



# ИЗЛУЧЕНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ 2

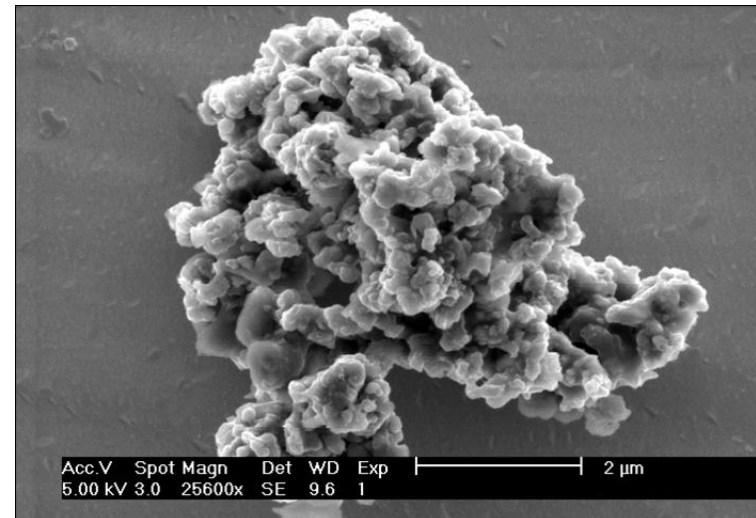
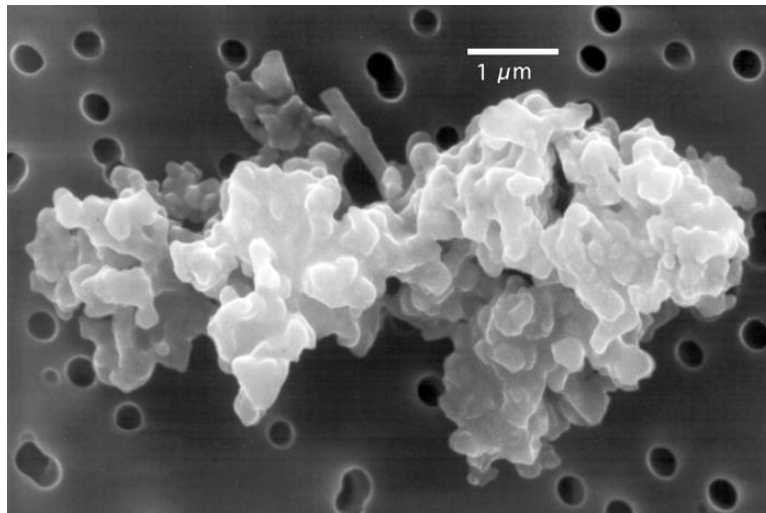
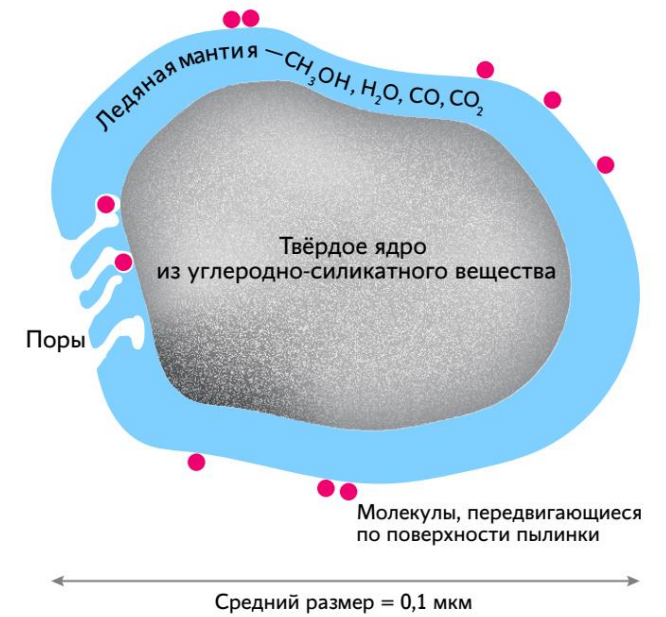
АНТОН БИРЮКОВ. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА», ОСЕНЬ 2022. ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ ВШЭ.



# ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ

N	ФИО	Домашнее задание							Среднее	Текущая оценка	Контрольная работа	Среднее	ИТОГ
		1	2	3	4	5	6	7					
1	Архипова Антонина	9											
2	Бережной Павел	9											
3	Быкова Дарья	8											
4	Винецкая Полина	10											
5	Горожанкин Вадим	9											
6	Залевский Никита	9											
7	Ипатов Николай	9											
8	Калмыков Михаил	9											
9	Кулаков Пётр	8											
10	Лопатина Софья	9											
11	Никонов Владислав	9											
12	Океанова Анна Мария	10											
13	Осипова Анастасия	10											
14	Павленко Маргарита	6											
15	Парфёнов Максим	10											
16	Полькин Артём	10											
17	Топоркова Анна	8											
18	Усманов Радион	9											
19	Французов Виктор	9											
20	Хабибуллин Альберт	10											
21	Шишкин Максим	9											
22	Щекотихин Евгений	9											

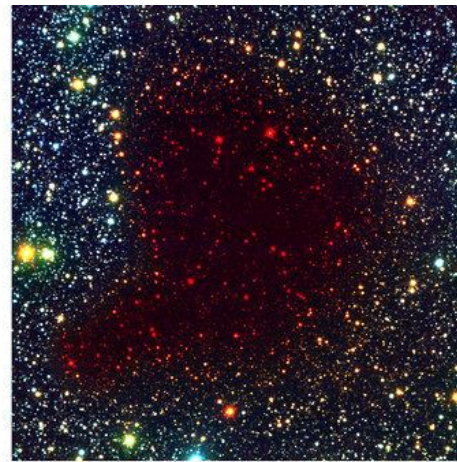
# МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ



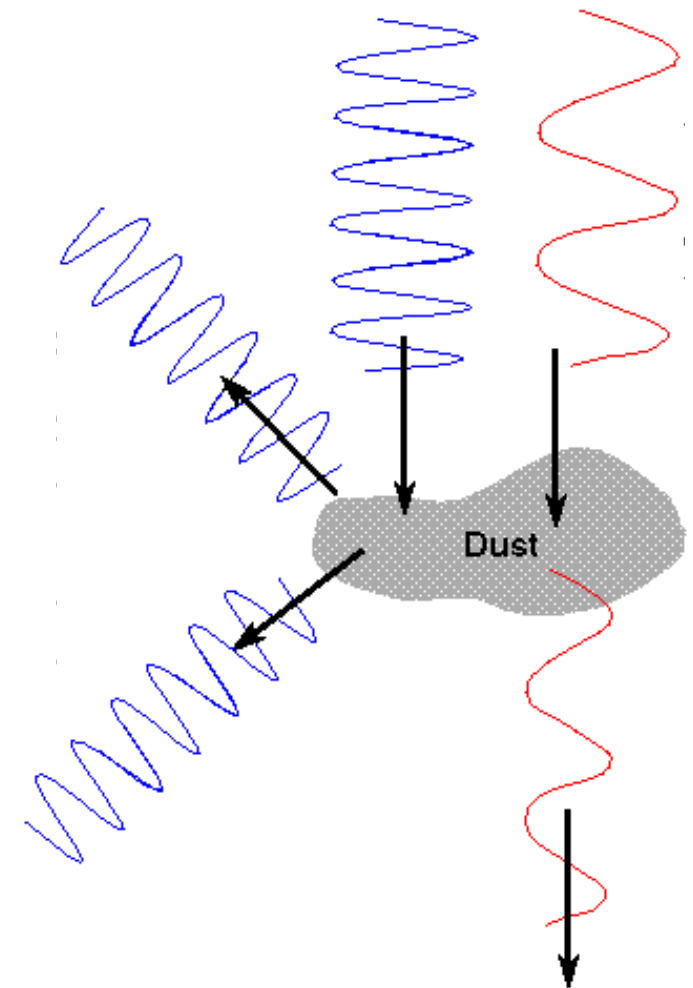
# ПОГЛОЩЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ПЫЛЬЮ



B, V, I



B, I, K



Reddening and Extinction



# МЕЖЗВЁЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{I_0 e^{-\tau}}{I_0} \approx 1.086 \tau$$

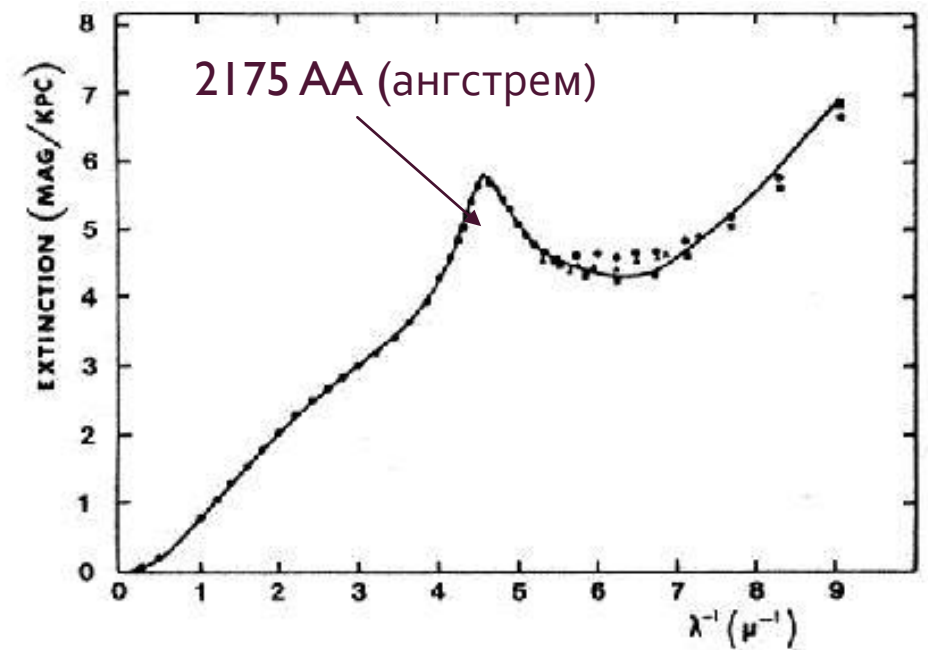
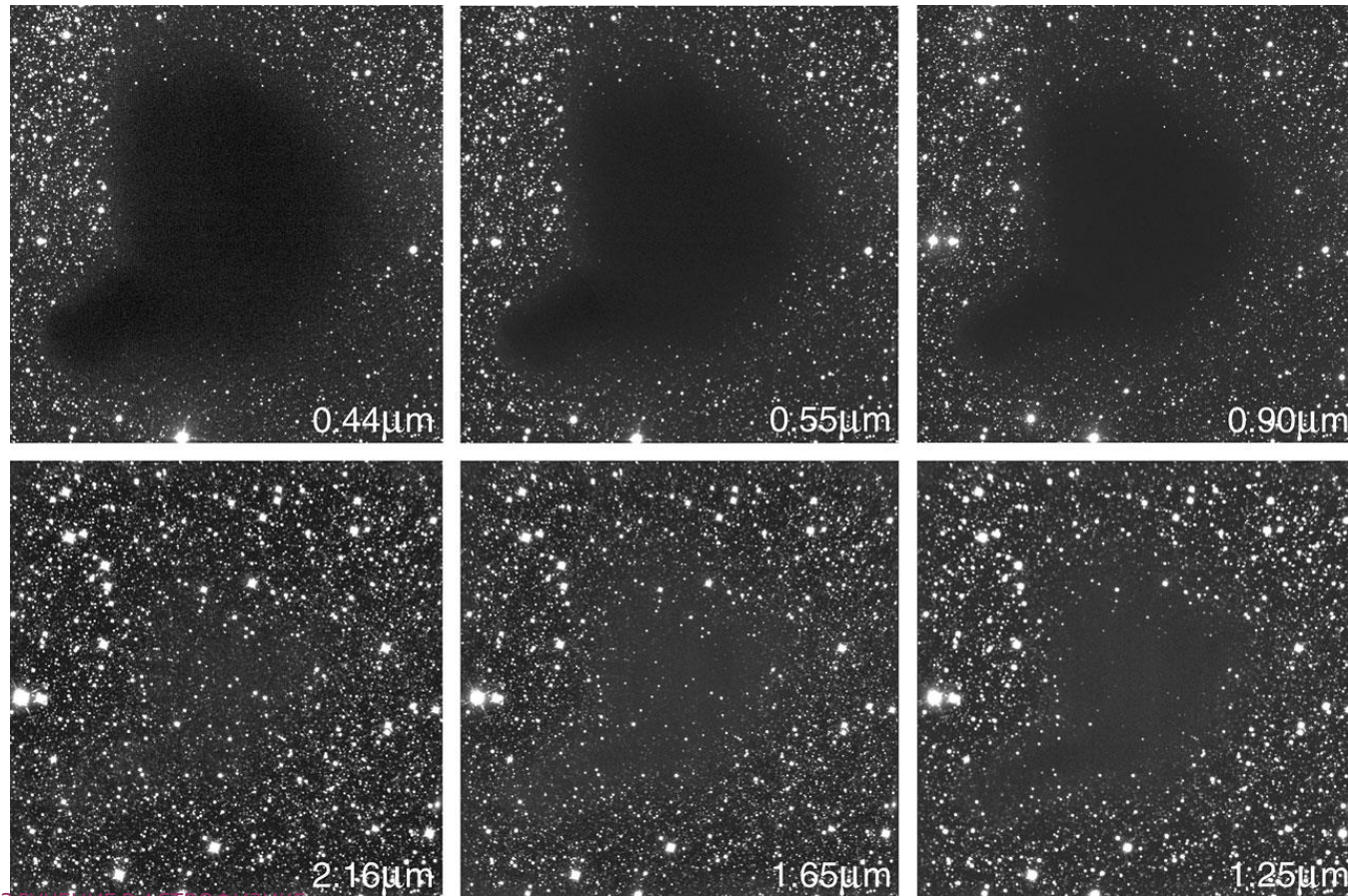
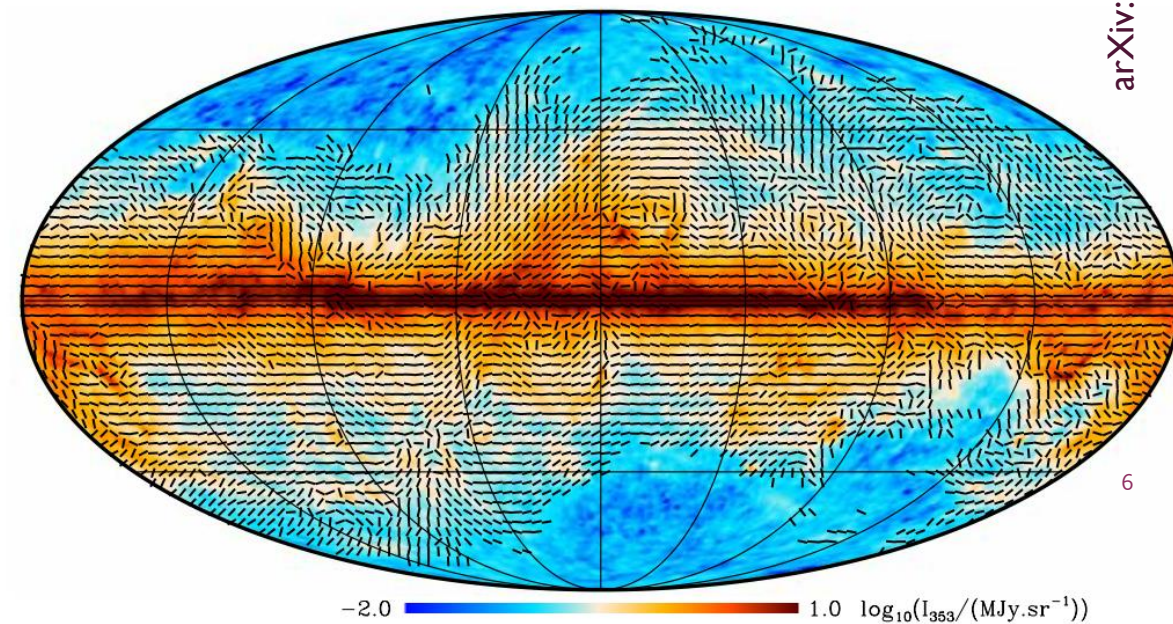
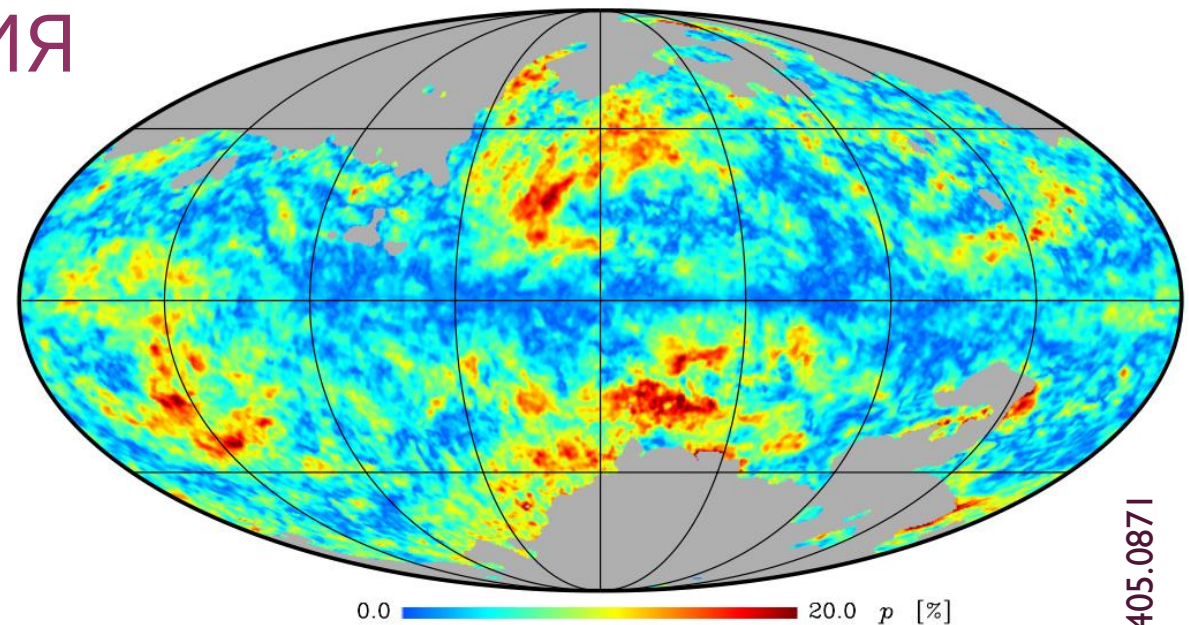
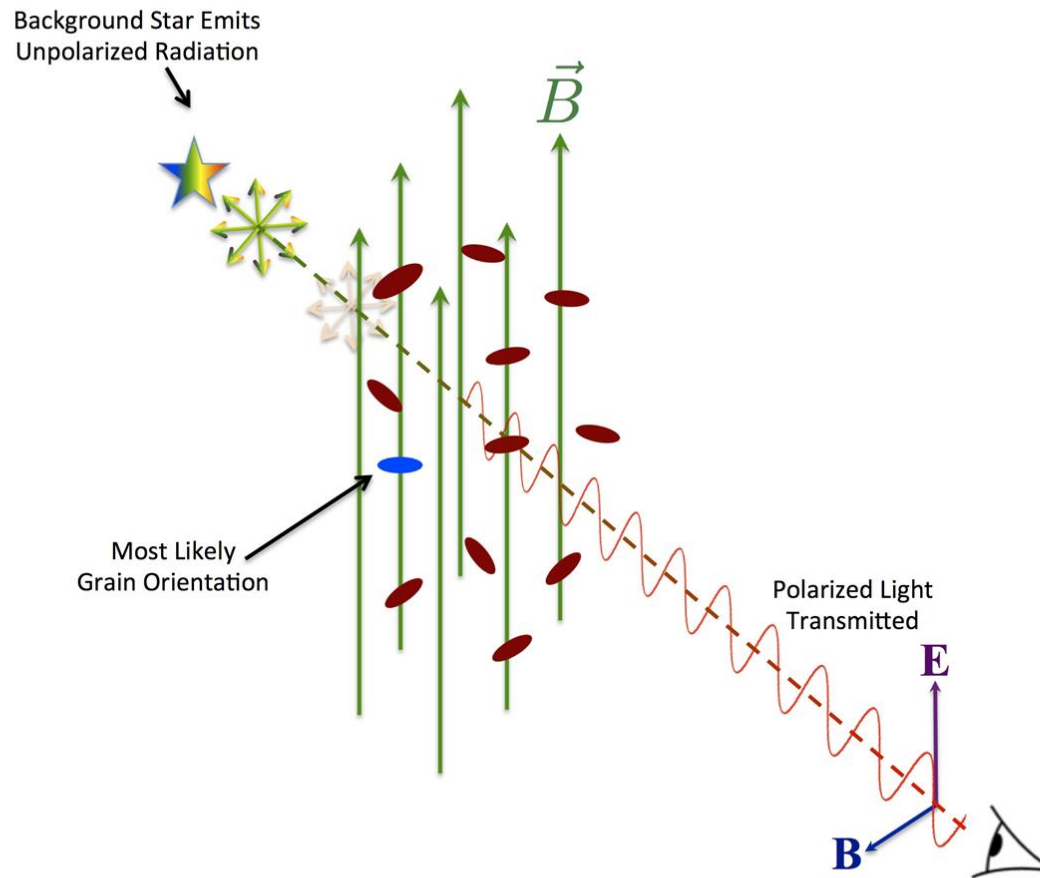


Fig. 1. Wavelength dependence of interstellar extinction normalised to 1.8 mag/kpc at  $\lambda^{-1} = 1.8 \mu\text{m}^{-1}$ . Points are astronomical observations; solid curve is for the grain model proposed here. (●) average extinction data compiled from many sources by Sagar and Kuusik (1979). (▲) ESA data from Jamar *et al.* (1976). (■) OAO II data from Bless and Savage (1972).

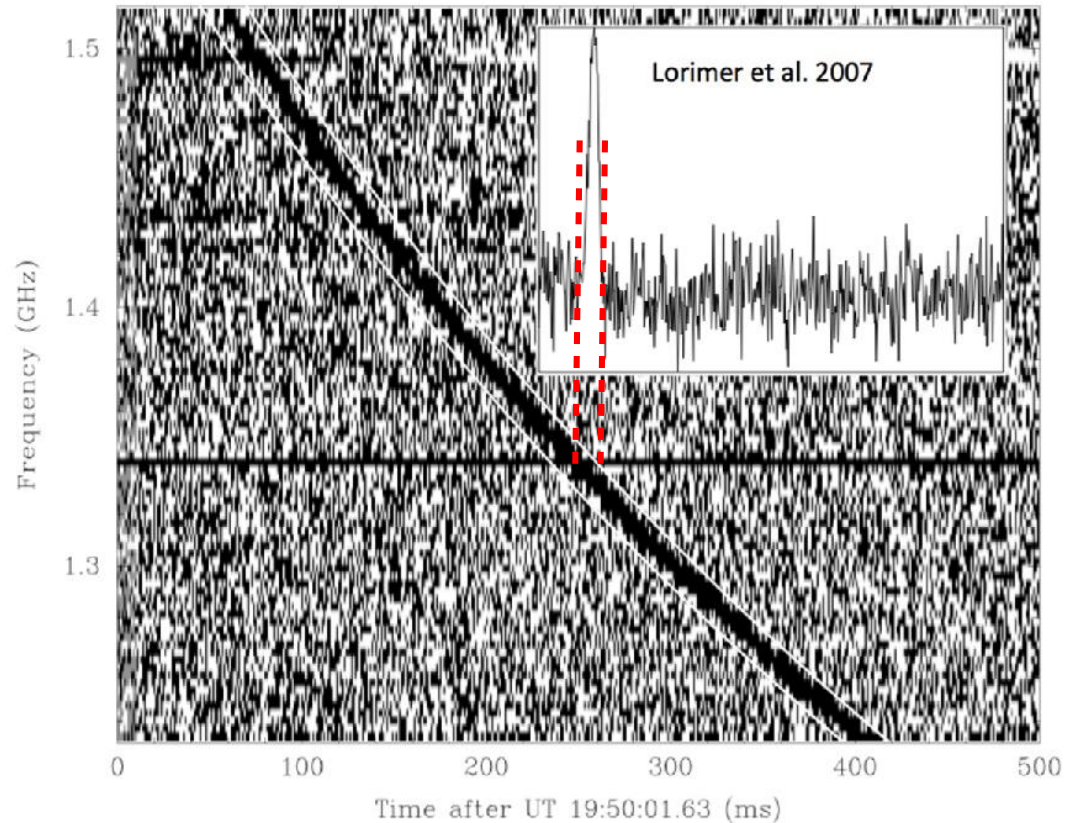


# МЕЖЗВЁЗДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ



arXiv:1405.0871

# ДИСПЕРСИЯ РАДИОВОЛН

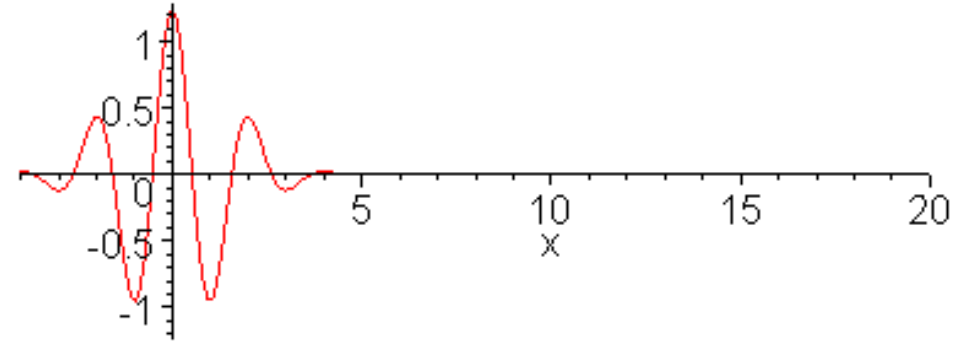


$$\Delta t_{1,2} = 4.6 (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \underbrace{\bar{n}_e \cdot D}_{\text{DM}} \text{ [мкс]}$$

ИЗЛУЧЕНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ 2



$\bar{n}_e \cdot D = DM$  -- «Мера дисперсии» [пк/см<sup>3</sup>]

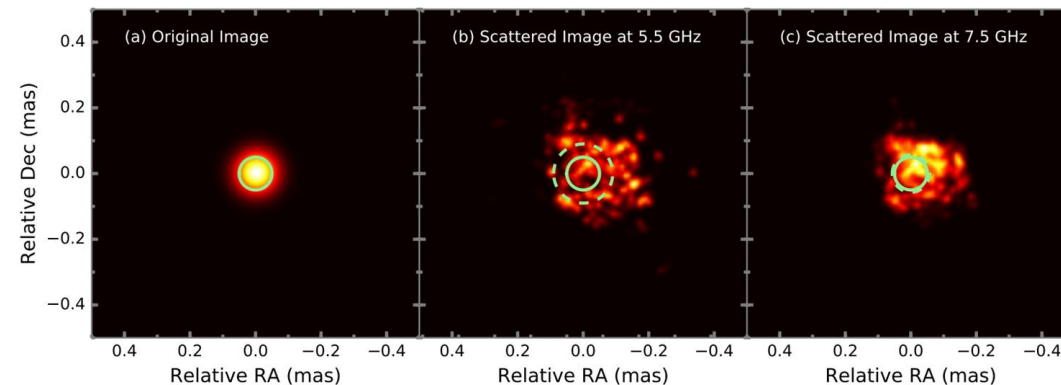
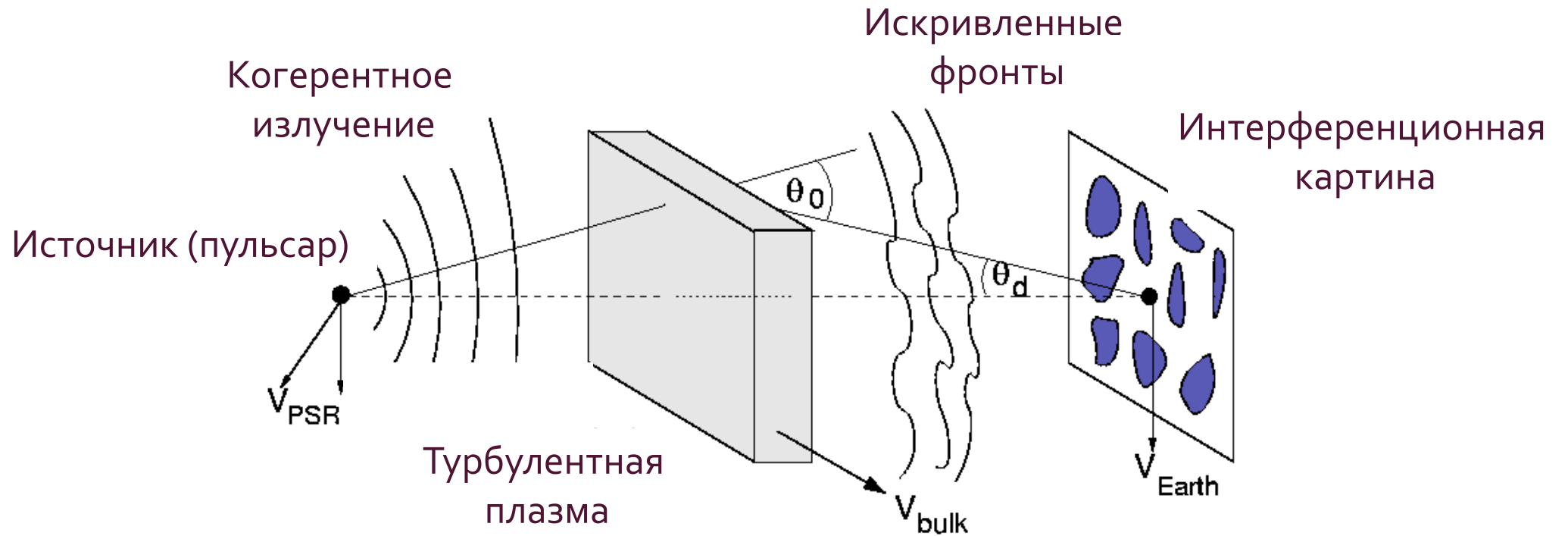


$$v_g = c \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

$$\omega_p \approx 5.6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e} \text{ рад/с}$$

Если длина волны выражается в см, расстояние в пк,  
а концентрация электронов в см<sup>-3</sup>

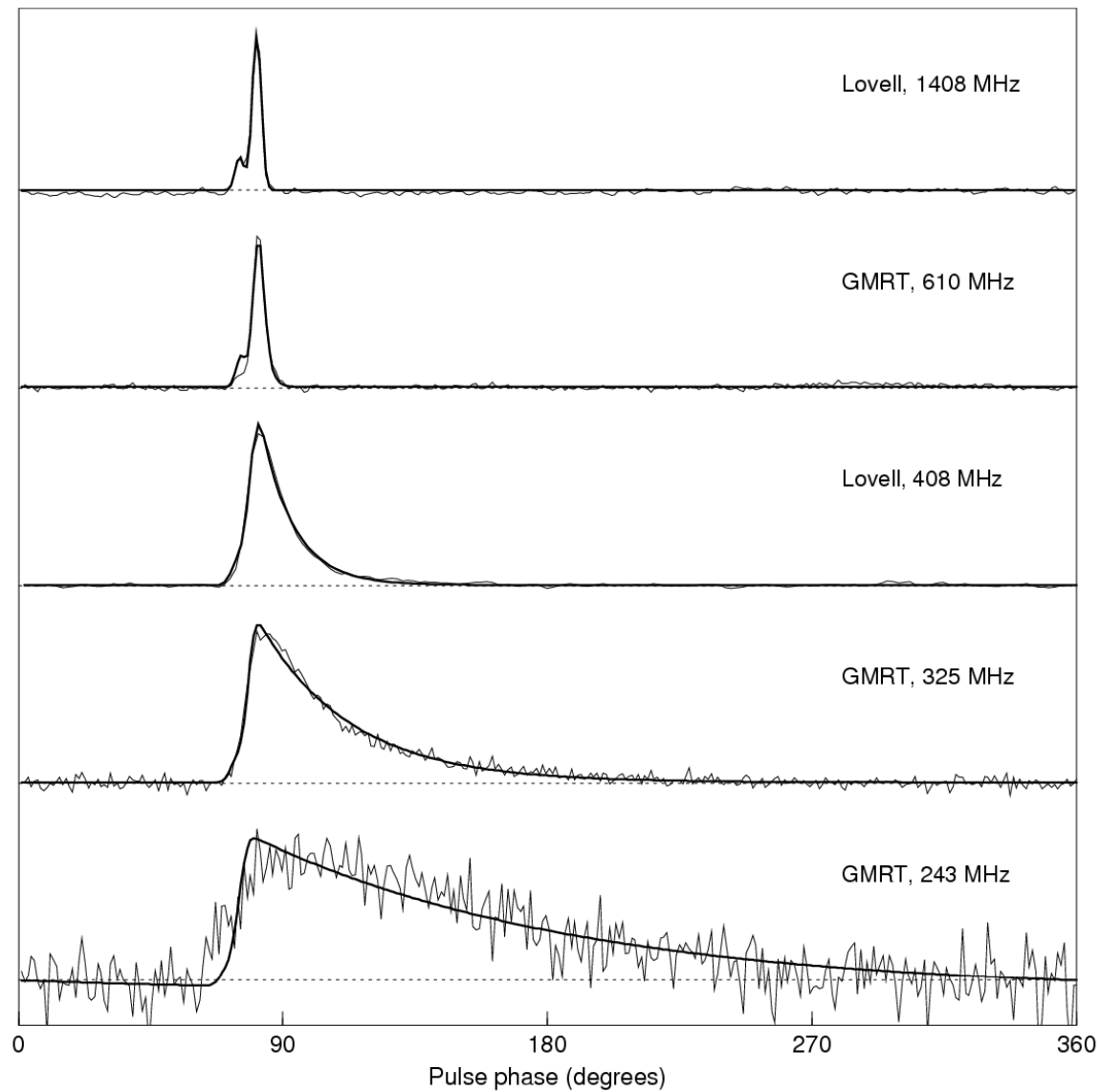
# ДИФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН



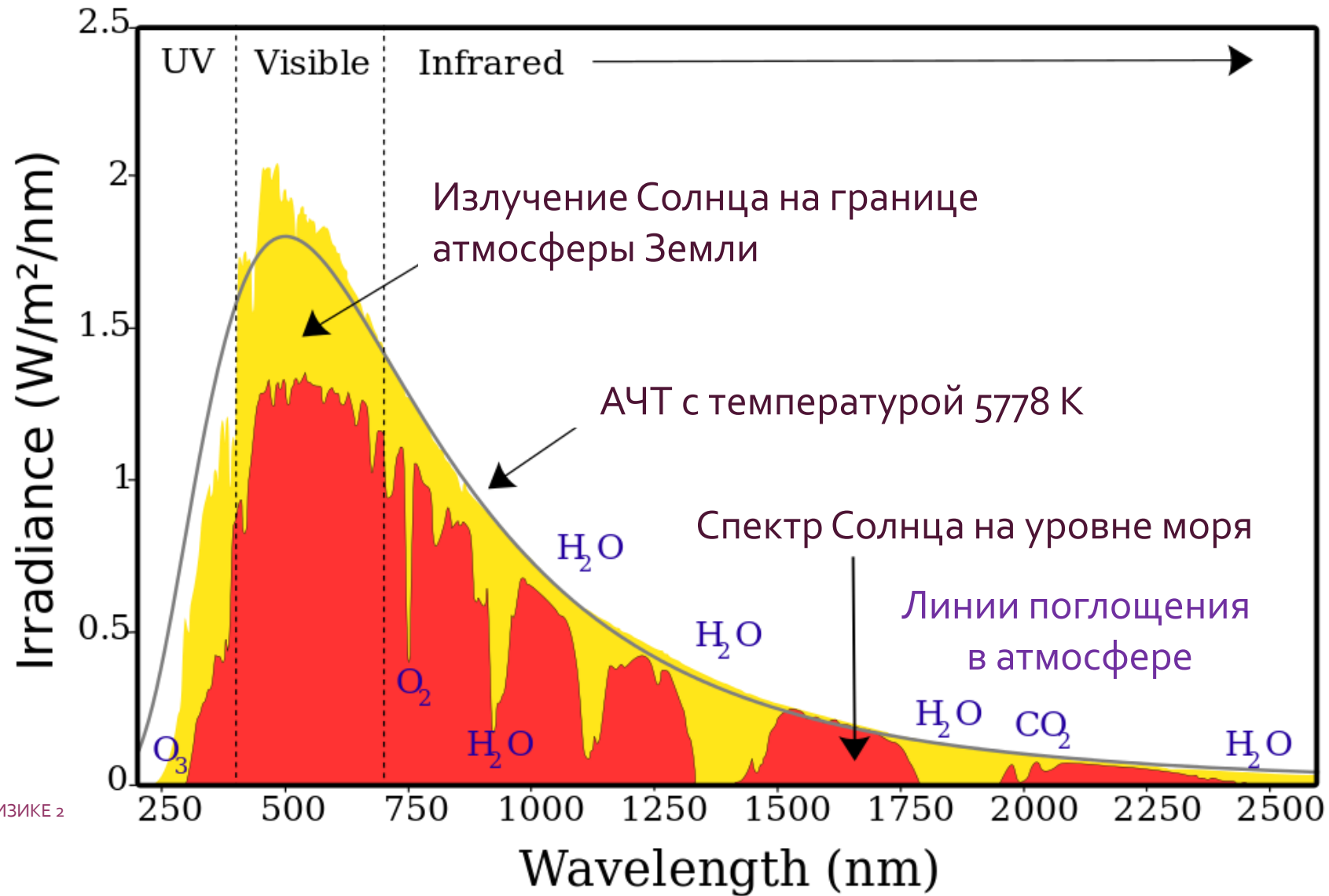


# ДИФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН

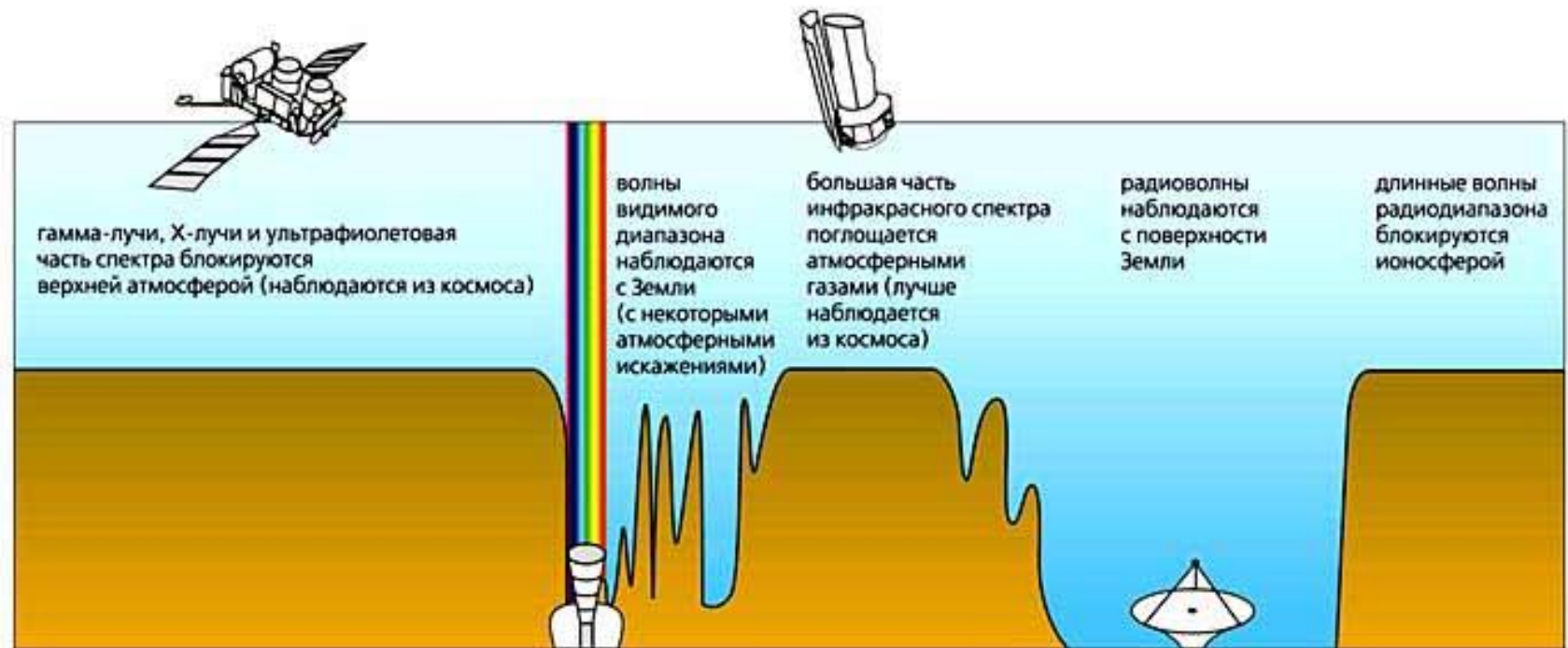
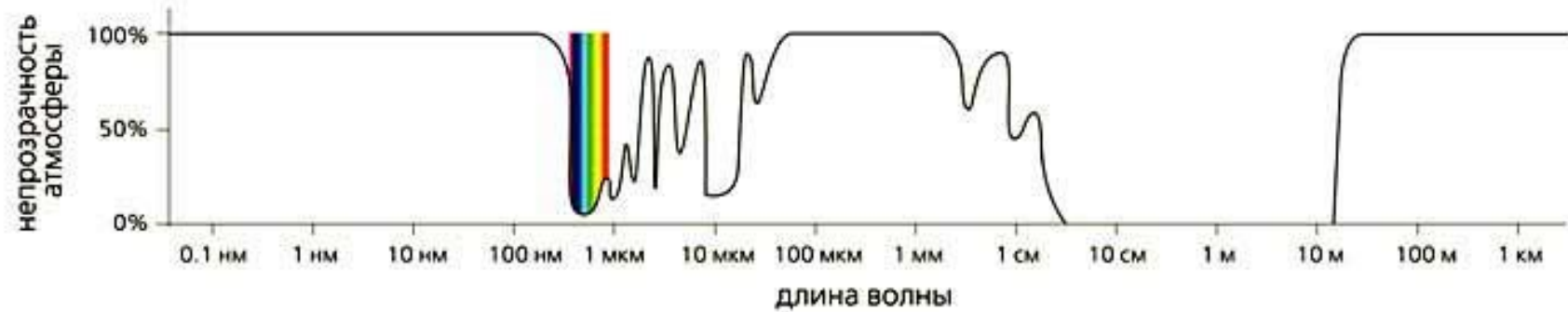
$$\tau \propto \nu^{-4}$$



# АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

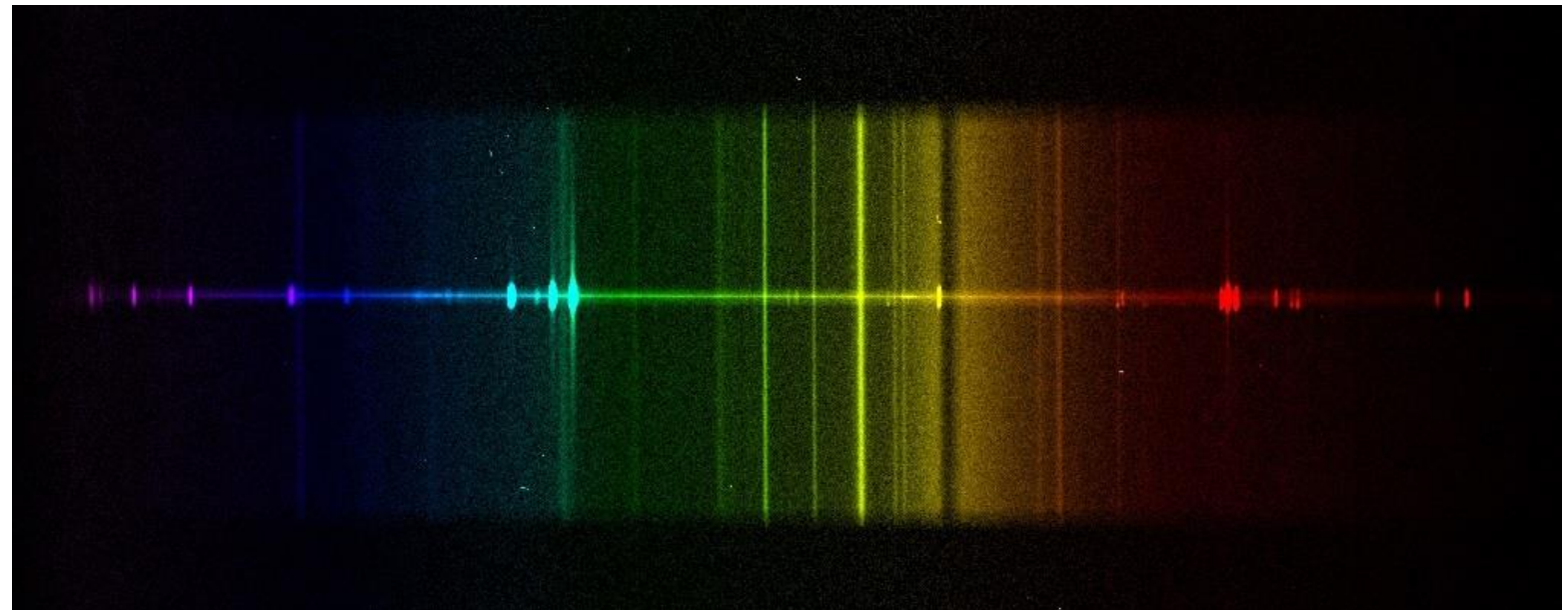
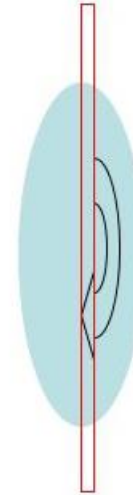
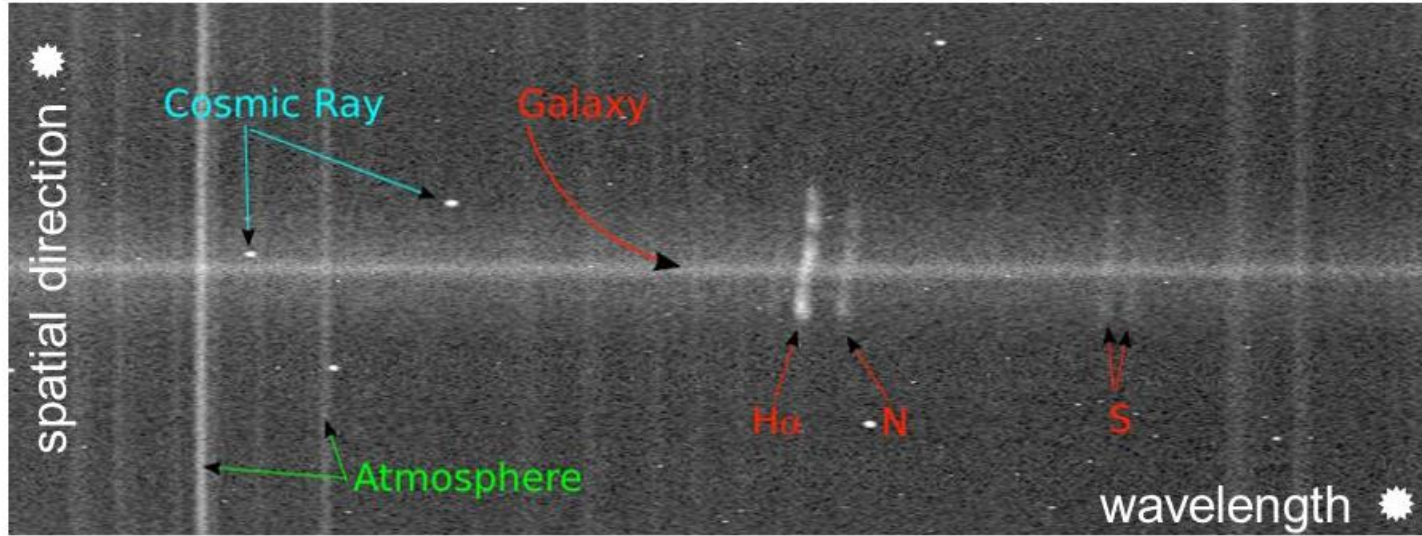


# АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

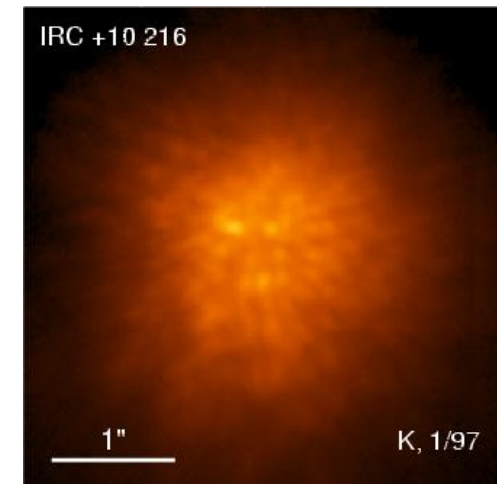
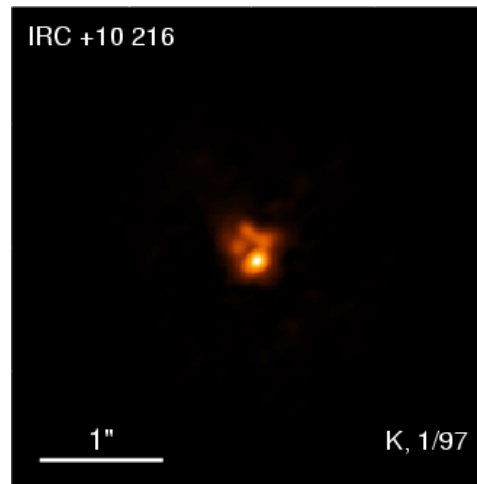
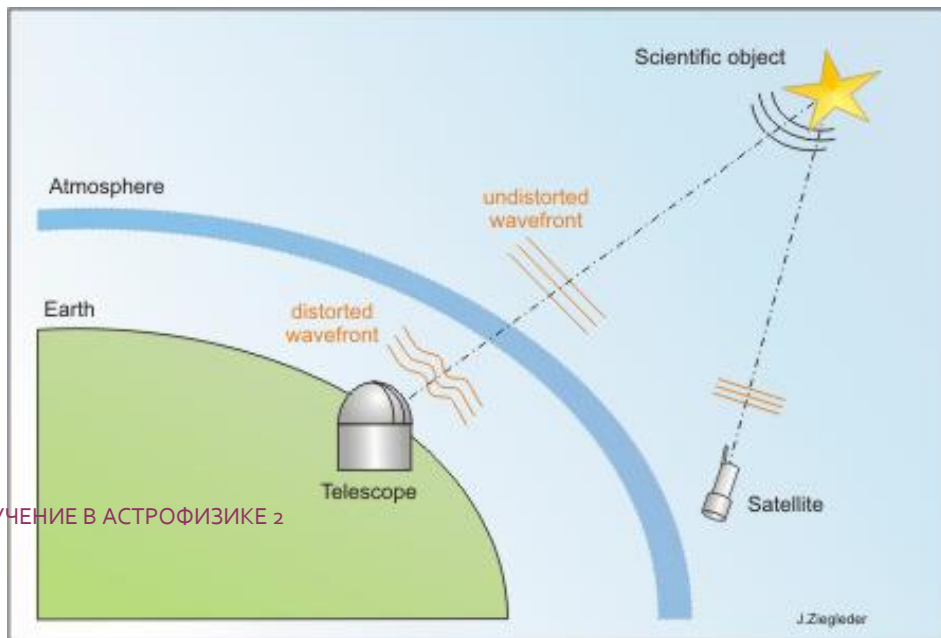
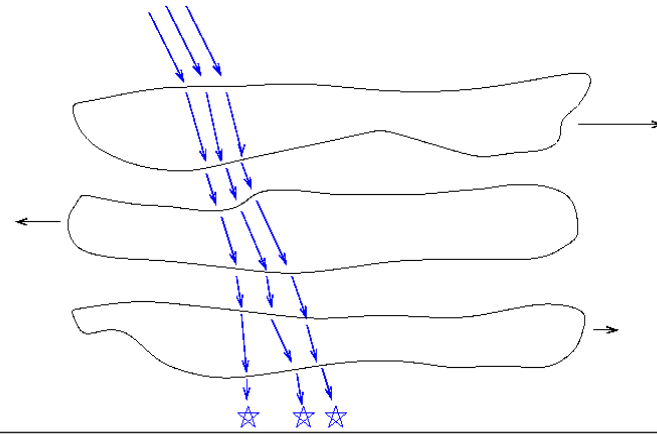
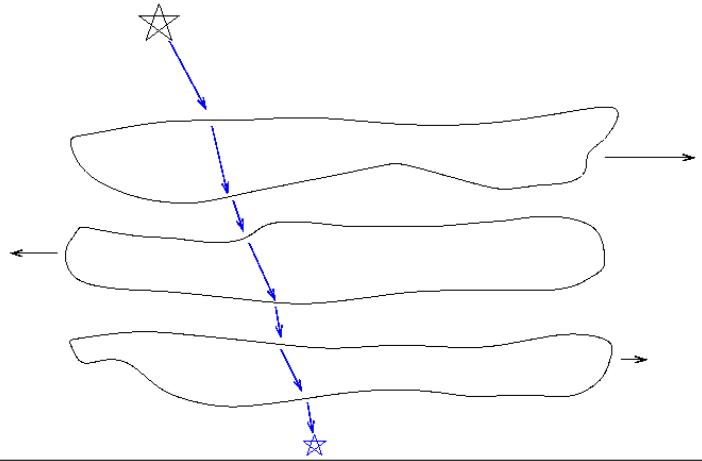




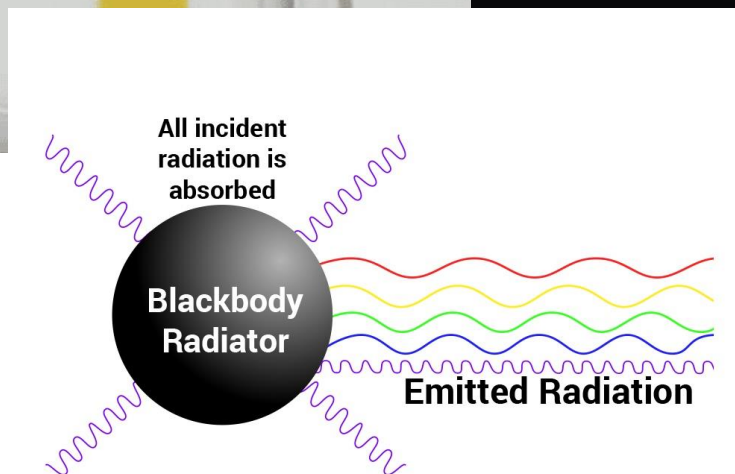
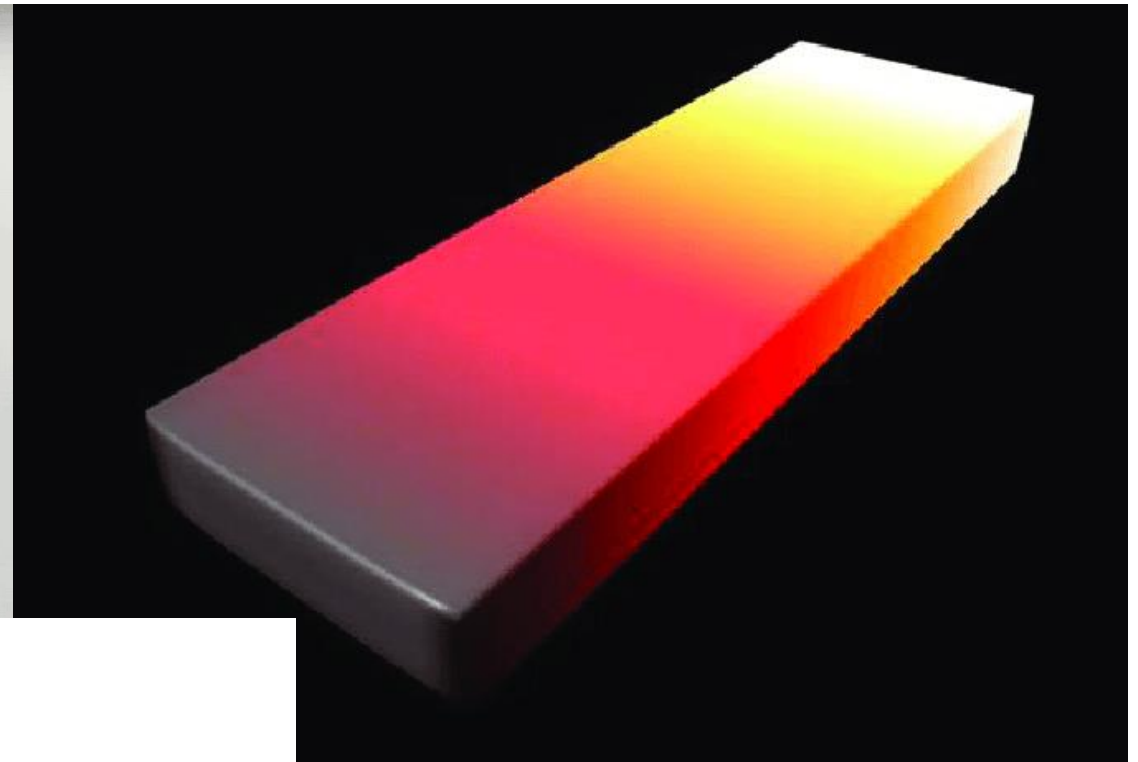
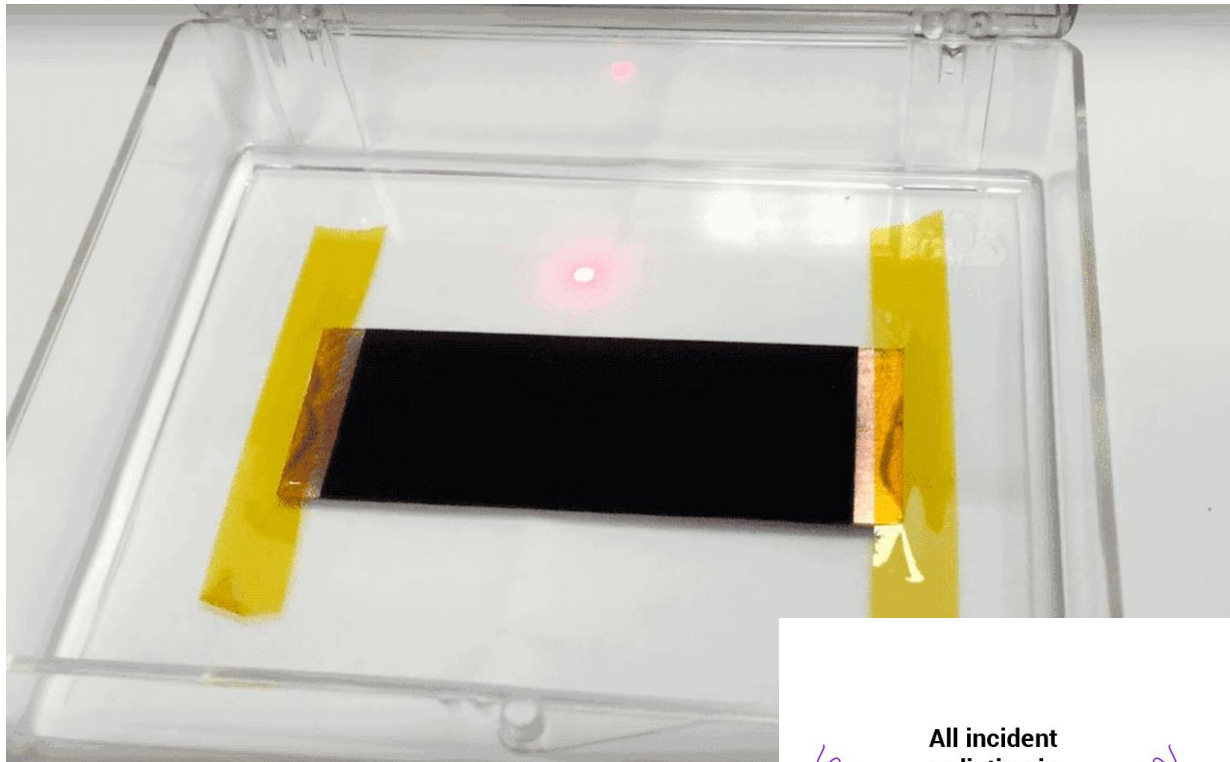
# СВЕЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА



# ИЗОБРАЖЕНИЕ ЗВЕЗДЫ

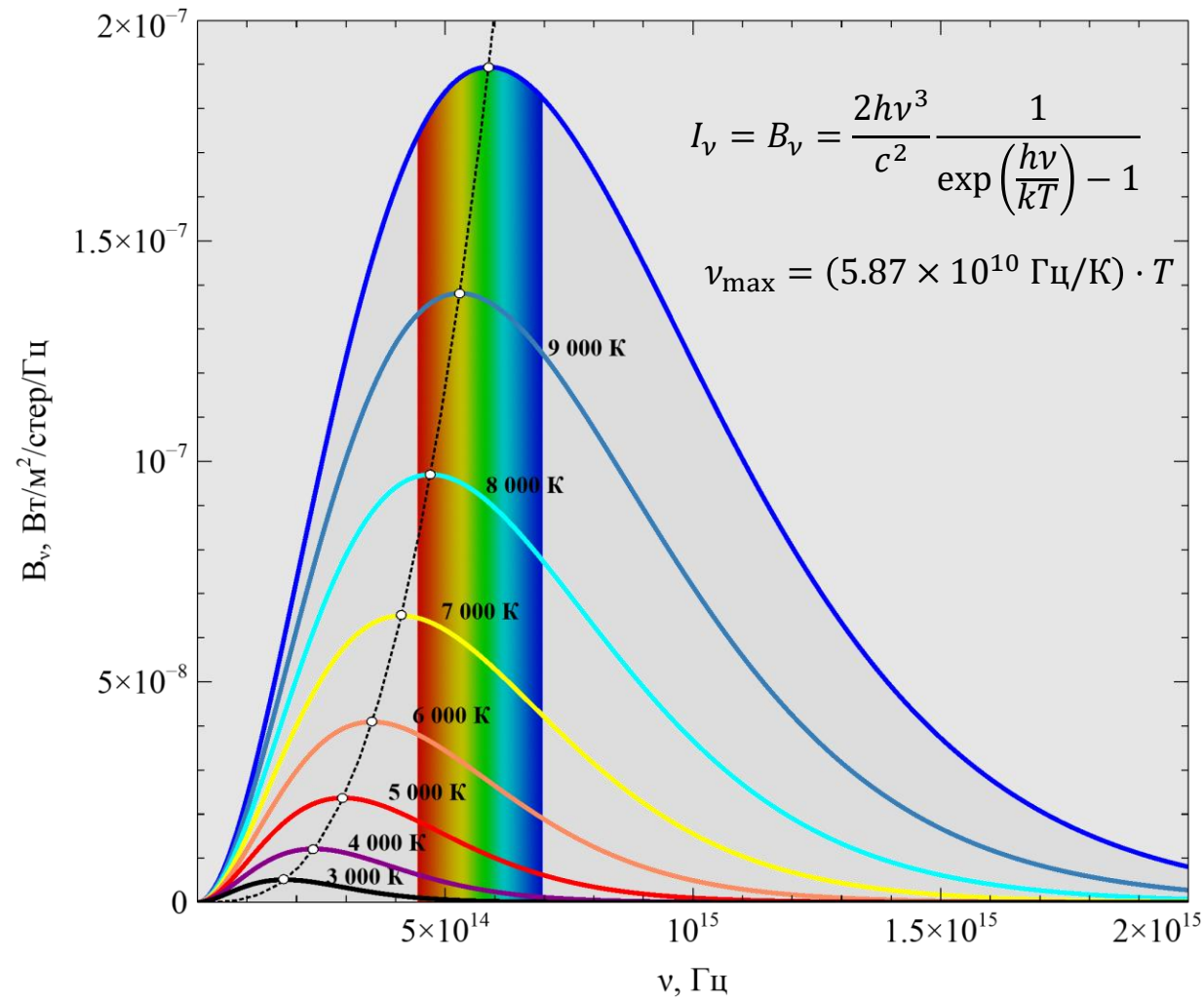
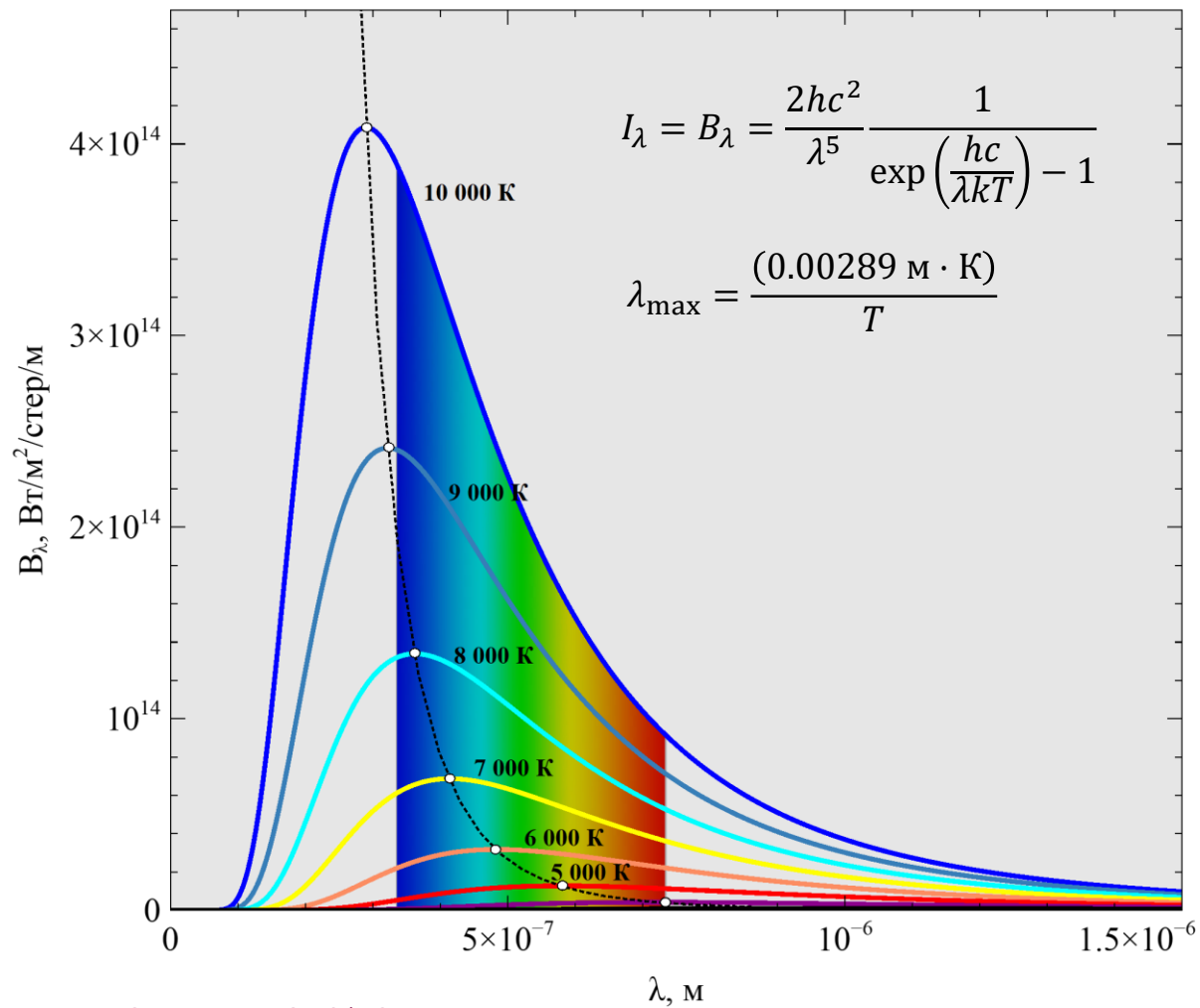


# АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО



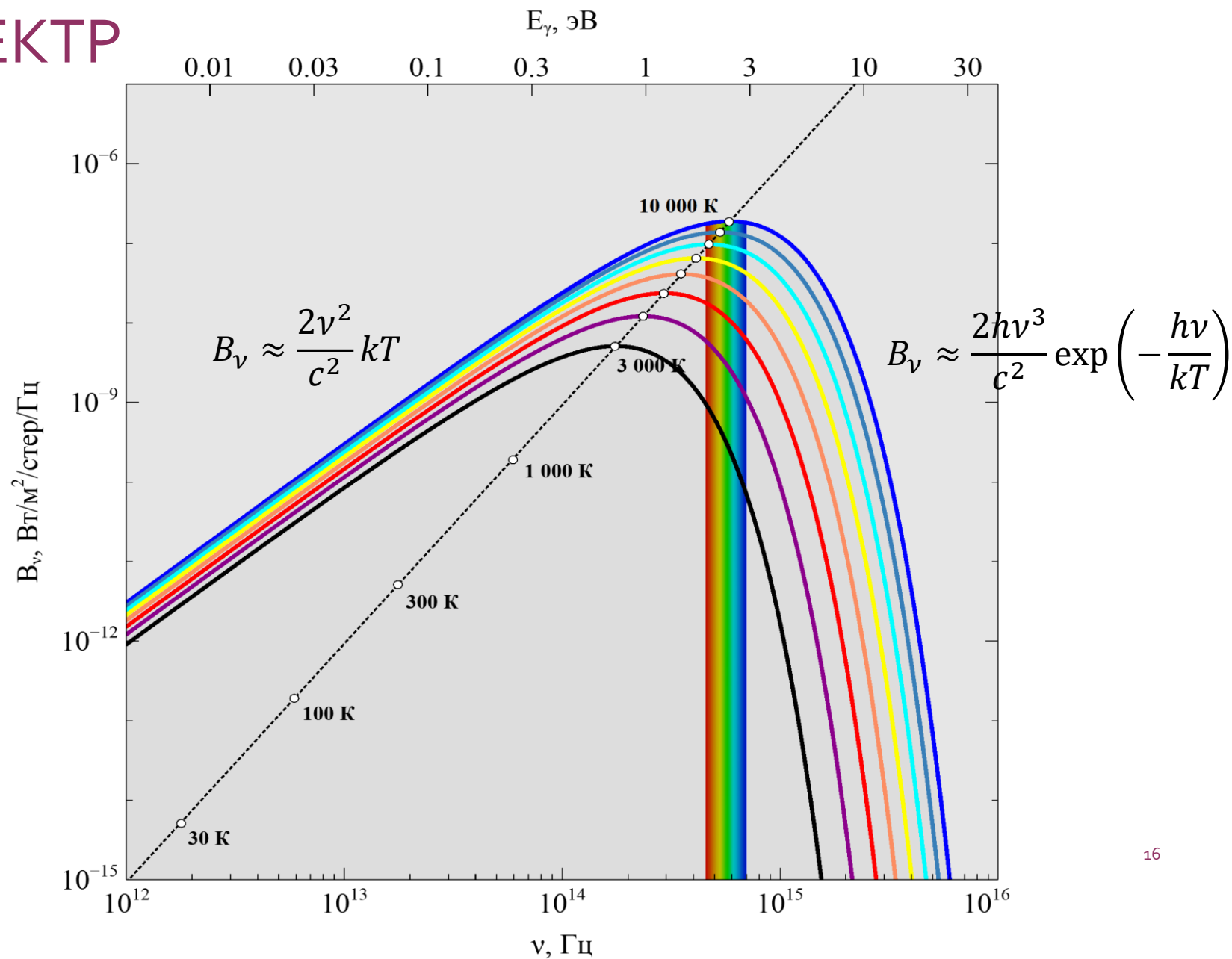


# ПЛАНКОВСКИЙ СПЕКТР



# ПЛАНКОВСКИЙ СПЕКТР

- $h\nu \ll kT \rightarrow$  Область Рэля-Джинса, степенной спектр:  
 $B_\nu \propto \nu^2$
- $h\nu \gg kT \rightarrow$  Область Вина, экспоненциальный спектр:  
 $B_\nu \propto \nu^3 e^{-\nu/\nu_0}$



# ЦЕФЕИДЫ

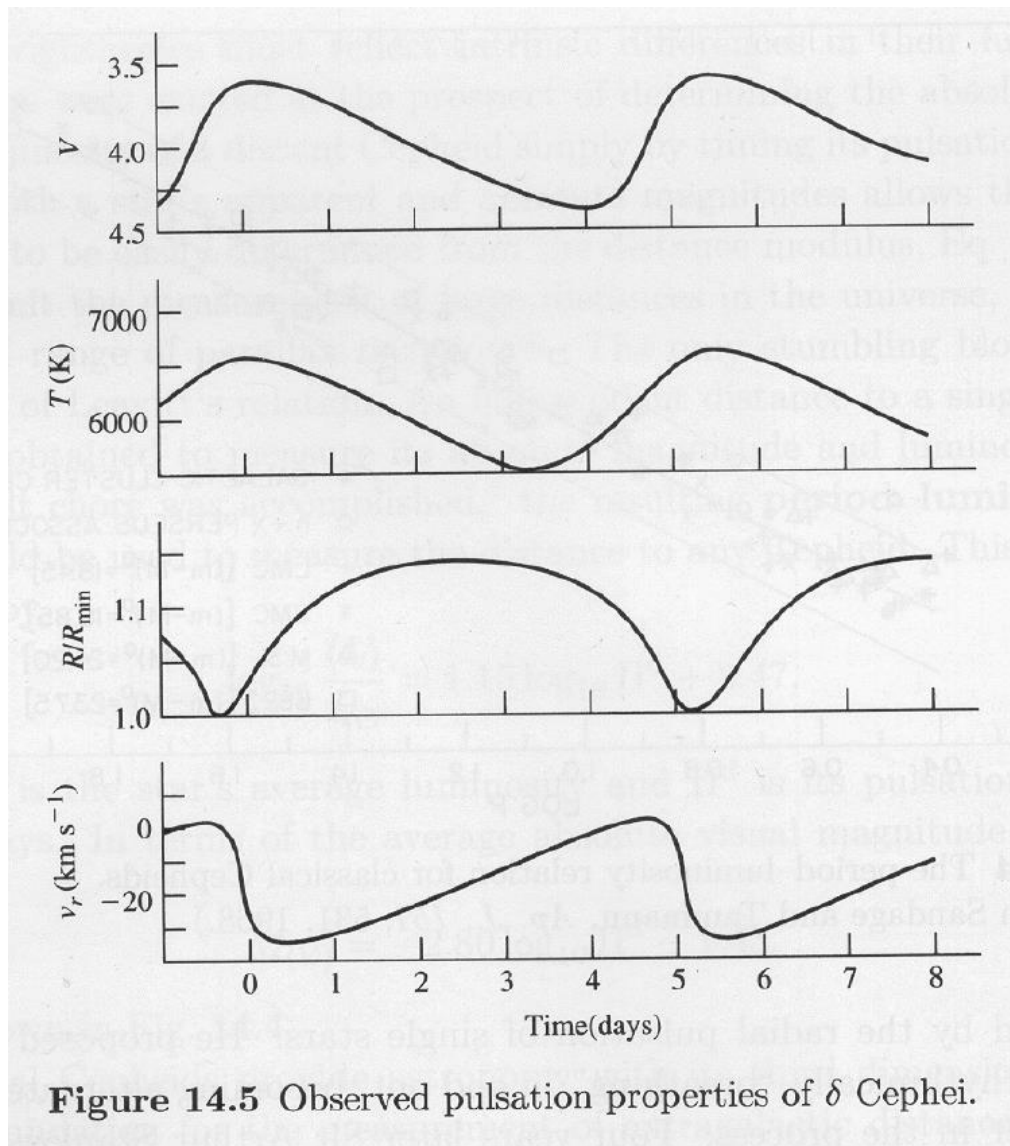
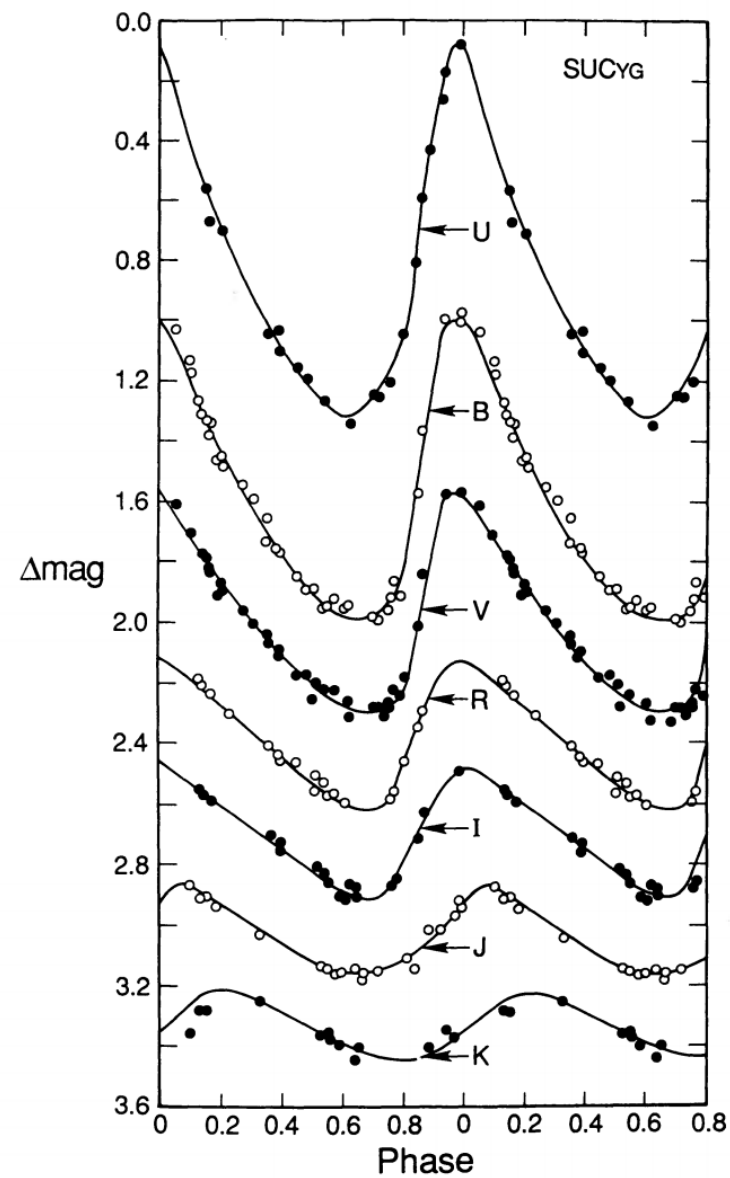


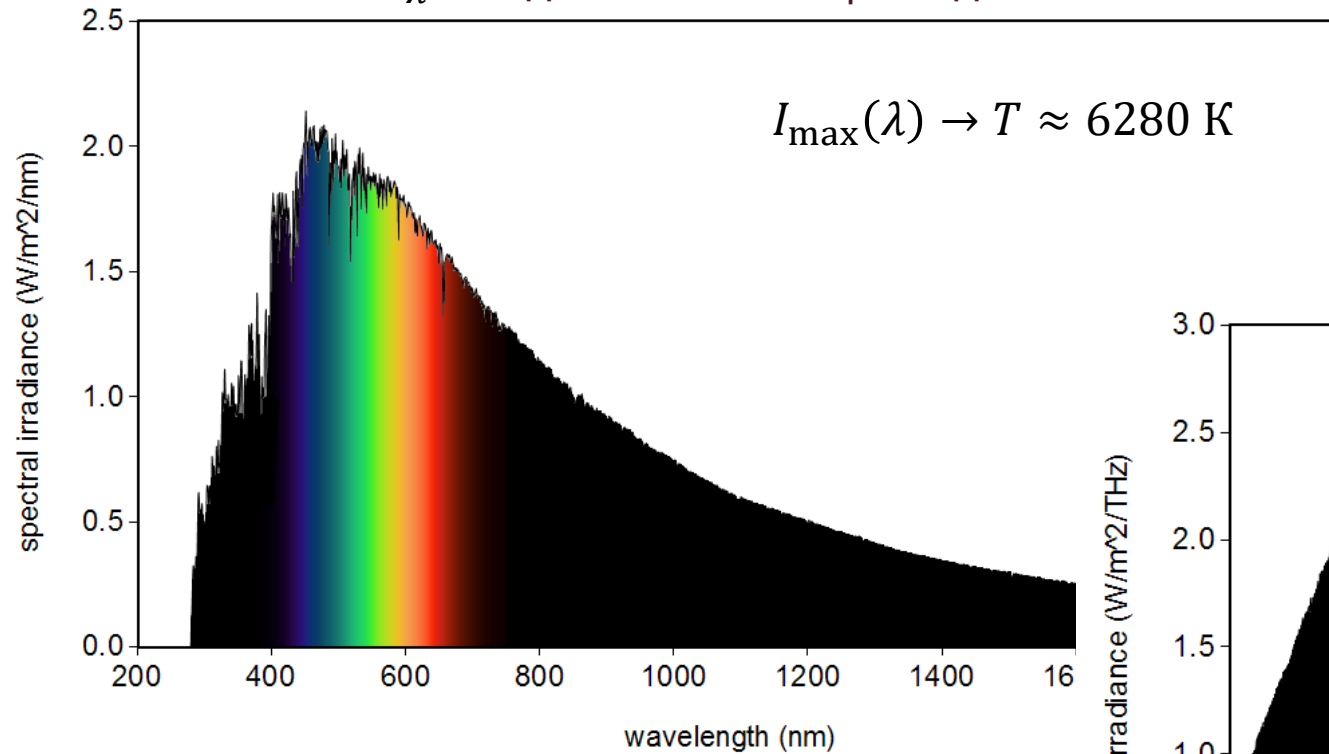
Figure 14.5 Observed pulsation properties of  $\delta$  Cephei.





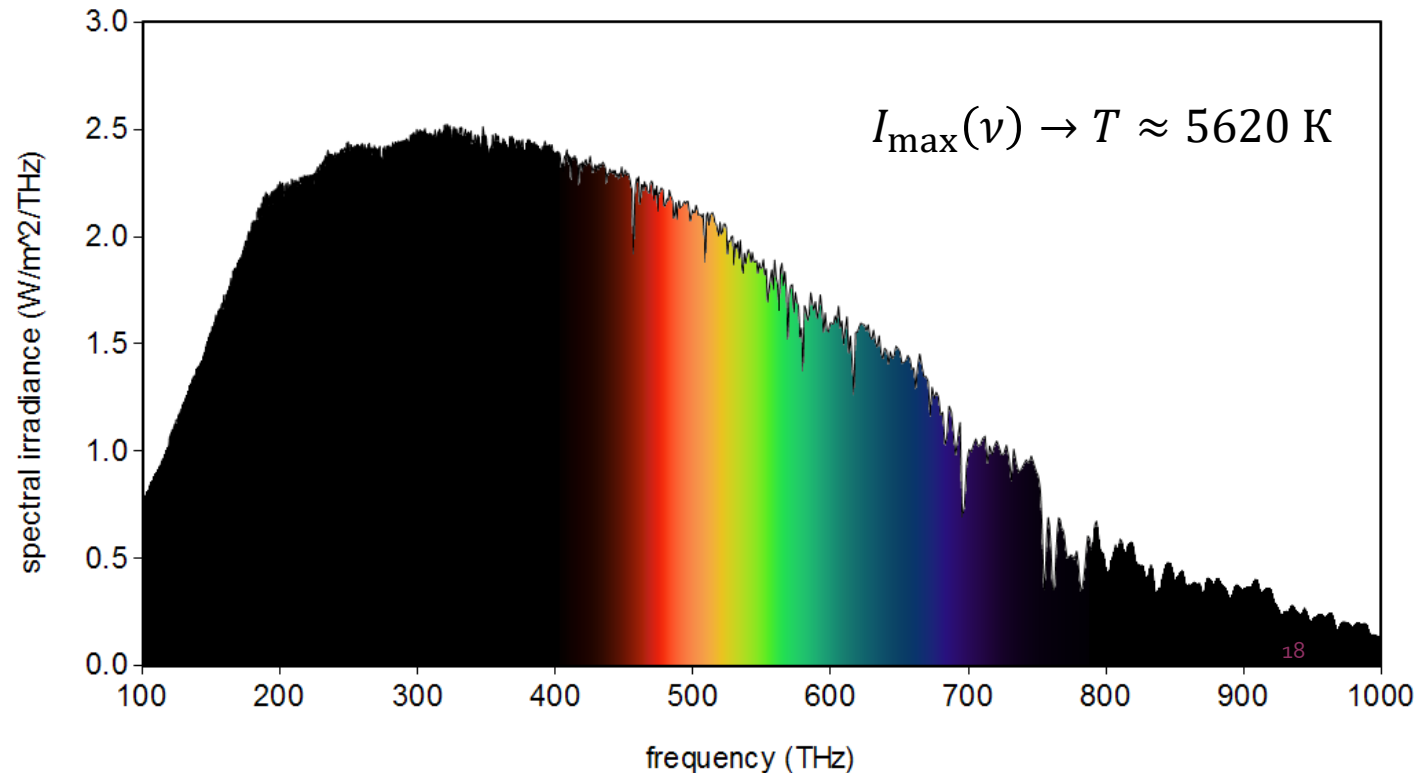
# ТЕМПЕРАТУРА И СПЕКТР СОЛНЦА

Поток  $F_\lambda$  на единичный интервал длин волн.

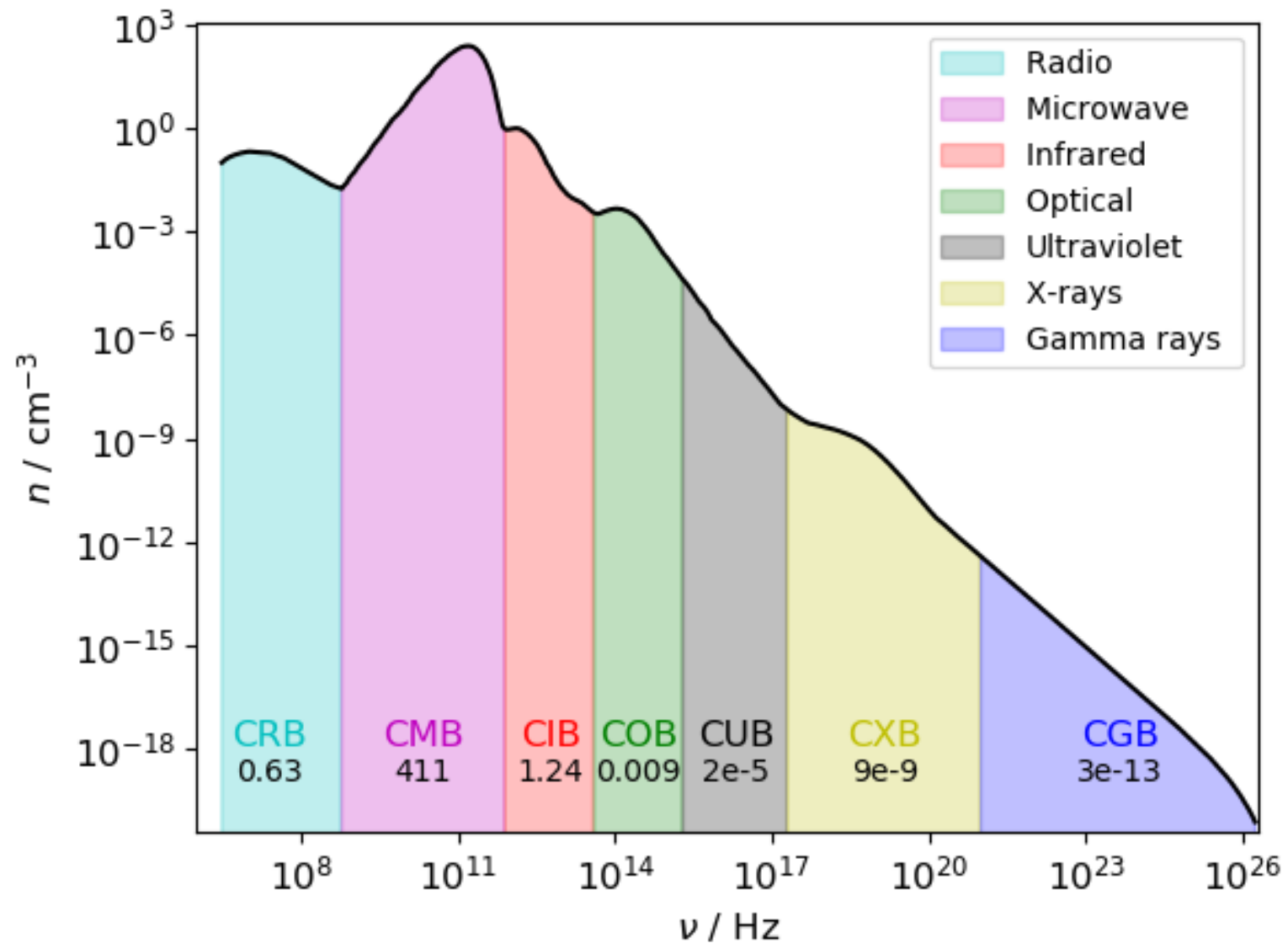


$$T_{\text{eff}, \odot} \approx 5772 \text{ K}$$

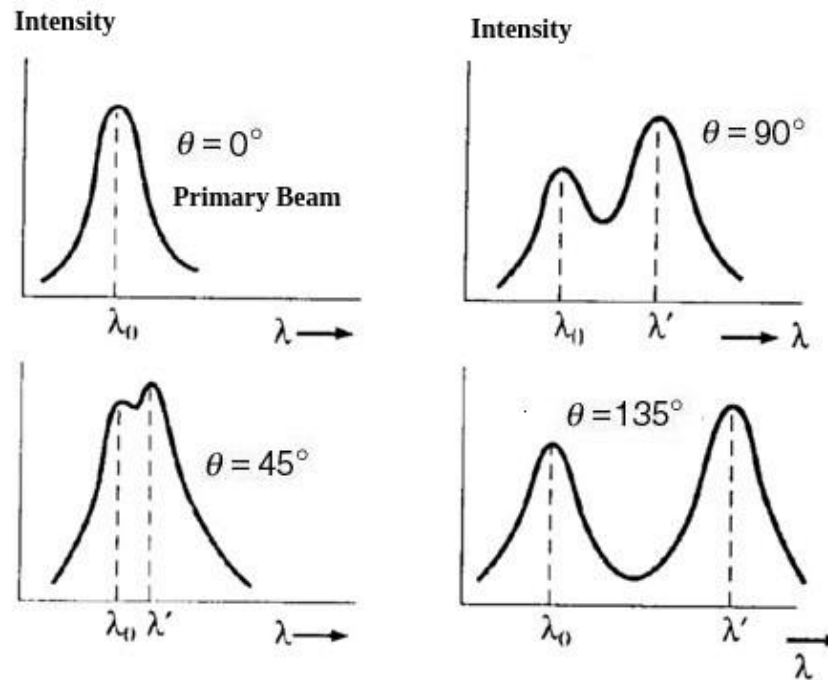
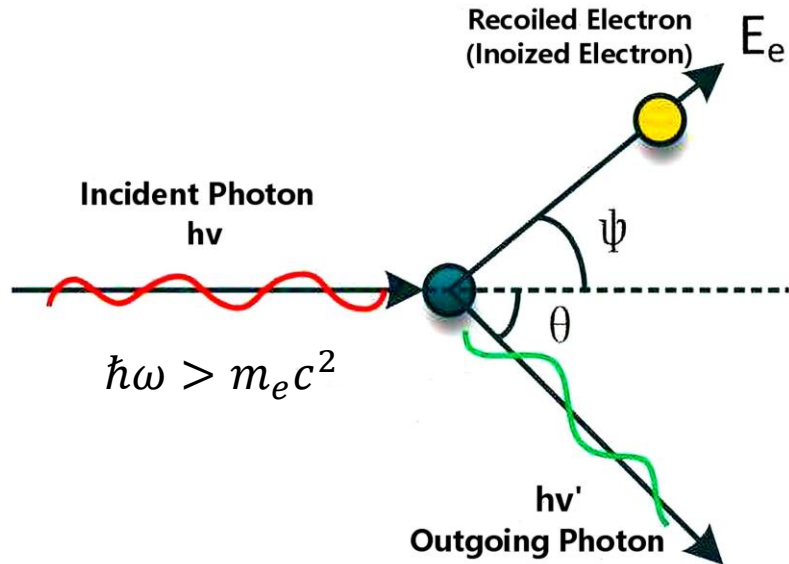
Поток  $F_\nu$  на единичный интервал частот.



# ФОН ИЗЛУЧЕНИЯ

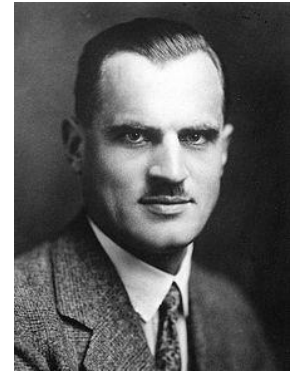


# КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ



$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

(В предположении, что в начале электрон покоился)



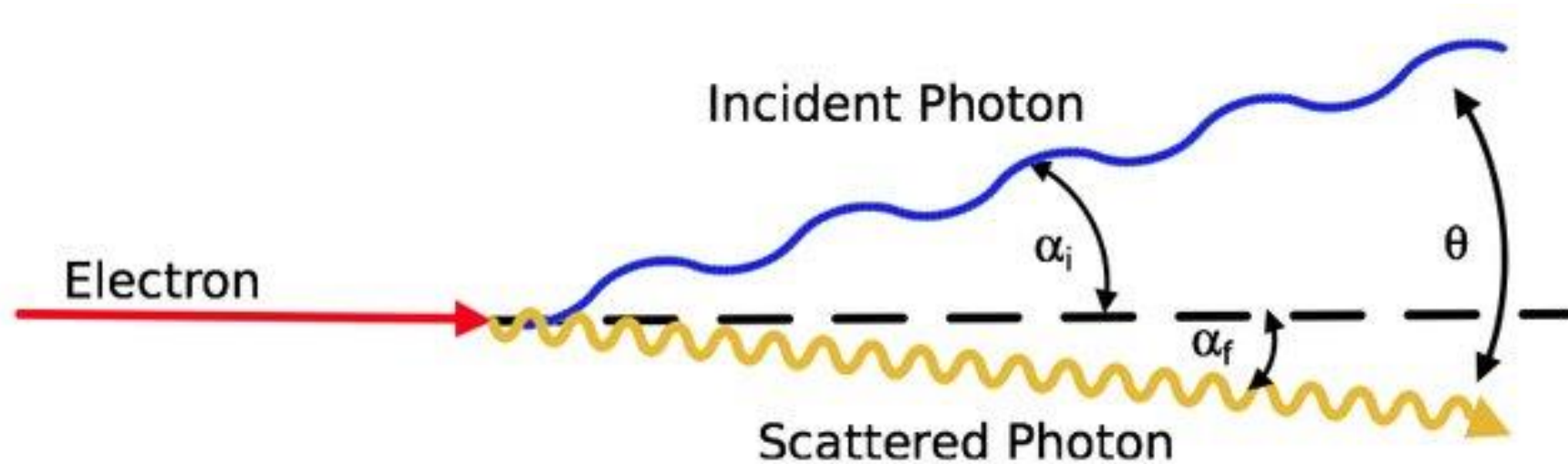
Артур Комптон  
(1892 – 1962)

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} \approx 2.4 \times 10^{-10} \text{ см}$$

(Комптоновская длина волны)



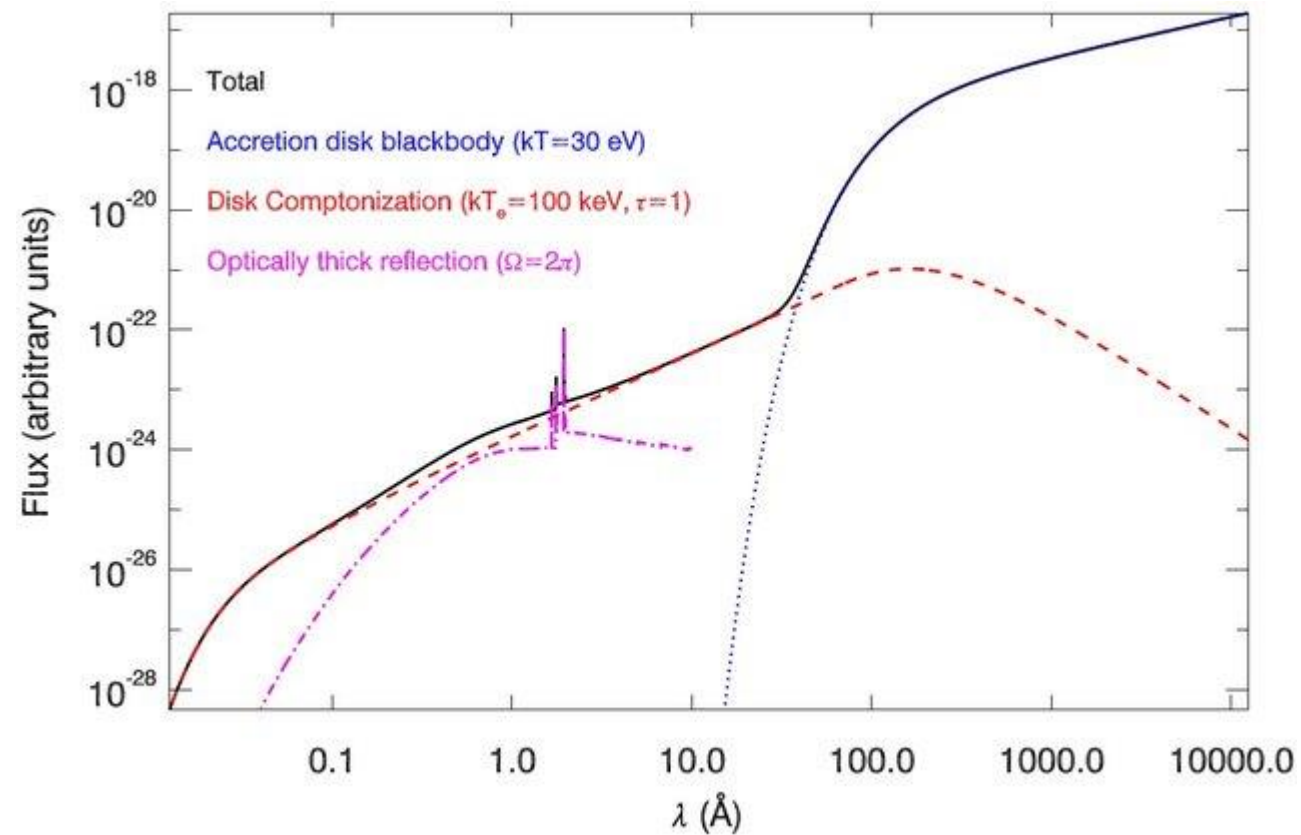
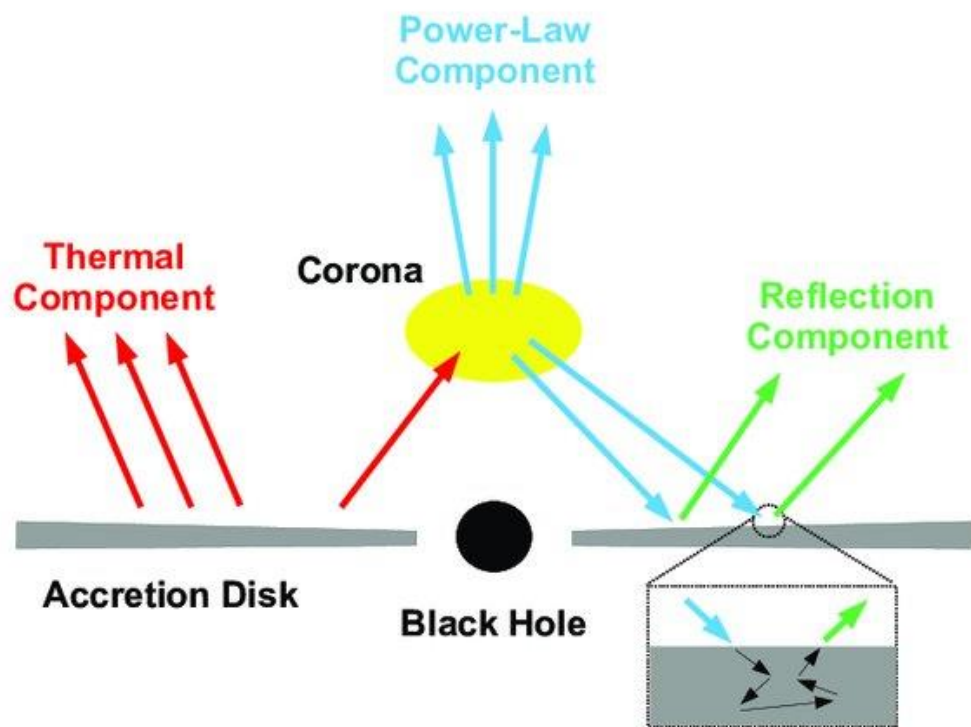
# ОБРАТНЫЙ КОМПТОН-ЭФФЕКТ



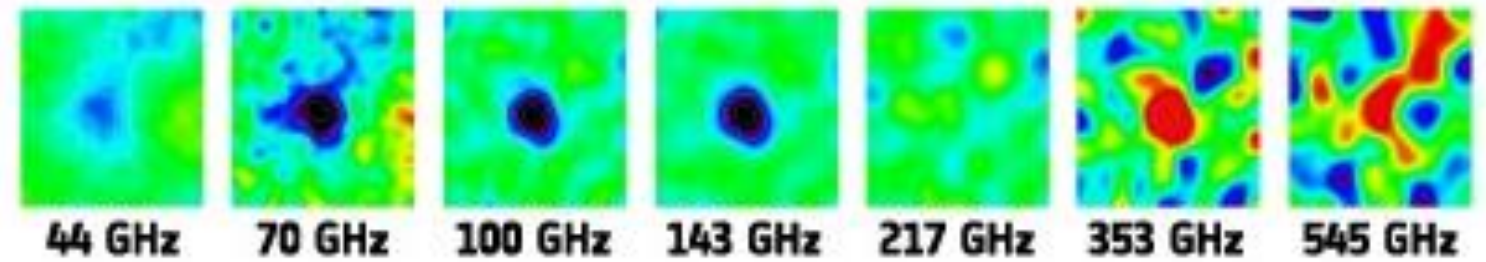
Энергия электрона очень велика:  $\gamma \gg 1$ . И она передаётся фотону так, что его энергия увеличивается:  $\mathcal{E}'_\gamma \sim \gamma^2 \mathcal{E}_\gamma$

$$\dot{E}_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_{ph}$$

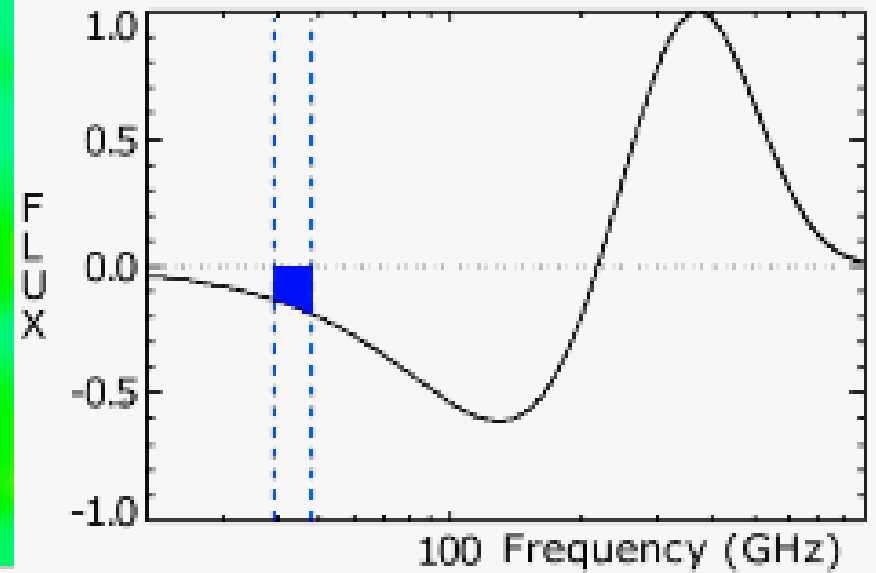
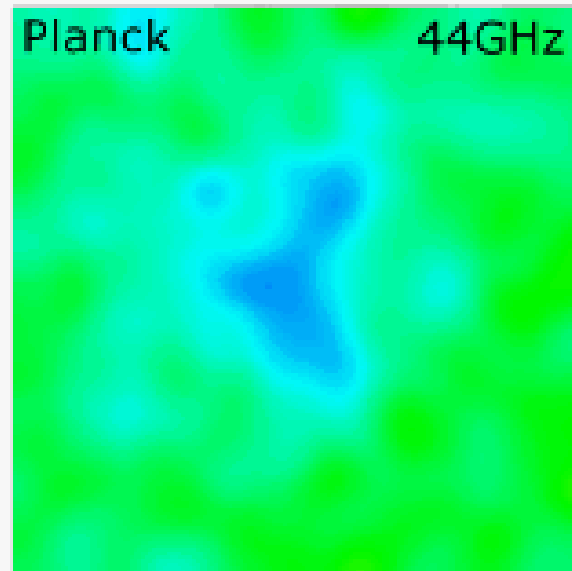
# СЛАЙД-ДЕЖАВЮ: ТАКИЕ РАЗНЫЕ СПЕКТРЫ



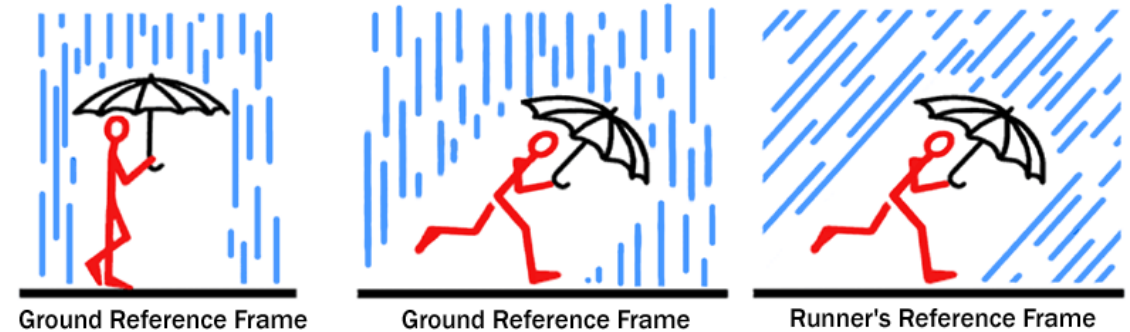
# ЭФФЕКТ СЮНЯЕВА-ЗЕЛЬДОВИЧА



$$\frac{\Delta T}{T_{CMB}} \propto \sigma_T \int n_e(l) \frac{kT_e(l)}{m_e c^2} dl$$

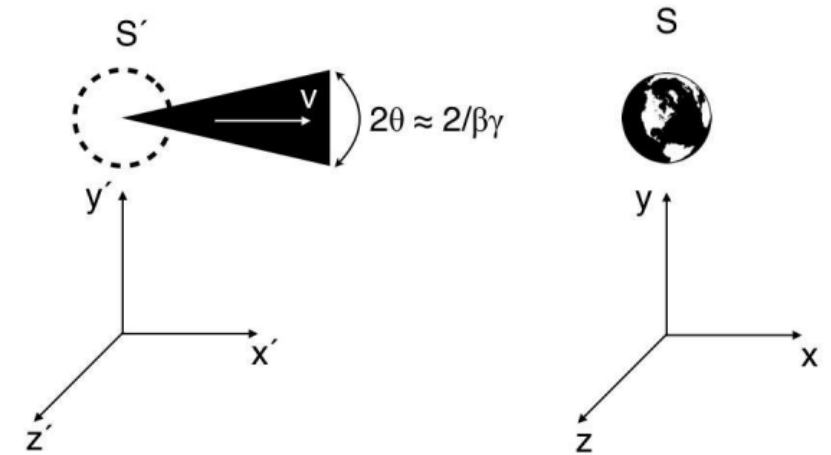


# АБЕРРАЦИЯ СВЕТА



$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + V \cdot dt'}{dt' + \frac{V}{c^2} \cdot dx'} \Rightarrow v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{V \cdot v'_x}{c^2}}$$

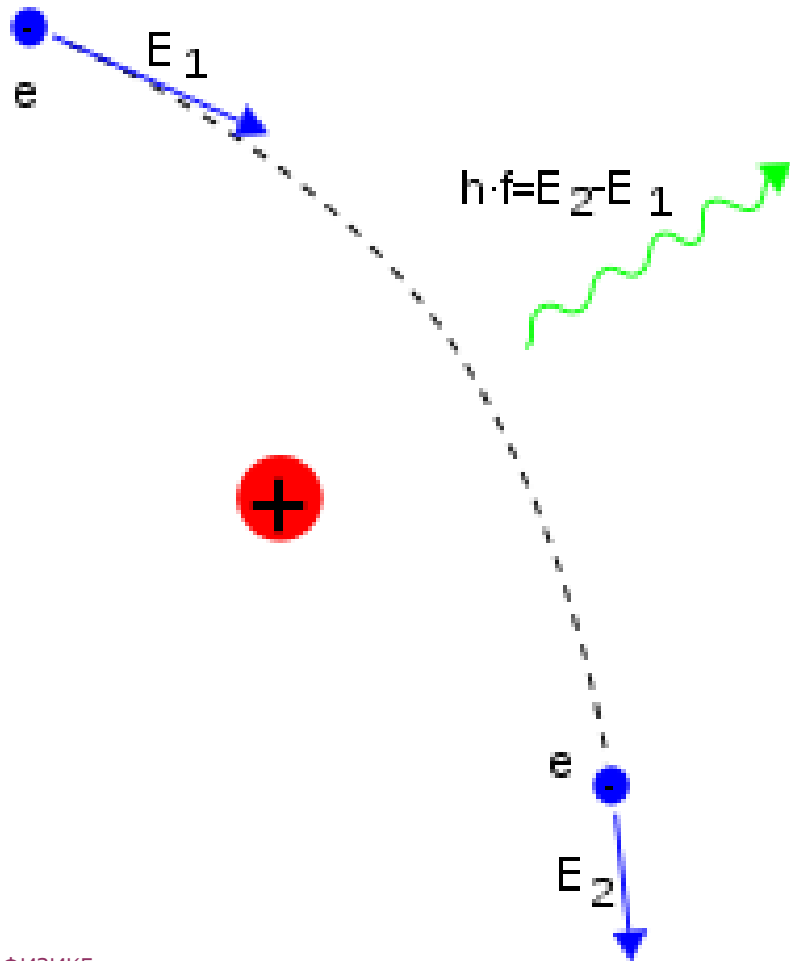
$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{\Gamma \cdot \left( dt' + \frac{V}{c^2} \cdot dx' \right)} \Rightarrow v_y = \frac{v'_y}{\Gamma \cdot \left( 1 + \frac{V \cdot v'_x}{c^2} \right)}$$



$$v = (v'_x, v'_y) = (0, c) \Rightarrow \frac{v_x}{v_y} = \tan \theta = \frac{1}{\Gamma\beta} \text{ или } \theta \approx \frac{1}{\Gamma} \text{ при } V \sim c$$



# ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

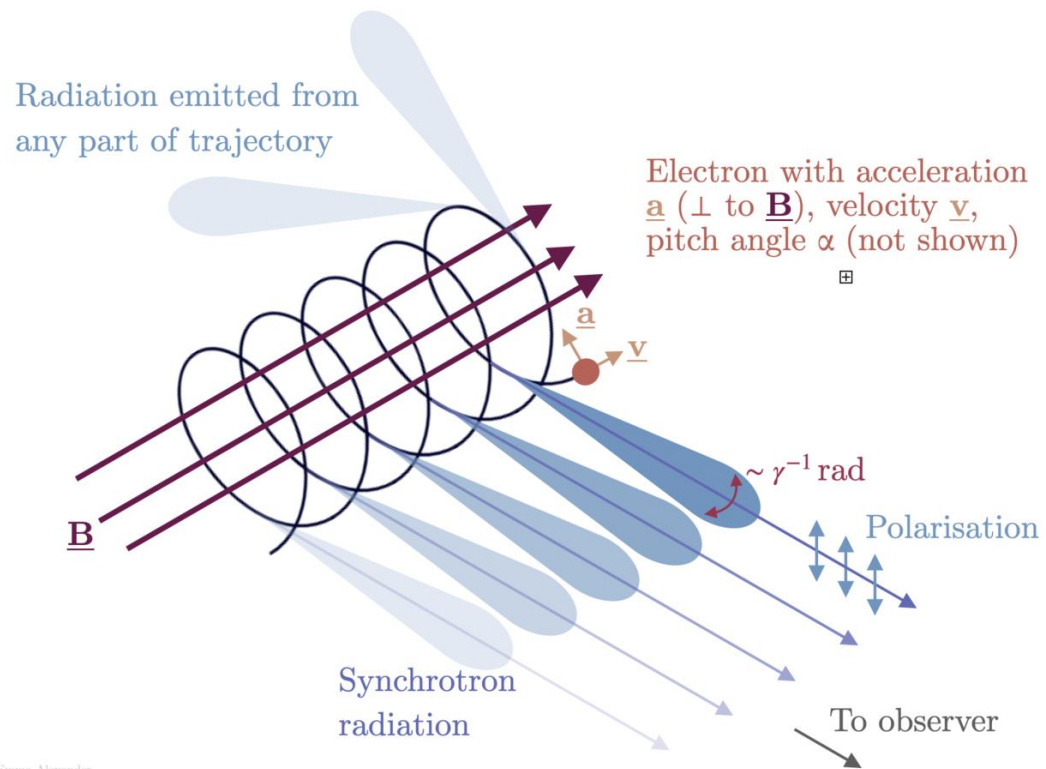


– свободно-свободные переходы, нем. Bremsstrahlung – «излучение торможения» или «тормозное излучение»

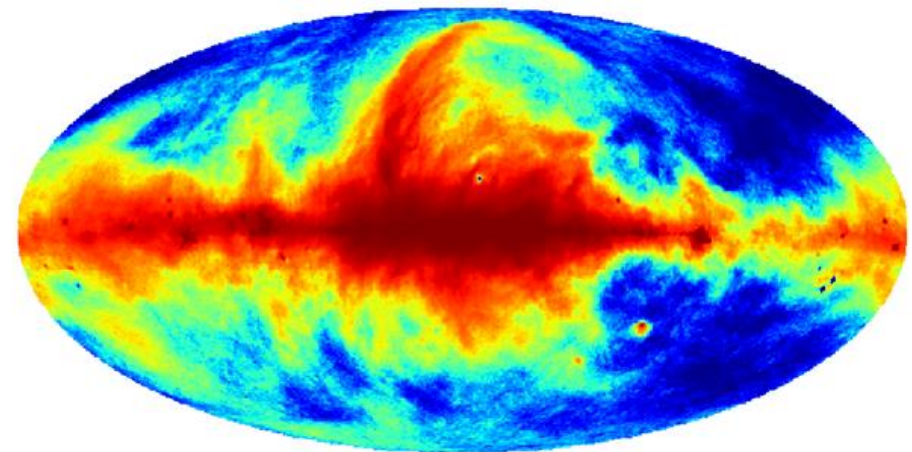
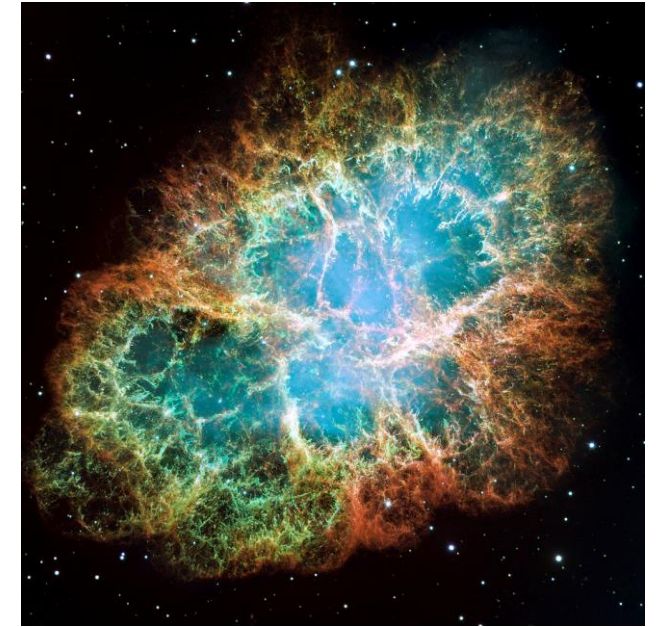
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2q^2}{3c^3} a^2$$

– темп потерь энергии на излучение зарядом  $q$ , движущимся с ускорением  $a$ . Здесь  $c$  – скорость света)

# СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

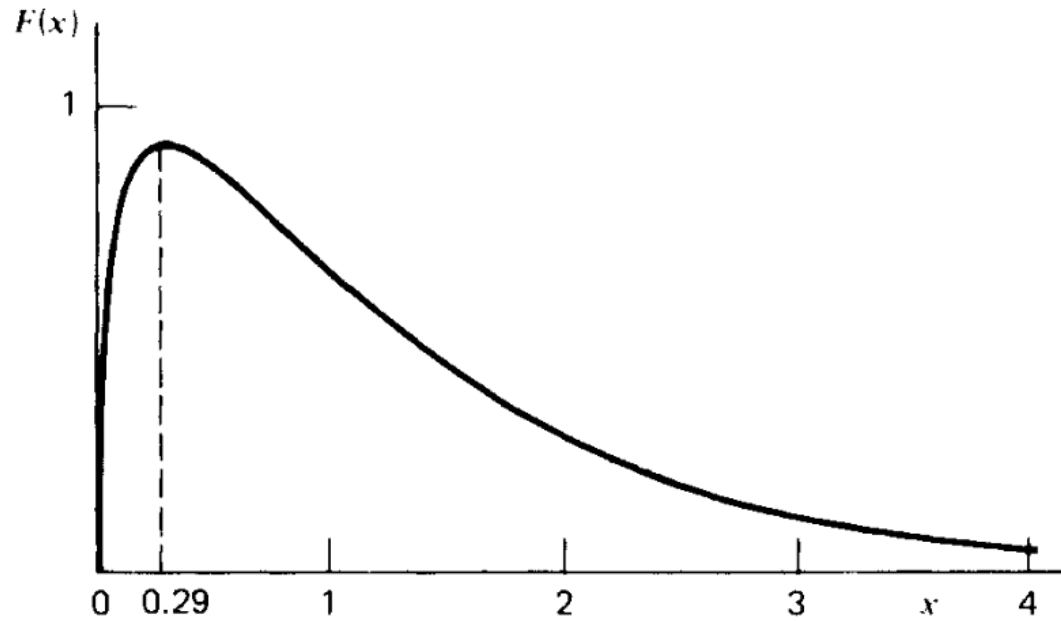


$$\dot{E}_{sync} = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$

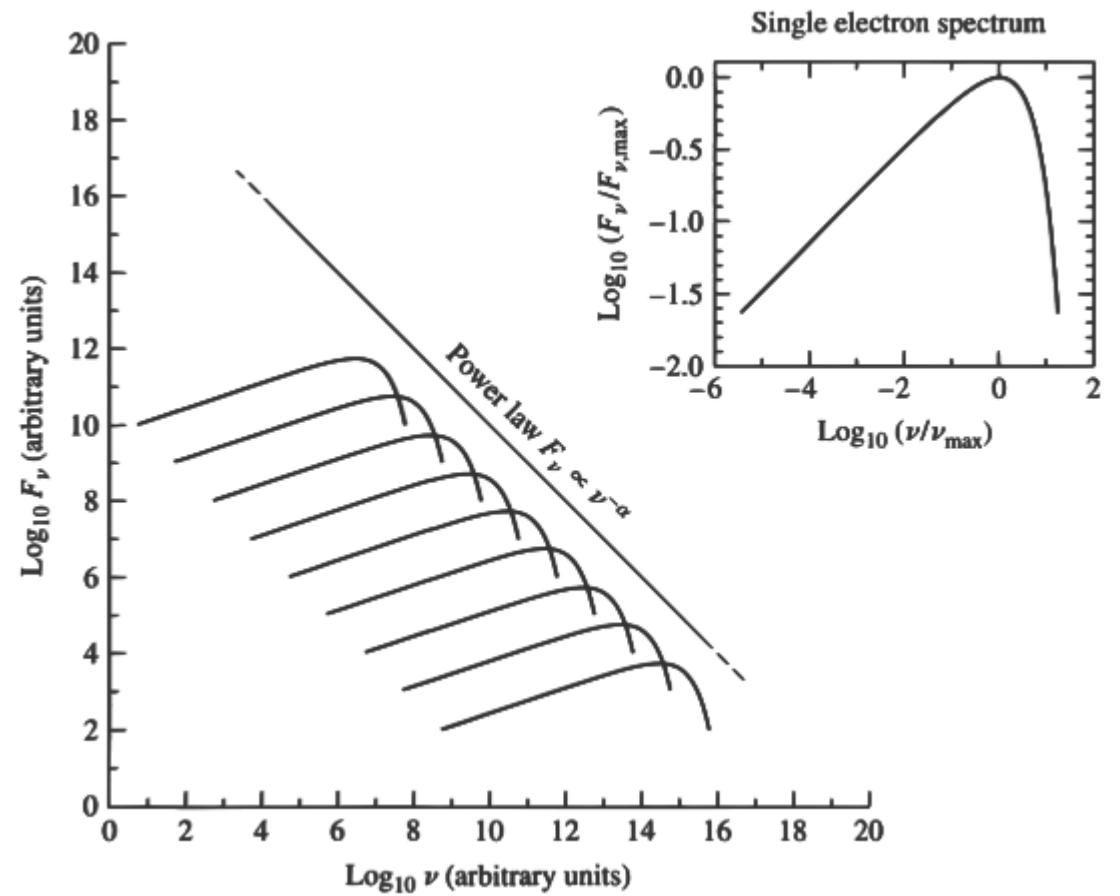


Emma Alexander

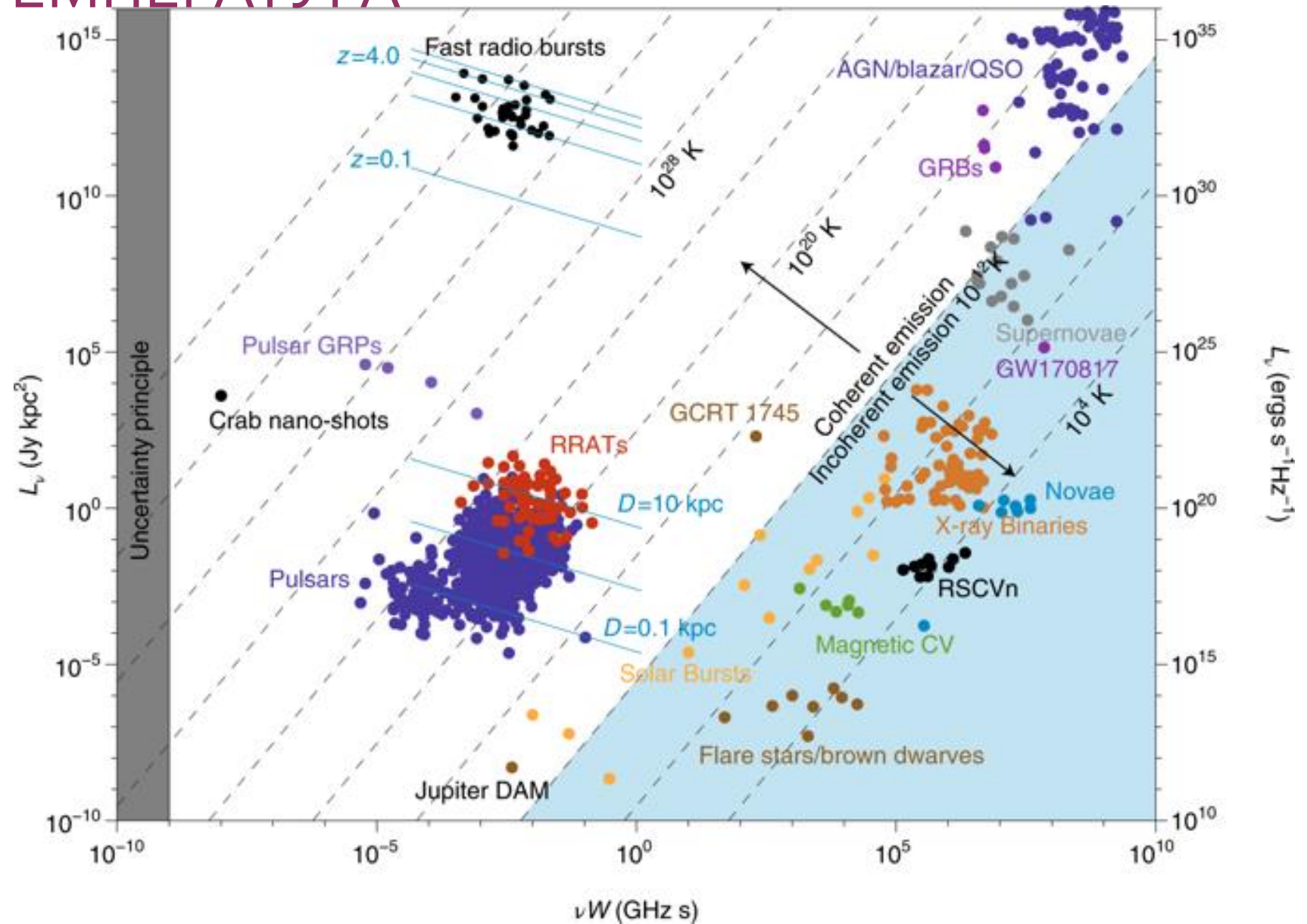
# СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



$$x = \omega/\omega_c$$



# ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

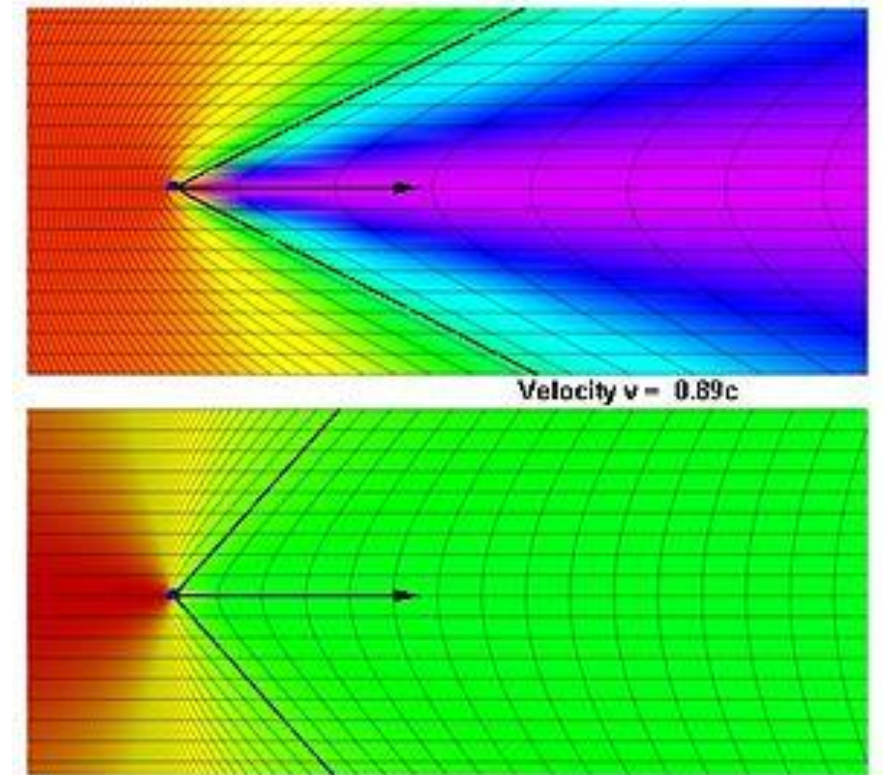
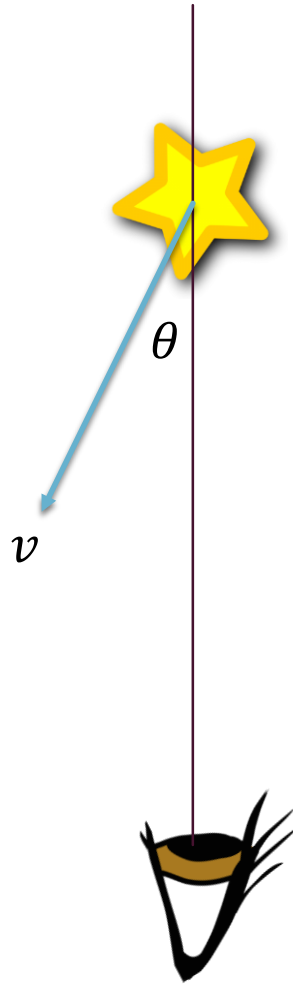




# РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}$$

Если  $\theta = 90^\circ$ , то всё равно  $\nu_0 < \nu$  – это т.н. «*поперечный эффект Доплера*»

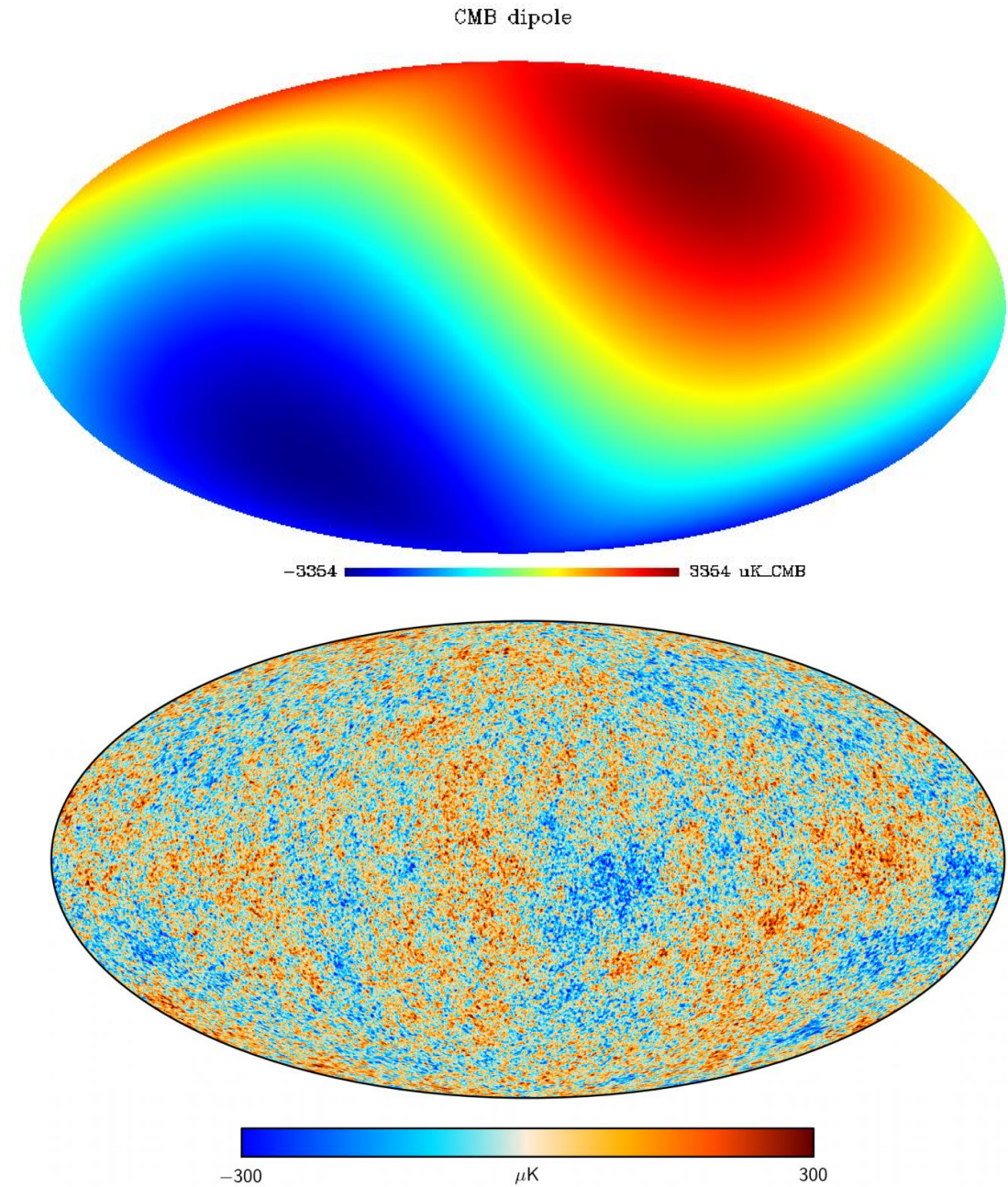


# ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Реликтовое излучение представляет собой изотропный фон теплового излучения со средней температурой  $T_{CMB} = 2.73$  К.

а) Определите скорость Солнечной системы (её барицентра) относительно реликтового фона, если амплитуда дипольной составляющей в неоднородности его температуры составляет  $\Delta T \approx 6.7 \times 10^{-3}$  К

б) С какой скоростью должна была бы двигаться Солнечная система, чтобы  $\Delta T = T_{CMB}$ ?



# ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА К ТЕМЕ

- G. Rybicki & A. Lightman, «Radiative processes in astrophysics», chapters 1.1-1.5, 5.1, 6.1-6.2, 7.2
- А. Засов, К. Постнов, «Курс общей астрофизики», Глава 2.

# ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА К ТЕМЕ

- К.В. Бычков, «Основные понятия теории излучения»

<http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Bychkov/Intensity.htm>

- Astronomical magnitude systems

<https://lweb.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/ay145/mags.html>

- Kramm & Molders «Planck's blackbody radiation law: Presentation in different domains and determination of the related dimensional constants»

<https://arxiv.org/abs/0901.1863>

- «The derivation of Planck formula»

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/48089/course/section/16461/qsp\\_chapter10-plank.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/48089/course/section/16461/qsp_chapter10-plank.pdf)