

Elemente de fonică: Radiația termică

Introducere

Orice obiect (sistem fizic), menținut în stare staționară (în „echilibru” dinamic), la o temperatură oarecare, emite energie sub formă de unde electromagnetice. Această radiație este cunoscută sub denumirea de „radiație termică de echilibru”.

Cunoașterea cantitativă a acestui fenomen a condus la fabricarea surselor de lumină, la măsurarea la distanță a temperaturii corpurilor, ca și la dezvoltarea teoriilor corpusculare ale câmpului privind originea și evoluția Universului.

Cuprins

I. Radiația “termică”

Caracterizarea radiației termice

Legile radiației termice

II. Surse convenționale de lumină

I. Radiația “termică”

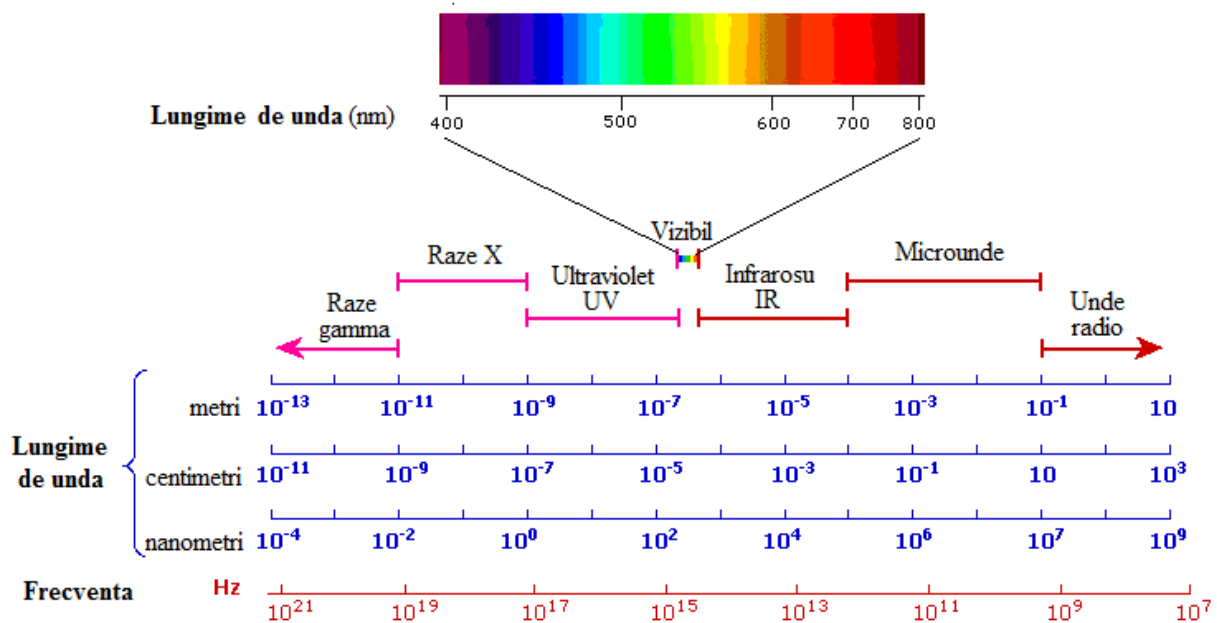
Scopul acestui capitol este acela de fundamenta teoretic constatarea experimentală că *orice* obiect emite radiație electromagnetică. Altfel spus, trebuie găsite *regulile* după care obiectele emit radiație electromagnetică.

Caracterizarea radiației termice

Radiația „termică” este de natură electromagnetică, denumirea „termică” provenind din faptul că există o legătură între temperatura la care se găsește un obiect și radiația electromagnetică emisă de acesta.

Spectrul radiației electromagnetice

În figura de mai jos este ilustrat spectrul radiației electromagnetice în dublă reprezentare, atât în funcție de frecvența ν , cât și în funcție de lungimea de undă (în vid) λ . Conversia se face utilizând relația cunoscută $\lambda=c/\nu$, unde $c=3\cdot 10^8$ m/s este viteza radiației electomagnetice în vid (viteza luminii).



Exemplu

Senzația „de căldură” pe care o percepem în apropierea obiectelor aflate la temperaturi de peste 40°C se datorează radiației infraroșii (IR) emise de acestea, care este absorbită de epiderma noastră și convertită în energie de agitație termică, cu consecința creșterii temperaturii locale; aceasta influențează senzorii termici din piele, care transmit informația la nivelul encefalului, unde este interpretată ca „senzație de cald”.

Deși se situează în afara intervalului nostru de percepție senzorială, și corpurile „rezi”, aflate la temperaturi scăzute, emit radiație termică. În funcție de intervalul spectral, radiația este măsurată cu detectoare specifice: antene¹, senzori optici etc.

Corpuri „negre”

Este evident că emisia de radiație trebuie compensată prin aport de energie, altfel neputându-se menține temperatura constantă, staționară, a obiectului (starea de „echilibru termic”, în sensul principiului zero al termodinamicii). Exemple de aport de energie sunt prin absorbție de căldură, de radiație electromagnetică etc. Bilanțul energetic al energiei interne al corpului este nul: emisia de energie prin radiație termică este compensată de absorbția de energie din exterior.

Prin corp „negru” se înțelege un corp care absoarbe *toată* radiația electromagnetică incidentă pe acesta.

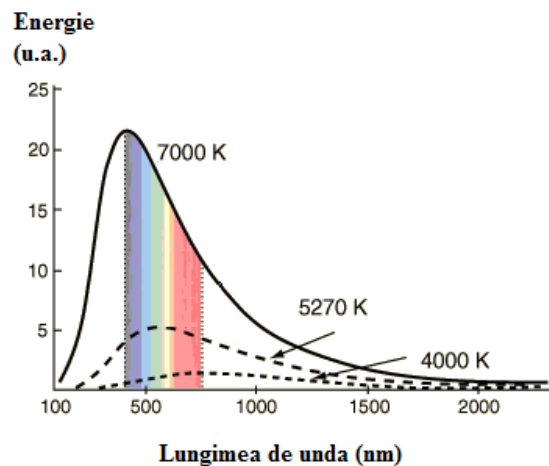
În consecință, la corpul negru nu există radiație reflectată. Radiația electromagnetică emisă de corpul negru este exclusiv sub forma de radiație termică. Din acest motiv, radiația termică (de echilibru) mai este cunoscută ca *radiația de corp negru*, aflat în stare staționară (de echilibru termic) la o temperatură constantă.

Rezultatele sunt exploatate comercial la fabricarea surselor de lumină, la măsurarea la distanță a temperaturii corpurilor, la trasarea hărților termice ale motoarelor în funcționare, a pierderilor de energie în construcțiile urbane etc.

Proprietățile radiației termice

Caracteristicile radiației termice emise de un corp aflat la temperatura T sunt:

1. Este de natură electromagnetică.
2. Este independentă de natura corpului², dacă acesta este un *corp negru*.
3. Este repartizată în tot spectrul, cu un maxim dependent de temperatura la care se afla corpul. Cu cât temperatura este mai înaltă, cu atât maximul se deplasează spre lungimi de undă mai mici (echivalent, frecvențe mai mari).
4. Este izotropă, caracteristicile emisiei nedepinzând de direcție.



Repartiția spectrală a radiației termice

¹ În astrofizică se utilizează telescoape performante aflate la observatoare astronomice plasate pe varfuri de munte pe Pământ, sau lansate în spațiu.

² Cunoscută sub denumirea „legea lui Kirchoff”.

Mărimi fizice caracteristice

În cele ce urmează presupunem că studiem un corp negru, aflat în stare staționară, la temperatura constantă T .

Fie W partea din energia internă a corpului care se găsește sub formă de energie electromagnetică, $[W]_{SI}=J$; în aceste condiții, celelalte mărimi importante pentru studiul radiației termice sunt definite în cele ce urmează:

- *Densitatea (volumică) de energie* din corpul negru

$$w = \frac{dW}{dV}; [w]_{SI}=J/m^3.$$

- *Puterea* radiației emise de corpul negru

$$P_{emisa} = \frac{dW}{dt}; [P_{emisa}]_{SI}=W.$$

- *Intensitatea radiației* emise de corpul negru

$$I_{emisa} = \frac{dP_{emisa}}{dS}; [I_{emisa}]_{SI}=W/m^2.$$

Deoarece aici interesează energia *radiată* spre exterior de unitatea de suprafață a corpului în unitatea de timp, această mărime se mai numește *emisivitate*, notată e_{emisa} :

$$e_{emisa} = I_{emisa}.$$

Deși energia emisă de corp are loc în tot spectrul, ea nu este repartizată uniform la toate lungimile de undă. Spre exemplu, dacă se consideră intervale spectrale *egale*, atunci Soarele emite mai multă energie în zona verde decât în zona roșului; mai exact, energia emisă de Soare este mai mare în intervalul 550-551nm decât în intervalul 650-651nm. Din acest motiv, este nevoie să cunoaștem *distribuțiile spectrale* ale mărimilor fizice energetice:

- *Intensitatea spectrală*, sau *emisivitatea spectrală* a corpului negru:

$$e_{\lambda,emisa} = \frac{de_{emisa}}{d\lambda}; [e_{\lambda,emisa}]_{SI}=W/m^3.$$

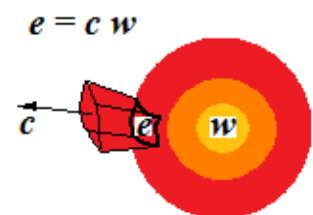
- *Densitatea (volumică) spectrală de energie* a corpului negru:

$$w_{\lambda} = \frac{dw}{d\lambda}; [w_{\lambda}]_{SI}=J/m^4.$$

Se constată că emisivitatea spectrală și densitatea (volumică) spectrală de energie sunt proporționale, fiind legate printr-o relație de forma

$$e_{\lambda,emisa} = cw_{\lambda}.$$

Acest lucru nu este surprinzător, deoarece indică, de fapt, că energia emisă este proporțională cu energia înmagazinată în corp.



O dată definite aceste mărimi fizice, scopul acestui capitol se poate reformula:

Trebuie găsită expresia cantitativă a densității spectrale de energie w_λ , sau, echivalent, cea a emisivității spectrale $e_{\lambda,emisa}$.

Observație

Densitatea spectrală de energie nu este măsurabilă direct, dar emisivitatea spectrală, da. Prin urmare, o metodă de a determina densitatea spectrală de energie este aceea de a măsura emisivitatea spectrală. Spre exemplu, emisivitatea spectrală a unui furnal poate fi măsurată, pentru a calcula densitatea de energie din interior, și, de aici, temperatura materialului topit din cuptor. Sau, se poate măsura emisivitatea spectrală a Soarelui, de pe Pământ, sau de pe un satelit, fără a ne apropia periculos de Soare.

Ipoteza lui Planck

Pentru a putea ajunge la o relație teoretică în acord cu rezultatele măsurătorilor experimentale, Max Planck a fost nevoit să facă o ipoteză nouă, revoluționară pentru acea vreme³.

Orice undă electromagnetică are proprietăți corpusculare, iar energia emisă de corp nu se poate face decât în multipli întregi de cantitatea („cuanta”) $h\nu$, care are dimensiune de energie:

$$\Delta\varepsilon = n \cdot h\nu, n=1, 2, \dots,$$

unde $h \approx 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js este constanta Planck, iar ν este frecvența undei.

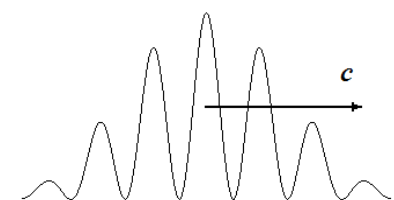
„Porțiile” de energie de mai sus se pot exprima și în funcție de lungimea de undă λ :

$$\Delta\varepsilon = n \cdot \frac{hc}{\lambda}, n=1, 2, \dots$$

unde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s este viteza undei electromagnetice în vid.

Observații

1. Ipoteza lui Planck este confirmată experimental de existența *fotonilor*⁴, cantitatea $\varepsilon_F = h\nu$ fiind energia unui *foton*. Fotonii au proprietăți ondulatorii, fiind trenuri de undă finite, cu frecvență, lungime de undă, polarizare, și fază specifice undelor, dar și cu impuls $p = h/\lambda$, care este specific corpurilor materiale⁵. Ei nu există decăt în mișcare cu viteza (în vid) $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, au masa de repaus zero și masa de mișcare $m = \frac{\varepsilon_F}{c^2}$. De fapt, după cum se poate vedea și în figură, nu se poate vorbi decât de o lungime de undă aproximativă, sau de un „grup” sau „pachet” de unde, deoarece, din cauza finitudinii trenului,



Exemplu de reprezentare a unui foton, sub formă de pachet de unde

³ Anul 1900.

⁴ Existența fotonului a fost dovedită experimental de A. Einstein pentru a explica efectul fotoelectric.

⁵ A se vedea și relațiile de unificare undă-particulă de la fascicula *Structura materiei*.

lungimea de undă nu este perfect definită, cum ar fi în cazul unui tren cu durată și lungime nelimitate.

Spre exemplu, fotonul „albastru”, cu lungimea de undă (aproximativă, în vid) $\lambda=444\text{nm}$, are frecvența $675,7\text{THz}$, energia $4,47 \cdot 10^{-19}\text{J}$, impulsul $4,97 \cdot 10^{-36}\text{kg} \cdot \text{m/s}$ (extrem de mic!), și masa de mișcare $1,6610^{-44}\text{kg}$ (!).

2. Ipoteza lui Planck reprezintă o constatare a faptului că mărimile energetice ale câmpului electromagnetic sunt discrete, sau *cuantificate*.

Cuantificarea este detectabilă doar la valori mici ale energiei, cu instrumente cu rezoluție adecvată, deoarece la valori mai mari este mascată de rezoluția limitată a aparatelor. Din cauza evoluției tehnologice mai lente a aparatelor de măsură, multe teorii nu pot fi validate decât mult după momentul formulării și apariției acestora.

3. Cuantificarea din ipoteza lui Planck nu trebuie confundată cu ecuațiile cu valori proprii ale undelor staționare, în încinte închise⁶, care conduc la formarea modurilor proprii, de frecvențe $\nu_q = q \cdot \nu_0$, respectiv lungimi de undă $\lambda_q = \frac{1}{q} \lambda_0$, $q=1,2,\dots$. Ipoteza lui Planck *nu impune* restricții asupra frecvenței (echivalent, asupra lungimii de undă).

Temă

Calculați mărimile caracteristice – ondulatorii și corpusculare – ale unui foton „verde” cu $\lambda=555\text{nm}$, unuia „galben” cu $\lambda=578\text{nm}$, și unuia „roșu” cu $\lambda=666\text{nm}$.

Legile radiației termice

Formula lui Planck

Pe baza ipotezei făcute, raționamentul lui Planck a condus la următoarea lege cantitativă pentru emisivitatea spectrală⁷ a unui corp negru, aflat în echilibru termic, la temperatura T , exprimată în funcție de lungimea de undă și de temperatură, celelalte constante fiind cele cunoscute:

$$e_{\lambda,\text{emisa}}(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \cdot \text{Formula lui Planck}$$

Aceasta relație răspunde scopului propus pentru acest capitol. Mai mult, prin consecințele ei, a condus la apariția unor teorii și tehnologii noi, bazate pe ceea ce astăzi numim optică fonică și electronică cuantică.

Observații

1. Pentru intervale spectrale înguste, intensitatea radiației emise în intervalul spectral $\Delta\lambda$ se

⁶ Prezentată la fascicula *Unde*, cap. *Fenomene ondulatorii - Interferență în medii mărginite: unde staționare în cavități rezonante*

⁷ Pentru demonstrație, a se vedea <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod6.html>

calculează cu relația aproximativă

$$I \cong e_{\lambda,emisa}(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda,$$

adică

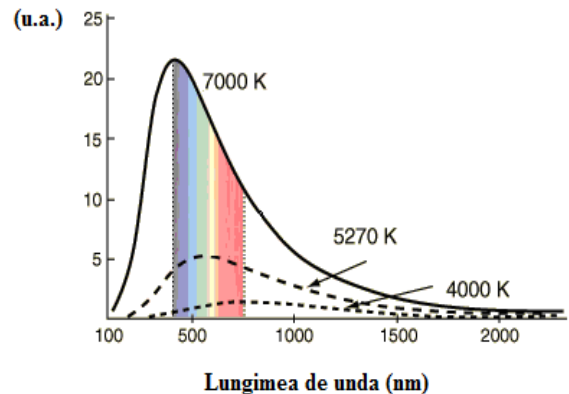
$$I \cong \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \cdot \Delta\lambda.$$

2. Ținând cont că $e_{\lambda,emisa} \sim c \cdot w_\lambda$, expresia matematică pentru densitatea spectrală de energie este

$$w_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}.$$

Graficul acestuia prezintă un maxim, a cărui poziție în spectru depinde de temperatura la care se află corpul.

Densitate spectrală de energie



3. A nu se confunda notația $e_{\lambda,emisa}(\lambda, T)$, care indică emisivitatea spectrală ca funcție de lungimea de undă și de temperatură, cu litera lui Euler $e \approx 2,7183$, care este utilizată ca baza logaritmilor naturali (prezentă și la numitorul formulei lui Planck).

Consecințele formulei lui Planck

- Legea emisivității totale (Stefan-Boltzmann)

Emisivitatea totală (energia emisă în unitatea de timp de unitatea de suprafață a unui corp negru) este proporțională cu puterea a patra a temperaturii corpului:

$$e_{emisa} = \sigma_{S\&B} T^4, \quad \text{Legea Stefann-Boltzmann}$$

unde $\sigma_{S\&B} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ este constanta Stefan-Boltzmann.

Emisivitatea totală înseamnă sumarea continuă (integrală) a contribuțiilor după intervalele

spectrale $e_{emisa} = \int_0^\infty e_{\lambda,emisa} d\lambda$. Efectuând integrala

$$e_{emisa} = \int_0^\infty \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda,$$

se obține o relație de forma

$$e_{emisa} = \sigma_{S\&B} T^4,$$

unde $\sigma_{S\&B} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ este constanta Stefan-Boltzmann.

Aplicații

Aceasta lege a stat la baza determinării temperaturii echivalente a Pamântului⁸. Alte aplicații sunt în fizica atmosferei și a climei terestre.

- Legea de deplasare Wien

Constatarea experimentală a deplasării maximului densității spectrale de energie spre lungimi de undă mici, la creșterea temperaturii corpului, se deduce din legea radiației termice, din condiția

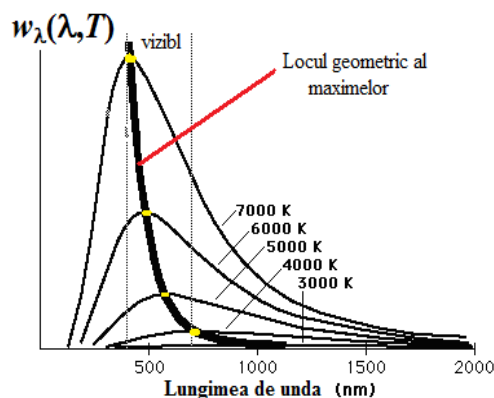
$$\frac{dw_{\lambda}(\lambda, T)}{d\lambda} = 0.$$

Se obține

$$\lambda_{\max} T = b, \quad \text{Legea de deplasare Wien.}$$

Constanta $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ este constanta lui Wien.

Cu cât este mai mare temperatura corpului, cu atât este mai mică lungimea de undă la care densitatea de energie, ca și emisivitatea spectrală, sunt maxime, adică maximul „se deplasează” în funcție de temperatură (a se vedea figura alăturată).

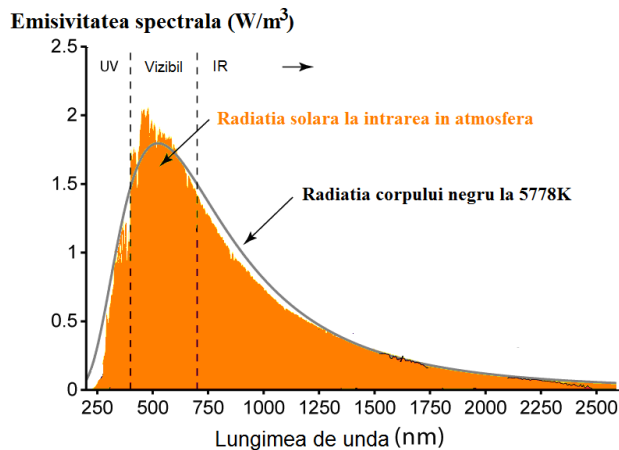


Exemple⁹

1. Temperatura coroanei solare. Măsurătorile spectroscopice ale emisivității spectrale a Soarelui indică un maxim la $\lambda_{\max} = 501,6 \text{ nm}$ (verde). Conform legii de deplasare Wien, temperatura coroanei solare este

$$T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{501,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5778 \text{ K}.$$

După cum se vede în figura alăturată, funcția de emisivitate spectrală este extrem de bine aproximată de curba teoretică de emisivitatea spectrală a corpului negru, aflat la 5505°C (echivalent cu 5778 K).



Emisivitatea spectrală a Soarelui

2. Temperatura Universului. Toate radiotelescoapele din lume, ca și cele lansate în spațiu, receptionează o radiație electromagnetică izotropă, cu maximul la lungimea de undă

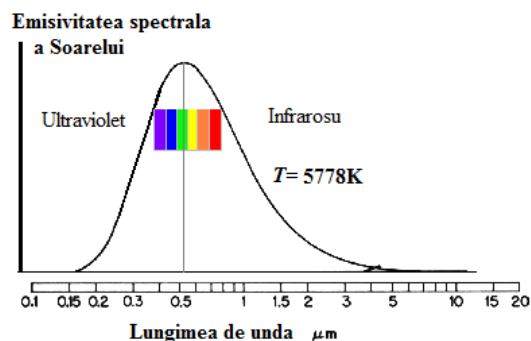
⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law

⁹ Exemple de calcul pot fi găsite la adresa <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/wien.html#c3>

$\lambda_{\max}=1,06\text{mm}$. Această radiație este un zgomot de fond, care se suprapune peste orice semnal electromagnetic recepționat, și este interpretată ca radiația remanentă de la “explozia primordială”¹⁰; acesteia îi corespunde temperatura $T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2,73\text{K}$, care este asimilată ca fiind „temperatura Universului”.

Aplicație

Soarele emite mai multă energie în zona verde decât în zona roșului; mai exact, energia emisă de Soare este mai mare în intervalul 550-551nm decât în intervalul 650-651nm. Justificarea este în figura alăturată, analizând curba emisivității spectrale.



¹⁰ Cunoscut ca “Big Bang” (engl.)

II. Surse de lumină albă

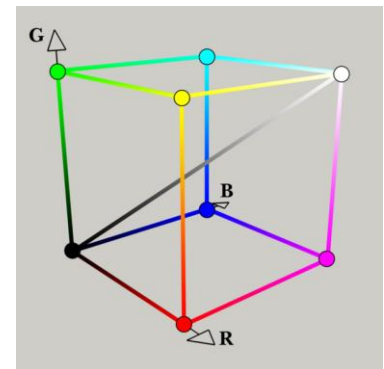
Senzații cromatice

Culoarea albă este o senzație rezultată în urma combinării unor anumite culori, cu anumite intensități. Compunerea nu este unică.



Reconstituirea luminii albe

Există mai multe feluri de compunere și codificare a culorilor; fie aici cel cunoscut sub forma RGB, de la culorile primare cele mai utilizate în televiziunea în culori Red-Green-Blue, fiecare având intensitatea aleasă conventional între 0 și 100. Dacă am reprezenta grafic spațiul ocupat de fiecare culoare primară într-un sistem de coordonate cartezian, am obține un cub cu un colț în origine – adică (0,0,0) – și colțurile Red (100,0,0), Green (0,0,100) și Blue (0,100,0). Fiecare dintre axele folosite pentru a defini acest spațiu ar echivala cu câte una dintre culorile primare: axa *R* pentru roșu, *G* pentru verde și *B* pentru albastru. Fiecare punct din cub ar avea câte o culoare individuală, determinată de poziția lui în spațiu – în origine am avea un punct negru, în colțul opus unul alb, pe diagonala dintre ele am avea toate nuanțele pure de gri, în colțurile de pe axe am avea culorile primare pure iar în colțurile opuse am avea culorile secundare pure și așa mai departe. Albul perfect ar fi în punctul (100, 100, 100).



În concluzie, se poate reconstitui o senzație aproximativă de alb din combinația nu neapărat a continuumului de frecvențe din domeniul vizibil, ca la obiectele incandescente, ci doar din combinația câtorva linii spectrale discrete.

Aplicații. Fabricarea surselor de iluminat.

1. **Becuri cu incandescență.** Sursele comerciale de lumină sunt de două tipuri: lămpi cu incandescență (cu filament încins la temperatura de circa 2700), și lămpi fluorescente, de obicei cu vapori de mercur. La cele dintâi, filamentul este cel care emite radiația termică, având maximul emisiei în infraroșu, la lungimea de undă

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{2700\text{K}} = 1,07 \mu\text{m}.$$

Din acest motiv, lumina are o tenta gălbuie, iar randamentul becurilor este scăzut, majoritatea energiei emise fiind în spectrul

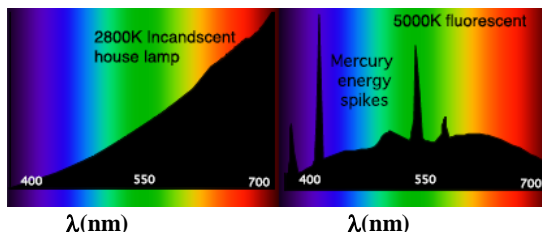


Comparatie între lămpile comerciale uzuale

infraroșu. Mărirea temperaturii filamentului este limitată de distrugerea sa, prin depășirea temperaturii de topire. Utilizarea halogenurilor metalice poate ameliora performanțele, prin creșterea temperaturii filamentului până la 2800K și „albind” lumina, prin îmbogățirea cu componente spectrale albastre.

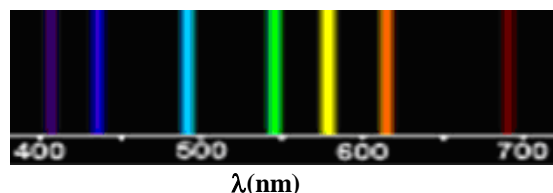
2. Lămpi fluorescente; temperatura de culoare.

O altă variantă este dată de lămpile fluorescente (“becuri” economice). Lămpile fluorescente au spectre de emisie sub formă de linii spectrale de fluorescență. Emisia de fluorescență este consecința emisie spontane a atomilor¹¹, excitați prin descărcări electrice (ciocniri electron-atom). Fiecare atom are o amprentă caracteristică de emisie, sub formă de “linii” spectrale. Mecanismul emisie spontane va fi explicat la capitolul „Lasere”.



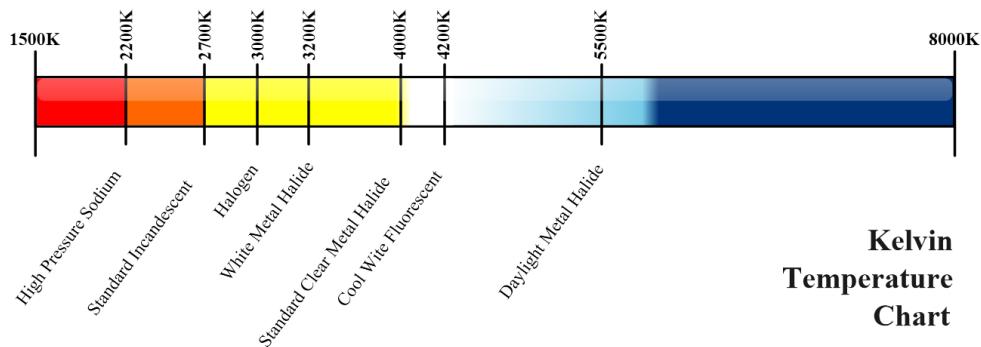
Densitatea spectrală de energie pentru un bec cu incandescentă, și pentru o lampă cu vapori de mercur (http://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature)

Lumina albă este recompusă, aproximativ, din câteva culori, corespunzătoare liniilor de emisie ale substanței fluorescente, acordându-i-se o temperatură echivalentă de culoare, în funcție de nuanța obținută pentru alb (care este, în principal, funcție de amestecul atomic din mediul de descărcare și de luminoforul utilizat).



Spectrul de fluorescență al mercurului

Pentru a standardiza compoziția cromatică a luminii albe, se definește, pe baza legii de deplasare a lui Wien, o temperatură echivalentă de culoare, în sensul că se presupune că „albul” de la lampa fluorescentă ar fi rezultatul emisie unui corp negru care ar avea acea temperatură la care se reproduce senzația de alb a lămpii fluorescente (atenție, emisia de fluorescență nu se face după legile radiației termice!).



http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_light#Phosphor

¹¹ După cum se va vedea la capitolul următor.

3. Termografie și termoviziune. Aceste tehnologii se bazează pe senzori sensibili la radiația din afara domeniului vizibil, de obicei din IR. Pierderile de căldură ale locuințelor, sau vizualizarea pe întuneric, au la bază astfel de materiale.
4. Măsurarea la distanță a temperaturii. Legea de deplasare stă la baza *pirometriei optice*, prin care se măsoară, la distanță, temperaturile corpurilor, utilizând legea de deplasare Wien:

$$T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{\max}} .$$

Mai jos este ilustrat un exemplu de clasificare a stelelor, după temperatura lor de culoare.

| | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|---------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Temperatura stelei (K) | 50000-28000 | 28000-10000 | 10000-7500 | 7500-6000 | 6000-4900 | 4900-3500 | 3500-2000 |
| Culoarea | Albastre | Albastru-albe | Albe | Alb-galbene | Galbene | Oranj | Roșii |

Teme

Să se calculeze:

1. Lungimea de undă la care emisivitatea spectrală a omului prezintă maxim ($T=37^{\circ}\text{C}$).
2. Lungimea de undă la care emisivitatea spectrală a gazelor eșapate de avion prezintă maxim (se va considera $T=480\text{K}$).