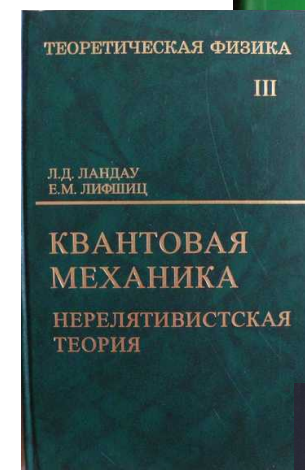
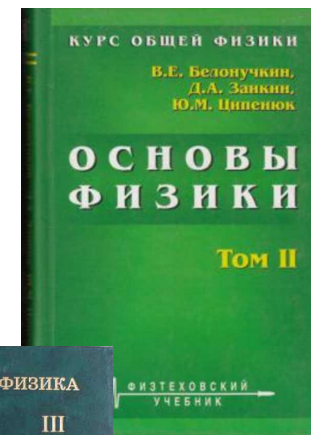


2022-2023 учебный год

Общая физика 5: Квантовая физика

Какого цвета учебник?

- Основы физики. Курс общей физики. Учебник. В 2т. Т. 2. Квантовая и статистическая физика. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М
- Курс теоретической физики, Том 3, Квантовая механика, Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.
- Частицы и атомные ядра, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин



План курса 2022-2023

1. (5.09) Введение. Равновесное излучение АЧТ.
2. (12.09) Кванты света и волны материи.
3. (19.09) Основы формализма квантовой механики.
4. (26.09) Квантовые ямы и барьеры. Туннелирование.
5. (3.10) Момент импульса. Движение в центральном поле.
6. (10.10) Водородоподобный атом. Спин.
7. (17.10) Неразличимость частиц. Сложный атом.
8. (24.10) Эффект Зеемана.
9. (31.10) Спонтанные и индуцированные переходы. Лазер.
10. (7.11) Ядерные модели
11. (14.11) Радиоактивность, ядерные реакции.
12. (21.11) Фундаментальные взаимодействия и частицы 1.
13. (28.11) Фундаментальные взаимодействия и частицы 2.
14. (5.12) Красивые эксперименты ядерной физики.

I. Немного истории и философии...

«Здание» физики

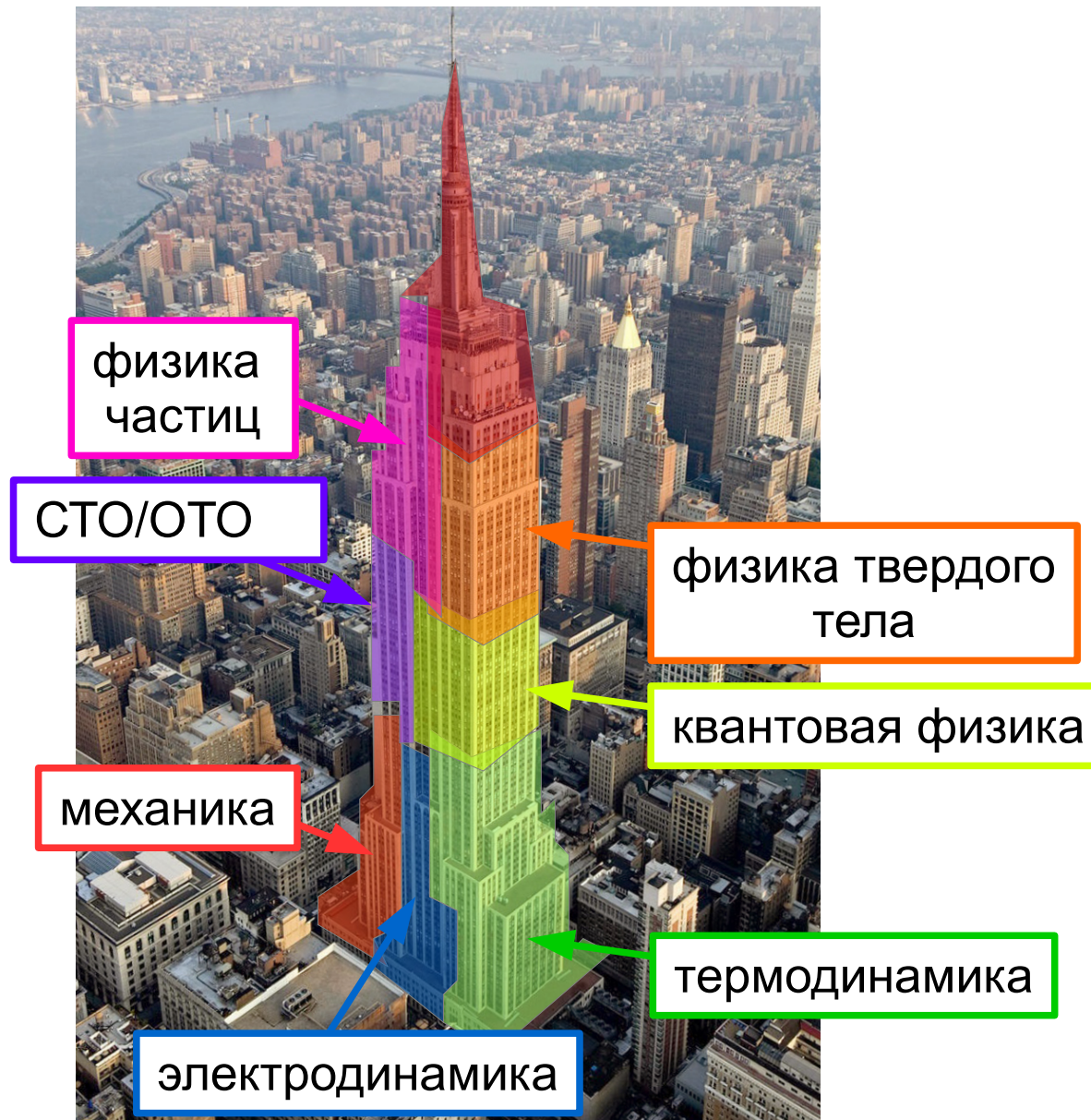


https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Empire_State_Building_%28aerial_view%29.jpg

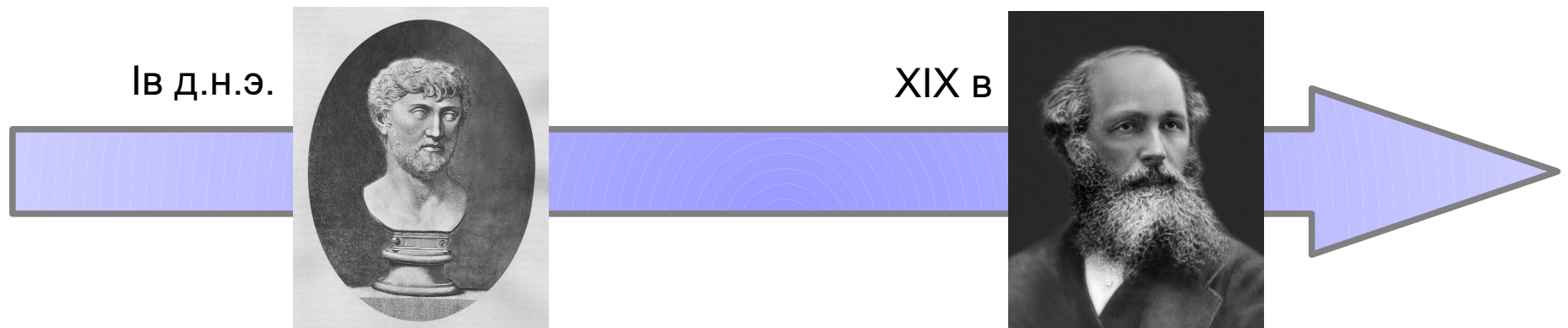
«Здание» физики



«Здание» физики



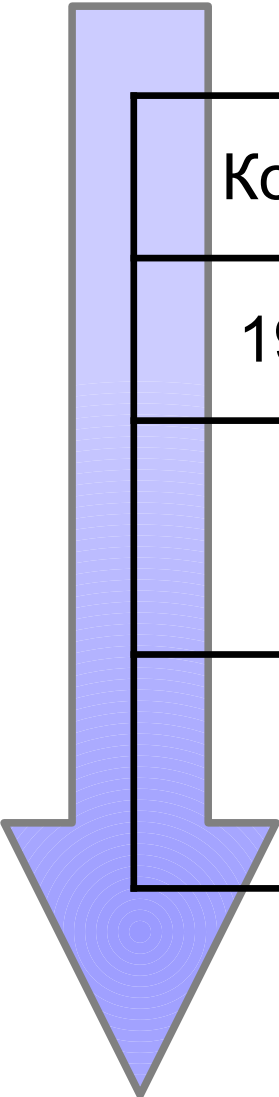
Теория электричества



Мне остается сказать,
по какому закону
природы
То происходит, что
камень притягивать
может железо,

$$\begin{aligned}\operatorname{div} \vec{D} &= 4\pi\rho \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$

Становление квантовой физики

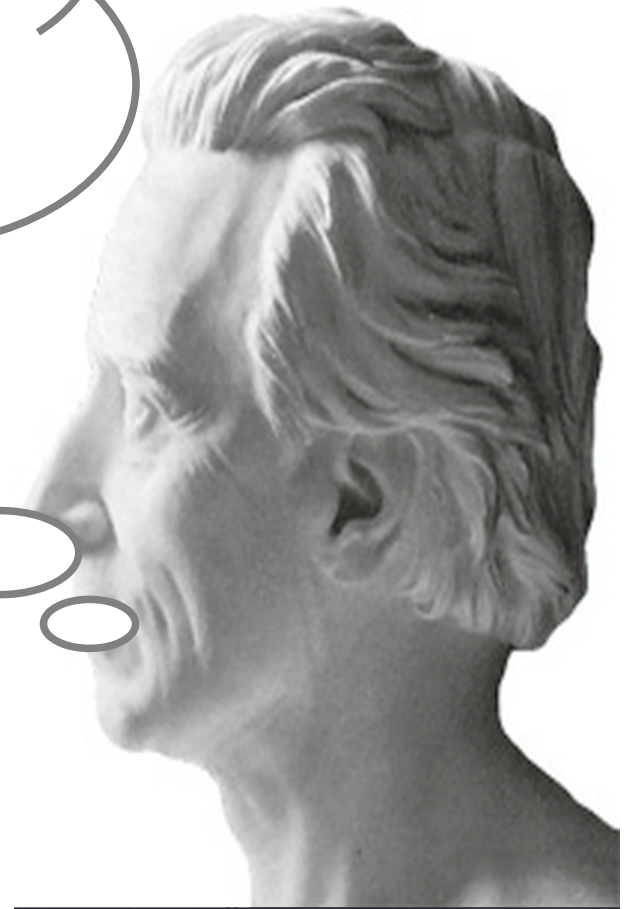


Конец XIX в.	накопление данных, не описываемых имеющимися теориями
1900...1910	возникновение гипотез (гипотеза Планка, атом Бора)
1920-е	формализация гипотез в последовательную теорию (Гейзенберг, Шредингер)
1930-е	определение условий (ограничений), при которых классическая физика описывает природу

К истокам...

*«В этой области знаний все уже
открыто, осталось только уточнить
кое-какие детали»*

проф. фон Жолли студенту Макс Планку,
Мюнхенский университет, ~1875



К истокам...

Нерешенные проблемы классической физики на рубеже XIX-XX веков

1. Строение атома (существование материи).
2. Линейчатые спектры испускания и поглощения атомов и молекул.
3. Фотоэффект.
4. Излучение чёрного тела.
5. Теплоёмкость твёрдых тел и газов при низкой температуре.

Проблема 1.

Существование материи (атомов).

1897 Дж.Дж.Томсон: обнаружение субатомной заряженной частицы – электрона.



National Electronics Museum
<https://www.youtube.com/watch?v=WT2B4dq6hjk>

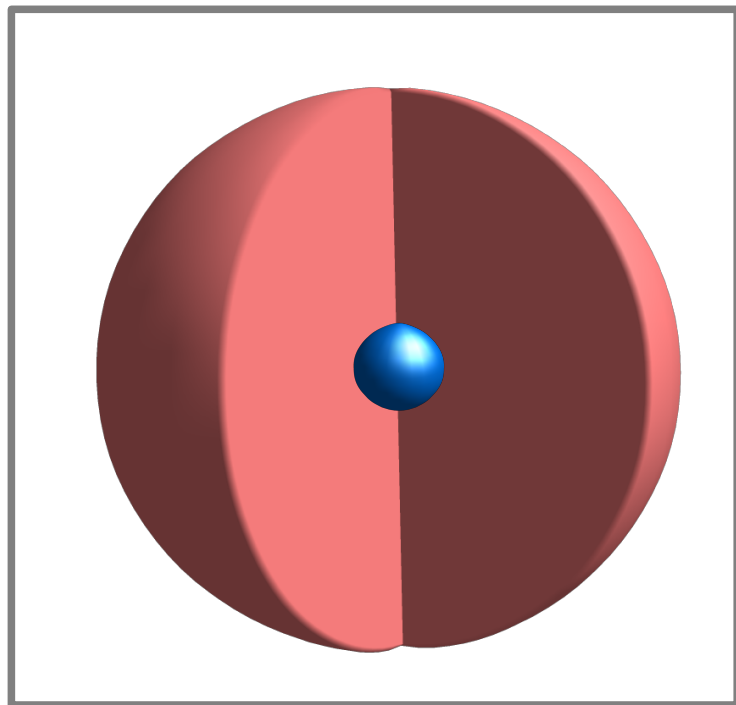
Проблема 1.

Существование материи (атомов).



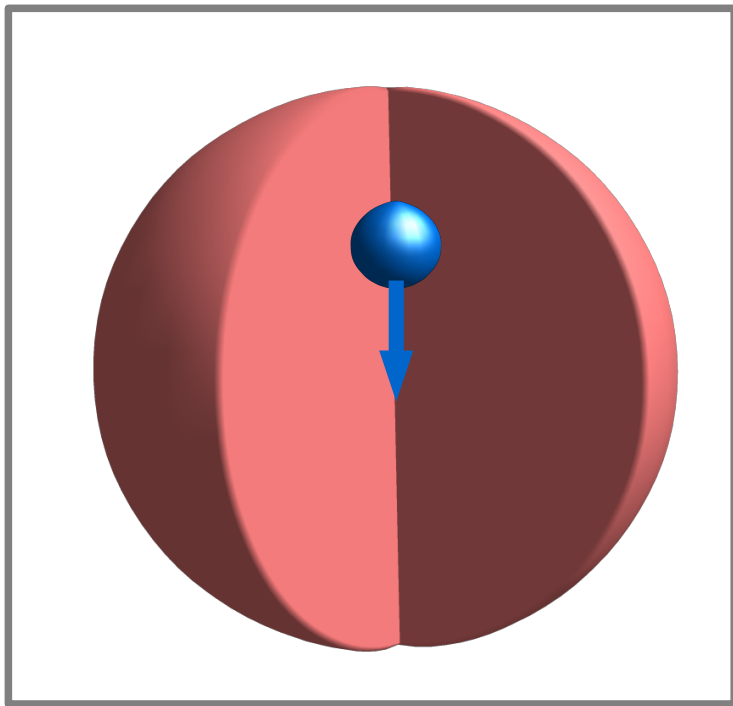
Проблема 1.

Существование материи (атомов).



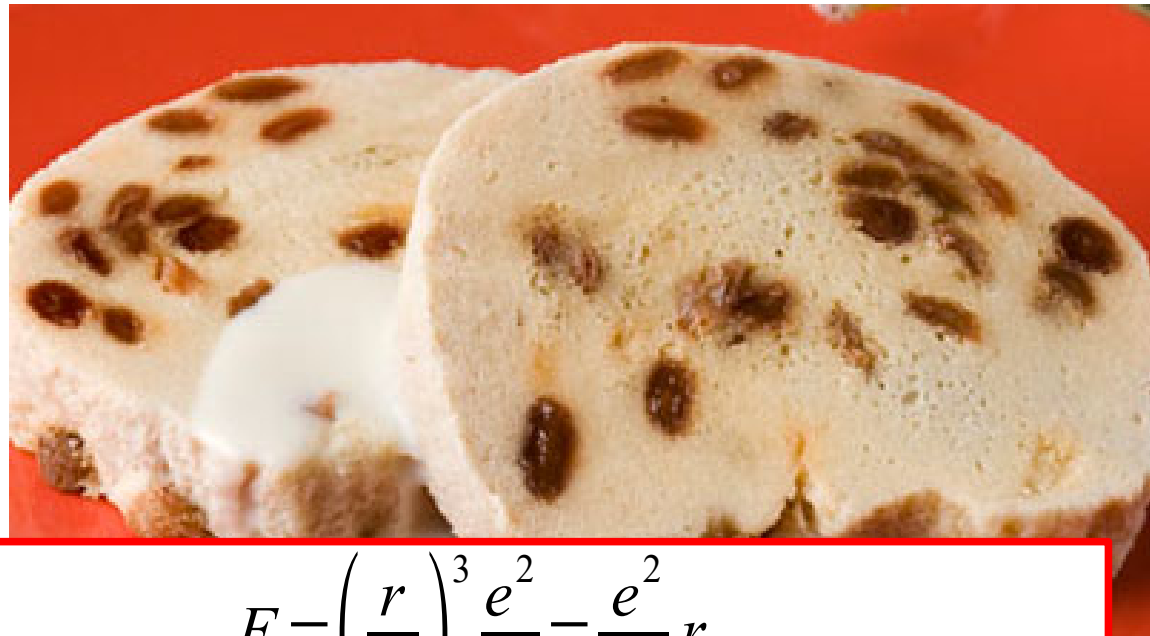
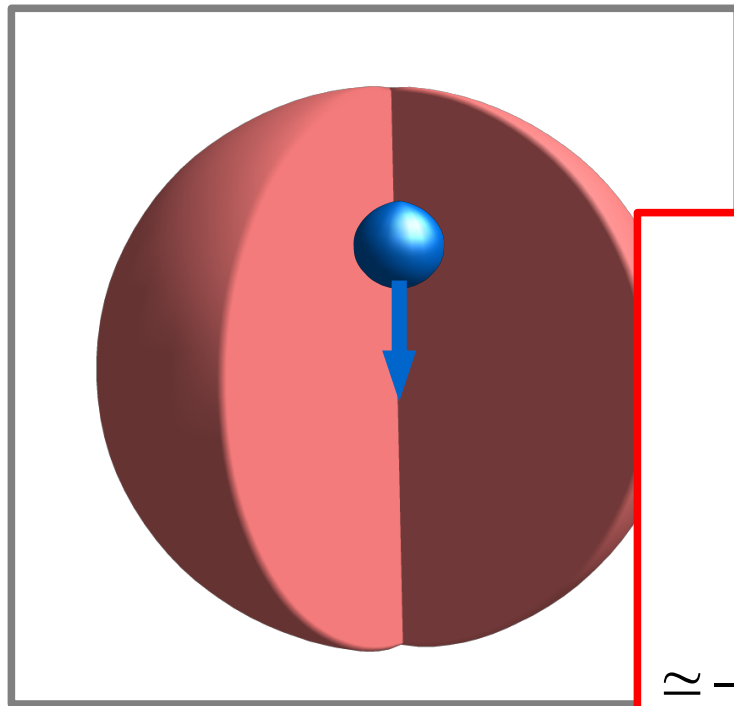
Проблема 1.

Существование материи (атомов).



Проблема 1.

Существование материи (атомов).



$$F = \left(\frac{r}{R} \right)^3 \frac{e^2}{r^2} = \frac{e^2}{R^3} r$$

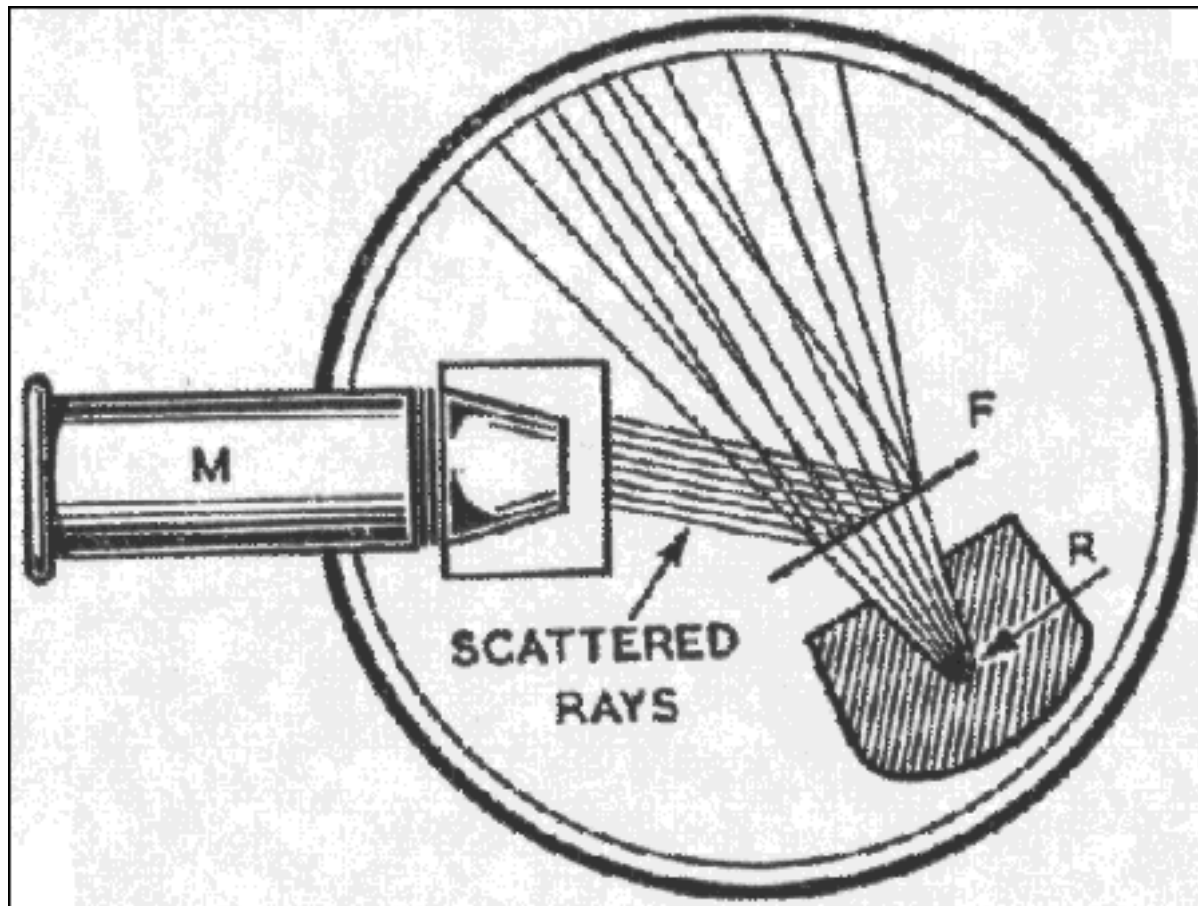
$$\omega = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} = \frac{e}{\sqrt{m R^3}} \simeq$$

$$\simeq \frac{5 \times 10^{-10}}{\sqrt{10^{-27} \times 10^{-24}}} \text{сек}^{-1} \simeq 10^{16} \text{сек}^{-1} \quad (\lambda \simeq 100 \text{ нм})$$

Проблема 1.

Существование материи (атомов).

1911 Опыты Гейгера-Марсдена («опыты Резерфорда»)

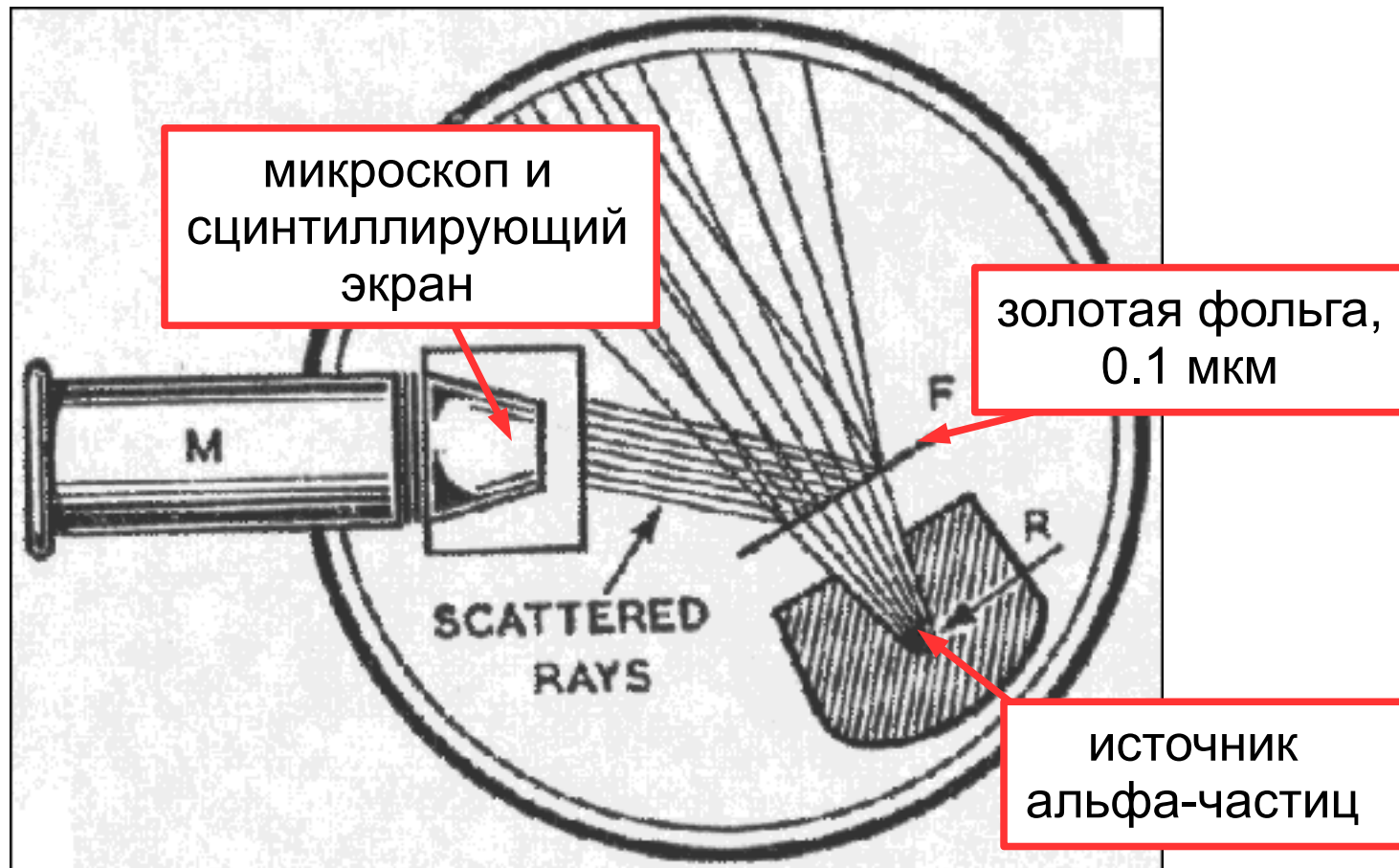


Разновидность опыта Резерфорда R - источник радиации, F - фольга, M - микроскоп с сцинтиллирующим экраном. chemteam.info, Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, 2016, <http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>

Проблема 1.

Существование материи (атомов).

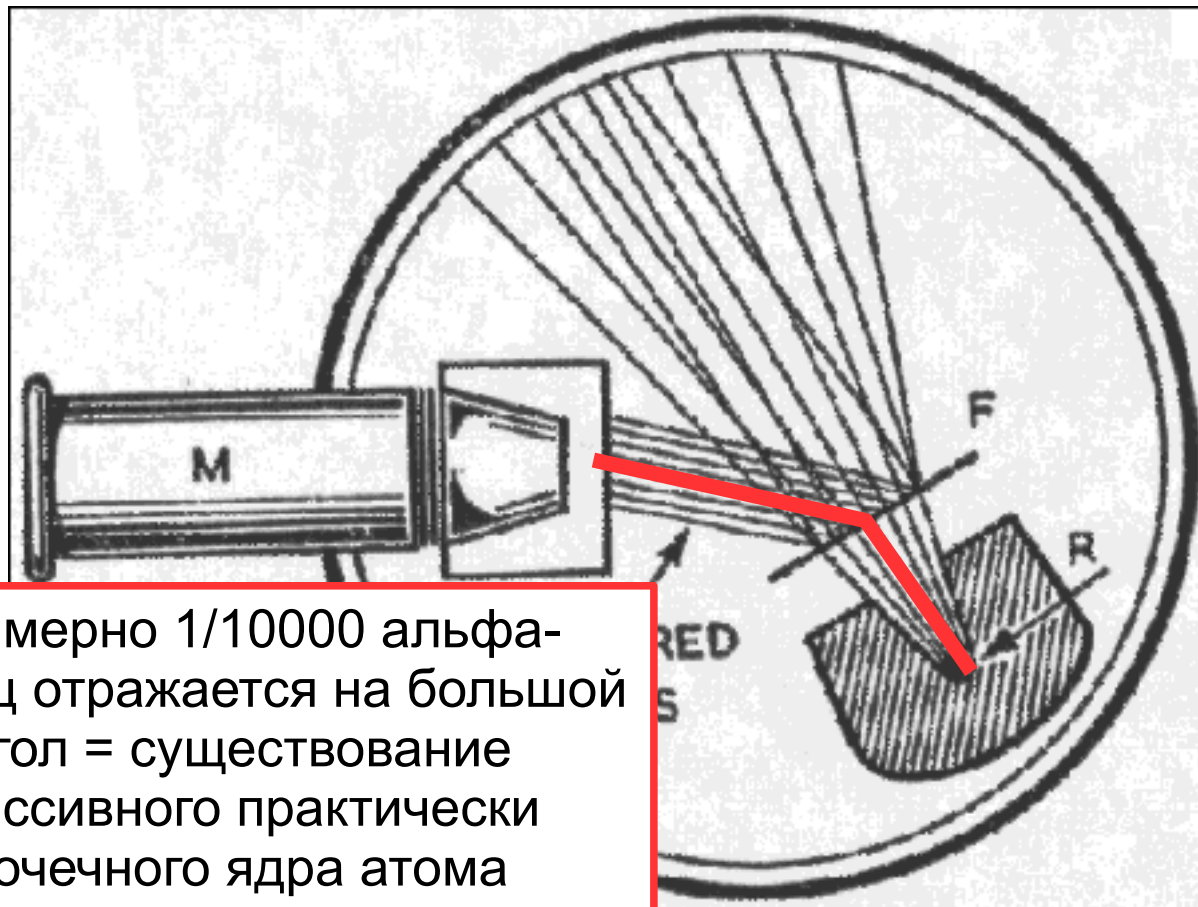
1911 Опыты Гейгера-Марсдена («опыты Резерфорда»)



Проблема 1.

Существование материи (атомов).

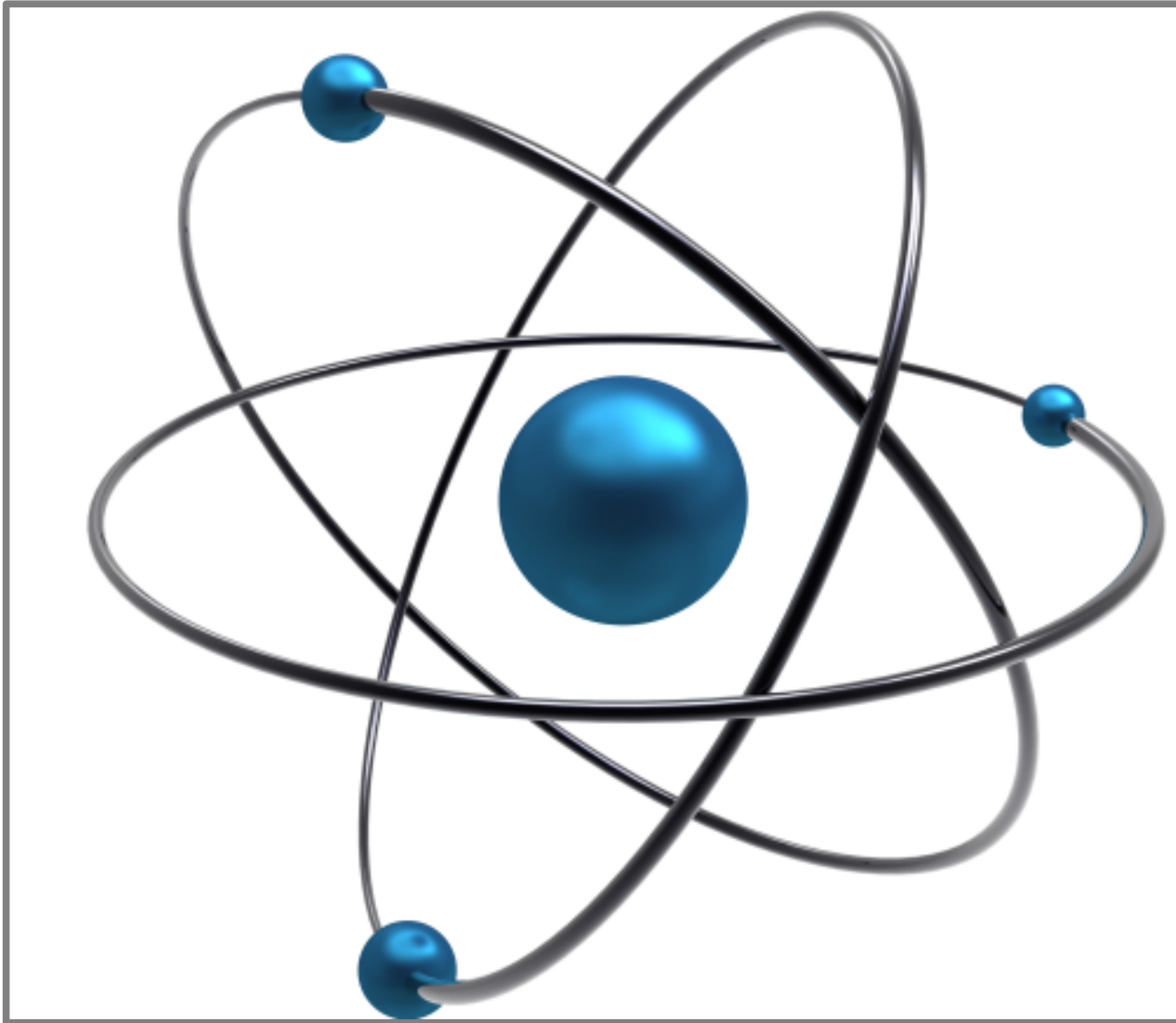
1911 Опыты Гейгера-Марсдена («опыты Резерфорда»)



примерно 1/10000 альфа-частиц отражается на большой угол = существование массивного практически точечного ядра атома

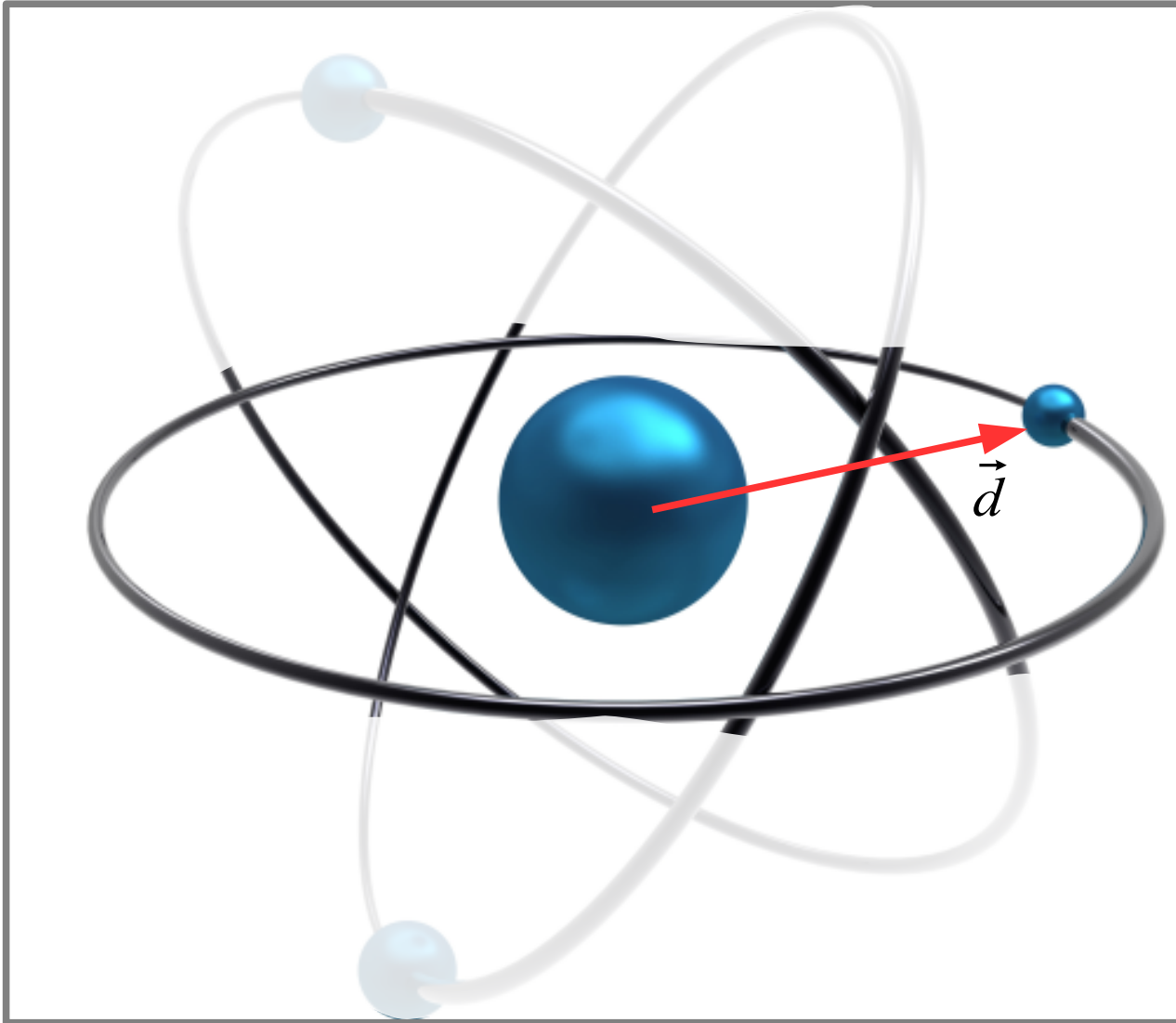
Проблема 1.

Существование материи (атомов).



Проблема 1.

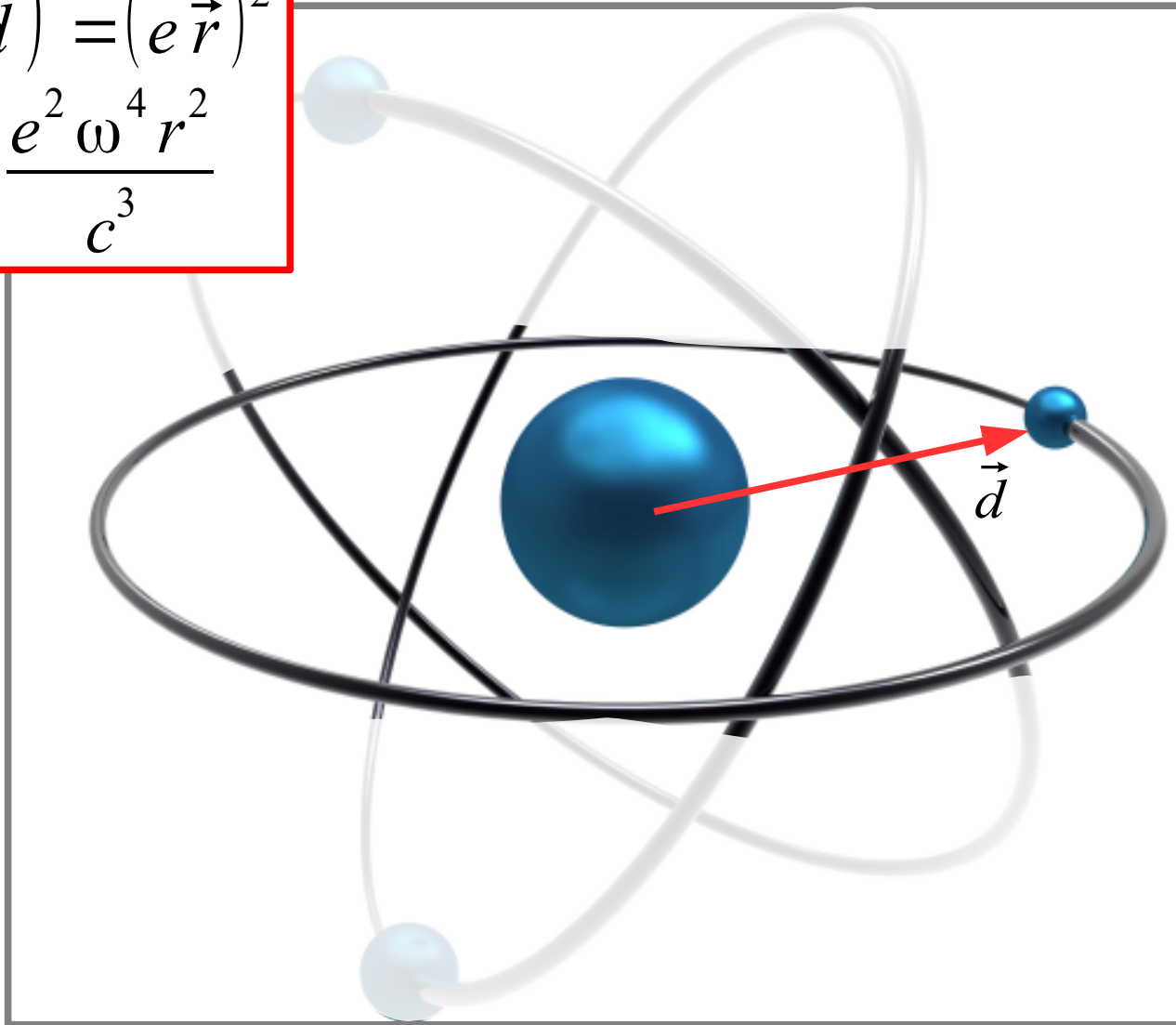
Существование материи (атомов).



Проблема 1.

Существование материи (атомов).

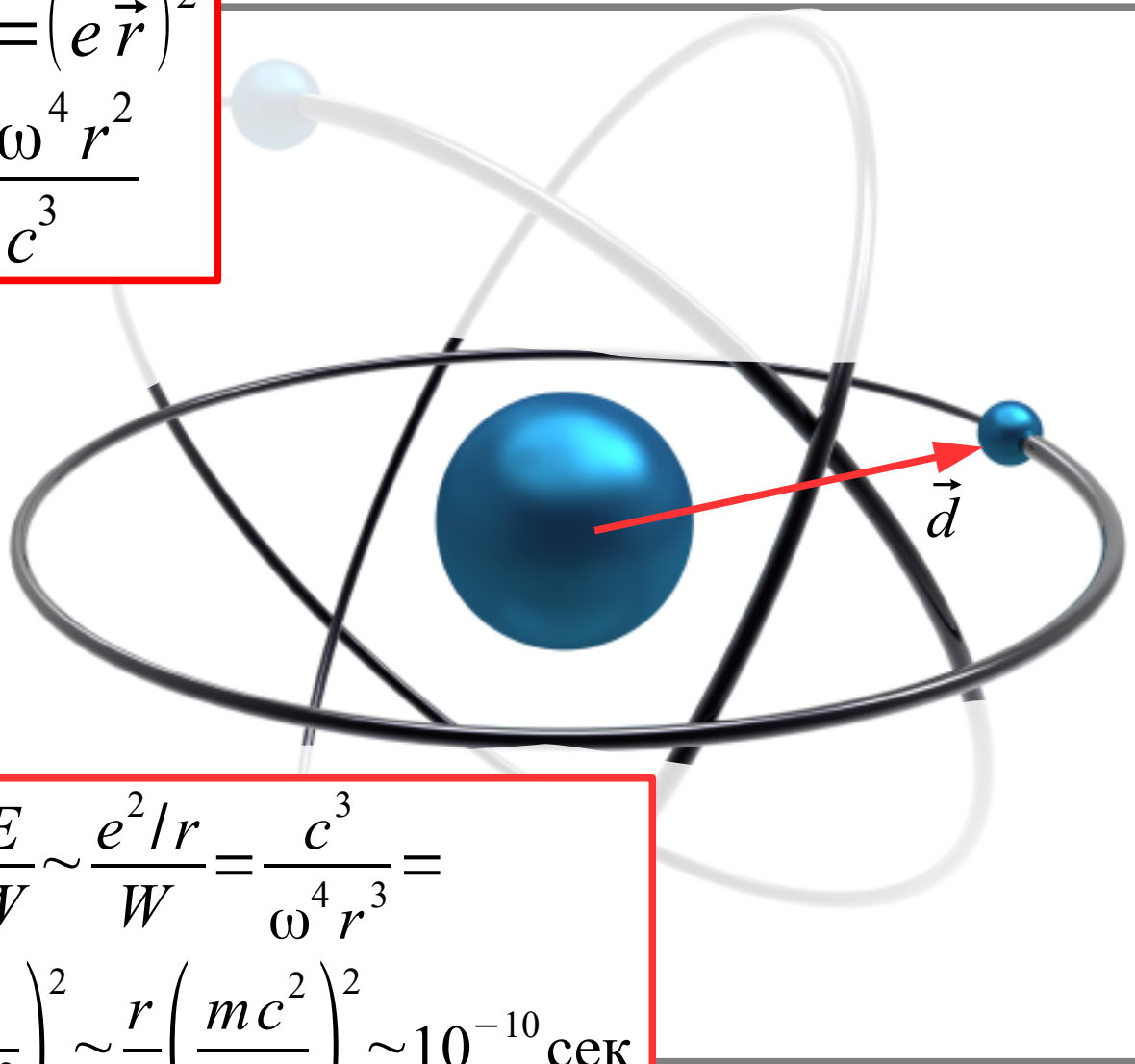
$$W \propto (\ddot{\vec{d}})^2 = (e \ddot{\vec{r}})^2$$
$$W \simeq \frac{e^2 \omega^4 r^2}{c^3}$$



Проблема 1.

Существование материи (атомов).

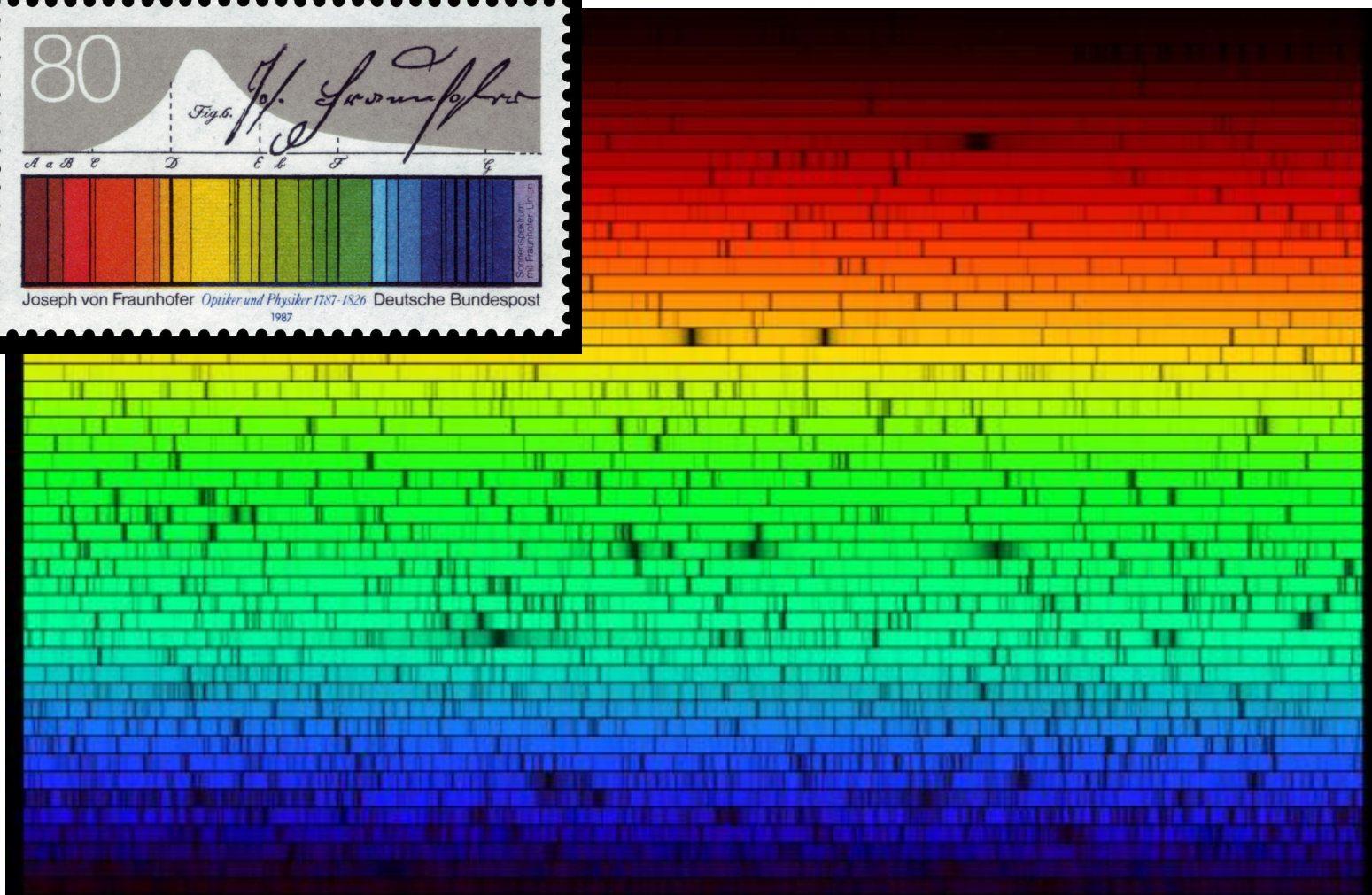
$$W \propto (\ddot{\vec{d}})^2 = (e \ddot{\vec{r}})^2$$
$$W \simeq \frac{e^2 \omega^4 r^2}{c^3}$$



$$t \sim \frac{E}{W} \sim \frac{e^2 / r}{W} = \frac{c^3}{\omega^4 r^3} =$$
$$= \frac{r}{c} \left(\frac{m c^2}{m \omega^2 r^2} \right)^2 \sim \frac{r}{c} \left(\frac{m c^2}{E} \right)^2 \sim 10^{-10} \text{сек}$$

Проблема 2.

Линейчатые спектры поглощения и испускания.

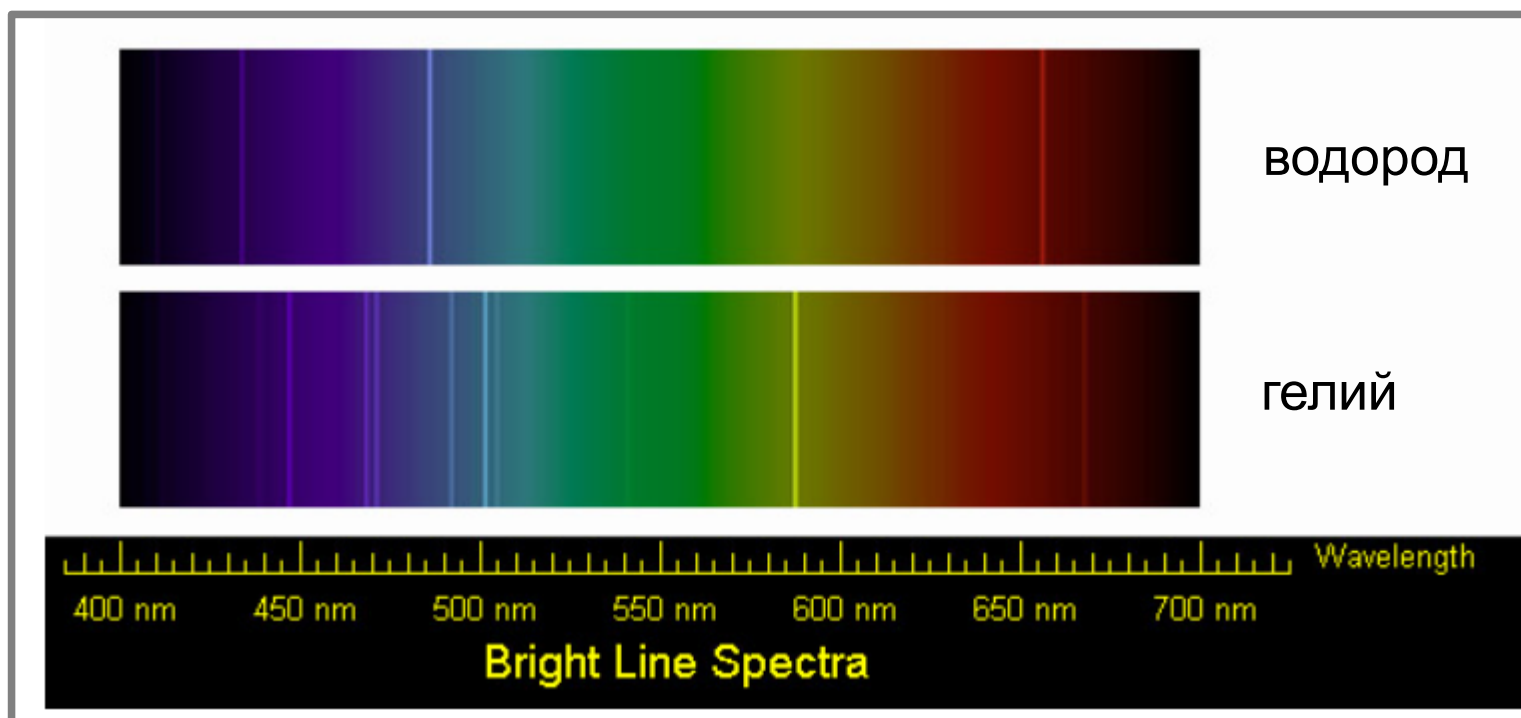


Основной рисунок — спектр Солнца с линиями Фраунгофера. С сайта NASA, Astronomy Picture of the Day (2000 August 15): The Solar Spectrum , 2017, <https://apod.nasa.gov/apod/ap000815.html>.

На вставке — памятная марка ФРГ (1987 год), воспроизводящая оригинальный рисунок Фраунгофера. С сайта wikipedia.org, Joseph von Fraunhofer, 2017, https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer

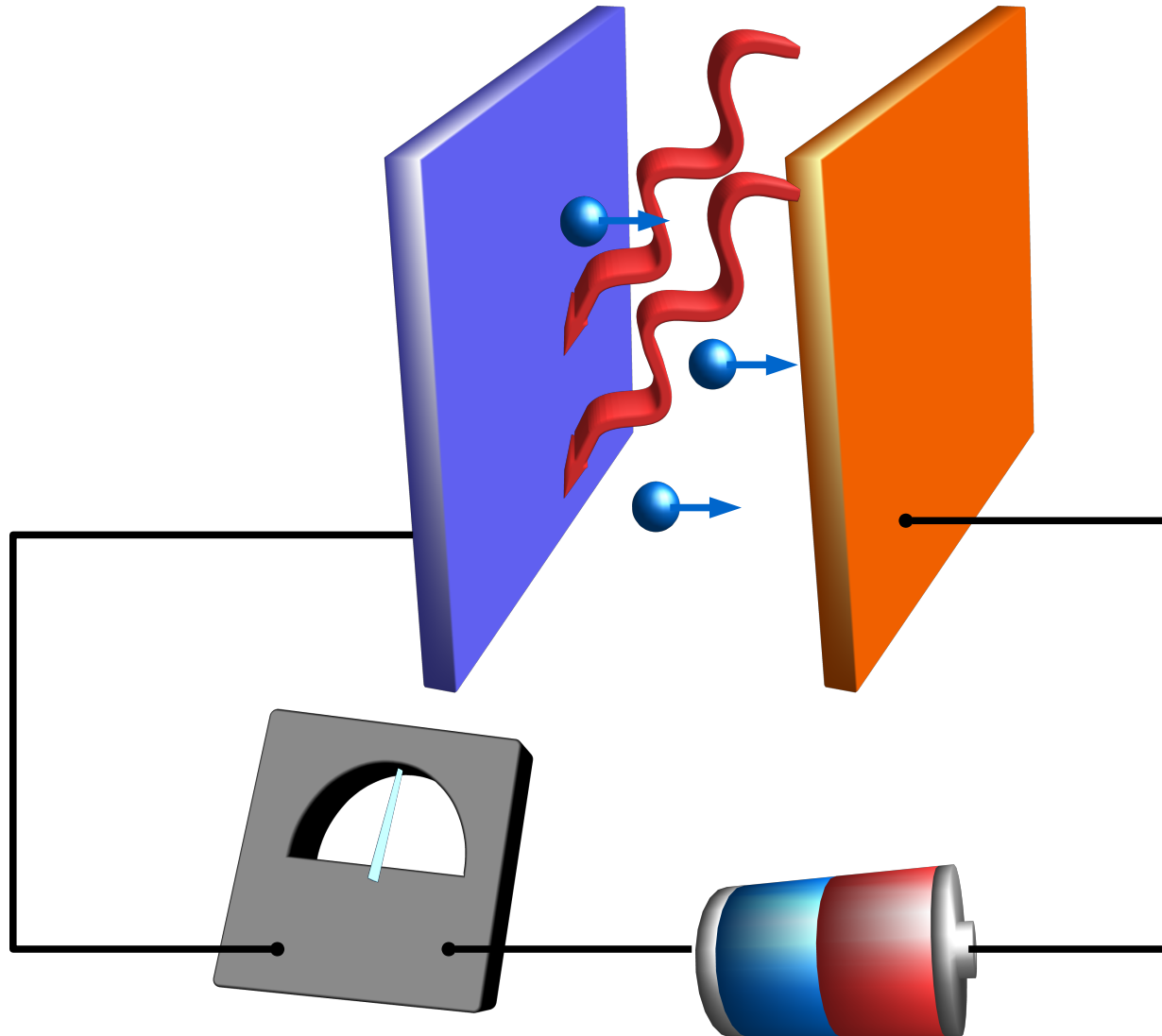
Проблема 2.

Линейчатые спектры поглощения и испускания.

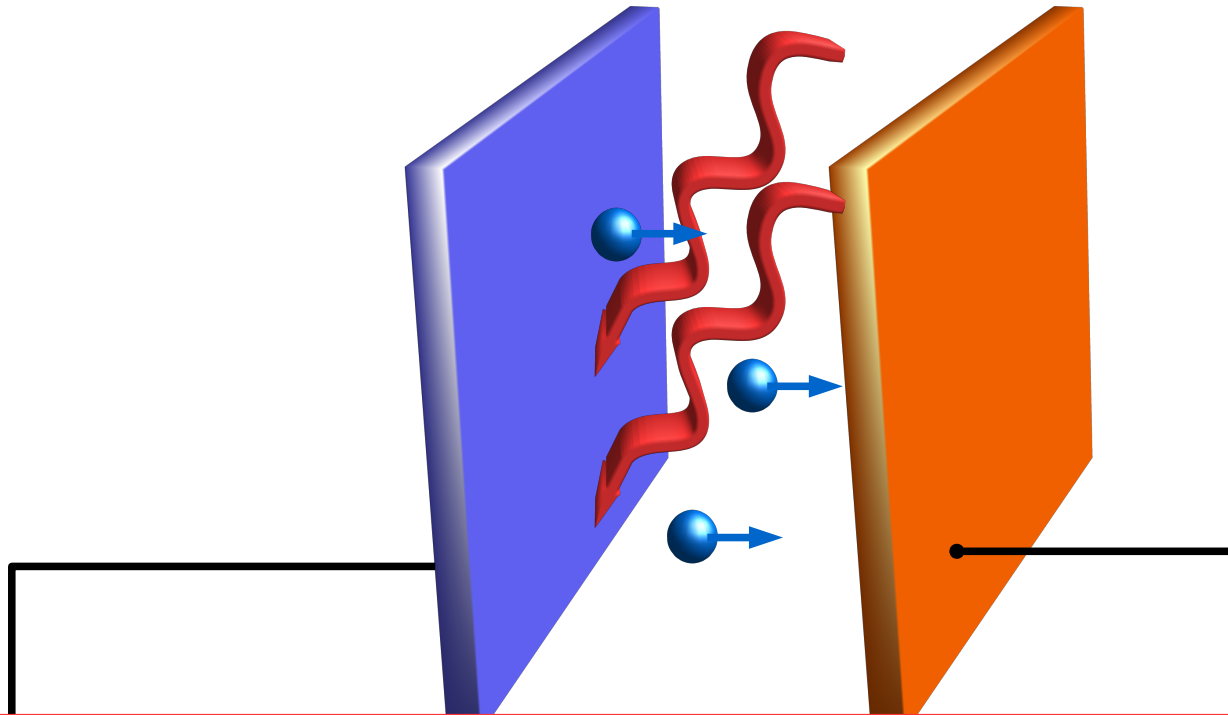


$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Проблема 3. Фотоэффект.



Проблема 3. Фотоэффект.

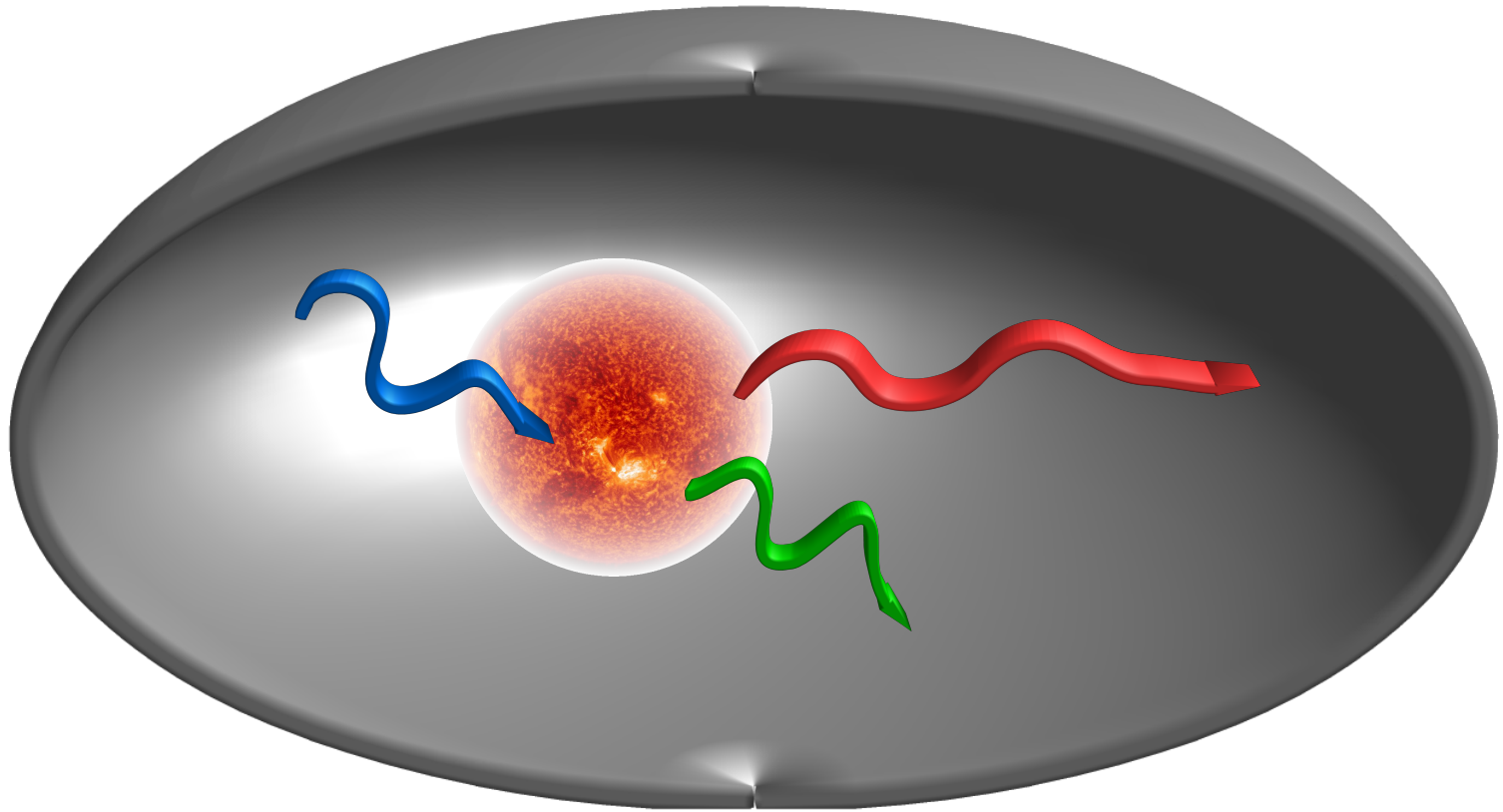


- Красная граница фотоэффекта,
- независимость макс. энергии электрона от интенсивности облучения,
- мгновенность фотоэффекта

не объясняются классической теорией.

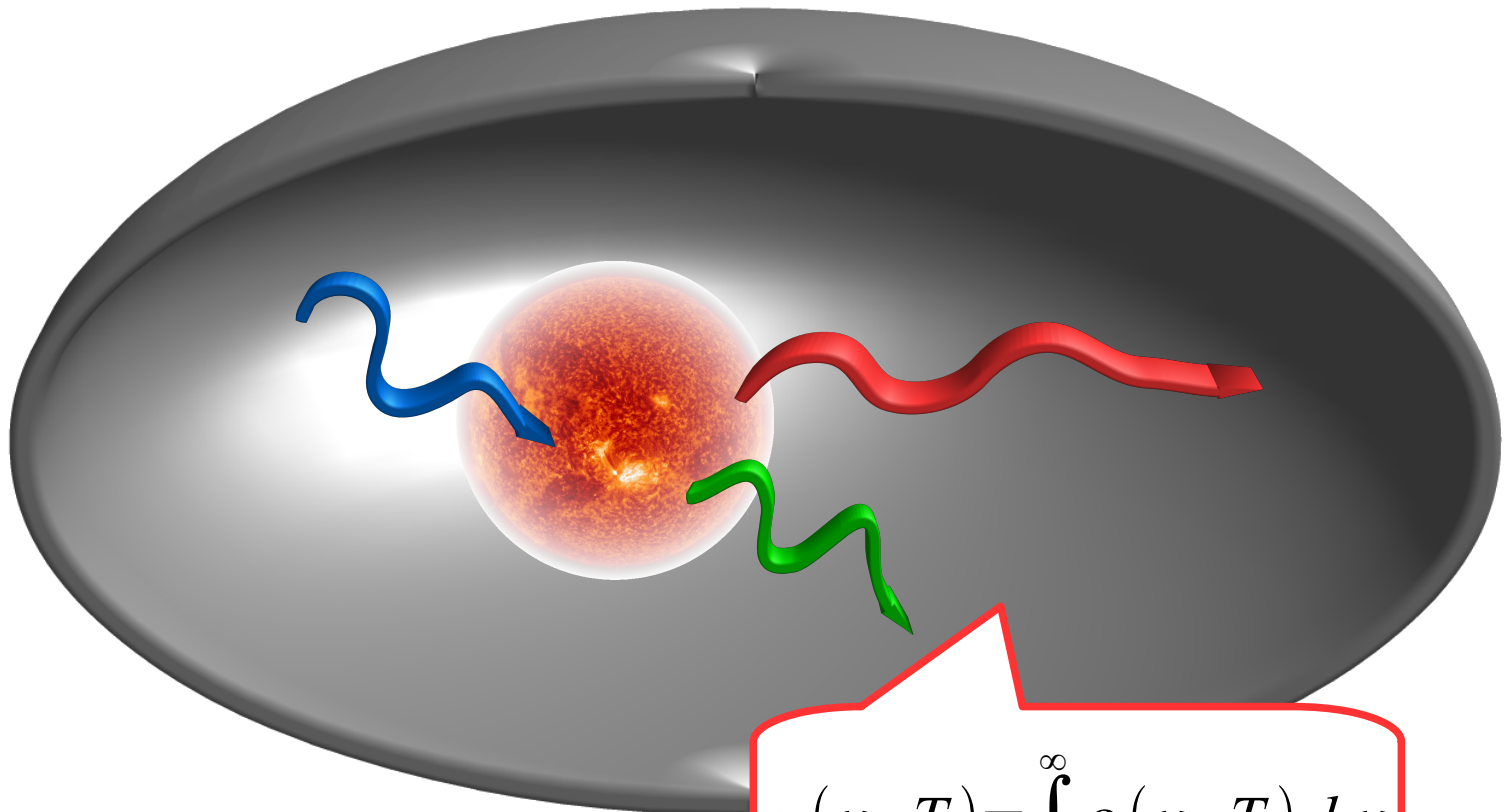
Проблема 4.

Излучение чёрного тела.



Проблема 4.

Излучение чёрного тела.

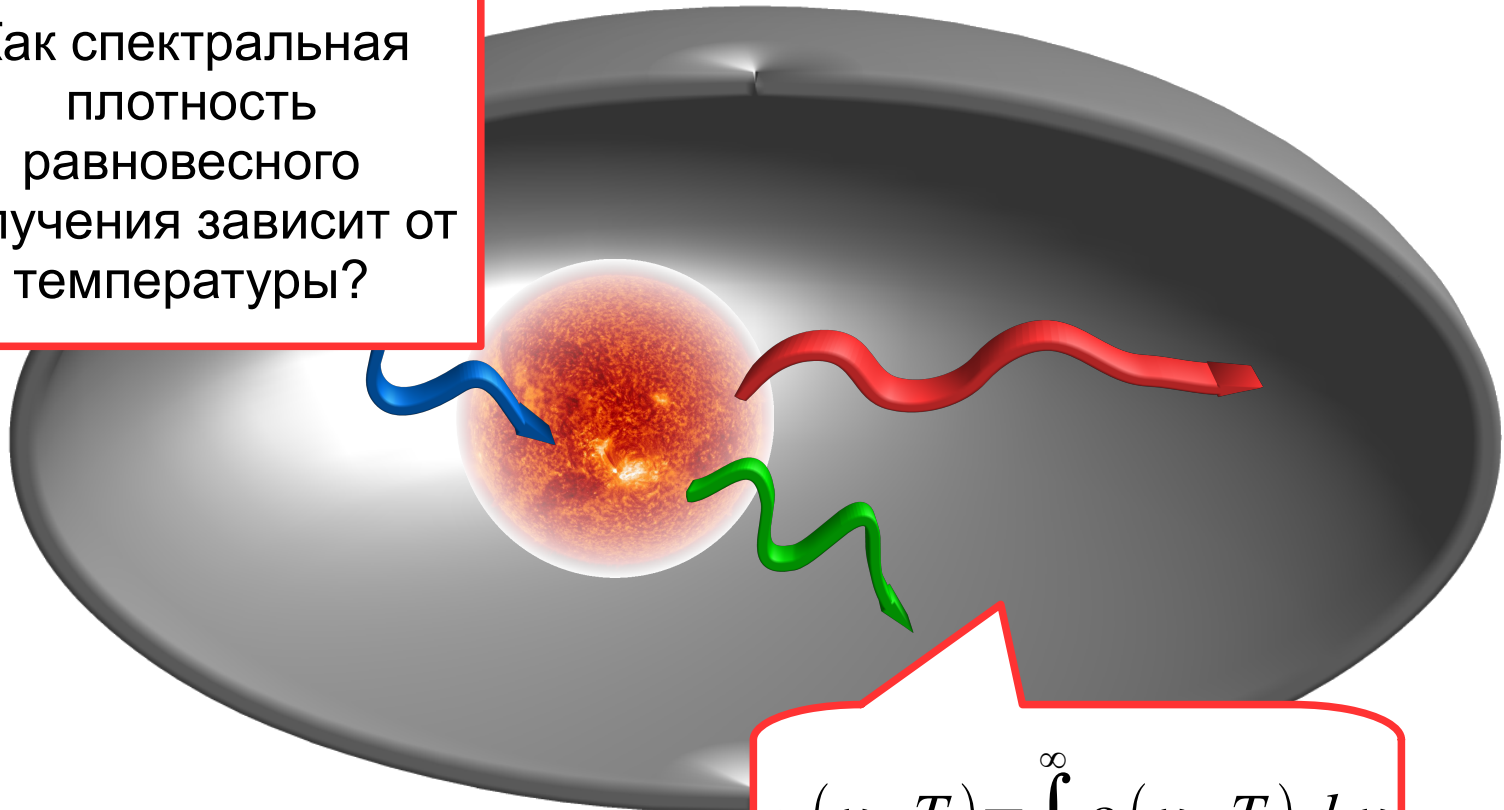


$$u(\omega, T) = \int_0^{\infty} \rho(\omega, T) d\omega$$

Проблема 4.

Излучение чёрного тела.

Как спектральная
плотность
равновесного
излучения зависит от
температуры?

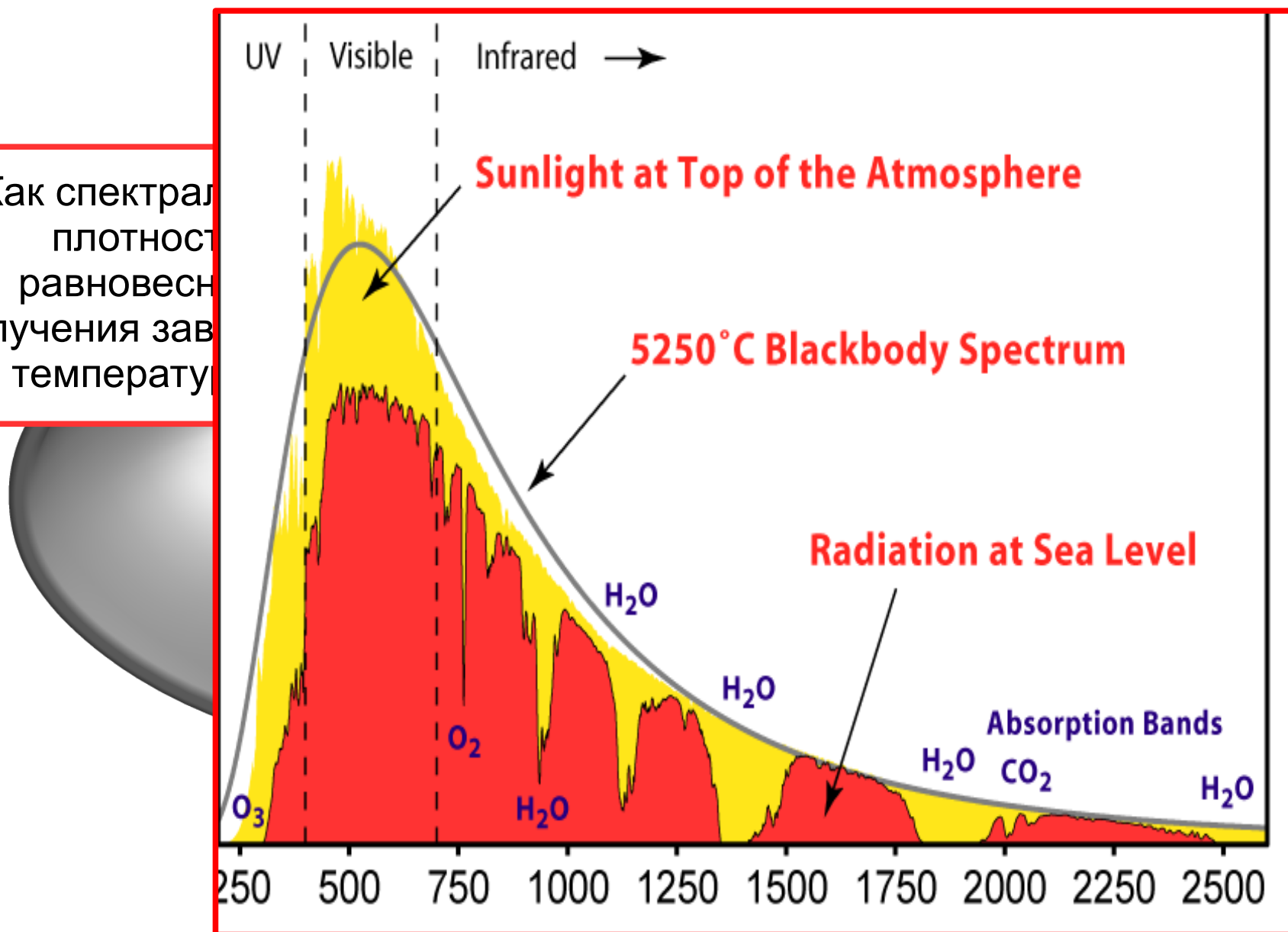


$$u(\omega, T) = \int_0^{\infty} \rho(\omega, T) d\omega$$

Проблема 4.

Излучение чёрного тела.

Как спектр
плотности
равновесного
излучения зависит
от температу



Проблема 4.

Излучение чёрного тела.

1862	Кирхгоф	постановка задачи об АЧТ
1879-1884	Стефан, Гретц, Больцман	$W \propto T^4$
1893	Вин	$\frac{dW}{d\nu} = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right); \nu_{max} = AT$
1900-1905	Рэлей, Джинс	$\frac{dW}{d\nu} = \frac{2\pi \nu^2 kT}{c^2}$

Проблема 4.

Излучение чёрного тела.

1862	Кирхгоф	постановка задачи об АЧТ
1879-1884	Стефан-Болцман	$W = \int_0^{\infty} \frac{dW}{d\nu} d\nu \propto \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \text{????}$ ультрафиолетовая катастрофа
1893		$4T$
1900-1905	Рэлей, Джинс	$\frac{dW}{d\nu} = \frac{2\pi \nu^2 kT}{c^2}$

Проблема 5. Теплоемкость. Теорема о равнораспределении.

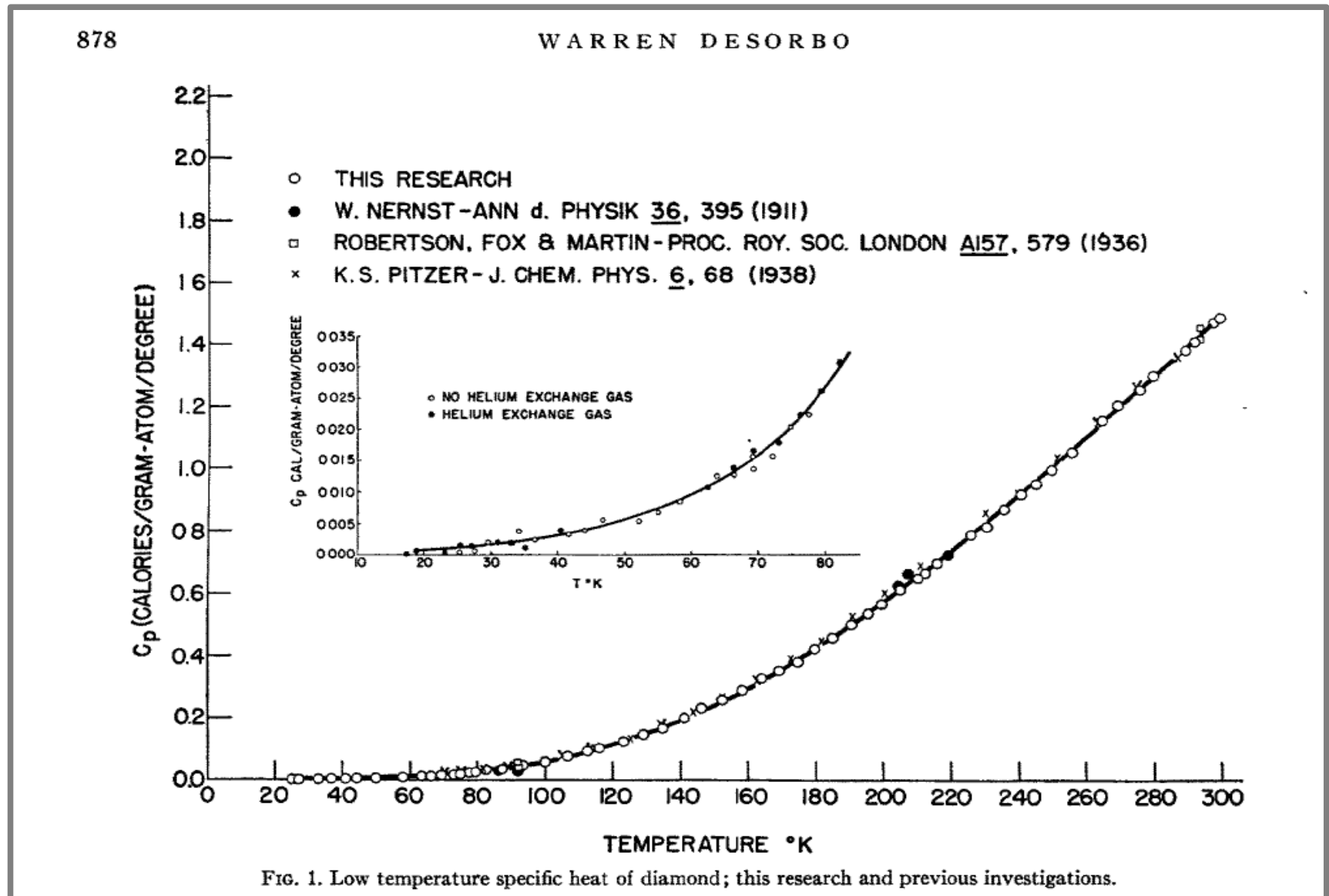
1819 – Дюлонг и Пти, закон Дюлонга и Пти:
«теплоёмкость почти всех простых твёрдых тел при комнатной температуре близка к 25 Дж/(К×моль)»

	C_m , Дж/(кг·К)	μ , г/моль	C_μ , Дж/(моль·К)
Fe	444	55.8	24.8
Pb	130	207	26.9
Li	3582	5.94	24.9

1876 – Больцман, теорема о равнораспределении:

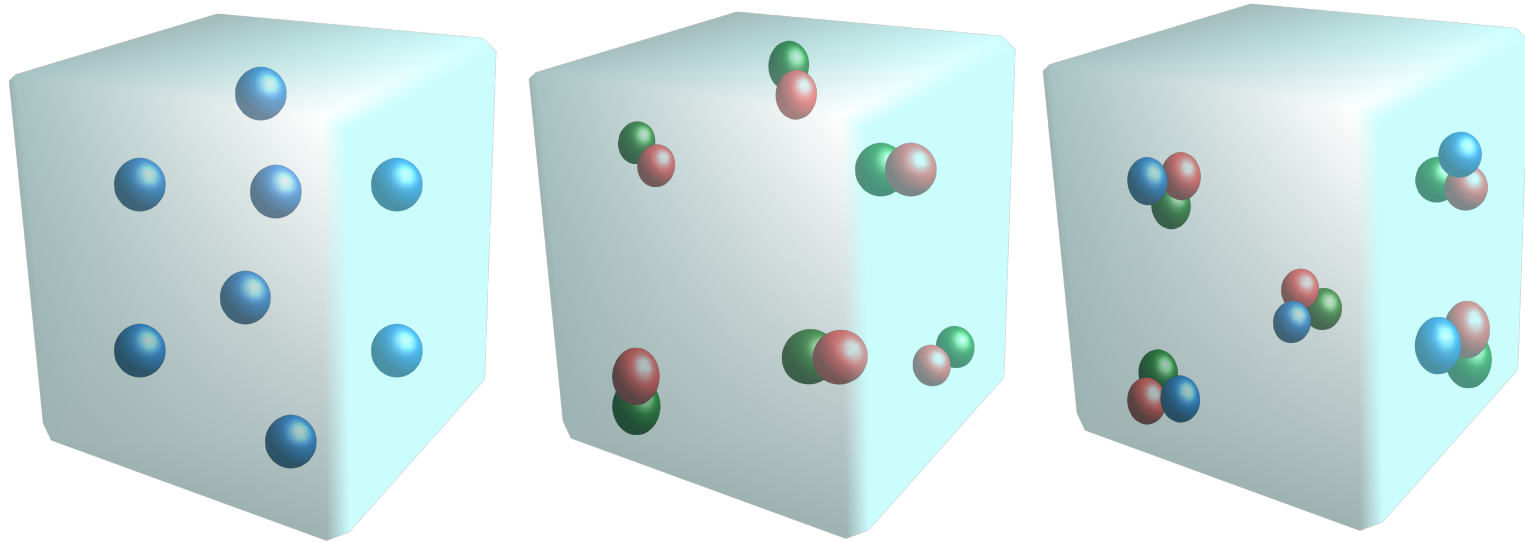
3 колебательные степени свободы дают вклад $3R$

Проблема 5. Теплоемкость. Теорема о равнораспределении.



по статье W.DeSorbo "Specific Heat of Diamond at Low Temperatures", J. Chem. Phys. 21, 876 (1953)

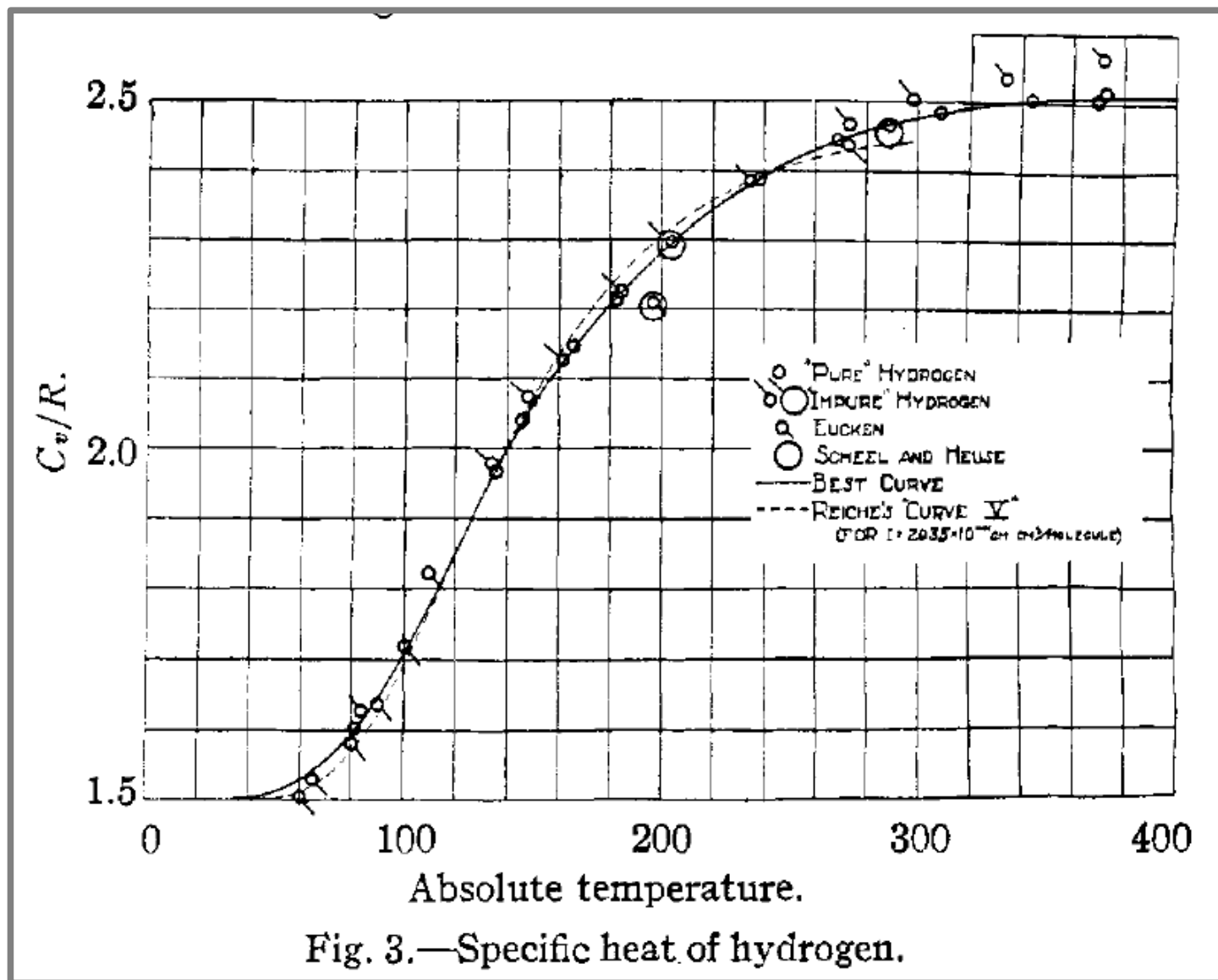
Проблема 5. Теплоемкость. Теорема о равнораспределении.



1876, Больцман

$$C_V = \begin{cases} \frac{3}{2} R & \text{для 1-атомного} \\ \frac{5}{2} R & \text{для 2-атомного} \\ 3 R & \text{для 3-атомного} \end{cases}$$

Проблема 5. Теплоемкость. Теорема о равнораспределении.



Гипотеза Планка (1900)



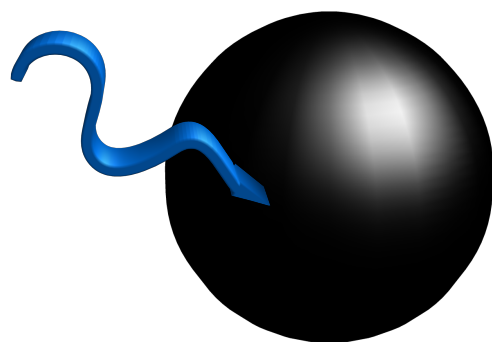
Photo from the Nobel Foundation archive

*При взаимодействии
электромагнитного излучения
с веществом энергия
поглощается и испускается
дискретными порциями
(квантами)*

$$E = \hbar \omega$$
$$\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

II. Равновесное тепловое излучение

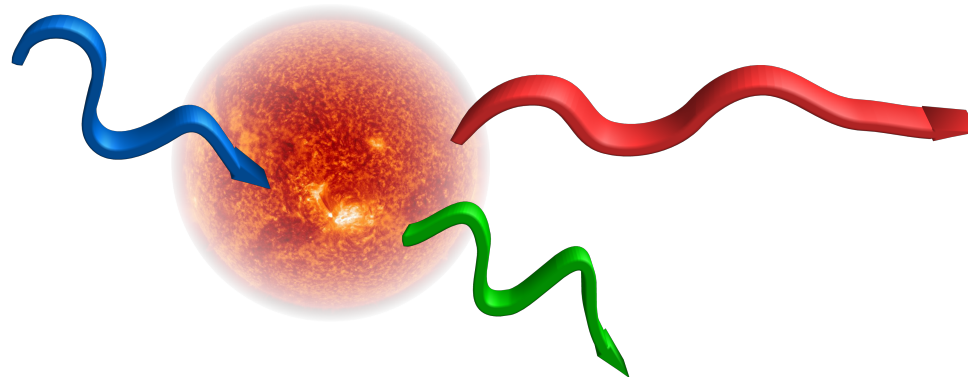
Немного определений и термодинамики



Абсолютно чёрное тело поглощает
ВСЁ падающее на него излучение

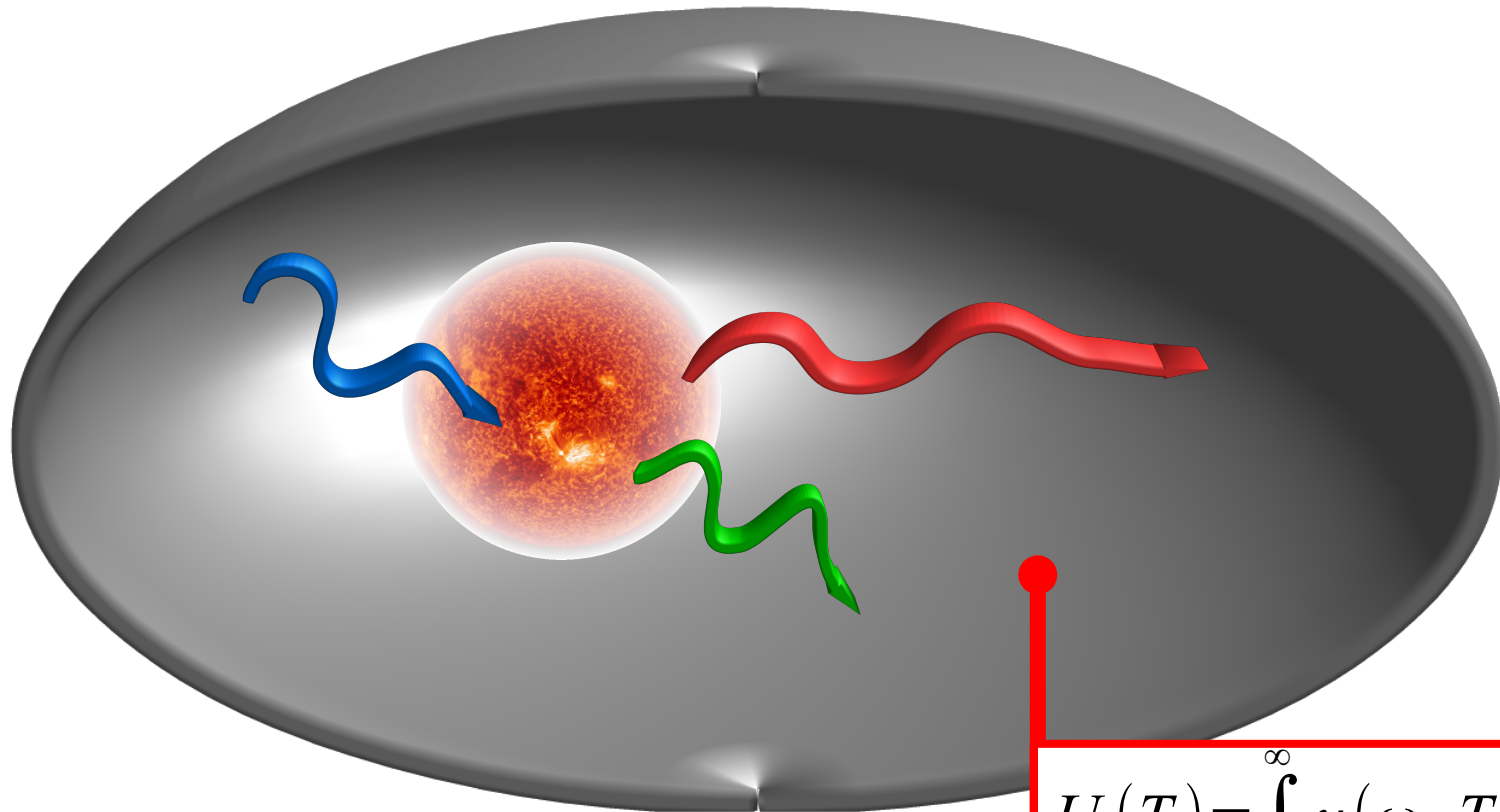
Немного определений и термодинамики

$$\frac{W}{S} = \int_0^{\infty} \rho(\omega) d\omega$$



В равновесии АЧТ переизлучает
падающую на него энергию

Немного определений и термодинамики

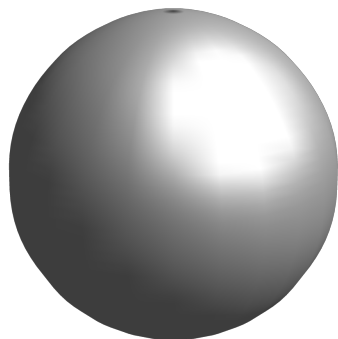


$$U(T) = \int_0^{\infty} u(\omega, T) d\omega$$

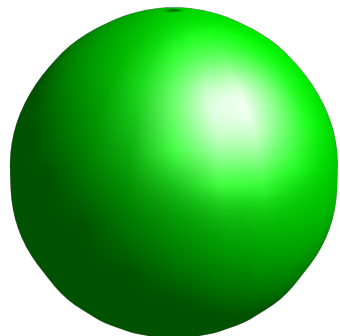
Немного определений и термодинамики



«черное» тело —
поглощает всё падающее
излучение

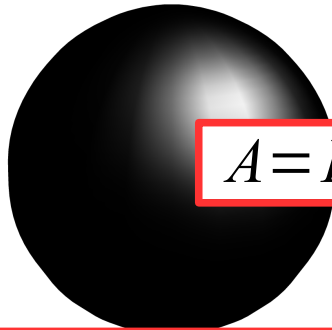


«серое» тело —
поглощает некоторую
часть падающего
излучения по всему
спектру



«цветное» тело —
отражает или излучает
преимущественно
некоторую часть спектра

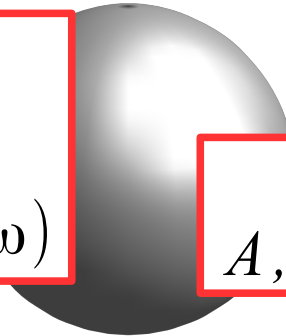
Немного определений и термодинамики



$$A = B = 1$$

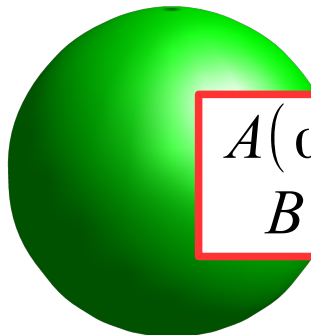
«черное» тело —
поглощает всё падающее
излучение

$$A(\omega) = \frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}}$$
$$\rho(\omega) = B(\omega) \rho_{\text{АЧТ}}(\omega)$$



$$A < 1$$
$$A, B = \text{const}$$

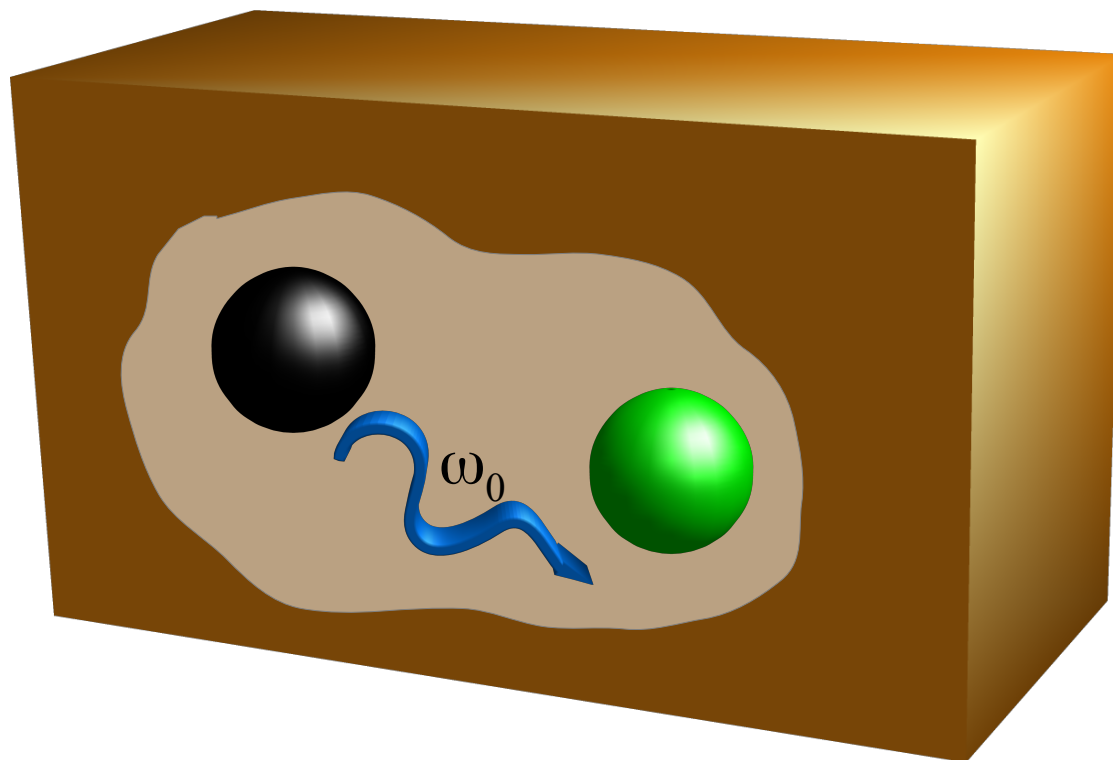
«серое» тело —
поглощает некоторую
часть падающего
излучения по всему
спектру



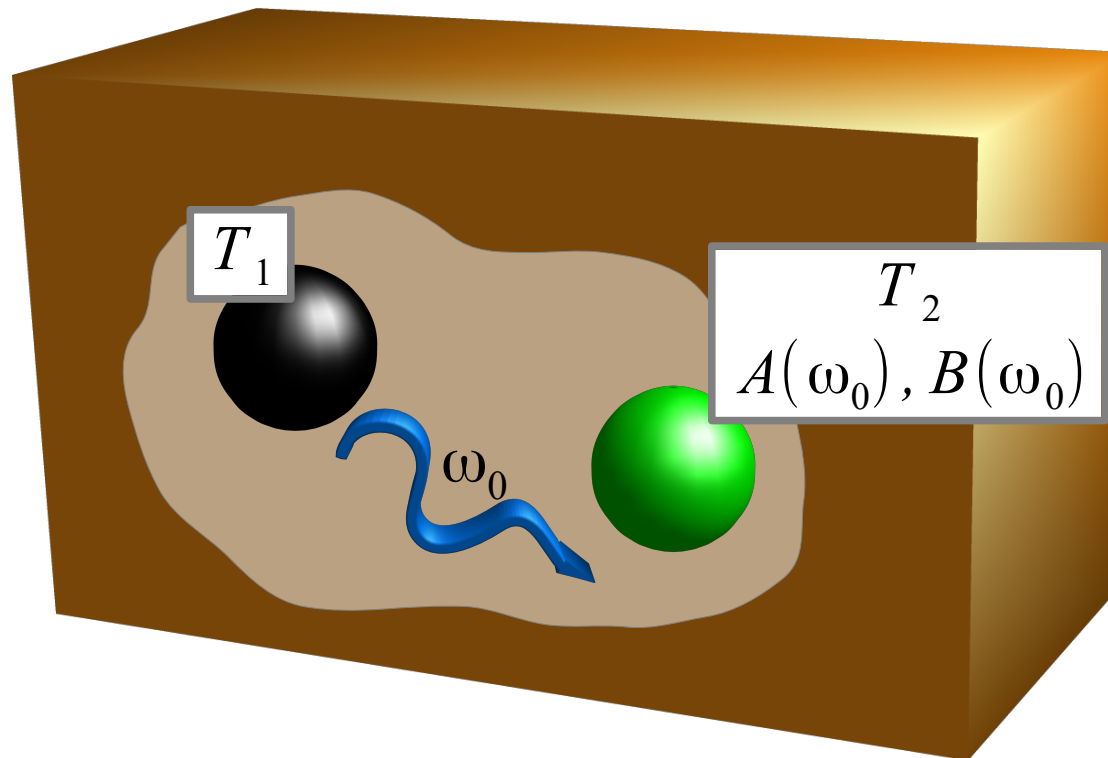
$$A(\omega) \leq 1$$
$$B(\omega)$$

«цветное» тело —
отражает или излучает
преимущественно
некоторую часть спектра

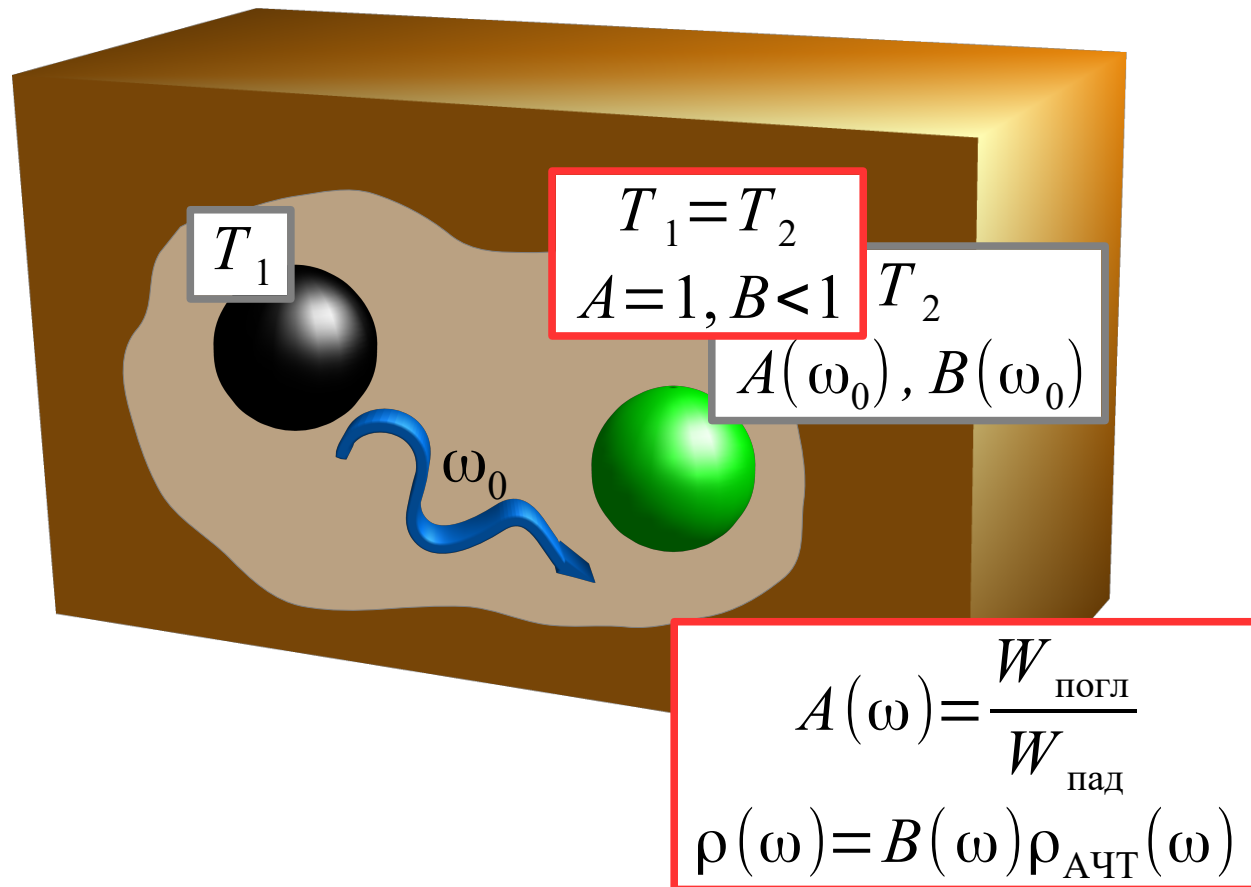
Немного определений и термодинамики



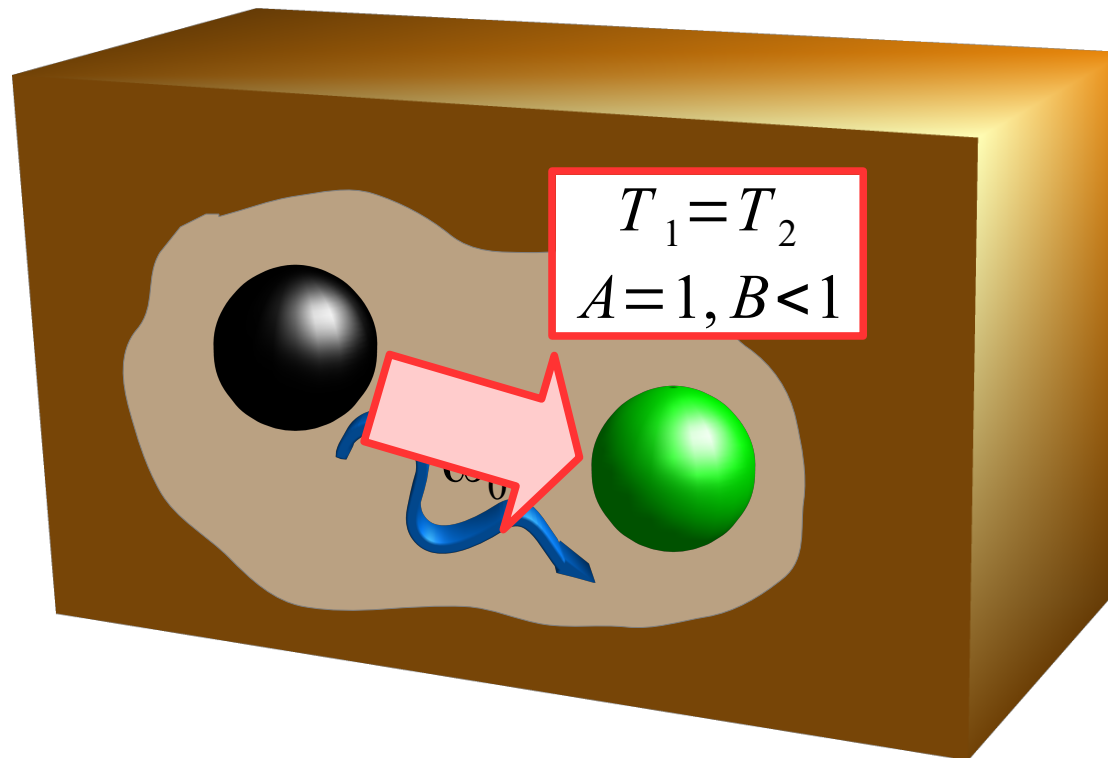
Немного определений и термодинамики



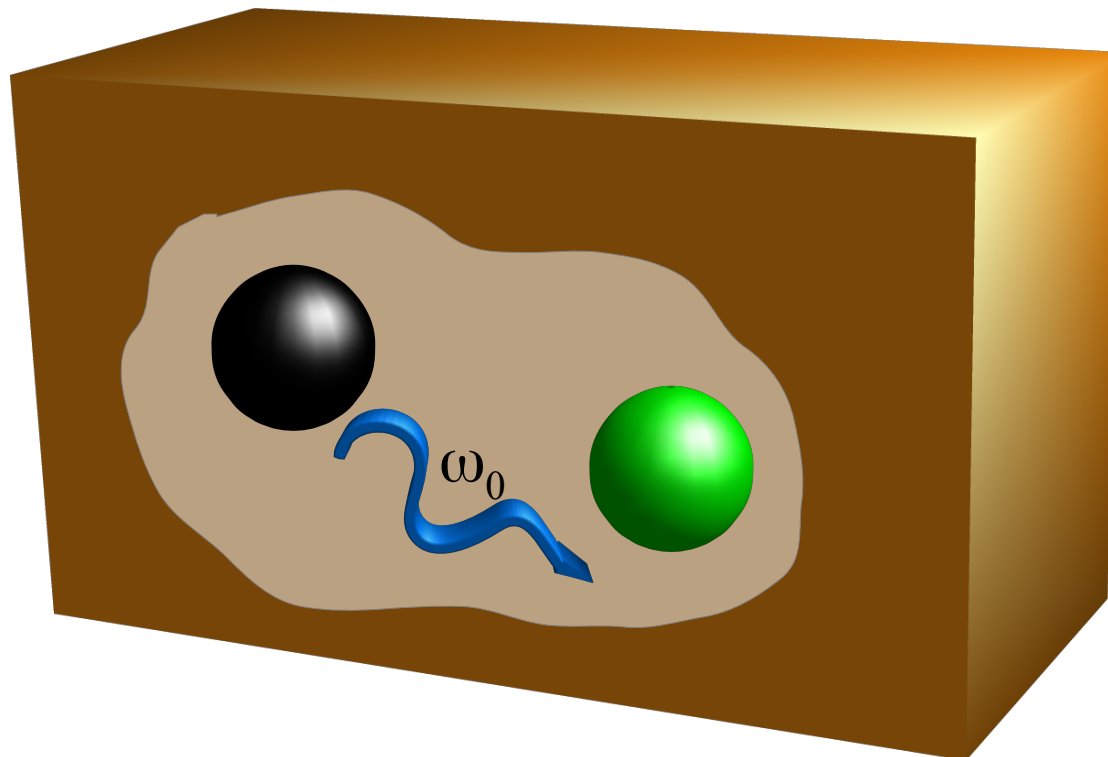
Немного определений и термодинамики



Немного определений и термодинамики



Немного определений и термодинамики



Излучательная и поглощательная
способности совпадают.

Контрольный вопрос



<https://www.youtube.com/watch?v=aFYMnlVrJnQ>

Какая максимальная температура может быть достигнута в фокусе “солнечного зеркала”?

Контр

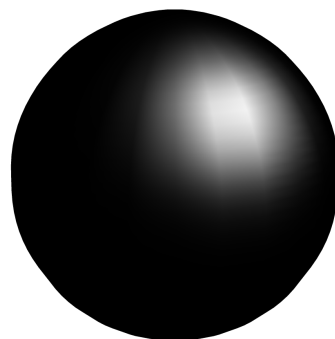
Не более 6000 К
(температура
«поверхности» Солнца)



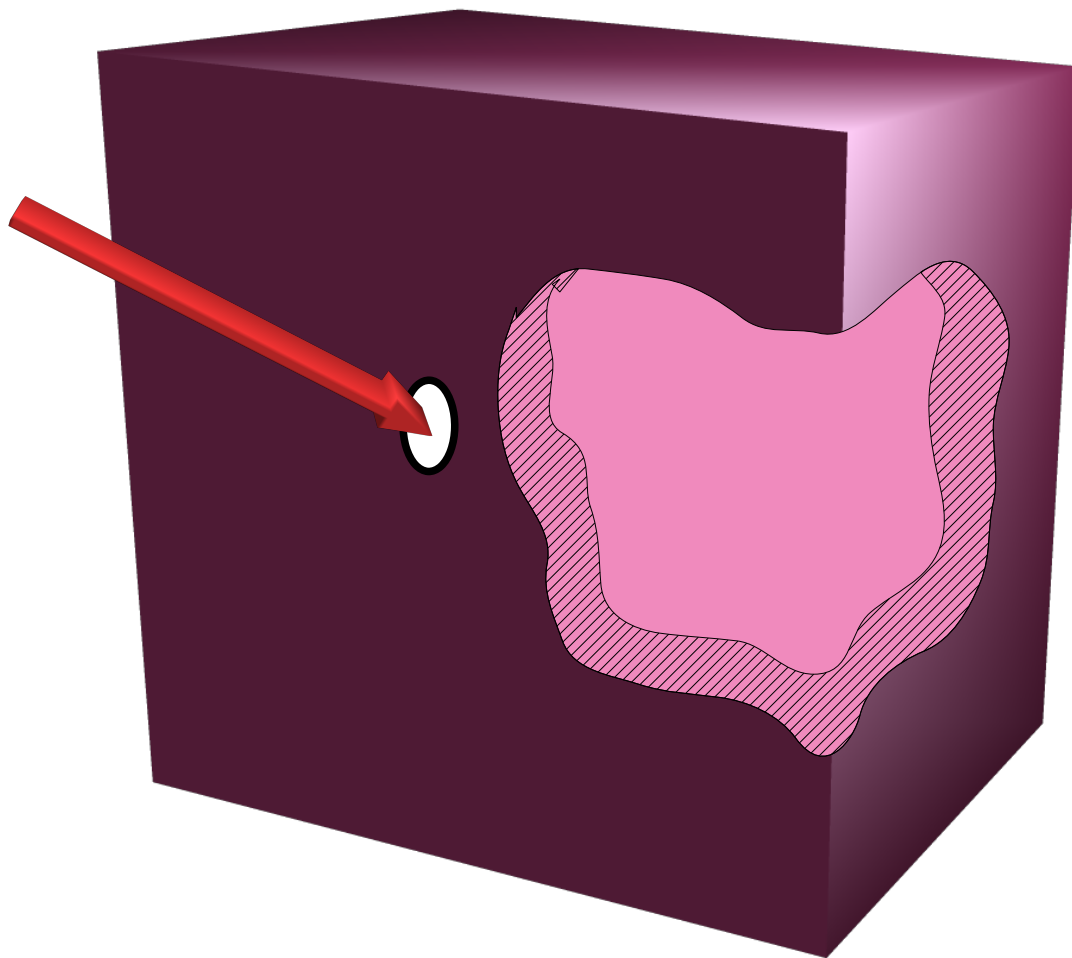
<https://www.youtube.com/watch?v=aFYMnlVrJnQ>

Какая максимальная температура может быть достигнута в фокусе «солнечного зеркала»?

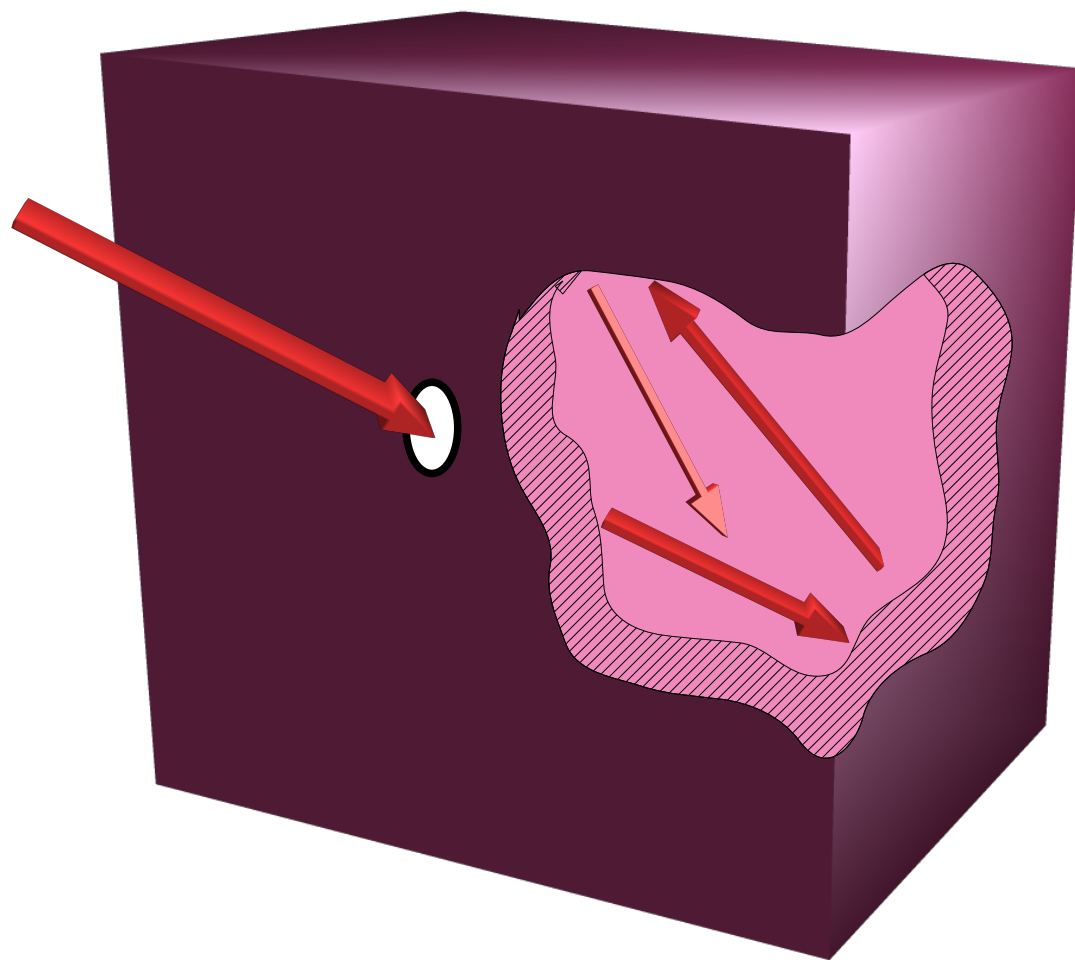
Шаг 1: удобная модель АЧТ



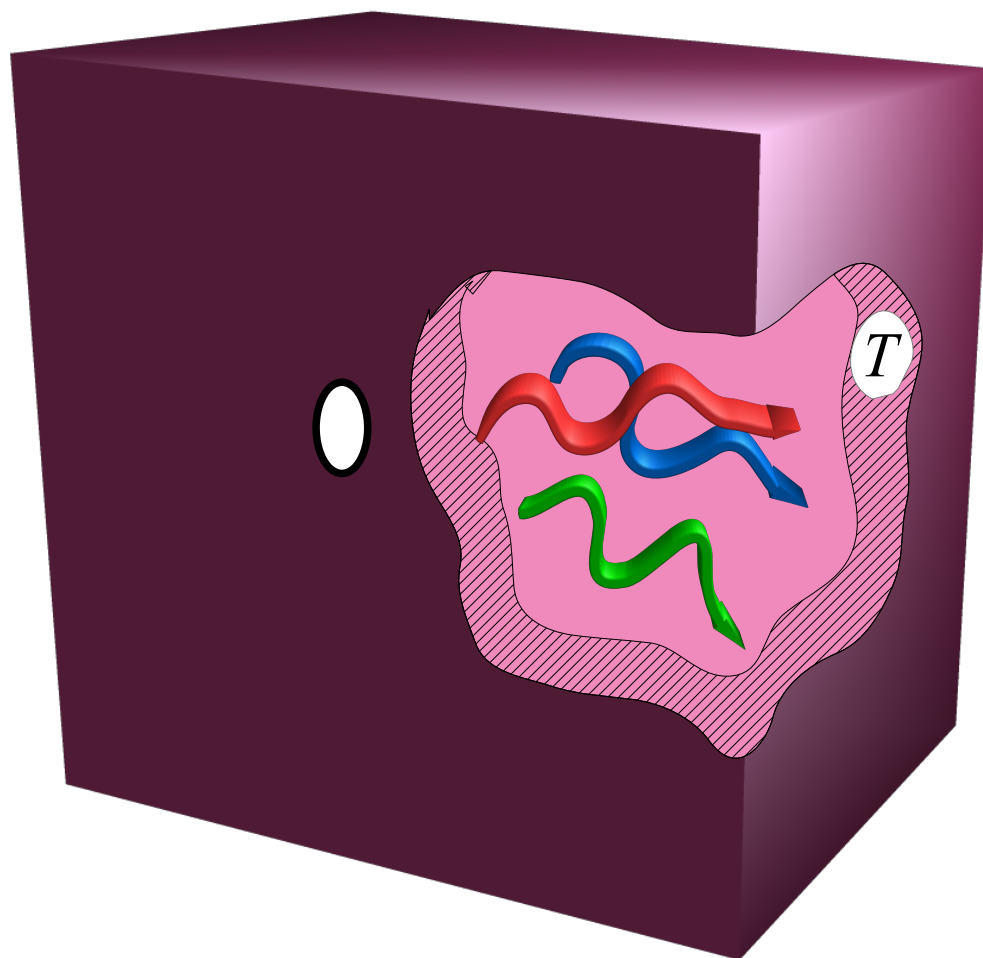
Модель АЧТ



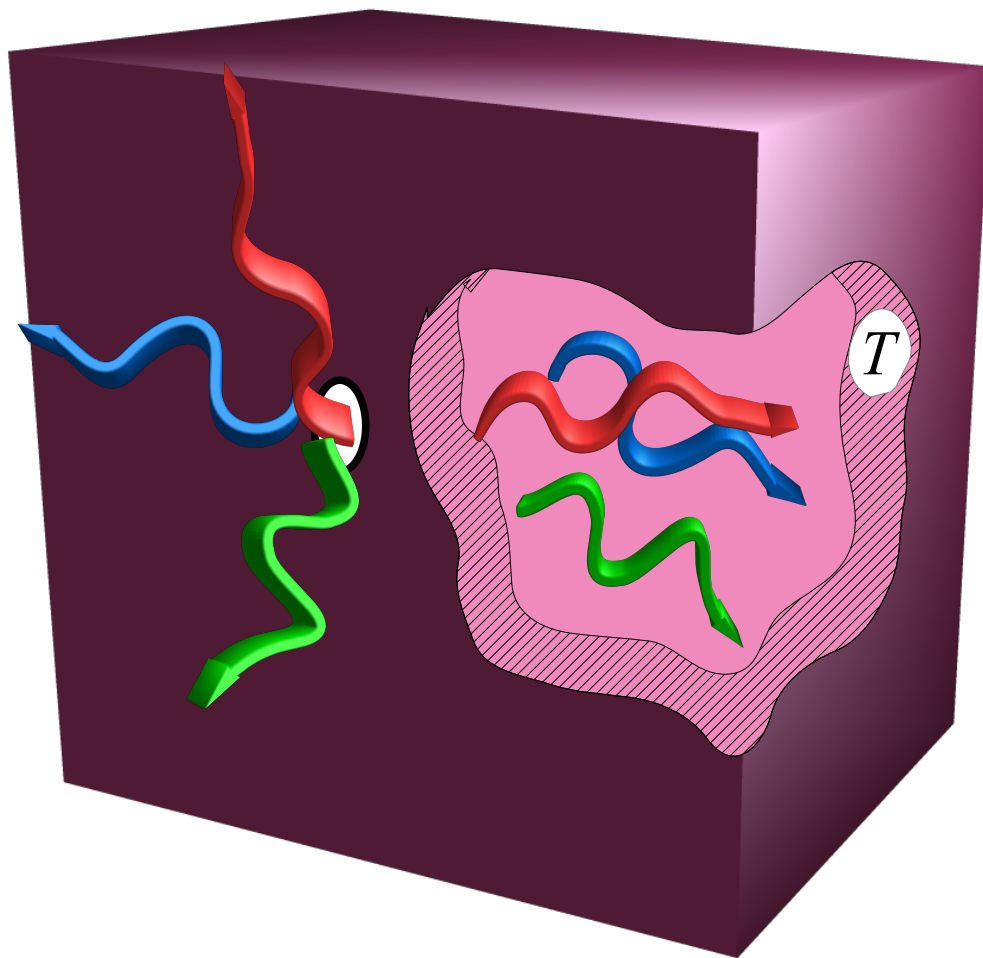
Модель АЧТ



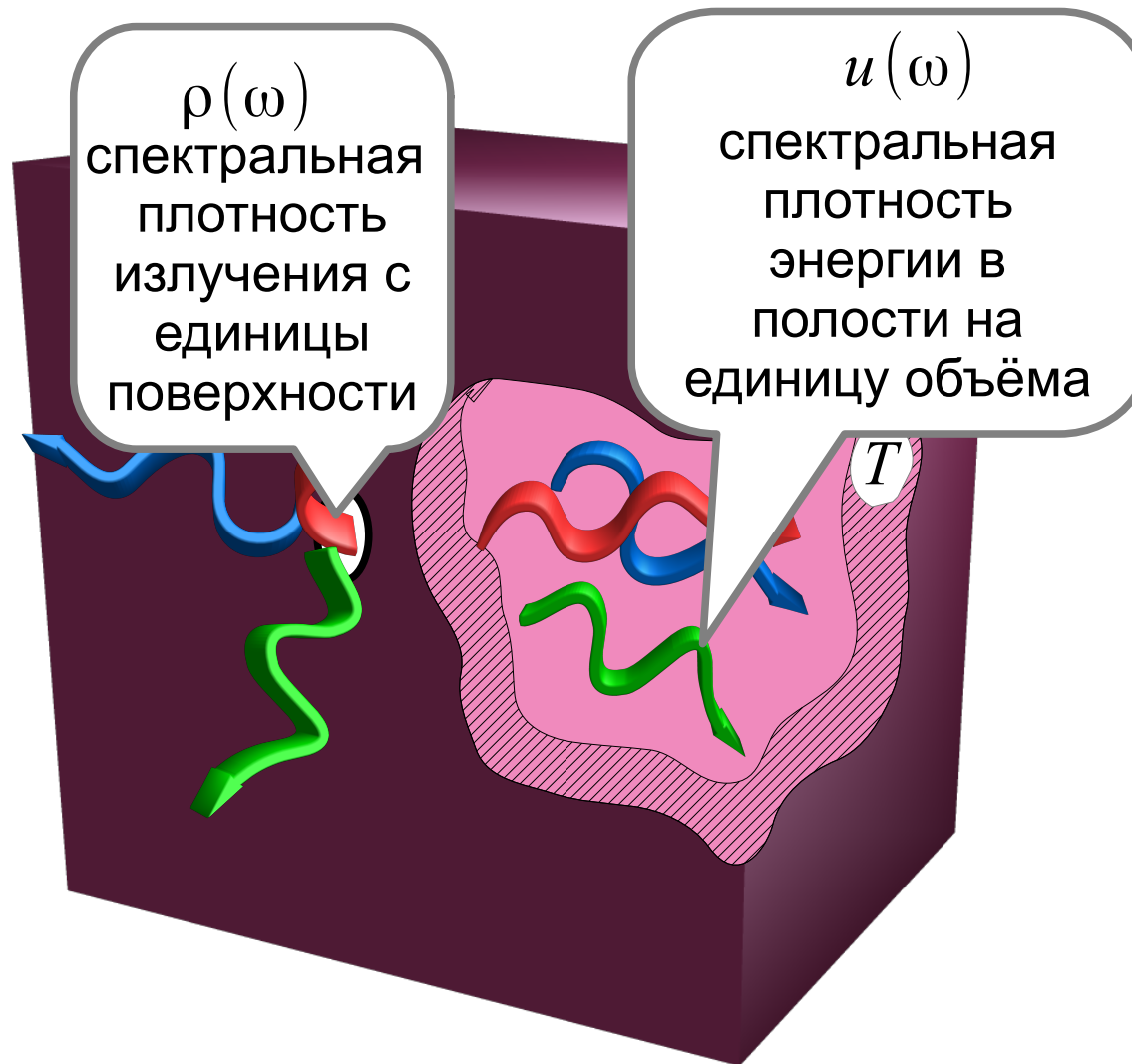
Модель АЧТ



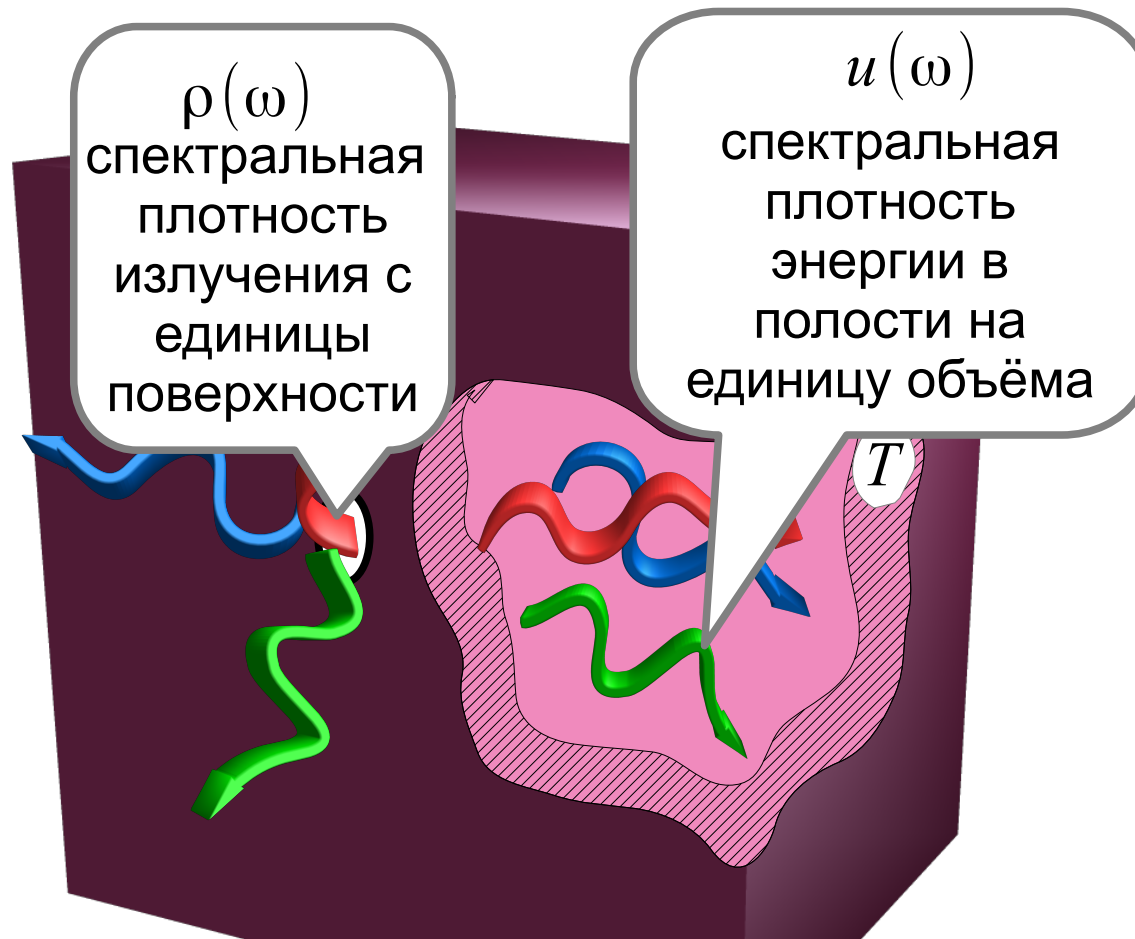
Модель АЧТ



Модель АЧТ

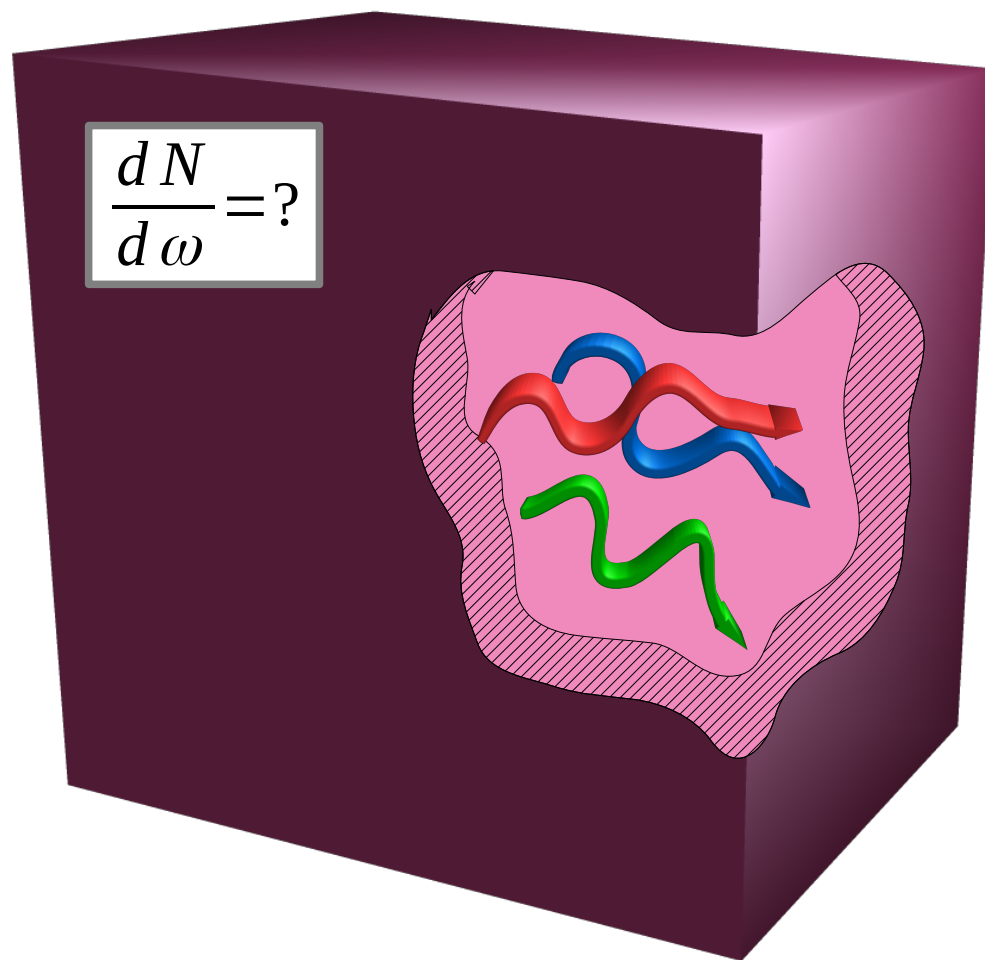


Модель АЧТ

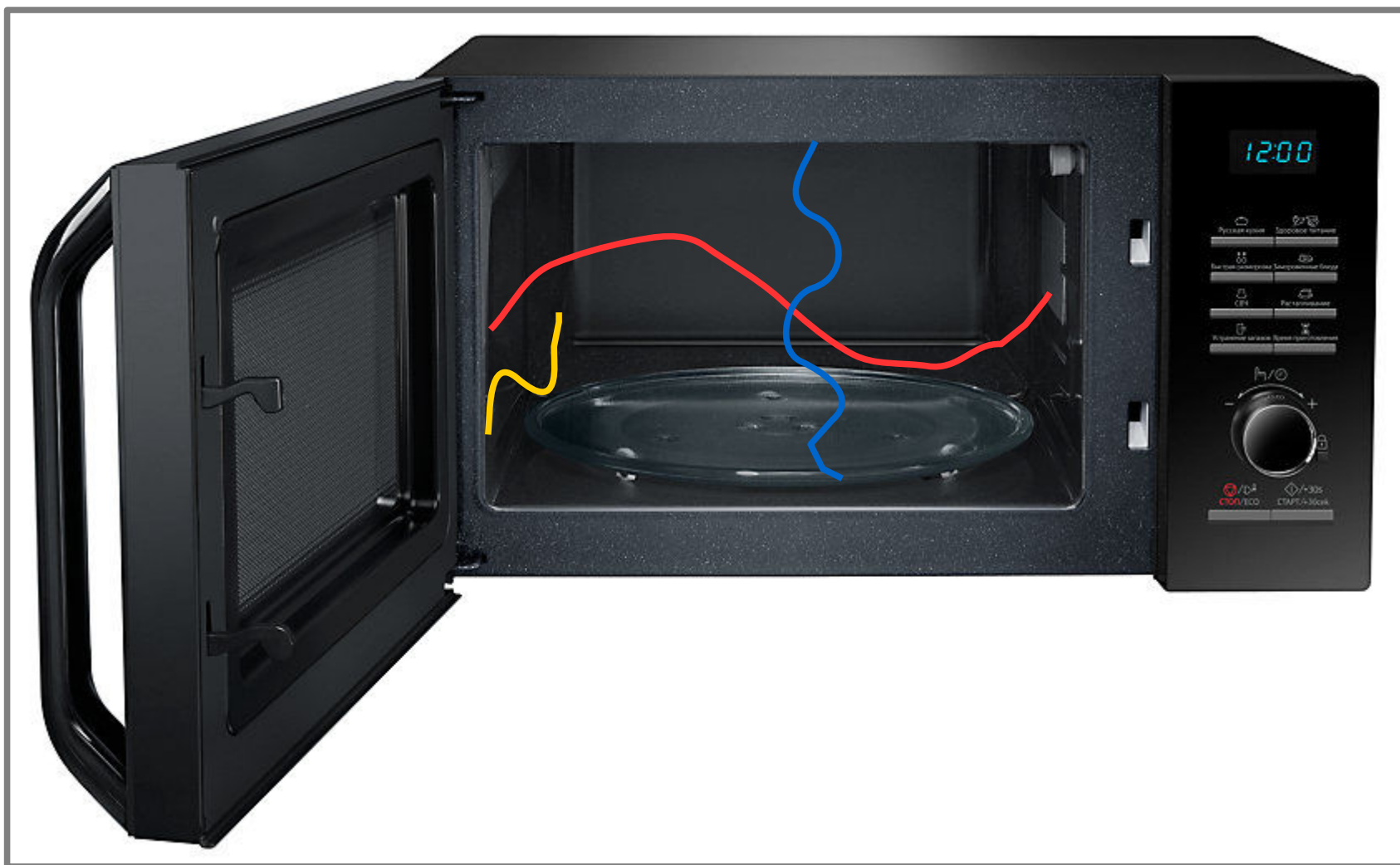


$$\rho(\omega) = \frac{dE}{S dt} = \int_0^{\pi/2} u(\omega) c \cos \Theta \frac{2\pi \sin \Theta d\Theta}{4\pi} = \frac{c u(\omega)}{4}$$

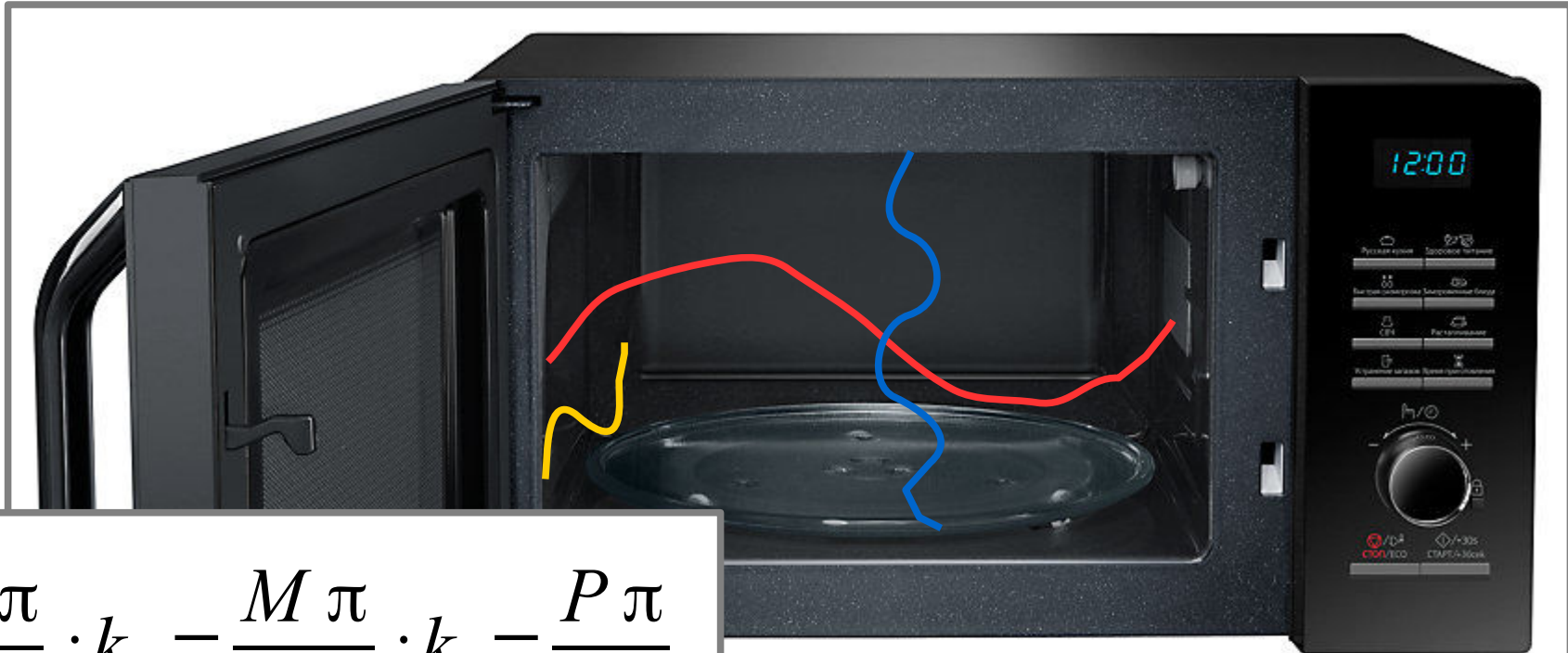
Шаг 2: Подсчёт числа мод колебаний



Частоты прямоугольного резонатора



Частоты прямоугольного резонатора



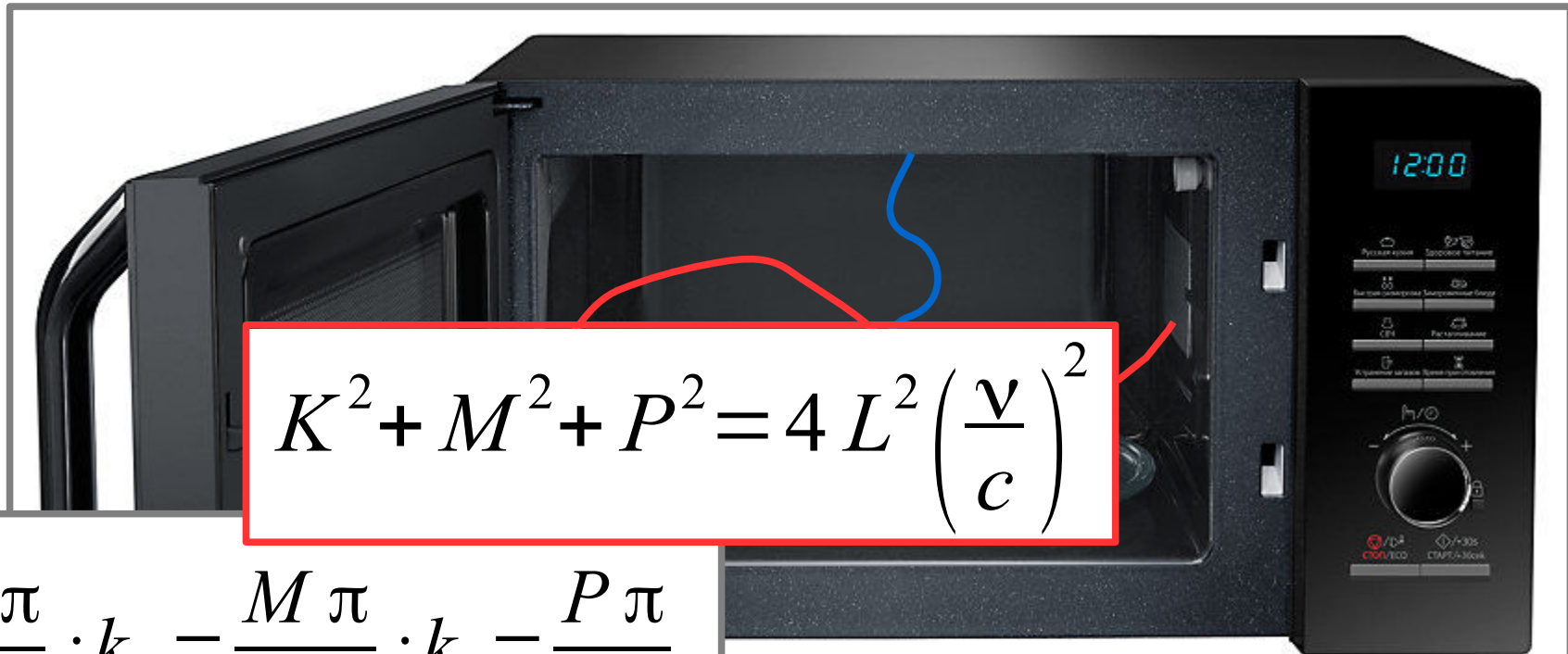
$$k_x = \frac{K \pi}{L_x}; k_y = \frac{M \pi}{L_y}; k_z = \frac{P \pi}{L_z}$$

$$K, M, P > 0$$

$$\omega^2 = c^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

частоты двукратно вырождены!

Частоты прямоугольного резонатора



$$K^2 + M^2 + P^2 = 4 L^2 \left(\frac{\nu}{c} \right)^2$$

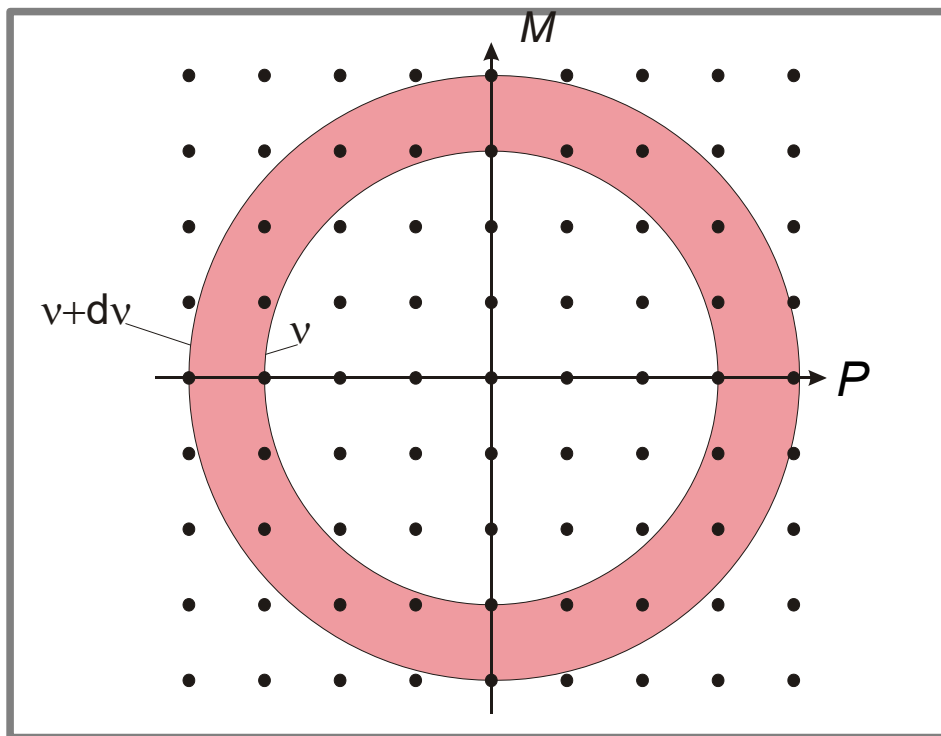
$$k_x = \frac{K \pi}{L_x}; k_y = \frac{M \pi}{L_y}; k_z = \frac{P \pi}{L_z}$$

$$K, M, P > 0$$

$$\omega^2 = c^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

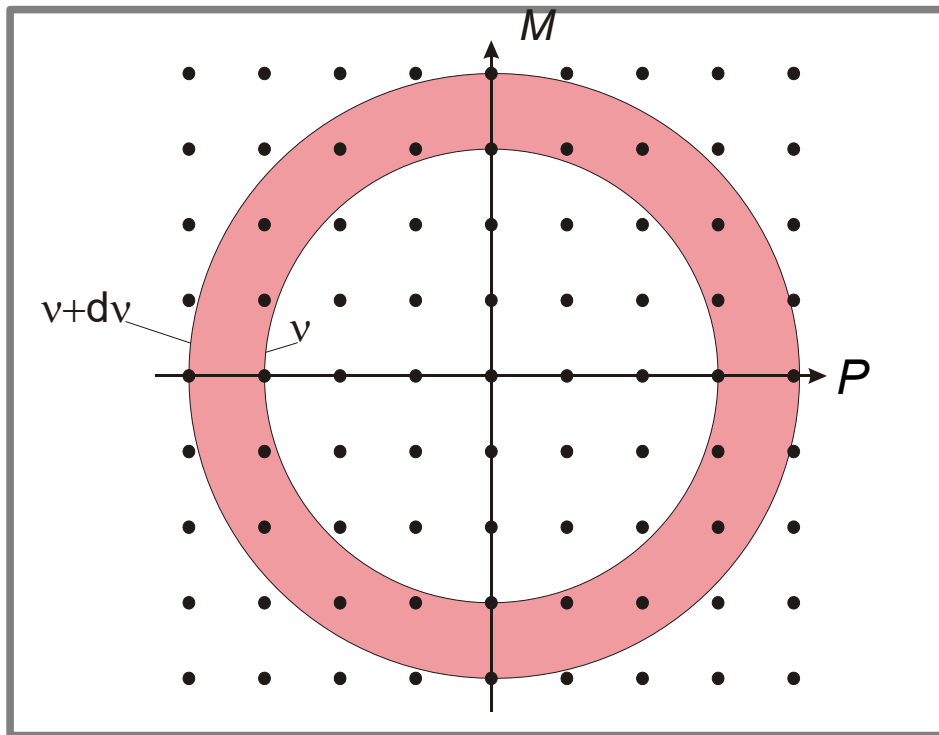
частоты двукратно вырождены!

Подсчёт мод



$$K^2 + M^2 + P^2 = 4L^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

Подсчёт мод



$$K^2 + M^2 + P^2 = 4 L^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

$$\begin{aligned} dN &= 2 \times \frac{1}{8} 4 \pi R^2 dR = \\ &= \left(\frac{2L}{c} \right)^3 \pi v^2 dv = \frac{L^3}{c^3} 8 \pi v^2 dv \\ \frac{dN}{d\omega} &= \frac{V}{c^3} \frac{\omega^2}{\pi^2} \end{aligned}$$

Бонус: Закон Рэля-Джинса

$$\rho(\omega) = \frac{c u(\omega)}{4}$$

$$\frac{dN}{d\omega} = \frac{V}{c^3} \frac{\omega^2}{\pi^2}$$

$$\bar{E} = kT$$

$$u(\omega) = \frac{\bar{E} \times (dN/d\omega)}{V}$$



$$\rho(\omega) = kT \times \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2}$$

$$\rho(\nu) = kT \times \frac{2\pi \nu^2}{c^2}$$

$$\rho(\lambda) = kT \times \frac{2\pi c}{\lambda^4}$$

Шаг 3: гипотеза Планка и средняя энергия колебаний поля

Гипотеза Планка

При колебаниях электромагнитного поля на данной частоте может быть запасено только целое число квантов колебаний

$$E = \hbar \omega n$$

Подсчёт средней энергии моды

$$\bar{E} = \frac{\sum n \hbar \omega e^{-n \hbar \omega / (k T)}}{\sum e^{-n \hbar \omega / (k T)}}$$

Подсчёт средней энергии моды

$$\bar{E} = \frac{\sum n \hbar \omega e^{-n \hbar \omega / (k T)}}{\sum e^{-n \hbar \omega / (k T)}}$$


$$A = \frac{1}{1 - e^{-\hbar \omega / (k_B T)}}$$

Подсчёт средней энергии моды

$$\frac{d A}{d \left(-\frac{1}{k_B T} \right)} = \frac{\hbar \omega e^{-\hbar \omega / (k_B T)}}{\left(1 - e^{-\hbar \omega / (k_B T)} \right)^2}$$

$$\bar{E} = \frac{\sum n \hbar \omega e^{-n \hbar \omega / (k T)}}{\sum e^{-n \hbar \omega / (k T)}}$$

$$A = \frac{1}{1 - e^{-\hbar \omega / (k_B T)}}$$

Подсчёт средней энергии моды

$$\bar{E} = \frac{\sum n \hbar \omega}{\sum e^{-n \hbar \omega / (k T)}}$$

$$\bar{E} = \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / (k T)} - 1}$$

$$\frac{d A}{d \left(-\frac{1}{k_B T} \right)} = \frac{\hbar \omega e^{-\hbar \omega / (k_B T)}}{\left(1 - e^{-\hbar \omega / (k_B T)} \right)^2}$$

$$A = \frac{1}{1 - e^{-\hbar \omega / (k_B T)}}$$

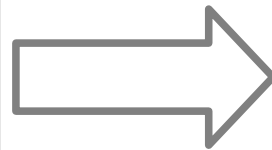
Итог: Спектральная плотность излучения АЧТ

$$\bar{E} = \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / (kT)} - 1}$$

$$\rho(\omega) = \frac{c u(\omega)}{4}$$

$$\frac{dN}{d\omega} = \frac{V}{c^3} \frac{\omega^2}{\pi^2}$$

$$u(\omega) = \frac{\bar{E} \times (dN/d\omega)}{V}$$

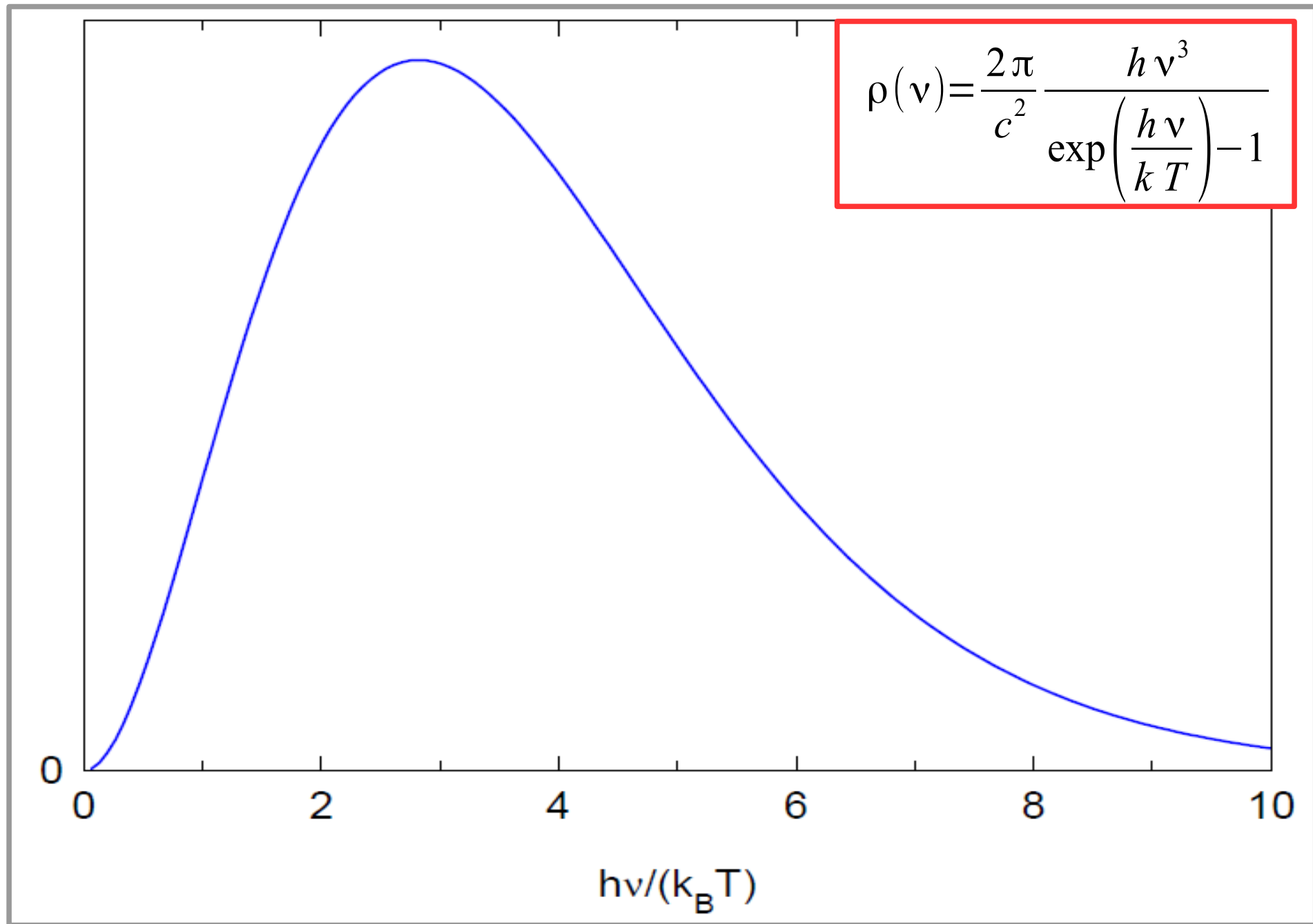


$$\rho(\nu) = \frac{2 \pi h \nu^3}{c^2 (e^{h \nu / (kT)} - 1)}$$

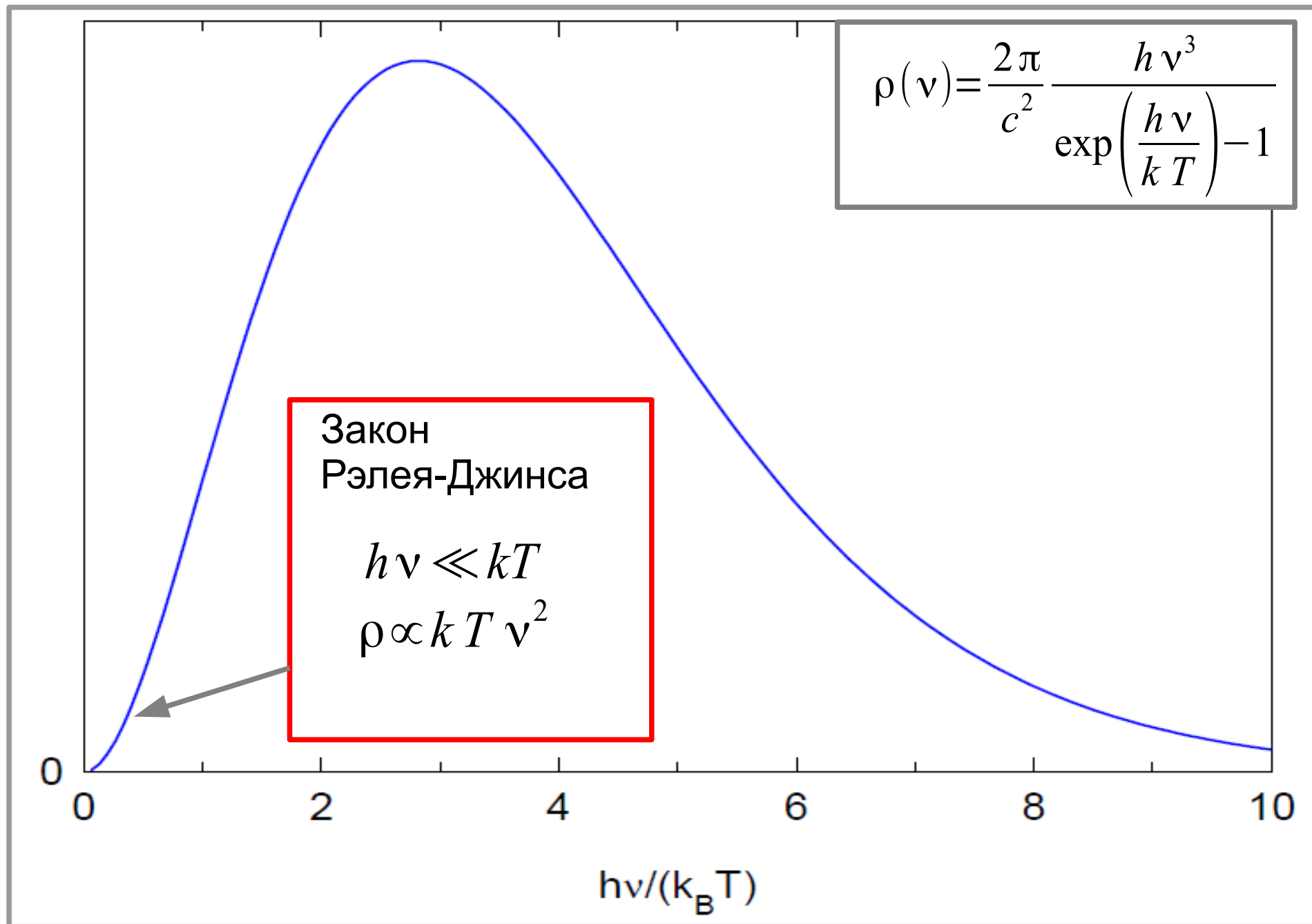
$$\rho(\omega) = \frac{\hbar \omega^3}{4 \pi^2 c^2 (e^{\hbar \omega / (kT)} - 1)}$$

$$\rho(\lambda) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 (e^{h c / (\lambda kT)} - 1)}$$

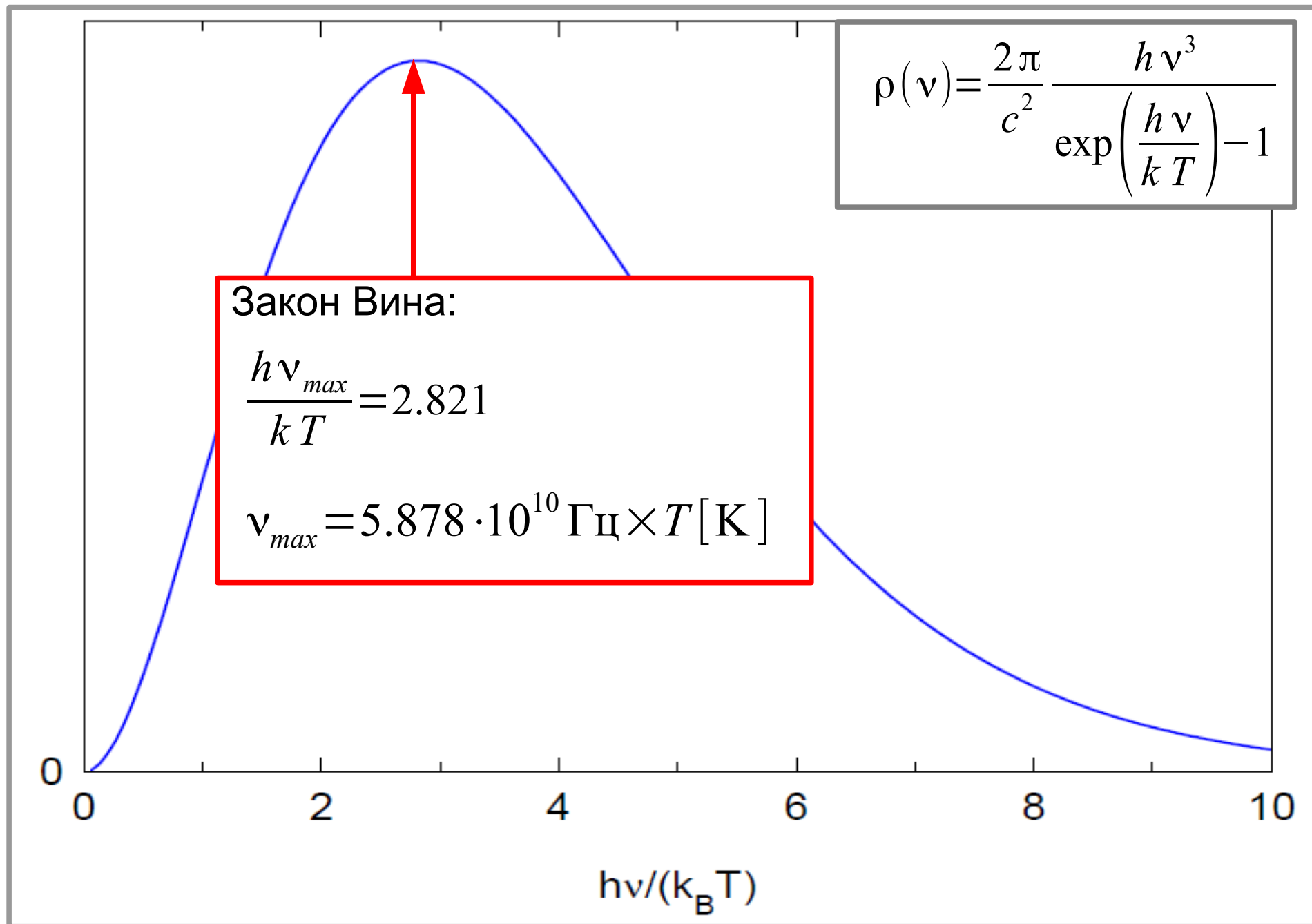
Законы теплового излучения



Законы теплового излучения



Законы теплового излучения



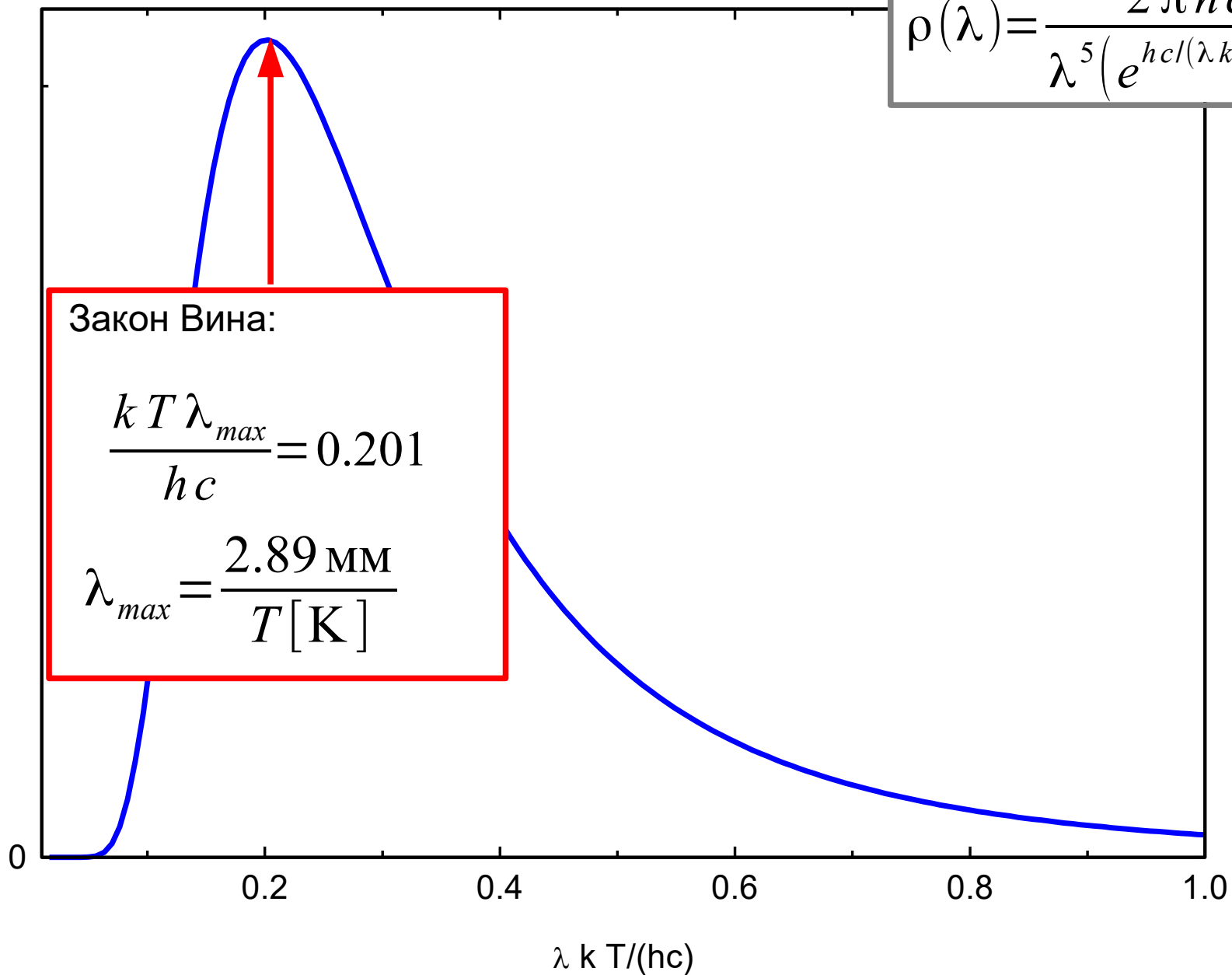
Законы теплового излучения

$$\rho(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/(\lambda kT)} - 1)}$$

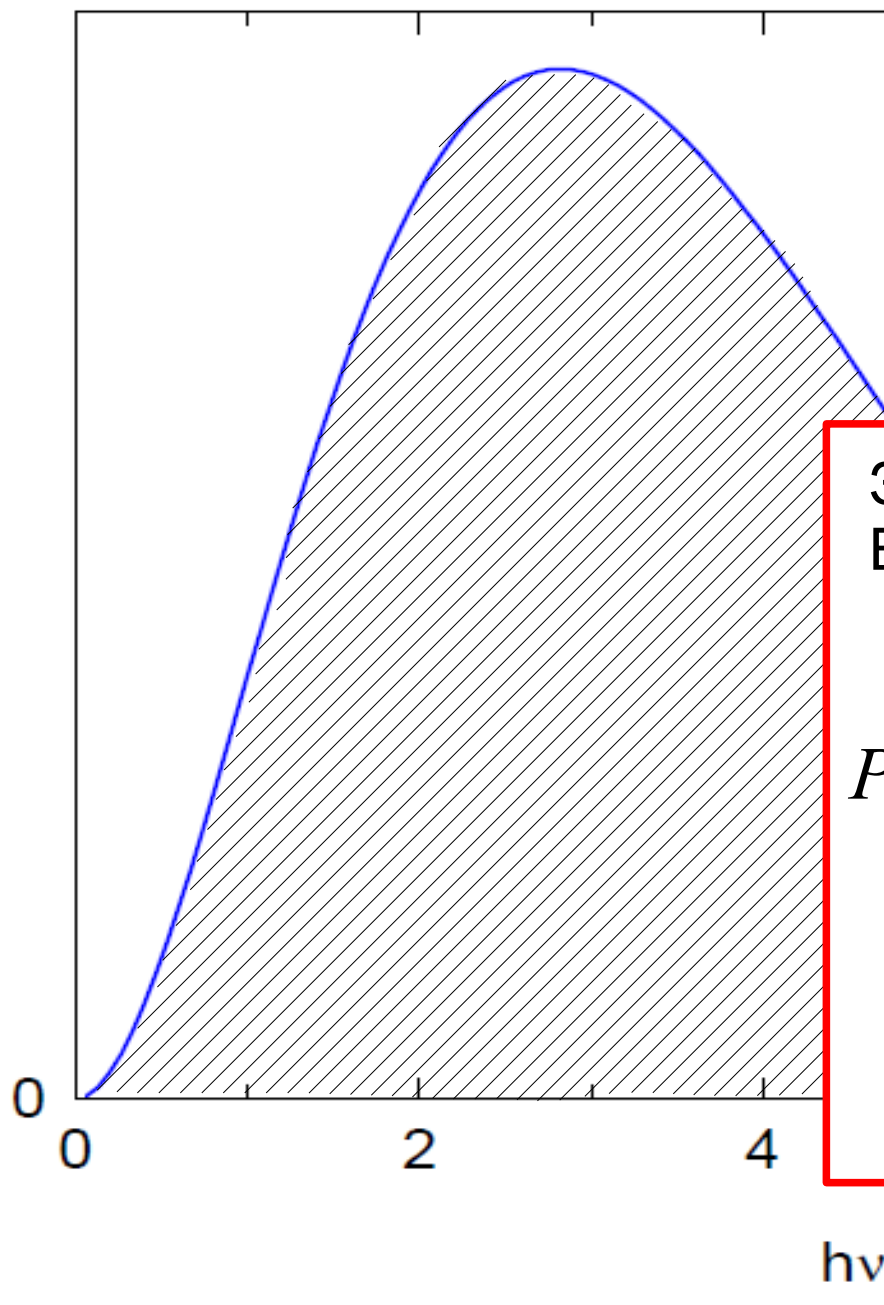
Закон Вина:

$$\frac{k T \lambda_{max}}{h c} = 0.201$$

$$\lambda_{max} = \frac{2.89 \text{ мм}}{T [\text{K}]}$$



Законы теплового излучения



$$\rho(\nu) = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

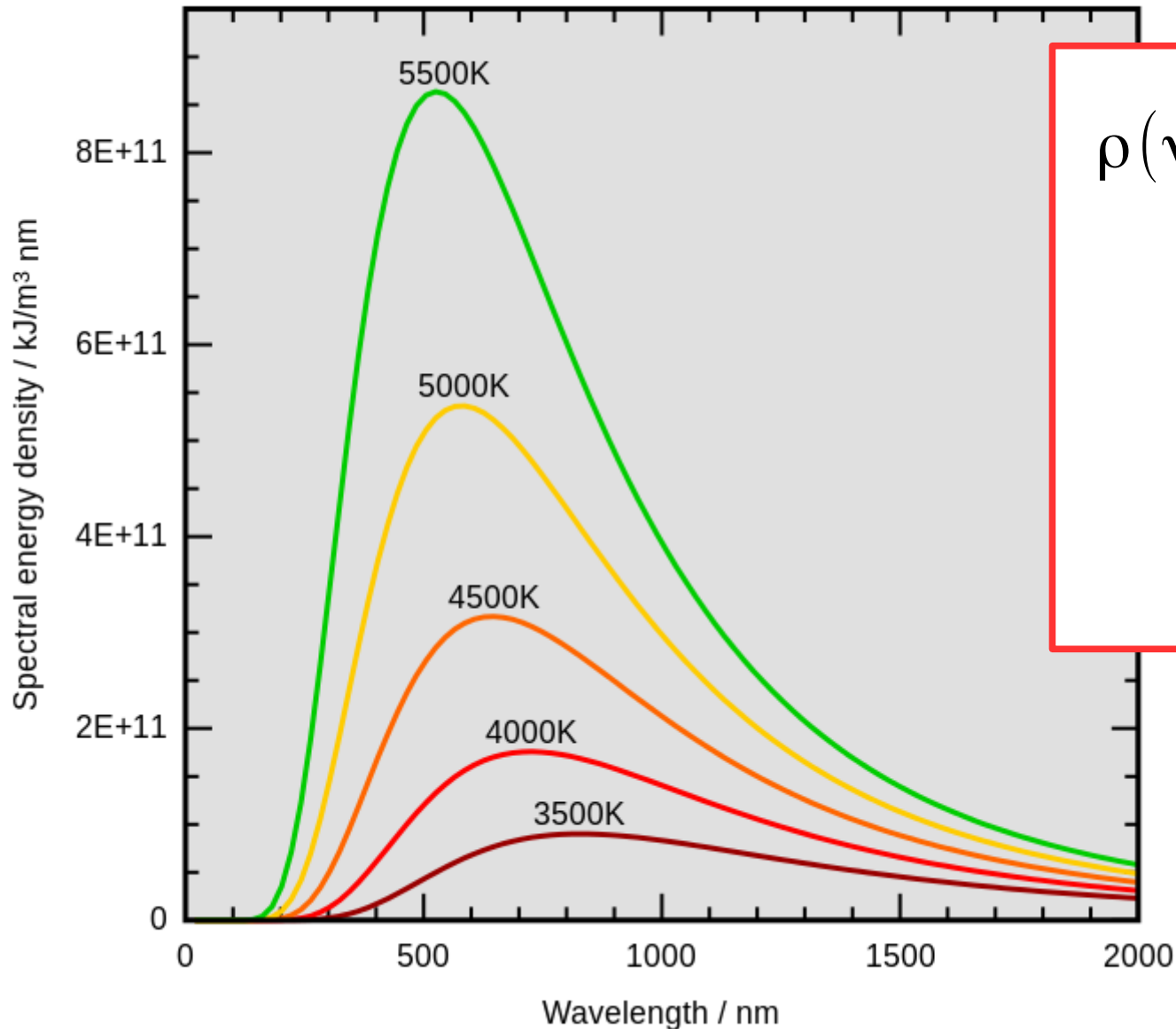
Закон Стефана-
Больцмана:

$$P = \frac{2\pi}{c^2} \int_0^\infty \frac{h\nu^3 d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Главное на лекции

https://en.wikipedia.org/wiki/Wien%27s_displacement_law#/media/File:Wiens_law.svg



$$\rho(\nu) = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$W/S = \sigma T^4$$

$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \cdot 10^6 \text{ nm}}{T [\text{K}]}$$