

# Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра

Асноўнымі а'б'ектамі квантавай фізікі з'яўляюцца *мікраз'явы*. Квантавая фізіка як прадмет падзяляецца на наступныя раздзелы:

1. Цеплавое выпраменьванне.
2. Квантавыя ўласцівасці выпраменьвання.
3. Асновы квантавай механікі.
4. Фізіка атамаў і малекул.
5. Квантавыя з'явы ў цвёрдых целах.
6. Фізіка атамнага ядра.
7. Элементарныя часціцы.
8. Эксперыментальныя метады ядзернай фізікі.

## Литература основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М., Наука, 1987.
2. С.А. Василевский, В.В. Махнач, К.А. Саечников и др. Физика. Ч.2. Минск, БГПУ, 2011.
3. Бондар В.А., Федаркоў Ч.М. Квантавая фізіка. Мн., БГПУ. 1999.
4. Лансбурґ Г.С. Оптика. М. Наука, 1976.
5. Цэдрык М.С. і інш. Зборнік задач па курсе агульнай фізікі. – Мн., Выш. школа, 1993.
6. Бондарь В.А., Ташлыков И.С., Яковенко В.А. и др. Общая физика. Практикум. Мн., Выш. школа, 2008.

## Литература дополнительная

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- М., АСADEМІA, 2003 .
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики Е.2. , Е.3., - М., Высшая школа, 2003.
3. Иродов И. Е. Атомная и ядерная физика. Сборник задач. – Санкт-Петербург. Лань, 2002.
4. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. Е.2.- М., ФИЗМАТЛИТ, 2000.
5. Курс агульнай фізікі. Лабараторны практыкум. – Мазыр, Белы вецер, 2000 г.

# Тэма Цеплавое выпраменьванне.

## ВОПРОСЫ:

- Выпраменьваючая і паглынаючая здольнасці цел.
- Закон Кірхгофа і яго вынікі.
- Выпраменьванне абсалютна чорнага цела. Закон Стэфана-Больцмана.
- Размеркаванне энергіі ў спектры выпраменьвання абсалютна чорнага цела. Закон зрушэння Віна.
- Формула Рэлея-Джынса.
- Фатоны.
- Формула Планка.
- Аптычная піраметрыя.

# 1. Выпраменьваючая і паглынаючая здольнасці цел.

*Выпраменьванне, якое адбываецца пры розных тэмпературах цел, за кошт іх унутранай энергіі, называецца тэмпературным або цеплавым выпраменьваннем.*

Асноўнай характарыстыкай выпраменьвання з'яўляецца тэмпература, якая вызначае хуткасць руху атамаў і малекул, ці ступень нагрэтакці цела.

Другой колькаснай характарыстыкай цеплавога выпраменьвання з'яўляецца велічыня, якая называецца энергетычнай сваяцільнасць і абазначаецца R.

$$R = \Phi / S, \quad \Omega = 4\pi, \quad 0 < \lambda < \infty,$$

{ [ R ] = Вт/м<sup>2</sup>, R(T) – функцыя тэмпературы, }

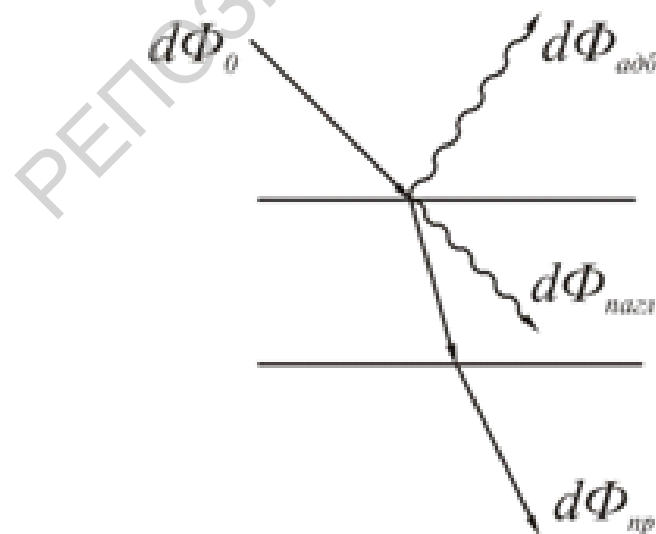
Велічыня, якая вызначае паток энергіі выпраменьвання ў вызначаным дыяпазоне хваль ( $\lambda$ ,  $\lambda+d\lambda$ ), называецца выпраменьвальнай здольнасцю цела.

Абазначаецца  $r(\lambda, T)$ , або  $r(\omega, T)$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}; \quad \omega = 2\pi\nu$$

Пры малым інтэрвале  $d\omega$ :  $dR_{\omega, T} = r_{\omega, T} d\omega$

$$R_T = \int_0^{\infty} dR_{\omega, T} = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega$$



$$d\Phi_0 = d\Phi_{\text{адб}} + d\Phi_{\text{пагл}} + d\Phi_{\text{пр}} \quad \text{делим на } d\Phi_0$$

$$1 = d\Phi_{\text{адб}} / d\Phi_0 + d\Phi_{\text{пагл}} / d\Phi_0 + d\Phi_{\text{пр}} / d\Phi_0 = \rho + \alpha + \beta,$$

дзе

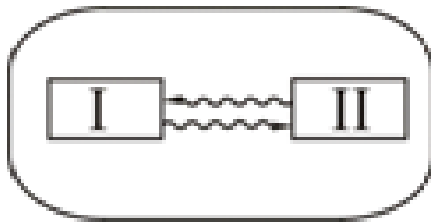
$\rho = d\Phi_{\text{адб}} / d\Phi_0$  - спекральны каэфіцыент адбіцця, які характэрызуе адбівальную здольнасць цела;

$\alpha = d\Phi_{\text{пагл}} / d\Phi_0$  - спекральны каэфіцыент паглынання, які характэрызуе паглынальную здольнасць цела. Паглынальная здольнасць паказвае, якая частка энергіі, што падае на цела гэтым целам паглынаецца:

$\beta = d\Phi_{\text{пр}} / d\Phi_0$  - спекральны каэфіцыент праходжання (тая частка энергіі, якая праходзіць ці выпраменьваецца гэтым целам).

## 2. Закон Кірхгофа і його висновки

(відкритий у 1859 р.)



$$dR \sim d\Phi_{\text{выпр}}, \quad d\Phi_{\text{выпр}} = r_{\omega, T} d\omega$$

$$d\Phi_{\text{пагл}} = \alpha_{\omega, T} d\Phi_0$$

$$d\Phi_{\text{выпр}} = d\Phi_{\text{пагл}}$$

$$r_{\omega, T} d\omega = \alpha_{\omega, T} d\Phi_0 \Rightarrow r_{\omega, T} / \alpha_{\omega, T} = d\Phi_0 / d\omega = f(\omega, T)$$

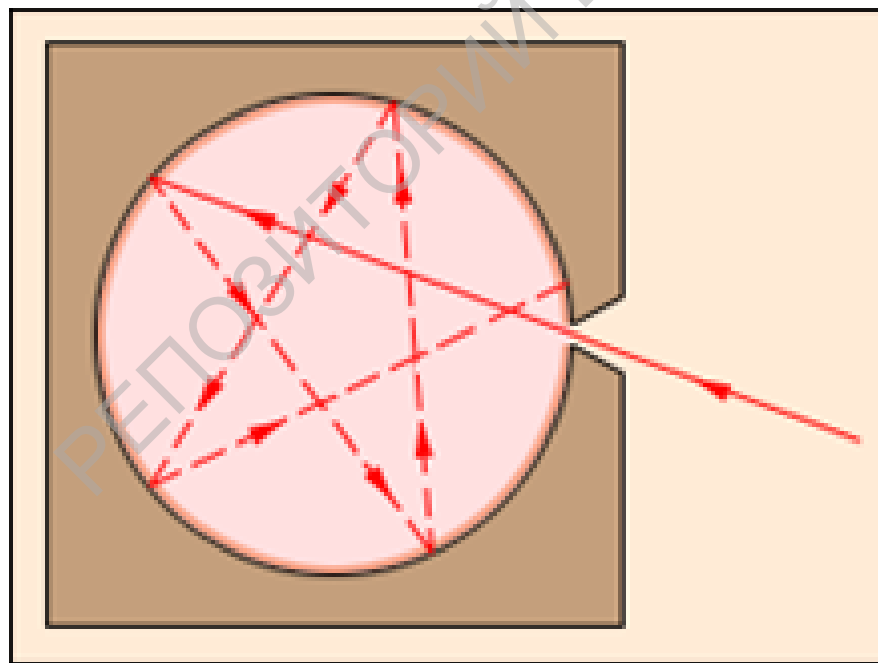
**Закон Кірхгофа:** *відношення випромінювальної здатності будь-якого тіла до його поглинальної здатності не залежить від природи тіла, т.е. є для всіх тіл однією і тією ж універсальною функцією частоти і температури.*



$\underline{r}_{\omega, \Gamma} / \alpha_{\omega, \Gamma} = f(\omega, \Gamma)$ ;  $f(\omega, \Gamma)$  – ф-я Кірхгофа

$\alpha_{\omega, \Gamma} = 1$  - абсалютна чорныя, а целы з  $\alpha_{\omega, \Gamma} < 1$  – шэрыя.

$\alpha_{\omega, \Gamma} = 1$ , то  $f(\omega, \Gamma) = r_{0\omega, \Gamma}$



*Вынікі з закона Кірхгофа:*

1. Целы, якія валодаюць большай выпраменьвальнай здольнасцю, валодаюць большай паглынальнай здольнасцю. Гэта правіла *Прэва* (швейцарскі фізік).

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{\omega, T} \sim \alpha_{\omega, T}$$

2. Найбольшай выпраменьвальнай здольнасцю валодаюць абсалютна чорныя целы

$$\underline{\underline{\Gamma}}_{\omega, T} = \alpha_{\omega, T} f(\omega, T) = r_{0\omega, T};$$

для шэрых цел  $\alpha_{\omega, T} < 1$

3. Спектр выпраменьвання адпавядае спектру паглынання

$$\tau_{\text{выпр}} \sim T = 10^{-15} \text{ с},$$

дзе  $T$  – перыяд уласных ваганняў малекул.

3. Выпраменьванне абсалютна чорнага цела. Закон Стэфана-Больцмана.

$$dR_{\omega, T} = r_{\omega, T} d\omega \Rightarrow R_T = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega$$

Для абсалютна чорнага цела:

$$R_{0T} = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega = \int_0^{\infty} \varphi(\omega, T) d\omega$$

У 1879 годзе аўстрыйскі фізік Стэфан на падставе эксперэментальных даных і законаў класічнай фізікі (тэрмадынамікі) паказал, што  $\varphi(\omega, T) \sim T^4$  для усіх цел.

У 1884 годзе Больцман падцвярдзіў вывады Стэфана толькі для абсалютна чорных цел і атрымаў формулу:

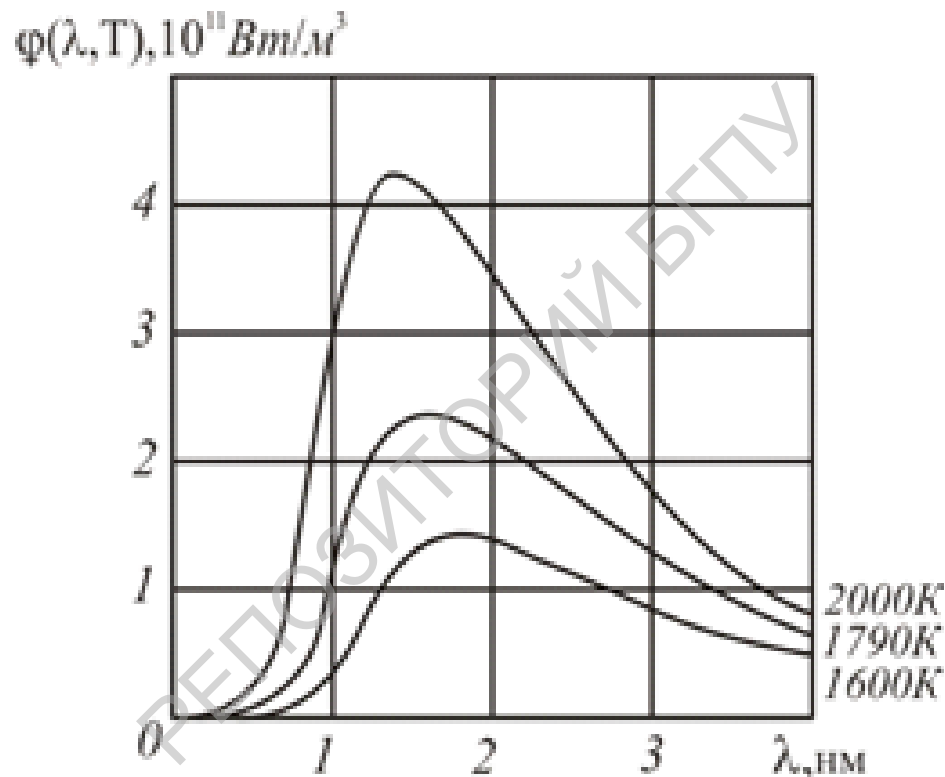
$$R_{0T} = \int_0^{\infty} \varphi(\omega, T) d\omega = \sigma T^4 ;$$

$R_{0T} = \sigma T^4$  – закон Стэфана-Больцмана

*Энергетычная сяцімасць абсалютна чорнага цела прапарцыяна чацвёртай ступені абсалютнай тэмпературы, дзе  $\sigma$  -- пастаянная Стэфана-Больцмана.*

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$$

4. Розмеркаванне энергіі ў спектры выпраменьвання абсалютна чорнага цела. Закон зрушэння Віна.



$$/ \underline{f(\omega, T)} = r_{0\omega, T} /$$

$$\underline{f(\omega, T) = \omega^3 \psi^*(\omega/T)}.$$

дзе  $\psi^*(\omega/T)$  – некаторая функцыя суадносін  $\omega$  к  $T$ .

У длінах хваль функцыя Кірхгофа выглядае наступным чынам:

$$f(\lambda, T) = (1/\lambda^5) \psi(\lambda \cdot T) \quad (*)$$

дзе  $\psi(\lambda \cdot T)$  – некаторая функцыя здабытку  $\lambda \cdot T$ .

$$df(\lambda, T)/d\lambda = 0$$

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{const}$$

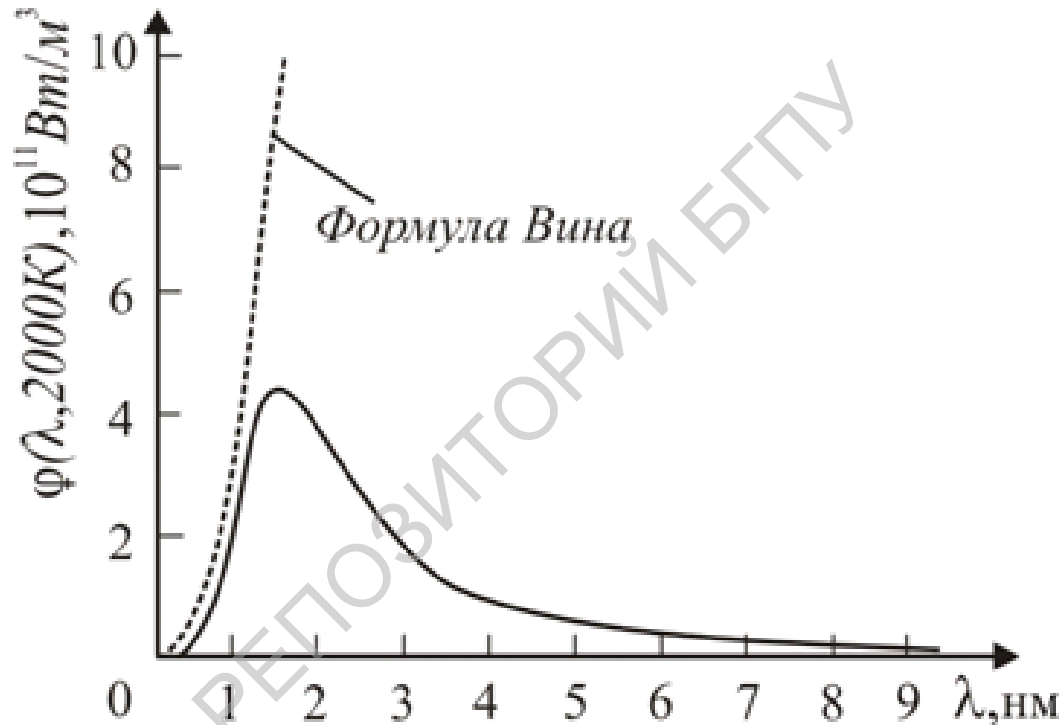
$$\lambda_{\max} = b/T \text{ – закон зрушвання Віна.}$$

*Драўжыня хвалі, якая адпавядае тах-му выпраменьвальнай здольнасці абсалютна чорнага цела, адваротна прапарцыйна абсалютнай тэмпературы цела.*

*( $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – пастаянная Віна).*

## 5. Формула Рэлея-Джынса

$$f(\lambda, T) = (1/\lambda^5) \psi(\lambda \cdot T) \Rightarrow f(\lambda, T) = (\alpha/\lambda^5) e^{-(\beta/\lambda T)},$$

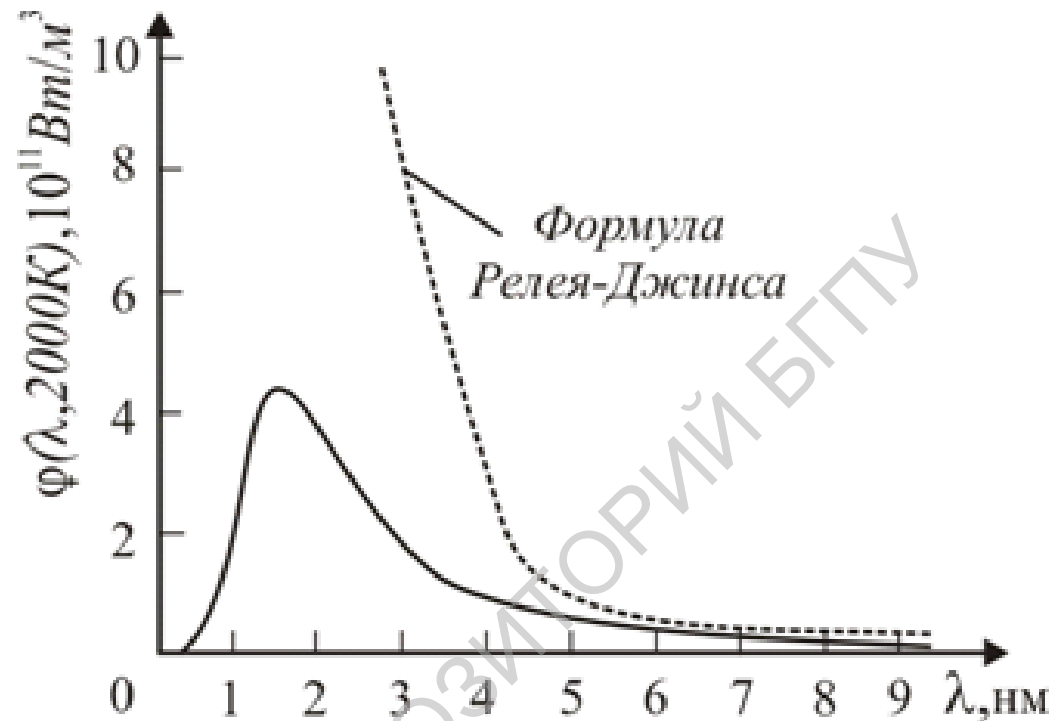


$$(1/2kT)$$

$$\psi(\lambda \cdot T) = 2\pi c \lambda \cdot kT,$$

дзе  $k$  – пастаянная Больцмана;  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К,  $R$  – молярная газовая пастаянная,  $c$  – хуткасць святла.

$f(\lambda, T) = (2\pi c / \lambda^4) kT$  – формула Рэлея-Джынса.



$$R = \int_0^{\infty} \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT d\lambda = 2\pi c kT \int_0^{\infty} \frac{d\lambda}{\lambda^4} \rightarrow \infty$$

Такім чынам,  $R \rightarrow \infty$  пры памяньшэнні  $\lambda$ . Гэтая з’ява атрымала назву “ультрафіялетавай катастрофы”.



## 6. Фотони

$$\epsilon = h\nu, \quad \epsilon = \hbar\omega, \quad \lambda = c/\nu, \quad \epsilon = (hc)/\lambda,$$

дзе  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – пастаянная Планка,  $\omega = 2\pi\nu$  –  
цыклічная частата,  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с –  
прыведзёная пастаянная Планка.

$$\epsilon = mc^2,$$

адсюль

$$m = \epsilon/c^2 = (h\nu)/c^2,$$

Імпульс цела

$$P = mv,$$

для кванта

$$v = c \Rightarrow P = mc = (h\nu c)/c^2 = (h\nu)/c,$$

1.  $m^0_\phi = 0$ ;
2. у вакууме  $v_\phi = c$ ; у асяроддзі  $v_\phi = c/n$ ,  
дзе  $n$  – паказчык прыламлэння  
асяроддзя.

## 7. Формула Планка

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{hc / \lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Формула Рэля-Джынса:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^4} kT,$$

дзе  $kT$  – сярэдняя энергія цеплавога хаатычнага руху атамаў.

$$\bar{\varepsilon} \approx kT.$$

Такім чынам:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} - \text{формула Планка.}$$

1. *Формула Віна:*  $f(\lambda, T) = (\alpha/\lambda^5) e^{-(\beta/\lambda T)}$ .

$$(\hbar c)/\lambda \gg kT, \text{ і } e^{(\hbar c/\lambda kT)} \gg 1,$$

$$f(\lambda, T) = (2\pi\hbar c^2/\lambda^5) \cdot e^{-\hbar c/\lambda kT}.$$

Калі параўнаем з Вінам то  $\alpha = 2\pi\hbar c^2$ ;  $\beta = \hbar c/k$ .

## 2. Закон зрушвання Віна.

$$d f(\lambda, T) / d\lambda = 0$$

$$df(\lambda, T) / d\lambda = d((2\pi h c^2 / \lambda^5) \cdot (e^{hc/\lambda k T} - 1)^{-1}) / d\lambda =$$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha = 2\pi h c^2 \\ \beta = hc / k \end{array} \right| = d(\alpha / \lambda^5) \cdot (e^{\beta/\lambda T} - 1)^{-1} / d\lambda =$$

$$= -(5\alpha/\lambda^6) \cdot (e^{\beta/\lambda T} - 1)^{-1} + (\alpha/\lambda^5) \cdot (-(e^{\beta/\lambda T} - 1)^{-2}) \cdot$$

$$e^{\beta/\lambda T} \left( -\beta/(\lambda^2 T) \right) = \frac{\alpha \left( \frac{\beta}{\lambda T} e^{\beta/\lambda T} - 5(e^{\beta/\lambda T} - 1) \right)}{\lambda^6 (e^{\beta/\lambda T} - 1)^2} = 0$$

$$\frac{\beta}{\lambda_{\max} T} e^{\beta/(\lambda_{\max} T)} - 5(e^{\beta/(\lambda_{\max} T)} - 1) = 0$$

$$\left| \frac{\beta}{\lambda_{\max} T} = x \right|.$$

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0.$$

$$xe^x - 5e^x \approx 0,$$

адкуль  $x \approx 5$ .

Другое приближенне атрымаем з раўнання

$$xe^5 - 5(e^5 - 1) = 0;$$

$$x = 4,965.$$

$$\beta / (\lambda_{\max} T) = 4,965 \Rightarrow \lambda_{\max} T = \beta / 4,965 = b$$

$$\lambda_{\max} = b / T$$

3. Формула Рэлея-Джынса виконвається для великих  $\lambda$ , г. зн.

$$hc/\lambda \ll kT \Rightarrow e^{hc/\lambda kT} \approx 1 + hc/\lambda kT$$

Підставім у формулу Планка:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{1 + \frac{hc}{\lambda kT} - 1} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

4. Атрымаем формулу Стэфана-Больцмана  
 $R = \sigma T^4$

Па адрэджаленню:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} \left( \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1)^{-1} \right) d\lambda =$$



$$\begin{aligned}
 \left| \begin{array}{l} z = \frac{\lambda kT}{hc} \\ \lambda = \frac{hc}{kT} z, d\lambda = \frac{hc}{kT} dz \end{array} \right| &= \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\left(\frac{hc}{kT} z\right)^5} \frac{1}{e^{1/z} - 1} \frac{hc}{kT} dz = \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2 K^4 T^4}{h^4 c^4} \frac{1}{z^5 (e^{1/z} - 1)} dz =
 \end{aligned}$$

$$= \frac{2\pi k^4 T^4}{h^3 c^2} \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4;$$

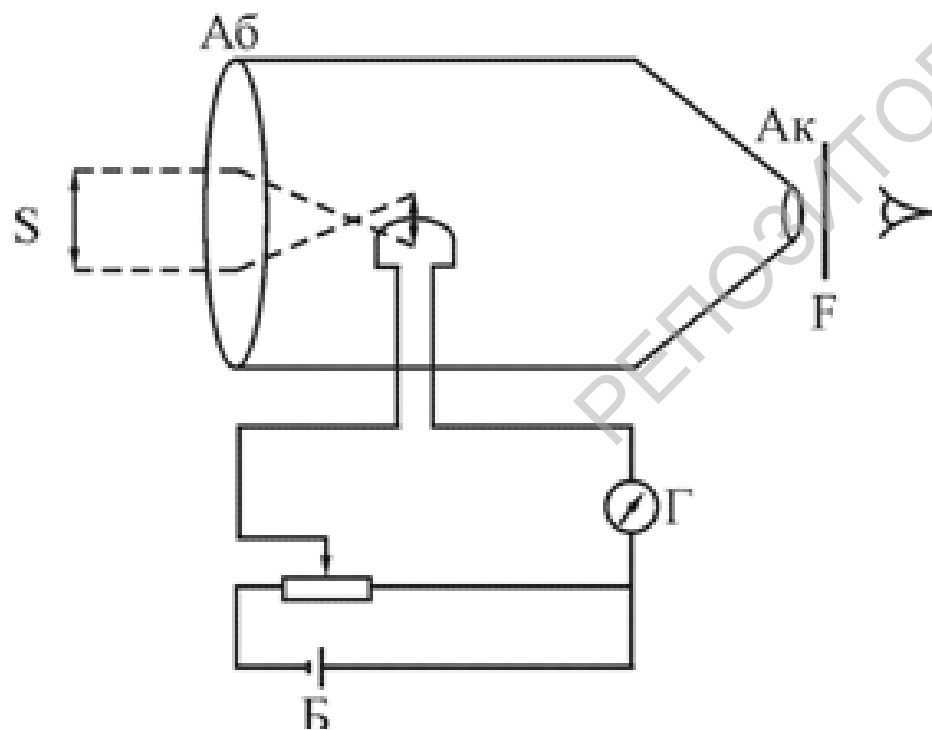
параўнаем з  $R = \sigma T^4$ ;

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт/м}^2 \text{К}^4$$

## 8. Апытчая параметрыя

1. Яркая параметр, ці параметр з ніццю, якая знікае.

$S$  – істочнік света,  $F$  – светофільтр (660 нм),  $L$  – лампа нагрэва,  $A_k$  – окуляр.

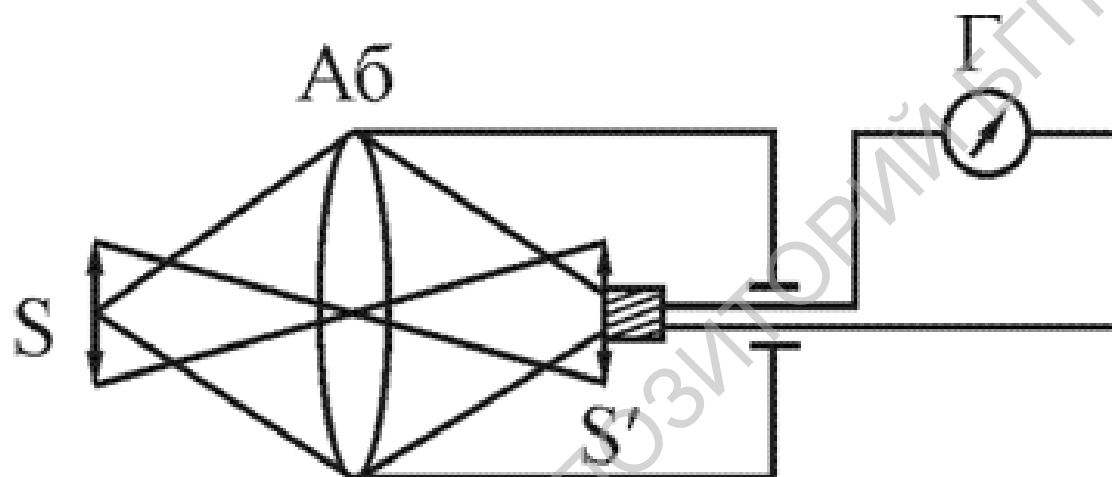


Спачатку дабіваліся таго, каб яркасць лампавай ніці = яркасці крыніцы. Гэтую тэмпературу называюць яркаснай тэмпературай  $T_j$ .

$$T_j \approx T_{\text{сапраўднай}}$$

## 2. Радыяцыйны піраметр

Рэгіструе поўнае выпраменьванне цела.  
Тэмпература награвання пласцінкі  $S'$  залежыць ад  
энергіі выпраменьвання цела  $S$ ;



$$R = \sigma T^4 \text{ – Стэф.-Больц.}$$

$S'$  – прыёмнік выпраменьвання.

Гальванометр загадзя праград. у шкале тэмператур  
абсалютна чорнага тела.

З дапамогай параметра вымяраецца радыяцыйная тэмпература:  $T_p$  – такая тэмпература абсалютна чорнага цела, пры якой яго інтэгральная выпраменьвальная здольнасць  $R^0_\tau(T_p)$  роўна інтэгральнай выпраменьвальнай здольнасці цела  $R_T(T)$ ; дзе  $T$  – сапраўдная тэмпература цела.

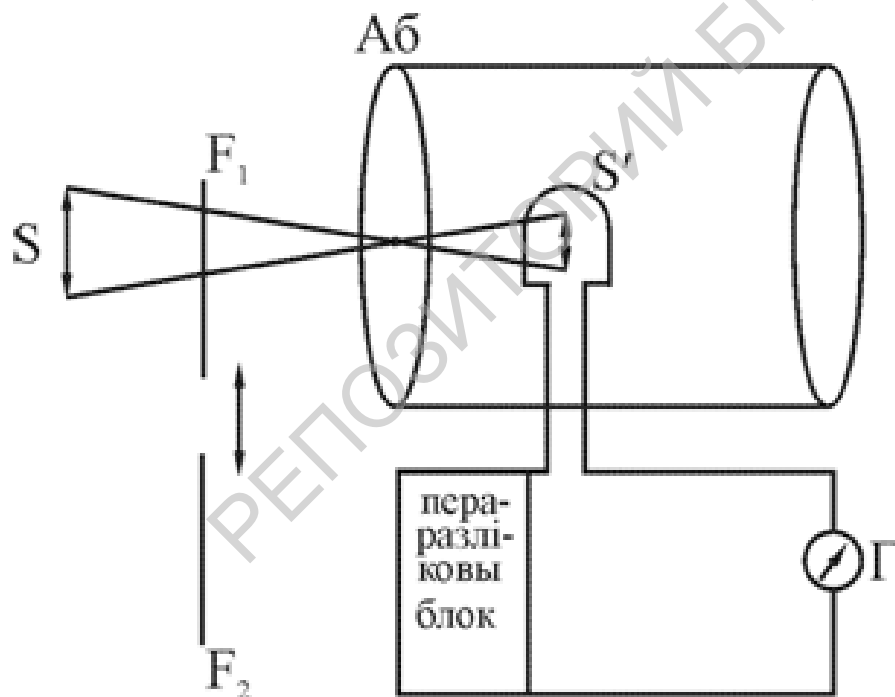
$$T_{\text{сапр.}} \sim T_p$$
$$T_{\text{сапр.}} = T_p / \sqrt[4]{\beta_\tau}$$

дзе  $\beta_\tau$  – поўны каэфіцыент паглынання цела, які  $< 1$  заўсёды, таму

$$T_p < T_{\text{сапр.}}$$

### 3. Параметр для вымярэння колеравай тэмпературы.

Применяется для тел, которые не обладают селективной излучением по спектру.



$$F_1 = 470 \text{ нм} \quad F_2 = 660 \text{ нм}$$

Даследуюць размеркаванне энергіі выпраменьвання ў спектры абсалютна чорнага цела, вызначчаюць яго тэмпературу па закону Віна.

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$$

$$\beta_{\lambda_1 T} = \frac{r_{\lambda_1} T}{r_{\lambda_1, T_K}}, \quad \beta_{\lambda_2 T} = \frac{r_{\lambda_2} T}{r_{\lambda_2, T_K}};$$

$$\frac{r_{\lambda_1} T}{r_{\lambda_2} T} = \frac{r_{\lambda_1, T_K}}{r_{\lambda_2, T_K}};$$