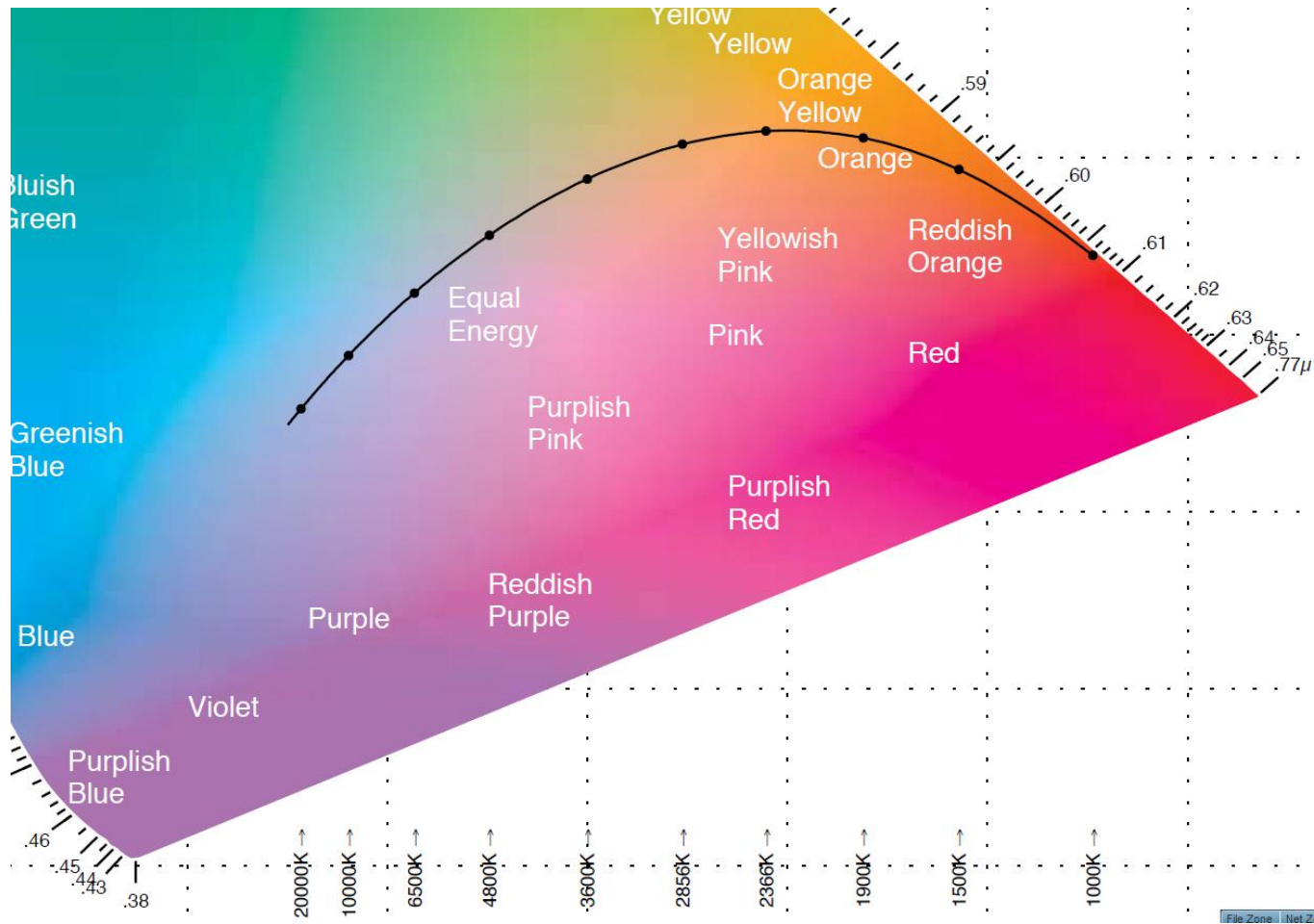


Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

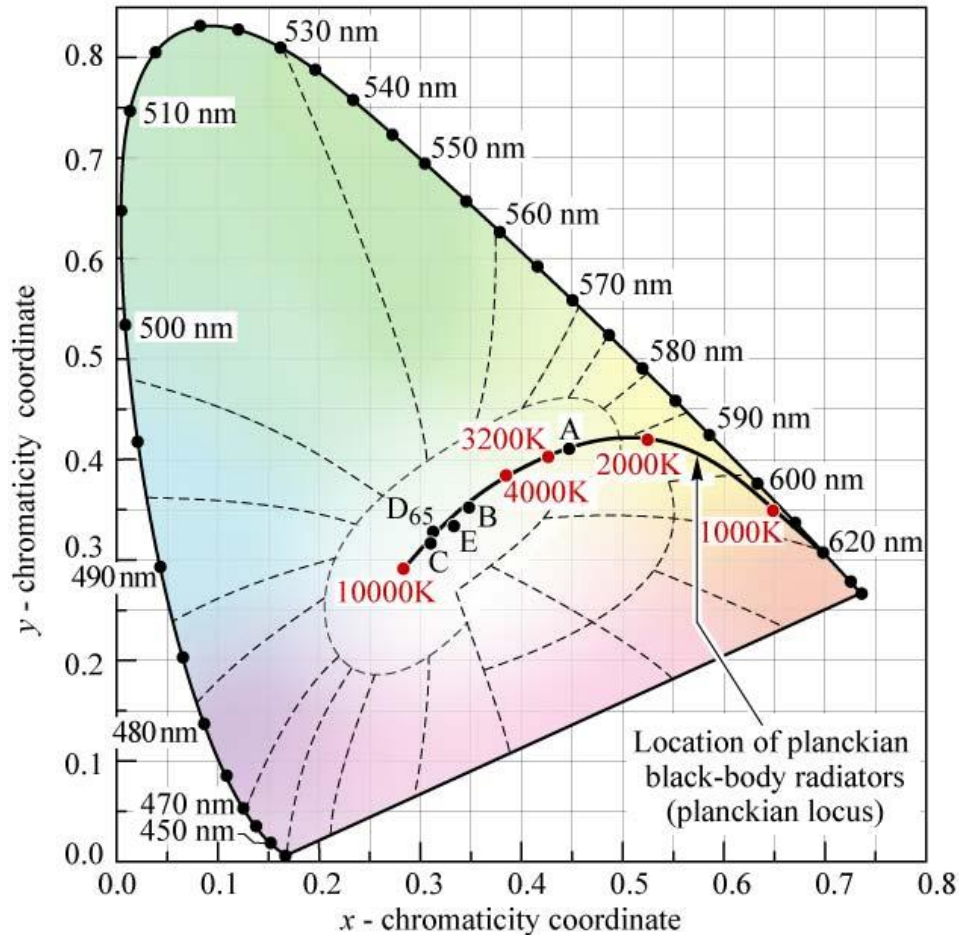
E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org



CIE xy 1931



Temperatura de culoare



Illuminant A
 $(x, y) = (0.4476, 0.4074)$
 (Incandescent source, $T = 2856$ K)

Illuminant B
 $(x, y) = (0.3484, 0.3516)$
 (Direct sunlight, $T = 4870$ K)


Illuminant C
 $(x, y) = (0.3101, 0.3162)$
 (Overcast source, $T = 6770$ K)

Illuminant D₆₅
 $(x, y) = (0.3128, 0.3292)$
 (Daylight, $T = 6500$ K)

Illuminant E (equal-energy point)
 $(x, y) = (0.3333, 0.3333)$

Fig. 18.3. Chromaticity diagram showing planckian locus, the standardized white Illuminants A, B, C, D₆₅, and E, and their color temperature (after CIE, 1978).

Lungimi de unda tipice – LED



Wavelength (nm)	Color Name
940	Infrared
880	Infrared
850	Infrared
660	Ultra Red
635	High Eff. Red
633	Super Red
620	Super Orange
612	Super Orange
605	Orange
595	Super Yellow
592	Super Pure Yellow
585	Yellow
4500K	"Incandescent" White
6500K	Pale White
8000K	Cool White
574	Super Lime Yellow
570	Super Lime Green
565	High Efficiency Green
560	Super Pure Green
555	Pure Green
525	Aqua Green
505	Blue Green
470	Super Blue
430	Ultra Blue

Marimi luminoase

► Intensitatea

- raportul dintre fluxul care părăsește sursa și se propagă într-un element de unghi solid ce conține direcția de propagare și elementul de unghi solid.
- o masura a puterii emise de o sursa într-un element de unghi solid

Intensitatea			
Fotometrie		Radiometrie	
$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	SI: cd	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	SI: W/sr

Marimi luminoase

► Iluminarea

- raportul dintre fluxul primit de un element de suprafață conținând punctul și aria acestui element (definita într-un punct al unei suprafețe la **receptie**):
- o masura a intensitatii luminii incidente pe o suprafata

Iluminarea			
Fotometrie		Radiometrie	
$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	SI: lx	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	SI: W/m ²

Marimi luminoase

▶ Excitanța

- raportul dintre fluxul care părăsește un element de suprafață conținând punctul și aria elementului de suprafață (definita într-un punct al unei suprafețe la emisie):
- o masura a intensitatii luminii emise de o suprafata

Excitanța			
Fotometrie		Radiometrie	
$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	SI: lm/m ²	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	SI: W/m ²

Marimi luminoase

▶ Luminanța

- raportul dintre fluxul care părăsește, atinge sau traversează un element de suprafață și care se propagă în direcții conținute într-un con elementar, $d\Omega$, conținând direcția dată, și produsul dintre unghiul solid al conului și aria proiecției ortogonale a elementului de suprafață pe un plan perpendicular pe direcția dată, dS (definita într-o direcție, într-un punct de pe suprafața unei surse sau unui receptor, sau într-un punct pe traiectul unui fascicol):
- o masura a densitatii de intensitate luminoasa într-o anumita directie

Luminanța			
Fotometrie		Radiometrie	
$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega \cdot dS}$	SI: cd/m ²	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dS}$	SI: W/m ² /sr

Directivitatea radiatiei exterioare

▶ SLED

- radiatia este emisa cu simetrie circulara, in interiorul unui con cu unghi la varf tipic de 60°
- Viewing Half Angle $\sim 10 \div 15^\circ$

▶ ELED

- radiatia emisa nesimetric in forma de con eliptic
 - perpendicular pe jonctiune $\sim 60^\circ$
 - paralel cu jonctiunea $\sim 30^\circ$

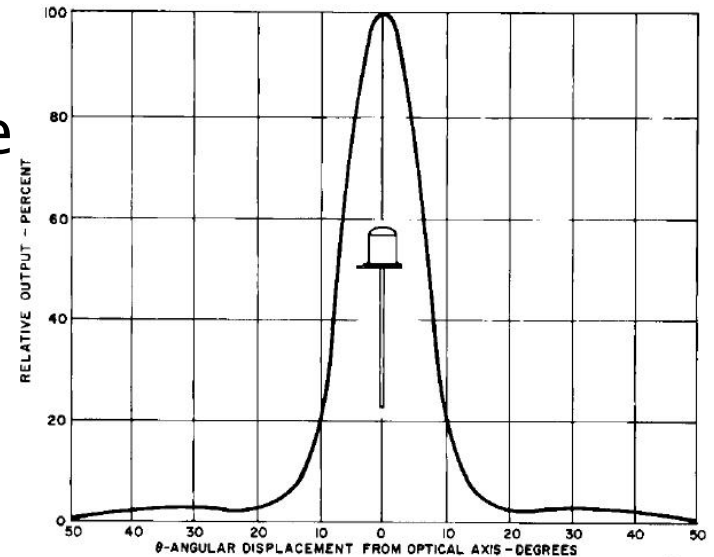
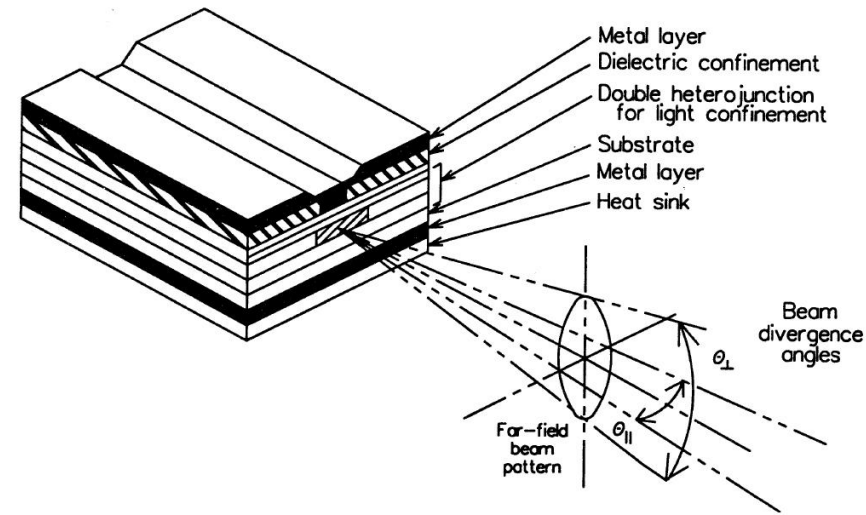


Fig. 5. Typical Radiation Pattern

ST1054



Directivitatea radiatiei exterioare

- ▶ Sursa lambertiana

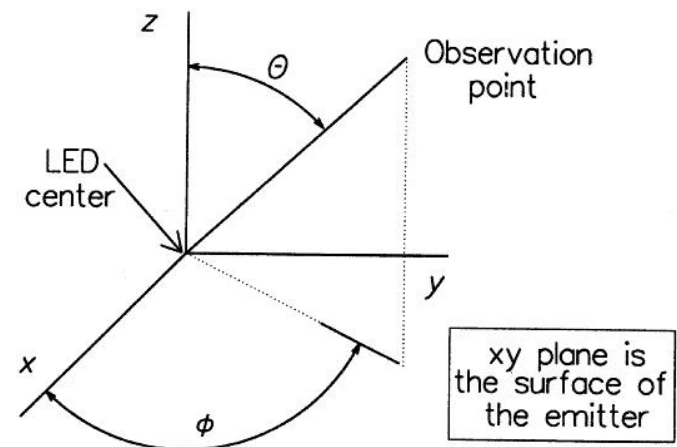
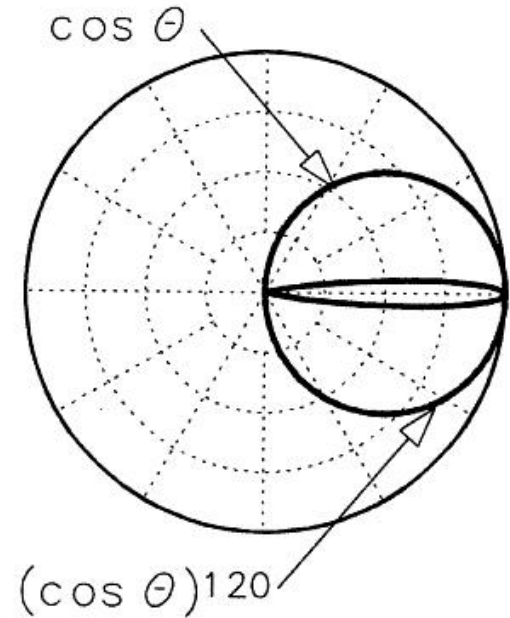
$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos \theta$$

- ▶ Aproximatie Lambertiana pentru surse cu directivitate crescuta

$$P(\theta) = P_0 \cdot \cos^n \theta$$

- ▶ Surse cu emisie asimetrica

$$P(\theta) = \frac{P_0}{\frac{\sin^2 \phi}{\cos^T \theta} + \frac{\cos^2 \phi}{\cos^L \theta}}$$



Marimi luminoase

- ▶ Standardele pentru surse luminoase (de ex. semne de circulatie), iluminarea spatiilor de lucru/odihna
 - sunt concepute cu marimi luminoase
 - lm, cd, lx, cd/m² etc.
- ▶ de multe ori se adapteaza relatiile pentru surse mai simple:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \rightarrow I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \Big|_{I_v \approx ct. \text{ in } \Omega} \quad E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \rightarrow E_v = \frac{\Phi_v}{S} \Big|_{\Phi_v \approx ct. \text{ pe } S}$$

$$\Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \int_{390nm}^{830nm} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \rightarrow \Phi_v = 683 \frac{lm}{W} \cdot \sum_i \Phi_e(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)$$

Probleme

- ▶ Panoul unui dispozitiv conține două LED-uri de semnalizare, unul de culoare verde și unul roșu standard. Doriți ca ambele să ofere aceeași luminozitate relativă și cât mai mare posibilă. Dacă ambele LED-uri acceptă un curent maxim de 50 mA, calculați curentul prin cele două LED-uri.
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

Probleme

- ▶ Trebuie să proiectați un semafor cu LED-uri. LED-urile care intră în componența sa sunt caracterizate de eficiență cuantică egală (aceeași tehnologie), iar parametrii de catalog pentru LED-ul roșu sunt ...
- ▶ Proiectați semaforul, pentru a obține o iluminare la 5m, pe direcție normală, de 50 lx pe timp de zi și 2 lx pe timp de noapte.
- ▶ Cerințe: luminozitate egală pentru cele 3 culori, alegerea numărului de LED-uri (considerente electronice/practice), necesitățile de curent ale fiecărui LED, parametrii pentru sursa de alimentare, parametrii unui sistem de control a intensității luminoase pentru reglare zi/noapte.
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

Probleme

- ▶ O instalație de semnalizare diurnă monocoloră trebuie realizată cu LED-uri. Cerințele sunt exprimate în parametri luminoși (lm, lx, cd, etc.). Aveți posibilitatea să alegeți între 4 LED-uri care au majoritatea parametrilor identici, valorile diferite fiind cele din tabel:

Nr.	Lungime de undă [nm]	Putere optică emisă [mW]	Preț
1	645	2.55	1.39
2	550	2.30	1.09
3	645	1.35	1.18
4	645	2.90	1.24

Probleme

- ▶ Se presupune că numărul de LED-uri necesar în instalație este suficient de mare astfel încât rotunjirea la număr întreg să nu modifice semnificativ rezultatele.
 - Alegeți componenta care vă permite să obțineți prețul total cel mai mic. Justificați. (3.5p)
 - Dacă instalația este prevăzută să funcționeze pe timp de noapte, se schimbă alegerea? Justificați. (1.5p)
- ▶ Rezolvari: <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>

Contact

- ▶ Laboratorul de microunde si optoelectronica
- ▶ <http://rf-opto.etti.tuiasi.ro>
- ▶ rdamian@etti.tuiasi.ro