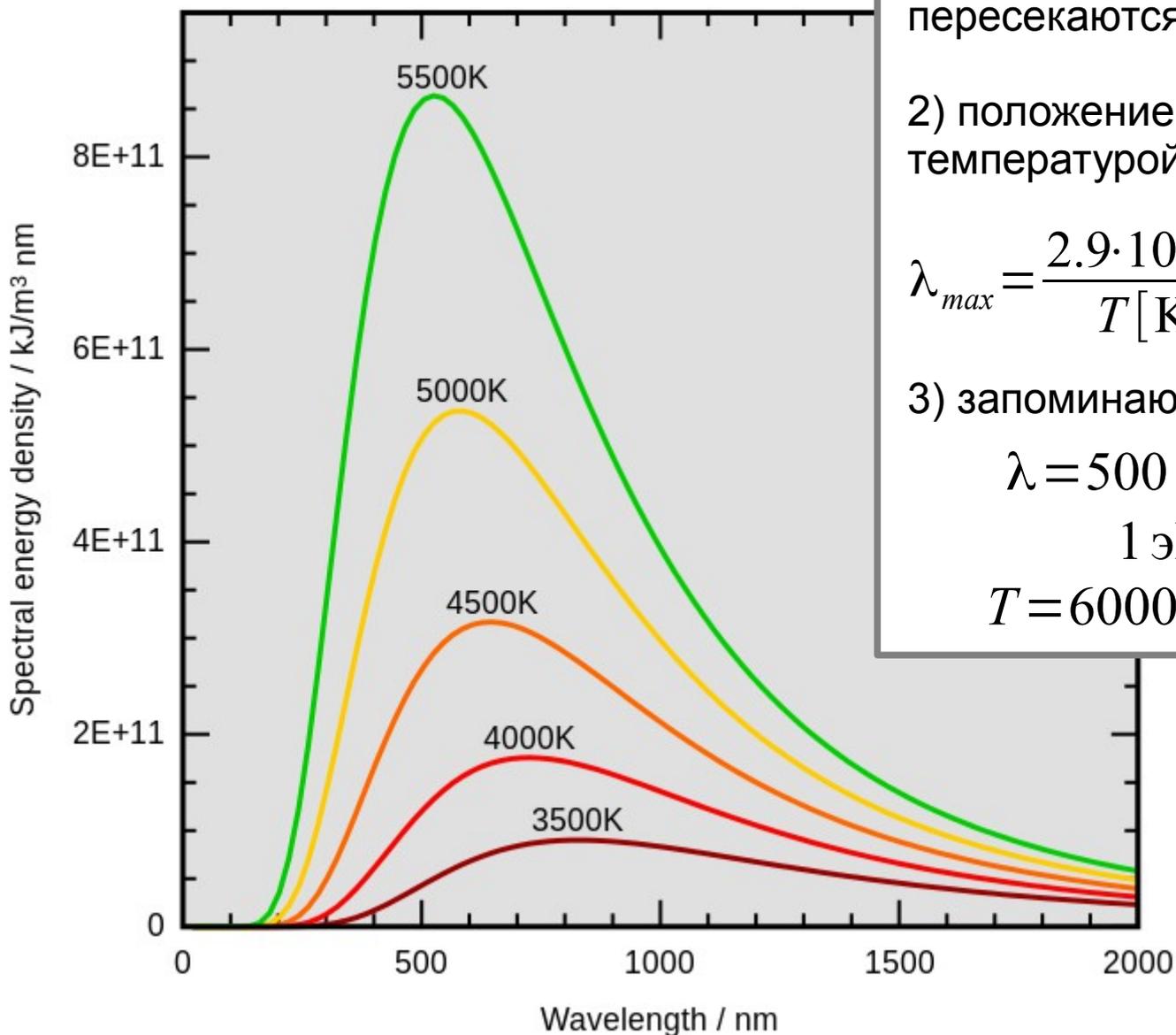


Лекция 2. Фотоэффект, эффект Комптона и немного про АЧТ

Спектр излучения АЧТ



1) для разных температур — не пересекаются

2) положение максимума определяется температурой

$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \cdot 10^6 \text{ нм}}{T [\text{К}]}; \hbar \omega_{max} \approx 2.8 k T$$

3) запоминающиеся порядки величины

$$\lambda = 500 \text{ нм} \rightarrow \hbar \omega \approx 2.5 \text{ эВ}$$

$$1 \text{ эВ} = 11600 \text{ К}$$

$$T = 6000 \text{ К} \rightarrow \lambda_{max} = 500 \text{ нм}$$

Предельные случаи

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

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

длинноволновый предел

$$\hbar \omega \ll kT$$

$$\rho(\omega) \propto \omega^2 \times (kT)$$

$$\rho(\lambda) \propto (kT) / \lambda^4$$

Если будет несколько источников, то «температуры суммируются»

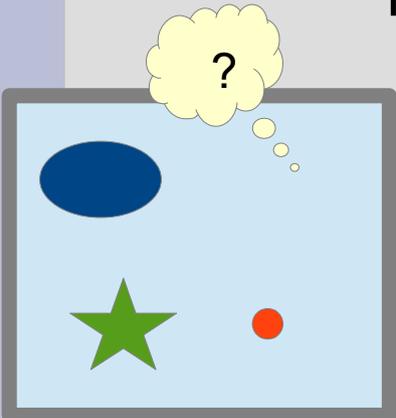
коротковолновый предел

$$\hbar \omega \gg kT$$

$$\rho(\omega) \propto \omega^3 \times e^{-\hbar\omega/(kT)}$$

$$\rho(\lambda) \propto e^{-hc/(\lambda kT)} / \lambda^5$$

оптический диапазон при температурах источника до 10000K



Как измерять?

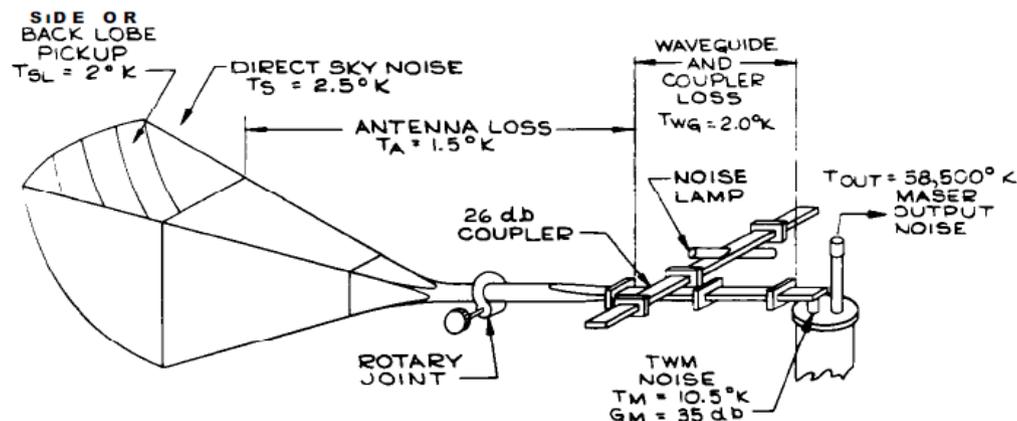
Исторический пример: детектирование микроволнового реликтового излучения, Нобелевская премия 1978 (Пенциас и Вильсон)



Работает на длине волны 7.4 см (4 ГГц, энергия кванта 0.2К).

Источники сигнала:

- реликтовое излучение
- излучение детектора
- излучение антенны
- тепловое излучение атмосферы



Изображения:

https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation

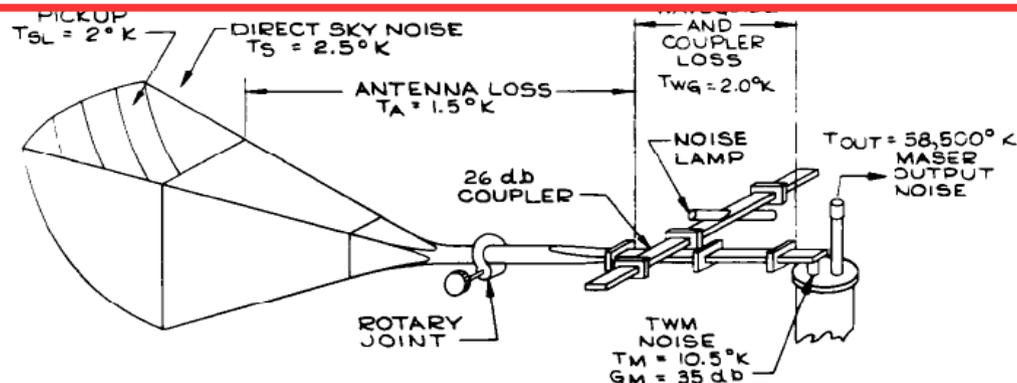
Нобелевская лекция Вильсона

Как измерять?

Нобелевская лекция Вильсона

	New Throat	Old Throat
He Temp.	4.22	4.22
Calculated Contribution from Cold Load Waveguide Attenuator Setting for Balance	.38	.70 ± 0.2
	<u>2.73</u>	<u>2.40 ± 0.1</u>
Total C.L.	7.33	7.32 ± 0.3
Atmosphere	2.3 ± 0.3	2.3 ± 0.3
Waveguide and Antenna loss	1.8 ± 0.3	.9 ± 0.3
Back lobes	.1 ± 0.1	.1 ± 0.1
Total Ant.	4.2 ± 0.7	3.3 ± 0.7
Background	3.1 ± 1	3.4 ± 1

Fig. 10 Results of our 3965 measurements of the microwave background. "Old Throat" and "New Throat" refer to the original and a replacement throat section for the 20 foot horn-reflector.



«Эквивалентная температура» всех источников

длине волны 7.4 см (энергия кванта 0.2К)

Для всех сигналов — длинноволновый режим

Детектор — АЧТ!!! Нужно охлаждать

Антенна «горячая», но почти идеально зеркальная!

Атмосфера «горячая», но почти прозрачная!

Изображения:
https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_cosmic_microwave_background_radiation
 Нобелевская лекция Вильсона

Несколько финальных рисунков про СМВ

Нобелевская лекция
Вильсона, 1978

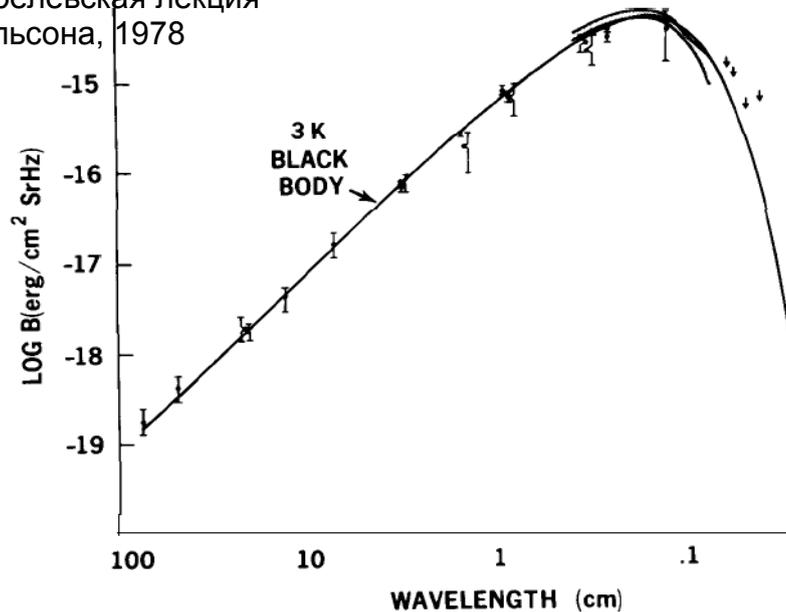
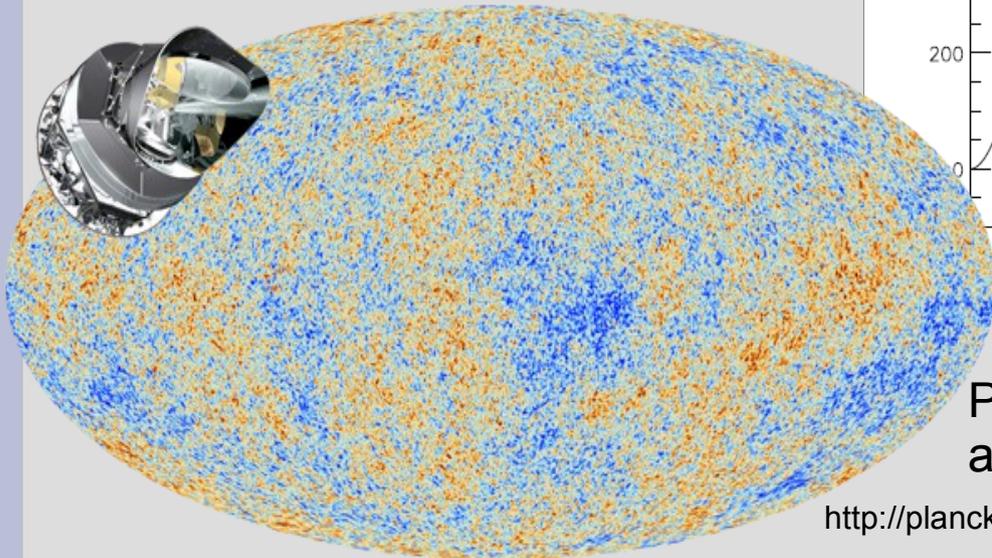
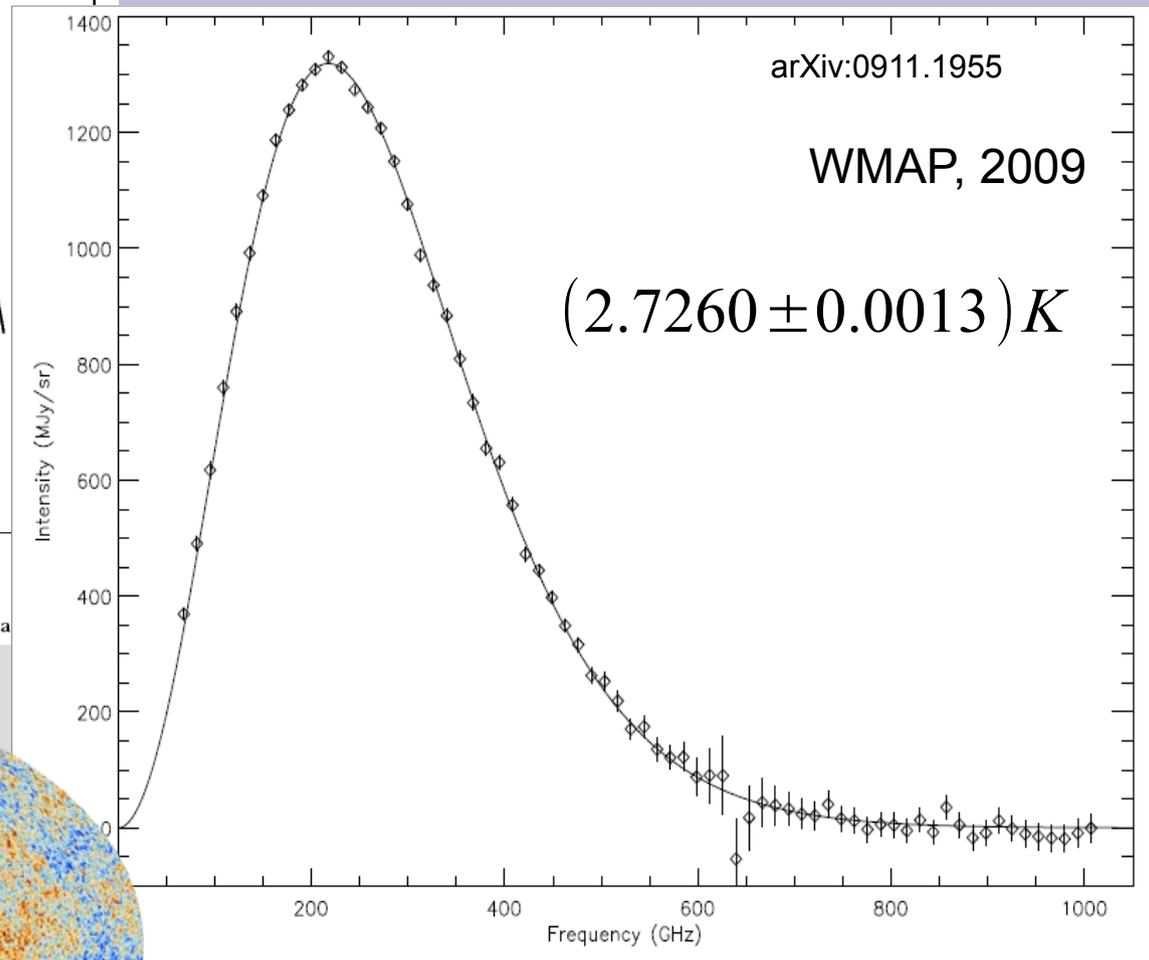


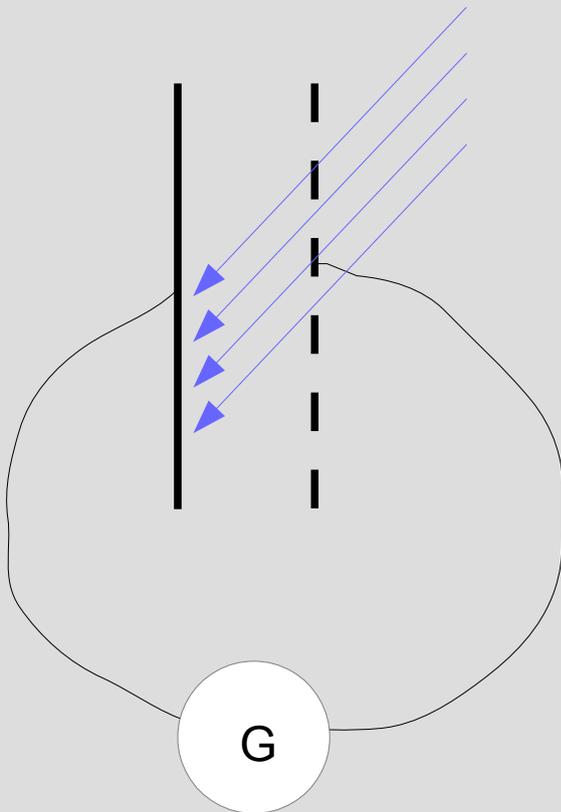
Fig. 12 Measurements of the spectrum of the cosmic microwave background radiation



PLANCK, 2015
анизотропия ~ 10 мкК

<http://planck.caltech.edu/news20130321.html>

Фотоэффект



При облучении (обычно УФ и видимый диапазон) электрода выбиваются электроны

Максимальный фототок пропорционален интенсивности

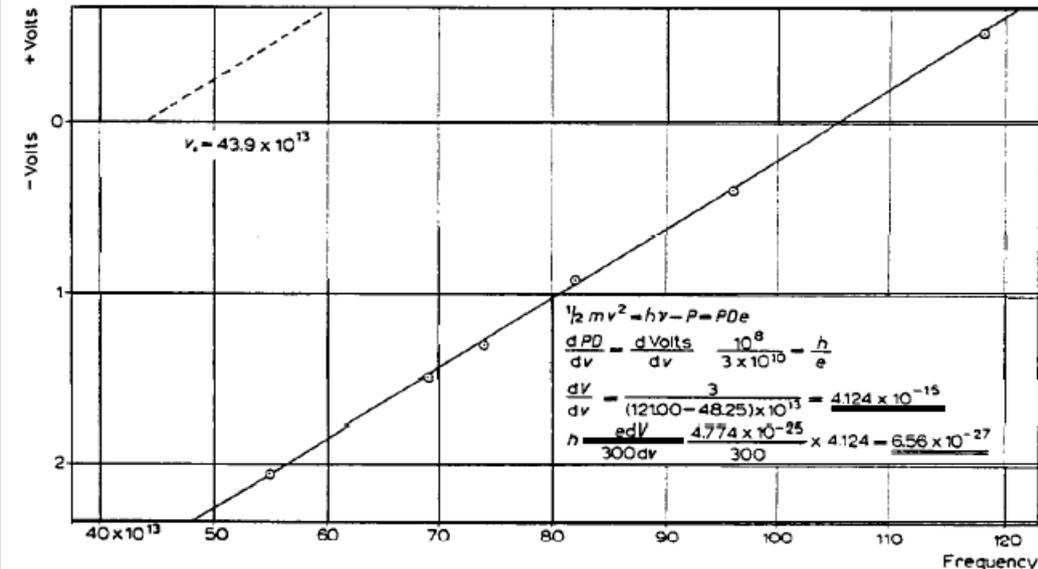
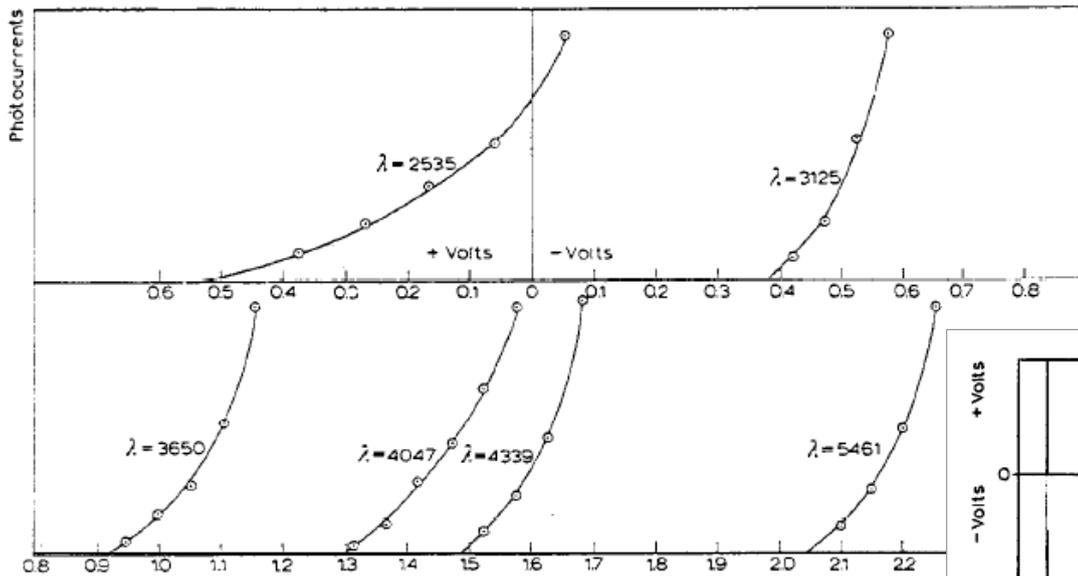
Фототок возникает и прекращается безинерционно при начале/остановке облучения

Максимальная энергия фотоэлектронов определяется только частотой падающего света

Существует красная граница фотоэффекта, при частоте ниже пороговой рост интенсивности не приводит к возникновению фототока.

Уравнение Эйнштейна и опыты Милликена

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

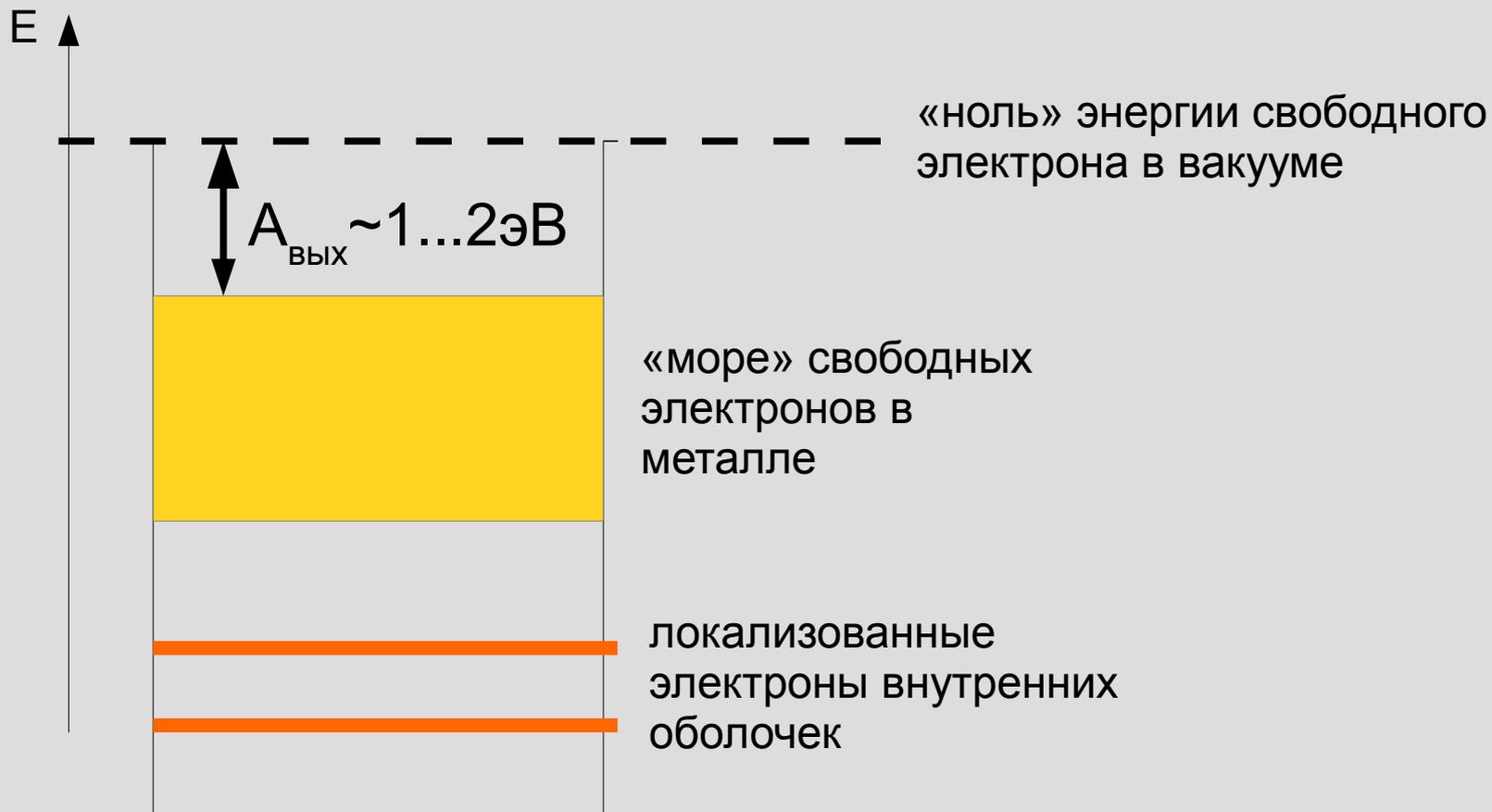


рисунки из Нобелевской лекции
Милликена, 1923

Fig. 4.

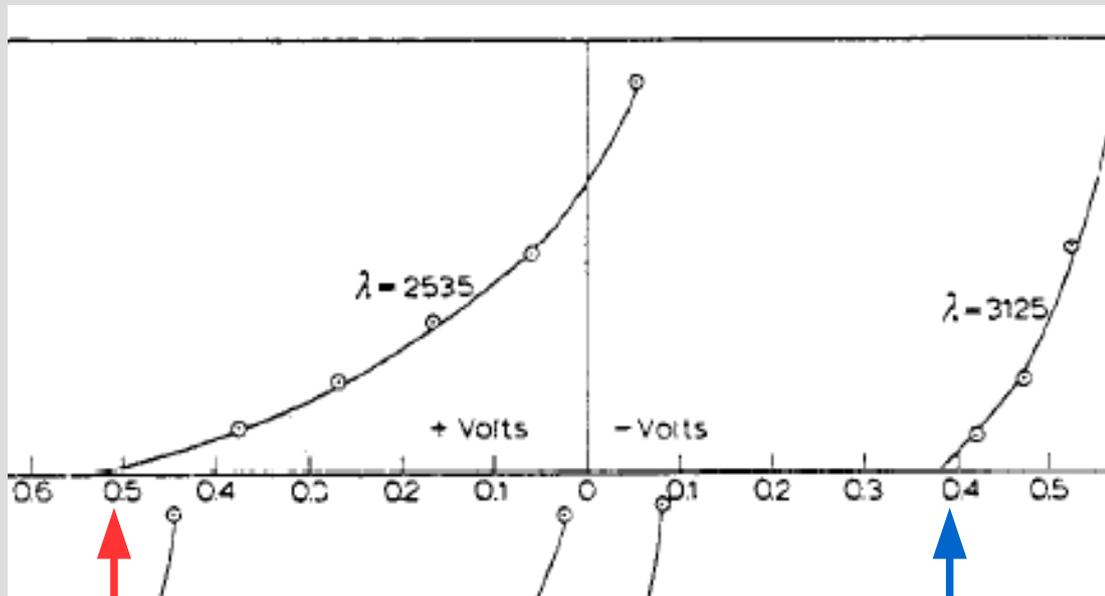
Некоторые тонкости 1...

Работа выхода — что это такое и всё ли так просто...

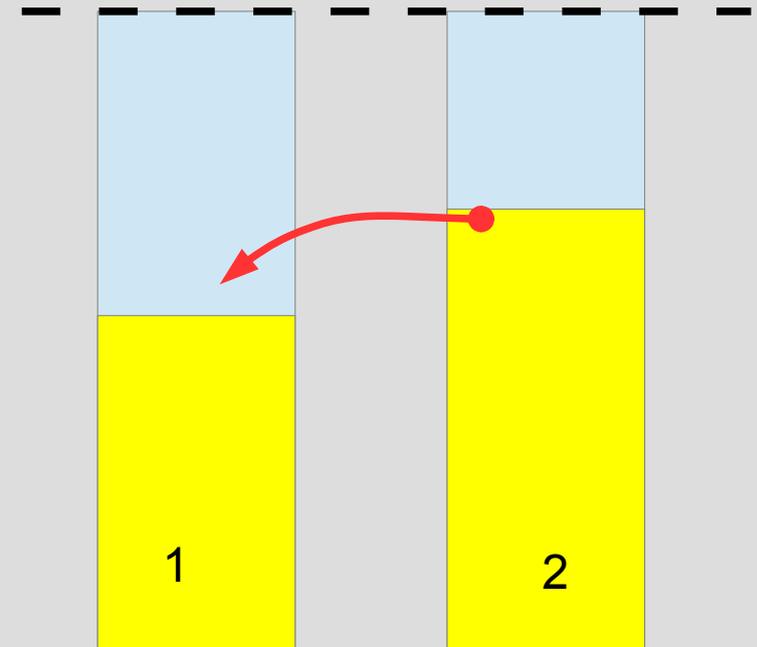


Некоторые тонкости 2...

Электроды из разнородных материалов



ВНИМАНИЕ: сменилась полярность запирающего напряжения!?



В равновесии часть электронов перейдёт в материал с большей работой выхода, возникнет **контактная разность потенциалов**

Некоторые тонкости 3...

Граница на замке?

Возможен ли фотоэффект
на частоте **НИЖЕ** красной
границы?

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\hbar \omega_{кр} = A$$

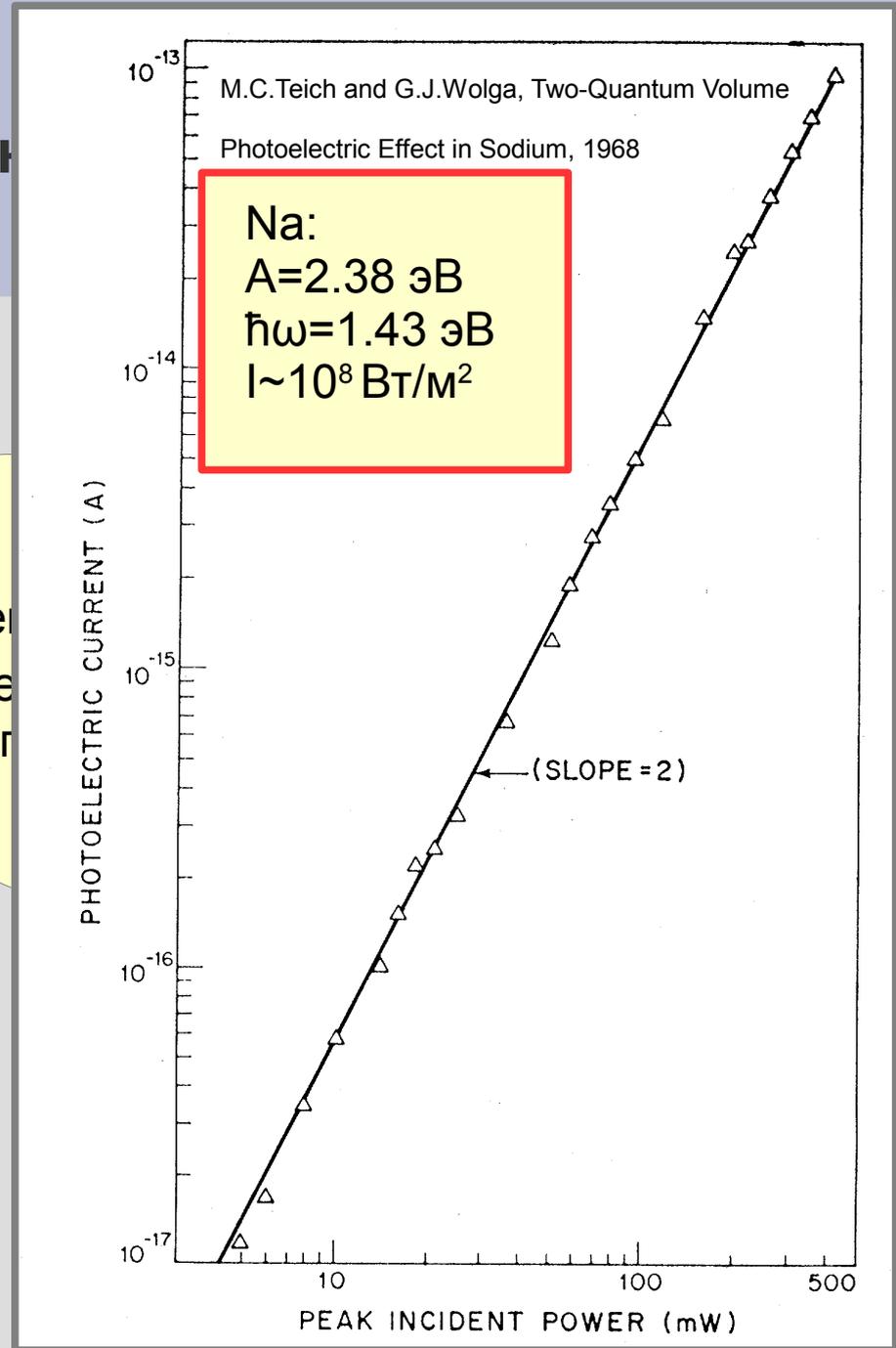
Некоторые тонк

Многоквантовый фотоэффект

$$N \cdot \hbar \omega = \frac{mV^2}{2} + A$$
$$\omega_{кр}^{(N)} = \frac{\omega_{кр}}{N}$$

~~$$\hbar \omega = \frac{mV^2}{2} + A$$~~

~~$$\hbar \omega_{кр} = A$$~~



Промежуточный вывод

Гипотеза Планка о дискретности передачи энергии электромагнитной волны позволяет объяснить свойства излучения АЧТ и свойства внешнего фотоэффекта.

Импульс кванта электромагнитной волны

Классическая электродинамика:
поток энергии и поток импульса в электромагнитной волне
однозначно связаны друг с другом

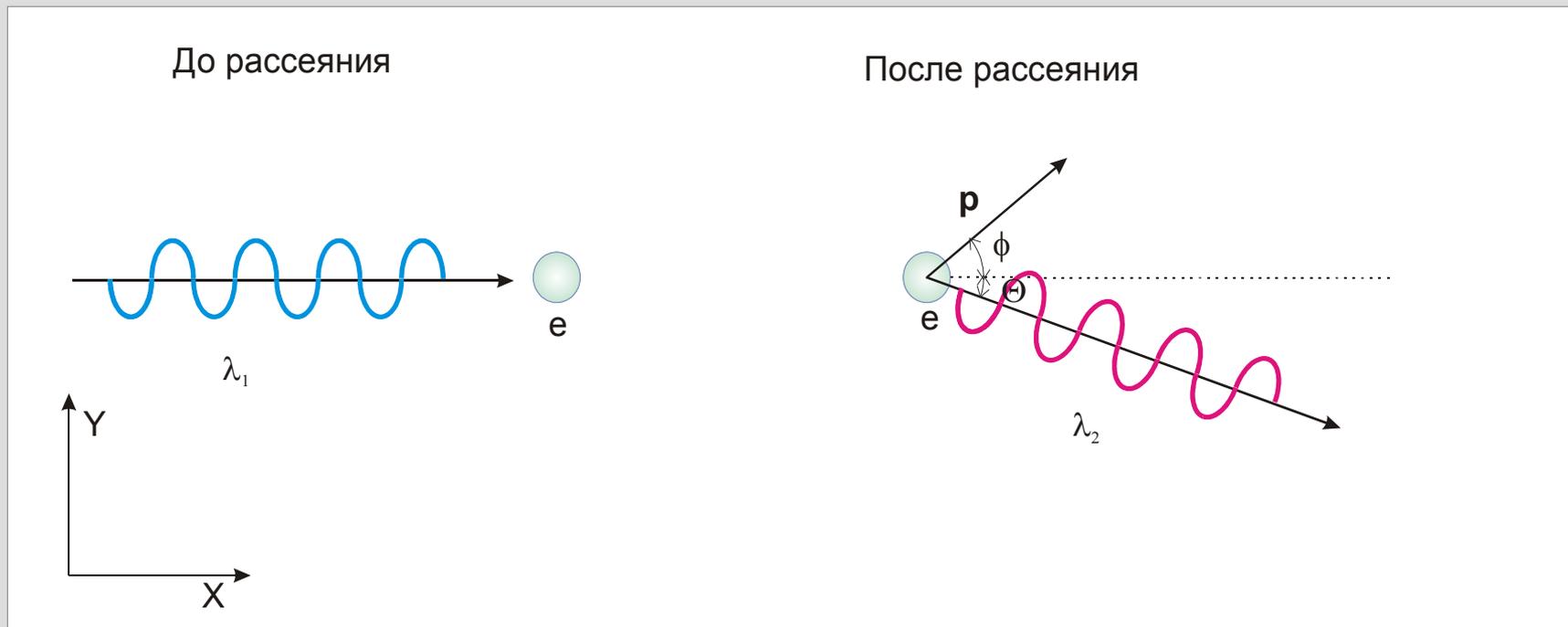
$$\dot{j}_p = \frac{\dot{j}_E}{c}$$

Рассматривая плоскую электромагнитную волну
как поток планковских квантов, мы обязаны
каждому кванту сопоставить импульс

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar \omega}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Эффект Комптона

Рассеяние кванта электромагнитной волны на свободном электроне



Опыт Комптона (Нобелевская премия 1927):

- падающее излучение 0.708\AA
- при рассеянии назад наблюдается «красное смещение» на 0.044\AA

Эффект Комптона

$$\Delta \lambda = \lambda_c (1 - \cos \Theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} = 0.0024 \text{ нм (для электрона)}$$

- По сути — рассеяние безмассовой частицы на массивной. То же будет и для рассеяния фотонов на других заряженных частицах, но для легких электронов сдвиг самый сильный
- Рассеяние «почти безмассового» нейтрино будет описываться также
- Ответ для «красного смещения» рассеянной волны не зависит от начальной длины волны

Где взять свободный покоящийся электрон для эффекта Комптона?

Необходимо, чтобы энергия, переданная электрону была велика по сравнению с энергией связи электрона в атоме!

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e \approx \frac{hc}{\lambda_0} \gg mc^2 \gg E_{св} \sim 10 \text{ эВ}$$

$$(\text{чуть точнее}) \lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} \approx \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2}$$

видно на
лабах по
гамма-
излучению

$$\lambda_0 \gg \lambda_c : T_e \approx \frac{2hc\lambda_c}{\lambda_0^2} = 2 \frac{E_0^2}{mc^2} \gg 10 \text{ эВ}$$

выполнено для $E_0 \gg 1.5 \text{ кэВ}$
(у Комптона было $\sim 20 \text{ кэВ}$)

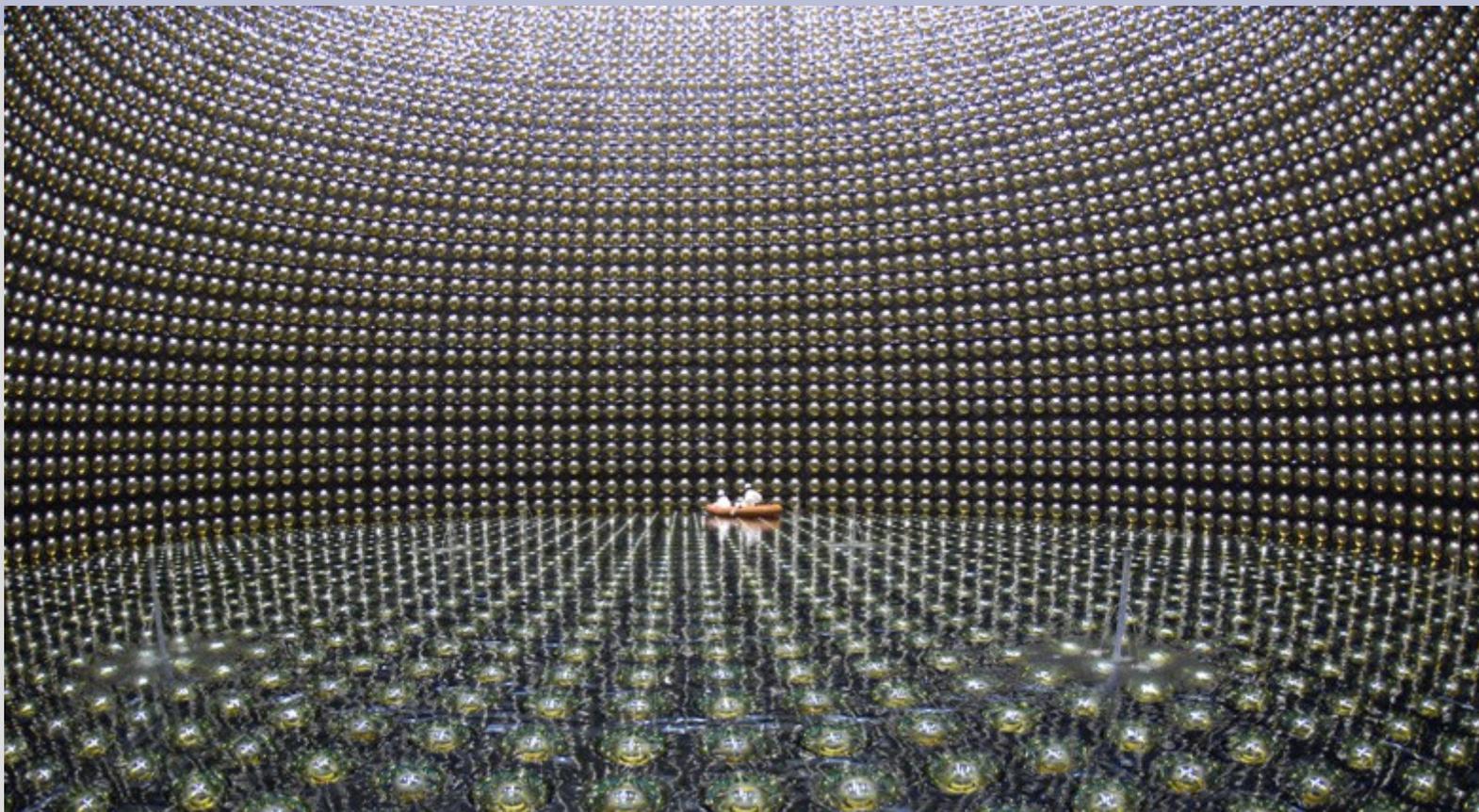
О чём может рассказать электрон после рассеяния?

$$T_e = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \right) = (\text{рассеяние назад}) = hc \frac{2\lambda_c}{\lambda_0(\lambda_0 + 2\lambda_c)}$$

$$\lambda_0 \ll \lambda_c : T_e = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{1}{1 + \lambda_0/(2\lambda_c)} = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{mc^2}{2} \gg mc^2$$

Такой электрон может двигаться быстрее света в среде!
Возникнет излучение Черенкова, направление движения самых энергичных электронов близко к направлению движения исходной безмассовой частицы.
Способ детектирования нейтрино!

Super Kamiokande



1000 метров под землей
размер ~40 метров, 50000 тонн воды, ~10000 ФЭУ

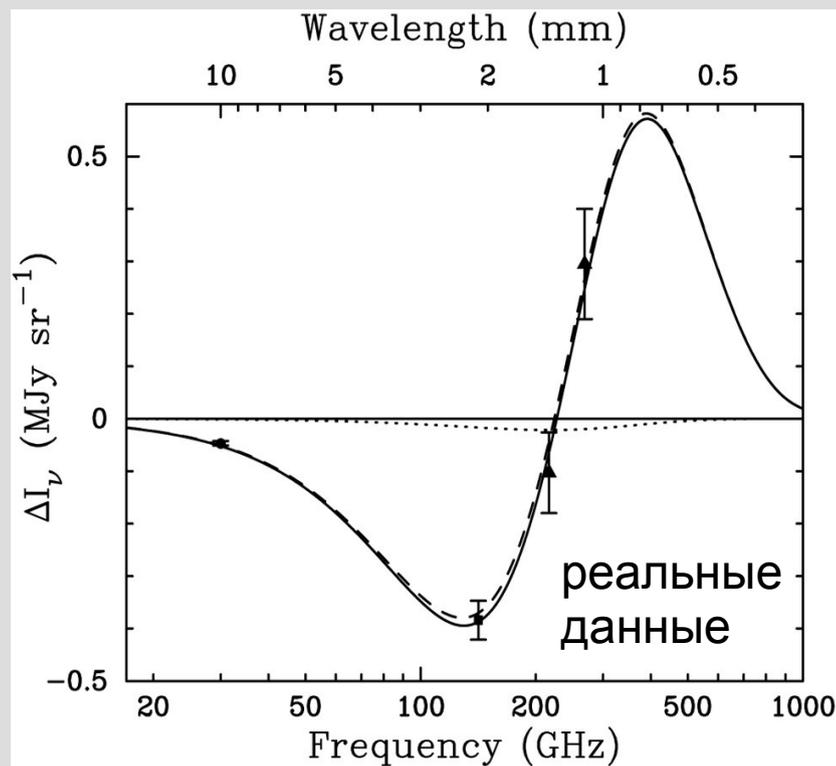
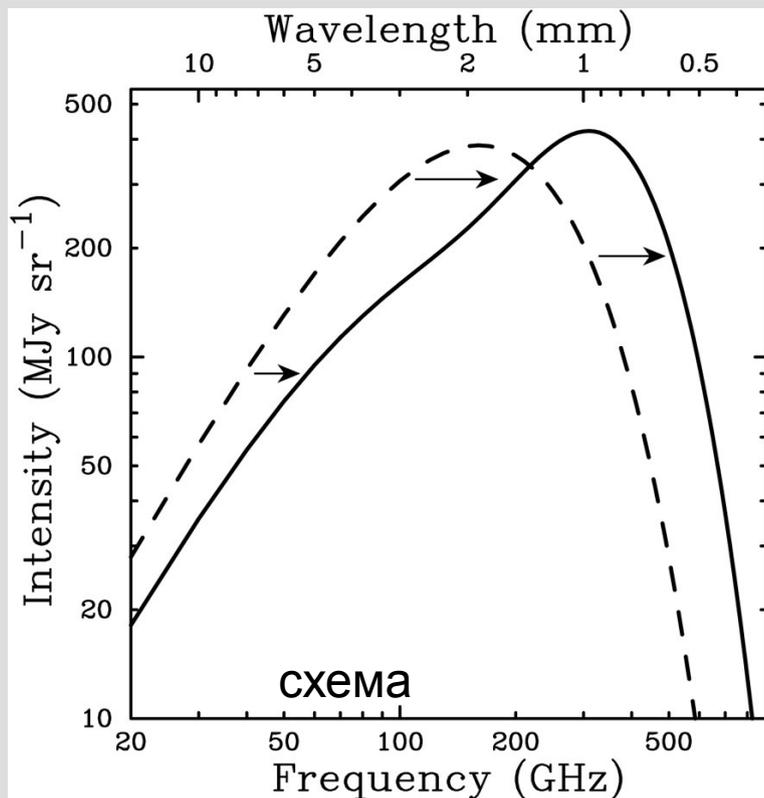
Эффект Комптона+излучение АЧТ (наивные комментарии по эффекту Сюняева-Зельдовича)

Реликтовое излучение низкоэнергетично
($T=2.7\text{K}$)

В космосе может присутствовать «горячий» ионизованный газ и «горячие» электроны (в солнечном ветре $T_e \sim 10^5\text{K}$, $V_e \sim 300\text{ км/сек}$)



При рассеянии на энергичных электронах энергия квантов увеличится



Главное на этой лекции

$$\hbar \omega = \frac{m V^2}{2} + A$$

$$\Delta \lambda = \lambda_c (1 - \cos \Theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} = 0.0024 \text{ нм (для электрона)}$$

