## STUDIUL RADIAȚIEI CORPULUI NEGRU

**Definiție:**

Emisia luminii este rezultatul tranzițiilor cuantice efectuate de atomi, molecule, sau de alte sisteme atomice, din stări de energie mai mari către stările de energie mai joase.

Ceea ce numim *radiație termică* nu se deosebeşte de alte tipuri de radiații (liminiscența), decât prin metoda de excitare a sistemelor emițătoare. În fenomenele în care intervin radiațiile termice, excitarea este rezultatul ciocnirilor moleculelor datorate mişcării de agitație termică.

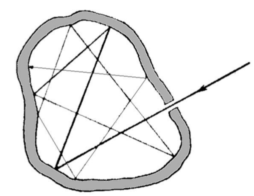

Figura 1. Schema unei cavități în echilibru termodinamic

Proprietățile radiației de echilibru sunt: densitatea energetică, repartiția în frecvențe şi în direcții de propagare, ca şi în polarizare, ele nu depind de forma *cavității* (*corp negru)* sau de natura fizică a pereților săi.

La fel ca şi în cazul unui gaz conținut într-o incintă, aceste proprietăți nu depind decât de temperatura la care se află pereții cavității. Ea este omogenă, în sensul că densitatea sa este aceeaşi în orice punct al cavității, este izotropă şi nepolarizată, toate direcțiile de propagare sunt echiprobabile.

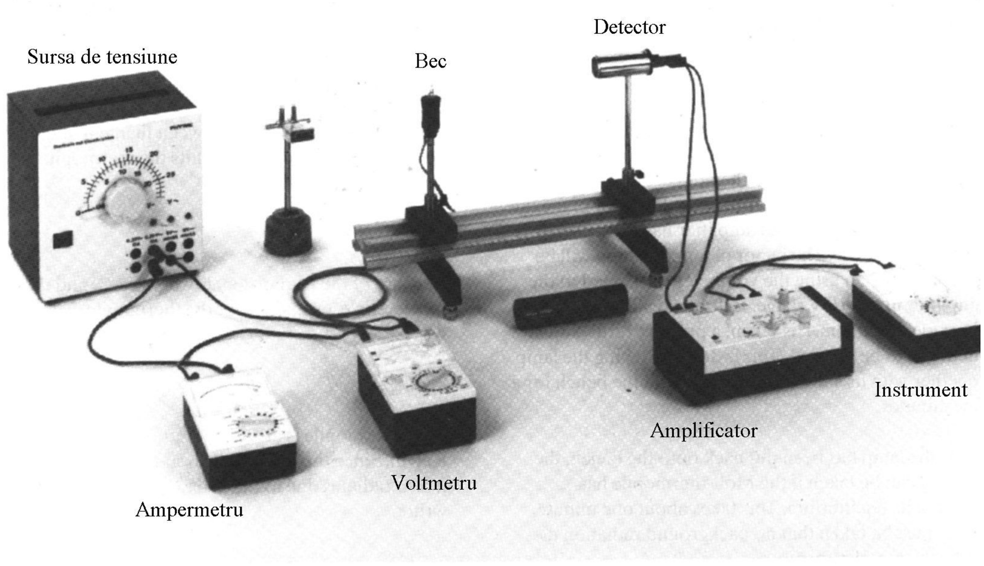


Figura 2. Aparatura firmei Leybold pentru studiul radiației corpului negru

Principalele relații utilizate în studiul corpului negru:

Tabelul 1

| Distribuția Wien | Distribuția Planck |
|---|---|
| $u_\lambda^W = a_W \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{b_w}{\lambda T}\right)$ | $u_\lambda^P = \frac{a_P \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{b_P}{\lambda T}\right) - 1}$ |
| $u_\nu^W = \frac{a_W}{c^4} \nu^3 \exp\left(-\frac{b_w \nu}{cT}\right)$ | $u_\nu^P = \frac{\frac{a_P}{c^4} \nu^3}{\exp\left(\frac{b_P \nu}{cT}\right) - 1}$ |

Între cele două forme există relația de corespondență care este valabilă indiferent de forma concretă a distribuțiilor:

$$u_\nu = \frac{\lambda}{\nu} u_\lambda = \frac{c}{\nu^2} u_\lambda \qquad (1)$$
$$\nu u_\nu = \lambda u_\lambda$$

## 1. Verificarea legii Ștefan-Boltzmann a radiației corpului negru. Metoda experimentală

Principiu

Conform legii lui Stefan și Boltzmann, energia emisă de către un corp negru pe unitate de arie și în unitate de timp, este proproțională cu puterea a "patra" a temperaturii absolute a corpului. Legea lui Stefan-Boltzmann este valabilă și pentru așa numitele corpuri "gri" a căror suprafață prezintă un coeficient de absorbție a radiației independent de frecvență, dar subunitar.

În experimentul de față, corpul "gri" este chiar filamentul unui bec cu incandescență a cărui energie radiată este investigată ca funcție de temperatură.

Probleme

1. Măsurarea valorii necunoscute a rezistenței becului cu incandescență la temperatura camerei și deducerea rezistenței lui la zero grade Celsius, $R_0$.
2. Măsurarea desnității fluxului de energie a becului funcție de tensiunea aplicată filamentului. Pentru fiecare tensiune se va citi valoarea intesnității curentului și se va calcula valoarea corespunzătoare a rezistenței. Presupunând o dependență parabolică (pătratică) a rezistenței de temperatură, se poate calcula temperatura filamentului din valoarea măsurată a rezistenței.

Aparatura

Sursa de alimentare cu tensiunea variabilă
Bec cu incandescență (6V sau 12V, 50W)
Ampermetru și voltmetru
Detector și instrument de citire (amplificator de cc.)
Cabluri și rezistoare

Dispozitivul experimental

1. Pentru prima problemă se realizează un circuit de măsurare a rezistenţei filamentului pentru un curent foarte mic (100-200 mA) pentru a evita încălzirea lui şi a obţine valoarea rezistenţei filamentului la temperatura camerei. Rezistenţa filamentului la cameră se poate măsura şi cu jutorul unui ohmetru digital, simplu.
2. Pentru a doua parte se realizează alimentarea becului de la sursa de tensiune variabilă şi se începe cu valori mici ale tensiunii de alimentare (în trepte de aproximativ 1V) până ce se atinge valoarea maximă admisă de bec (6 sau 12V). Se măsoară simultan tensiunea la bornele becului şi intesitatea curentului ce trece prin bec. Sursa si detectorul vor fi asezate pe un banc optic la aproximativ 30cm distanţă unul de altul si aliniate astfel încât să se obţină un semnal maxim. Deoarece semnalul dat de detector este doar de câţiva mV, amplificatorul de măsură se pune pe amplificare în jur de x1000 sau x10.000. Pentru o corectă măsurătoare, se realizează o reglare a zero-ului sistemului detector-amplificator cu becul nealimentat. Procesul de măsurare cu detectorul termic are o particularitate şi anume el trebuie lăsat de obicei să ajungă la echilibru, având nevoie de cam 1 min pentru acesta. Abia dupa aceea se obtine valoarea corectă De asemenea, trebuie eliminate sursele de radiaţii infraroşii din jurul detectorului, altfel măsurătorile vor fi eronate.

Teoria si prelucrarea datelor

Relaţia care dă densitatea fluxului de energie radiată de corpului negru (adică energia emisă de unitatea de arie, în unitate de interval de timp) funcţie de temperatura corpului *T,* şi de lungimea de undă λ, în intervalul d λ, este dată de legea lui Planck:

$$\frac{dL(\lambda,T)}{d\lambda}=\frac{2c^2h\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1} \qquad (2)$$

unde c = $1.10^8$ m/s, viteza luminii în vid; h = $6{,}62.10^{-34}$ J.s, constanta lui Planck; k = $1{,}381.10^{-23}$ J/K, constanta lui Boltzmann.

Integrând ecuaţia (2) după toate lungimile de undă (λ = 0 până la ∞) obţinem expresia legii lui Ştefan-Boltzmann şi care dă densitatea fluxului de radiaţie *L(T)*:

$$L(T)=\frac{2\pi^5}{15}\cdot\frac{k^4}{c^2h^3}\cdot T^4=\sigma\cdot T^4 \qquad (3)$$

unde $\sigma = 5.67.10^{-8}$ W/m$^2$/K$^4$.

Proporţionalitatea cu puterea a patra a temperaturii absolute este adevărată pentru corpurile "gri" şi care au un coeficient de absorbţie independent de lungimea de undă a radiaţiei şi subunitar.
Becul cu incandescenţă cu filament de wolfram, este un corp "gri" care satisface destul de bine această cerinţă. Pentru o distanţă fixată, bec - detector, fluxul de energie ce cade pe detector Φ este proporţional cu *L(T)*, Φ~ *L(T)*. Din cauza proporţionalităţii dintre tensiunea produsă de detector, $U_t$, şi fluxul Φ, va rezulta că $U_t \sim T^4$ , dacă detectorul se află la temperatura de 0K. Deoarece el se află la temperatura camerei, $T_c$, el la rândul lui va radia după aceeaşi lege, astfel încât în ansamblu semnalul pe detector va fi dat de expresia:

$$U_t \sim (T^4 - T_c^4) \qquad (4)$$

Pentru temperaturi suficient de ridicate, ca în acest caz, termenul $T_0^4$ poate fi neglijat. Logaritmând expresia de mai sus în această aproximație vom obține o dependență liniară de temperatură, cu panta 4:

$$\log U_t = 4 \log T + \text{const.} \qquad (5)$$

Temperatura absolută a filamentului, $T = t + 273$, se calculează din valoarea rezistenței filamentului de wolfram, $R(t)$, $t$ fiind temperatura lui în grade Celsius. Pentru filamentul de wolfram, dependența de temperatura a rezistenței este dată de relația aproximativă:

$$R(t) = R_0(1 + \mathrm{a}.t + \mathrm{b}.t^2) \qquad (6)$$

unde: $R_0$ - rezistența la temperatura de zero grade Celsius; a = $4{,}82.10^{-3}$ $K^{-1}$; b = $6{,}76.10^{-7}$ $K^{-2}$.

Determinarea valorii rezistenței filamentului la temperatura camerei se va face folosind aceeaşi relație (6) introducând valoarea temperaturii la care se lucrează (temperatura camerei, în jur de $20^0$ C).

Valorile lui $R(t)$ se consideră cele calculate utilizând legea lui Ohm şi măsurătorile făcute ale curentului şi tensiunii la bec. }inând cont de expresia dependenţei temperaturii absolute de cea în grade Celsius şi rezolvând ecuația de gradul doi în $t$, obținem folrmula pentru calcularea temperaturii

$$T = 273 + \frac{1}{2b}\left[\sqrt{a^2 + 4b\left(\frac{R(t)}{R_0} - 1\right)} - a\right] \qquad (7)$$

Exprimând într-un tabel datele experimentale şi cele calculate şi reprezentând într-un grafic dublu logaritmic $U_t$ funcție de $T$, se poate verifica panta dependentei care trebuie să fie proximativ 4.

Datele prezentate în tabel sunt fictive, şi au rol de exemplificare.

Tabel 2

| $U$(V) | $I$(A) | $U_t$(mV) | $T$(K) |
|---|---|---|---|
| 1 | 2,20 | 0,15 | 672 |
| 2 | 2,80 | 0,62 | 983 |
| 3 | …… | ……. | ….. |
| ……. | | | |

Valori ale intensității radiației corpului negru la trei temperaturi diferite obținute prin **metoda 1** şi care după ce s-au făcut toate corecțiile şi s-au determinat valorile reale ale temperaturii au condus la:

Tabelul 3

| **λ nm** | **5000 K** | **5500 K** | **6000 K** | **λ nm** | **5000 K** | **5500 K** | **6000 K** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 0.1 | 0.2 | 0.7 | 1000 | 2.2 | 2.9 | 3.7 |
| 300 | 1.0 | 2.5 | 5.2 | 1100 | 1.8 | 2.4 | 3.0 |
| 400 | 2.7 | 5.3 | 9.0 | 1200 | 1.5 | 1.9 | 2.4 |
| 500 | 3.8 | 6.4 | 9.9 | 1300 | 1.2 | 1.6 | 1.9 |
| 600 | 4.0 | 6.2 | 9.0 | 1400 | 1.0 | 1.3 | 1.5 |
| 700 | 3.7 | 5.4 | 7.4 | 1500 | 0.8 | 1.0 | 1.2 |
| 800 | 3.2 | 4.5 | 6.0 | | | | |
| 900 | 2.7 | 3.6 | 4.7 | Suma: | | | |

Considerând aceste date ca fiind obținute în laborator:

a) să se reprezinte grafic distribuția spectrală a corpului negru la cele trei temperaturi

b) să se determine valoarea lungimii de undă pentru maximul radiației pentru cele trei temperaturi

c) să se verifice panta 4 a legii Ştefan-Boltzmann aproximând aria de sub curba de radiație cu o sumă de dreptunghiuri (adică liniaritatea şi panta aproximativ 4 într-un grafic semilogaritmic).

**2. Verificarea legii Ştefan-Boltzmann a radiației corpului negru. Metoda grafică**

Din punct de vedere istoric, M. Planck a luat în considerație, pentru verificarea legii deduse teoretic, datele experimentale obtinute de O. Lummer si E. Jahnke (**Uber die Strahgleiching des schwartzen Korpers und blanken Platins**, *Annalen der Physik, 3, 283-297, 1900)*. Aceste date sunt următoarele:

Tabelul 4

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1259K | λ (nm) | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | $\rho_2$ (J/m$^4$) | 57 | 307 | 483,75 | 447 | 297,25 | 172,5 | 105 |
| 1646K | λ (nm) | 1,2 | 1,5 | 1,97 | 2,5 | 3,17 | 4,24 | 5,18 |
| | $\rho_2$ (J/m$^4$) | 1387,5 | 1897,5 | 1980 | 1620 | 1080 | 555 | 315 |

**A)** Vom folosi aceste date originale pentru a verifica legile radiației termice.

A1) În acest scop se vor reprezenta, pe acelaşi grafic, cele două curbe de radiație.
A2) Ca şi pentru cazul de la metoda 1, se va determina valoarea lungimii de undă pentru maximul radiației pentru cele două temperaturi.
A3) Se va determina maximul radiației din spectru pentru un alt experiment reprezentat grafic în figura 3.

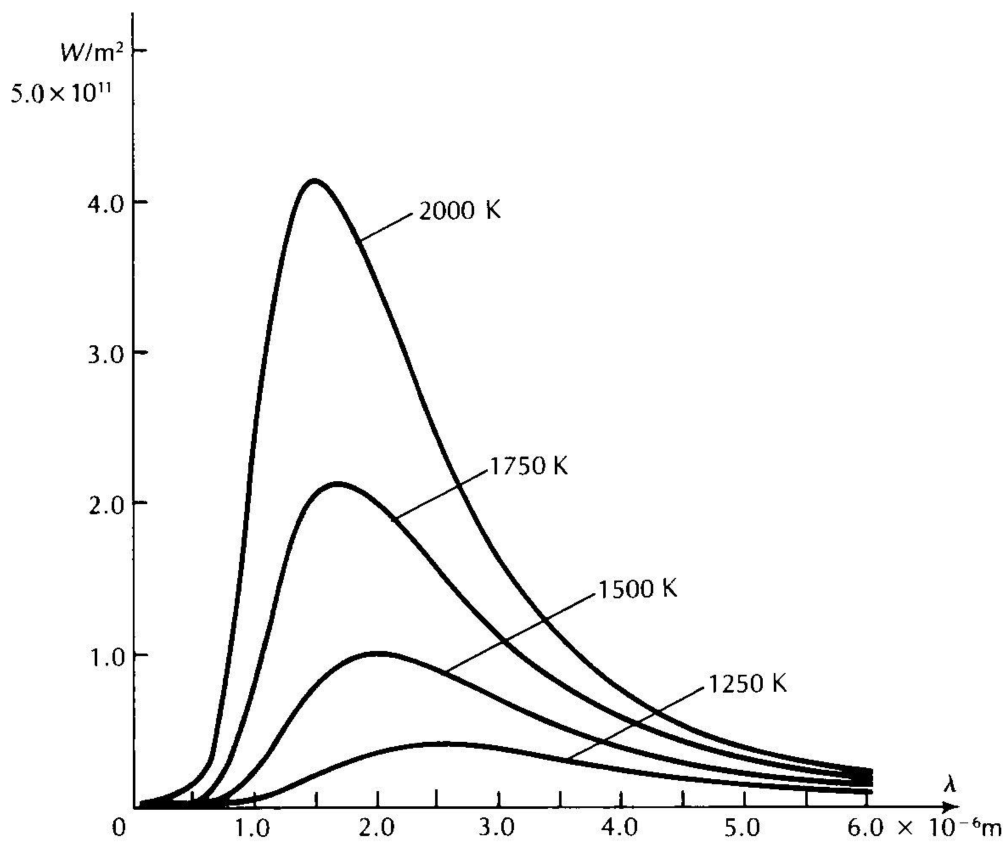


Figura 3

Dacă legea radiației corpului negru este universală atunci cele două grupuri de date experimentale (date în tabelul 4 şi în figura 3) pot fi luate ca bază pentru o curbă universală.

Să se verifice dacă cele două grupuri de date verifică această presupunere, exprimând într-un grafic unic dependența maximului din spectrul de radiație termică funcție de fracvență, utilizând o reprezentare semilogaritmică: logaritm natural de flux funcție de temperatura absolută (formula 3). Panta trebuie să fie 4 iar intersecția cu ordonata trebuie să fie logaritmul natural al constantei radiației, σ.

**3. Utilizarea legii radiației corpului negru în anumite cazuri particulare**

**A) Măsurarea fondului cosmologic**

Măsurarea fondului cosmologic (radiația electromagnetică relictă) reprezintă un argument fundamental pentru a valida modelul de "Big Bang" al universului. Măsurătorile cele mai noi efectuate cu satelitul COBE au obținut date experimentale prezentate în grafic în care punctele sunt datele experimentale iar linia continuă reprezintă cea mai bună aproximație a distribuției considerând-o radiație de corp negru (figura 4).

Determinați valoarea acestei temperaturi.

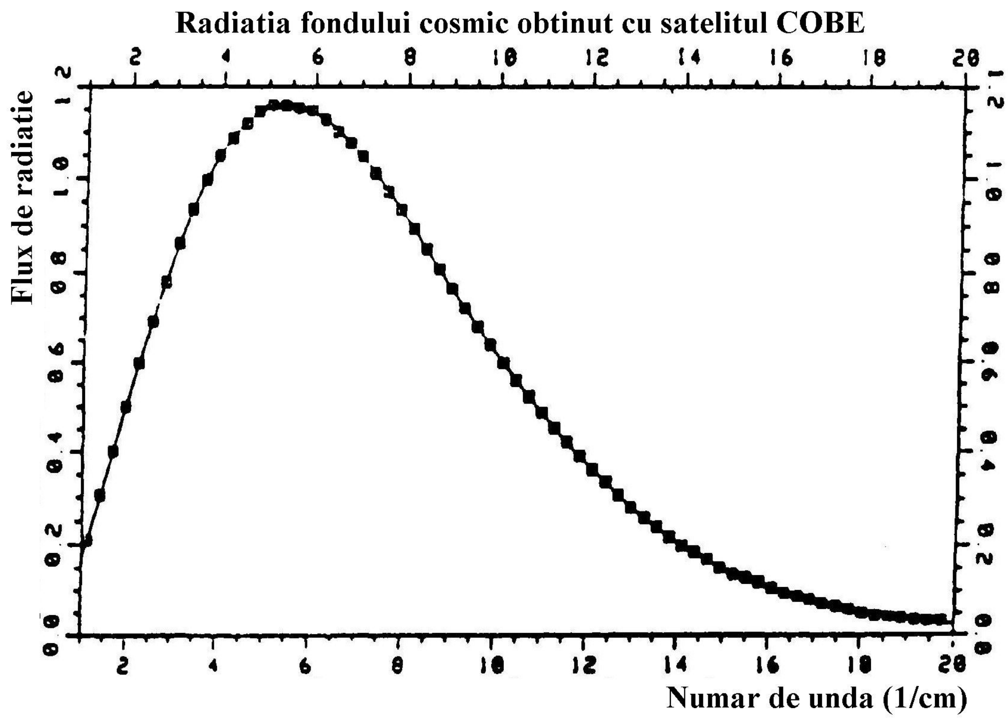


Figura 4

**B) Determinarea temperaturii la suprafața Soarelui şi a unor stele**

Soarele este un radiator care se apropie de un corp negru ideal. Măsurătorile făcute la suprafața Pământului însă modifică spectrul ideal datorită nenumăratelor fenomene de absorbție şi împrăştiere a luminii. De asemenea, absorbția luminii la trecerea ei prin atmosfera Soarelui modifică acest spectru. Dacă facem abstracție de aceste efecte ce deformează spectrul Soarelui, spectrul de radiație obținut poate fi utilizat pentru a determina temperatura la suprafața lui. Aceeaşi situație este valabilă şi pentru spectrele stelare. În această parte a lucrării se cere:

a) determinarea temperaturii Soarelui folosind datele de radiație prezentate în tabelul următor:

Tabelul 5. Date de emisie pentru Soare

| $\lambda$ μm | S (J/m$^4$) ($\sigma = 1$) | $\lambda$ μm | S (J/m$^4$) ($\sigma = 1$) | $\lambda$ μm | S (J/m$^4$) ($\sigma = 1$) | $\lambda$ μm | S (J/m$^4$) ($\sigma = 1$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1.2 | 3.9 | 115 | 6 | 187 | 18 | 15 |
| 2.2 | 4.5 | 4 | 160 | 6.5 | 167 | 20 | 10 |
| 2.4 | 6.4 | 4.1 | 187 | 7 | 149 | 25 | 5 |
| 2.6 | 13 | 4.2 | 189 | 7.5 | 129 | 30 | 2.6 |
| 2.8 | 25 | 4.3 | 183 | 8 | 114 | 40 | 0.93 |
| 3 | 59 | 4.4 | 201 | 9 | 90 | 50 | 0.41 |
| 3.2 | 85 | 4.5 | 213 | 10 | 74 | 60 | 0.21 |
| 3.4 | 114 | 4.6 | 215 | 11 | 61 | 80 | 0.06 |
| 3.6 | 115 | 4.8 | 213 | 12 | 50 | 100 | 0.02 |
| 3.7 | 127 | 5 | 204 | 14 | 33 | | |
| 3.8 | 121 | 5.5 | 198 | 16 | 22 | | |

b) Să se estimeze care este fracțiunea din energia radiată de Soare care este prezentă în domeniul vizibil al spectrului electromagnetic

c) Având un grafic al spectrului unei stele (de indicativ HD 116608) să se determine temperatura ei găsind cea mai buna curba de corp negru care fitează curba spectrală (figura 5)

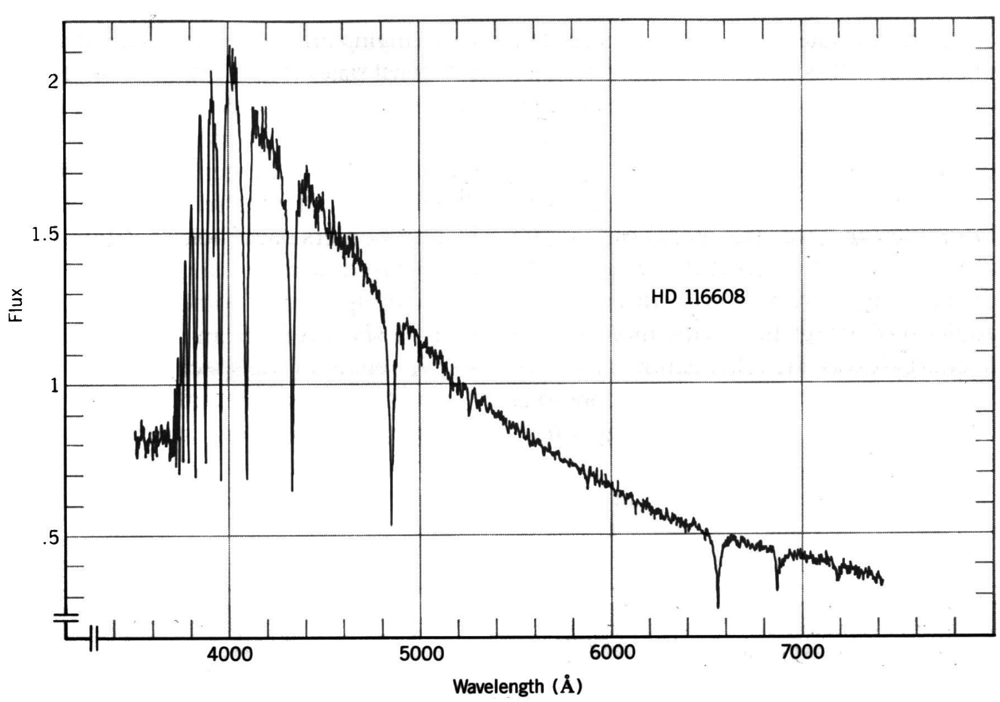


Figura 5. Spectrul stelei HD 116608

d) Având în vedere că informațiile care pot fi deduse din spectrele de corp negru (sau cenuşiu) sunt extrem de improtante, să se scrie un program care să permită:
- fitarea datelor experimentale cu o curba de radiație de tip Planck,
- determinarea ariei subîntinse de aceasta curbă,
- fracțiunea de energie radiantă ce este emisă între două valori date ale frecvenței (sau lungimii de undă)
- reprezentarea grafică a spectrului, fie după lungimi de undă fie după frecvențe.

**BIBLIGRAFIE**

1. E.H.Wichmann, "Fizica cuantică", Cursul de fizică Berkley, vol IV, Ed. Didactică şi Pedagogică, 1983, pp. 38-44;

**RADIAȚIA TERMICĂ - probleme**

**52.** "Cavitățile" existente într-un foc de cărbuni par a fi mai strălucitoare decât carbunii înşişi. Este temperatura în aceste cavități mai mare decât a porțiunilor neacoperite ale cărbunilor sau mai mică? Argumentați răspunsul printr-o demonstrație.

**53.** Aflați lungimea de undă pentru care radiația unui corp negru la temperatura de 6000 K este cea mai intensă, utilizând relația lui Planck pentru densitatea spectrală, $\rho_\lambda$ ? Dacă ne referim la radiația emisă pe unitatea de interval de frecvență, adică utilizăm densitatea spectrală în formula lui Planck exprimată în frecvență, $\rho_\nu$ , vom obține acelaşi rezultat?

**54.** Într-o explozie termonucleară, temperatura gazelor poate atinge $10^7$ K. Determinați lungimea de undă respectivă a frecvenței maximului de radiație termică emisă.

**55.** Determinați frecvența corespunzătoare maximului radiației termice emise de corpul omenesc în ipoteza că radiază ca un corp negru. Ce consecințe puteți trage privind domeniul de sensibilitate al ochiului, cunoscând valoarea acestui maxim de radiație?

**56.** Ştiind că temperatura în zona petelor solare este de aproximativ 4000 K (față de celelalte zone care au aproximativ 6000 K), să se explice de ce apar ca pete întunecate?

**57.** Spectrul continuu al radiației luminoase emise de Steaua Polară are un maxim situat la $\lambda$=350 nm. Presupunând că Steaua Polară emite ca un corp negru, să se determine temperatura la suprafața ei.

**58.** Maximul radiației gazului cosmic se situează la aproximativ 0,1 cm lungime de undă. Să se determine temperatura acestui gaz în ipoteza că emite ca un corp negru.

**59.** Una dintre liniile spectrale de mare importanță în astronomie este aceea a hidrogenului cu lungimea de undă de 21cm. Care este energia fotonului corespunzător?

**77**. Arătați că legea de radiație Rayleigh-Jeans nu este compatibilă cu legea de deplasare Wien.

**108.** În figură se prezintă dependența radiației emise de către o stea, funcție de frecvență. Presupunând că acest spectru de radiație este cel al unui corp negru, să se determine temperatura echivalentă a stelei. (ambele scări sunt logaritmice!)