

ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ

лекция 5

Эпоха рекомбинации ($t \sim 380\,000$ лет)
и реликтовое излучение

- Ионизация и рекомбинация плазмы, формула Саха
- Наблюдение реликтового излучения
- Анизотропия реликтового излучения:
 - ⇒ эффект Силка
 - ⇒ эффект Сакса-Вульфа
 - ⇒ эффект Допплера
 - ⇒ эффект Сюняева-Зельдовича
- Поляризация реликтового излучения и GW

Формула Саха для ионизации плазмы

Плазма: $p + e^- \longleftrightarrow H + \gamma$; $\Delta E = 13.6$ эВ.

$n_p = n_e = xn_{bar}$, $n_H = (1 - x)n_{bar}$ (x – степень ионизации)

Формула Саха:

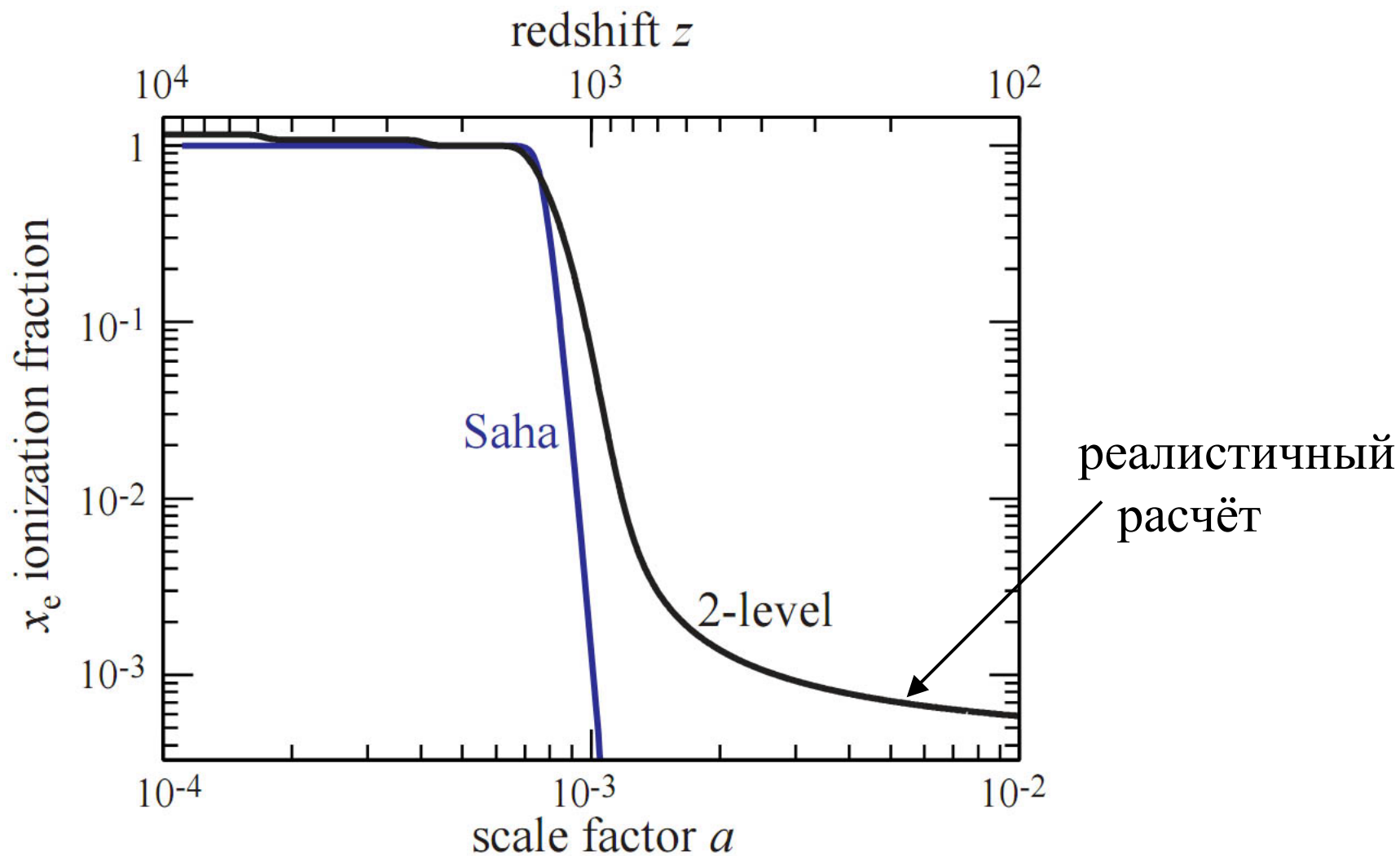
$$\frac{n_p n_e}{n_H n_{bar}} = \frac{x^2}{1 - x} \approx e^{-\Delta E/T} \frac{1}{n_{bar}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Поскольку $n_{bar}/n_\gamma \equiv \eta \sim 10^{-9}$, а $n_\gamma \simeq \frac{\sigma T_\gamma^4}{kT_\gamma}$, где $\sigma \equiv \frac{8\pi^5 k^4}{15h^3 c^3}$, то

$$\frac{x^2}{1 - x} = e^{-\Delta E/kT} \frac{\pi^{1/2}}{2^{5/2} \zeta(3) \eta} \left(\frac{m_e c^2}{kT} \right)^{3/2}$$

$$x \simeq 0.5 \quad \Longleftrightarrow \quad T \simeq 0.3 \text{ эВ} \sim 4000 \text{ К}$$

Формула Саха для ионизации плазмы



Оптическая толща и поверхность последнего рассеяния

Томсоновское рассеяние: $\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2$.

Оптическая толща: $\tau(l) = \int_0^l n_e(l) \sigma_T dl$;
 $\tau = 1 \Leftrightarrow$ поверхность последнего рассеяния.

При $z = 1100$ и $n_e = 10^{-9} n_\gamma \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$
длина пробега $l_{\tau=1} \sim 500 \text{ пс} \ll$ горизонта.

Реликтовое излучение: предсказание и наблюдения

1940-е – Гамов (теория горячей Вселенной); Alpher & Herman – оценка $T \sim 5\text{K}$

1964 – повторная оценка Дорошкевича и Новикова

1965 – Dicke, Wilkinson & Roll планируют эксперимент по обнаружению СМВ (Cosmic microwave background)

⇓ Нобелевская премия 1978

1965 – Penzias & Wilson открывают СМВ с температурой около 3 К в процессе настройки антенны для радиосвязи

⇓ Нобелевская премия 2006

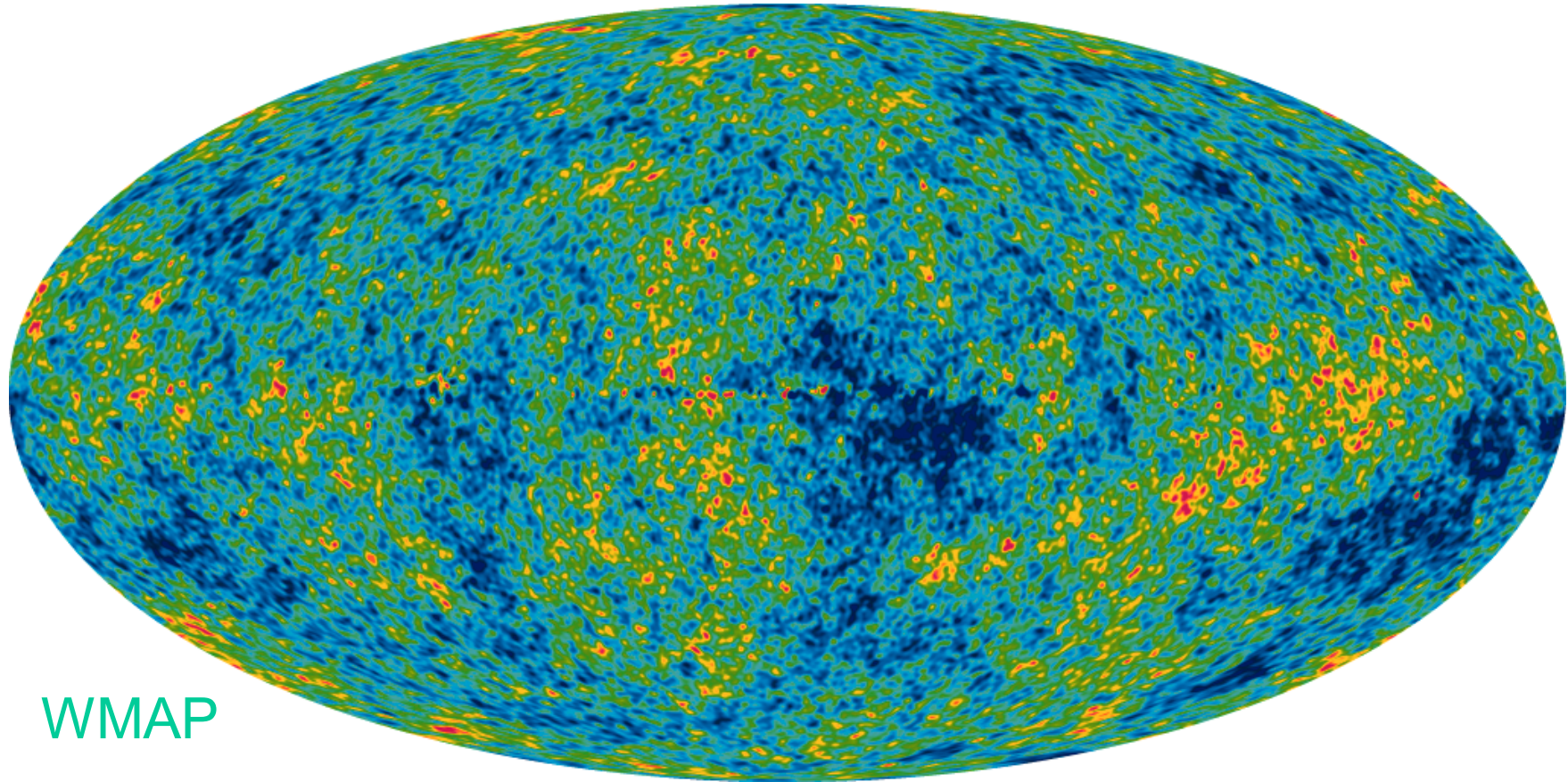
1992 – спутник COBE (Cosmic Background Explorer) измеряет спектр и открывает анизотропию реликтового фона ($\Omega \sim 10^\circ$)

1999 – BOOMERanG (баллонный эксперимент): отснят участок неба с высоким разрешением, найдены доплеровские пики

2003 – спутник WMAP (Wilkinson Microwave anisotropy probe) – карта всего неба с разрешением $\sim 1^\circ$

2009 – спутник Planck – улучшение точности и измерение поляризации

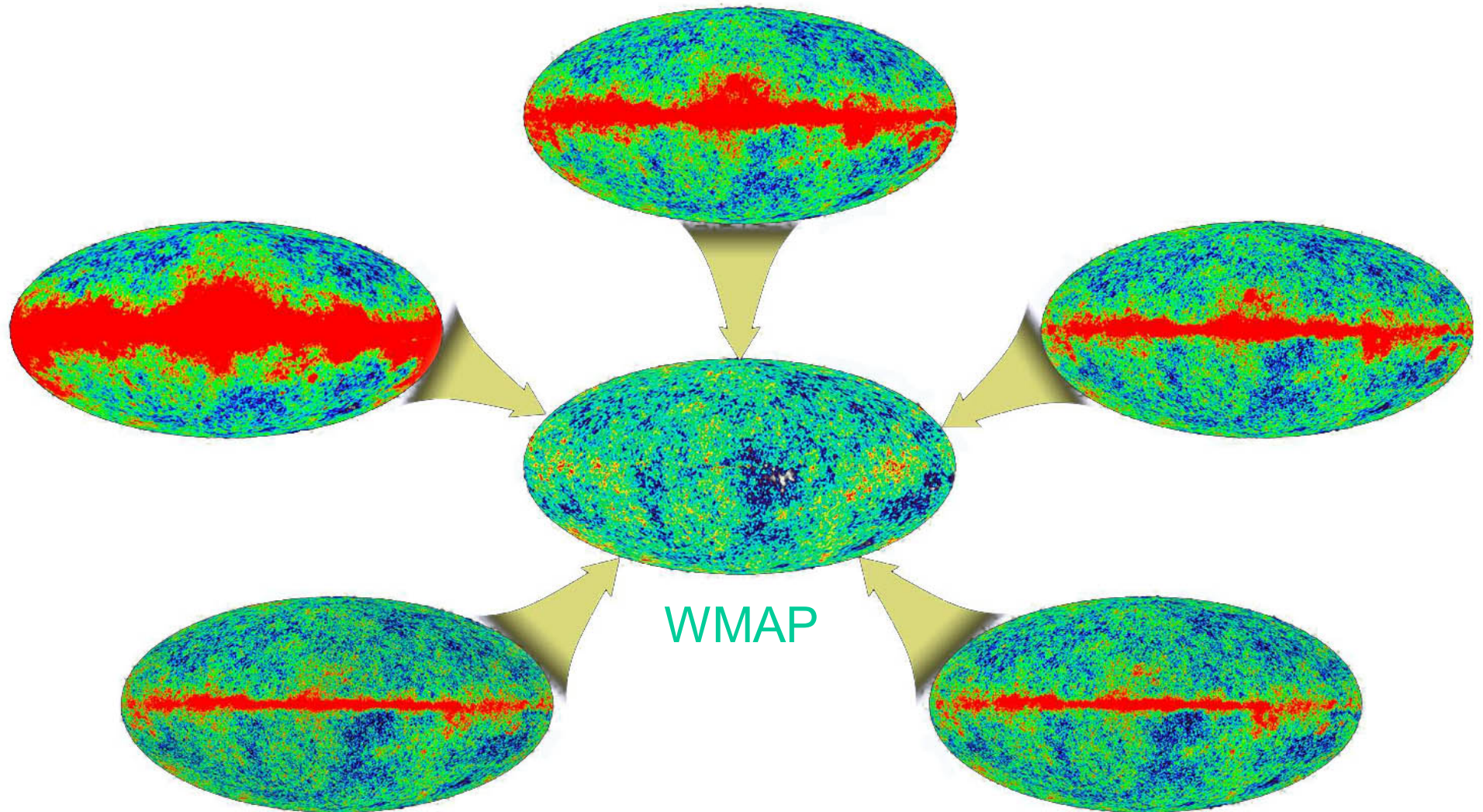
Реликтовое излучение: карта анизотропии



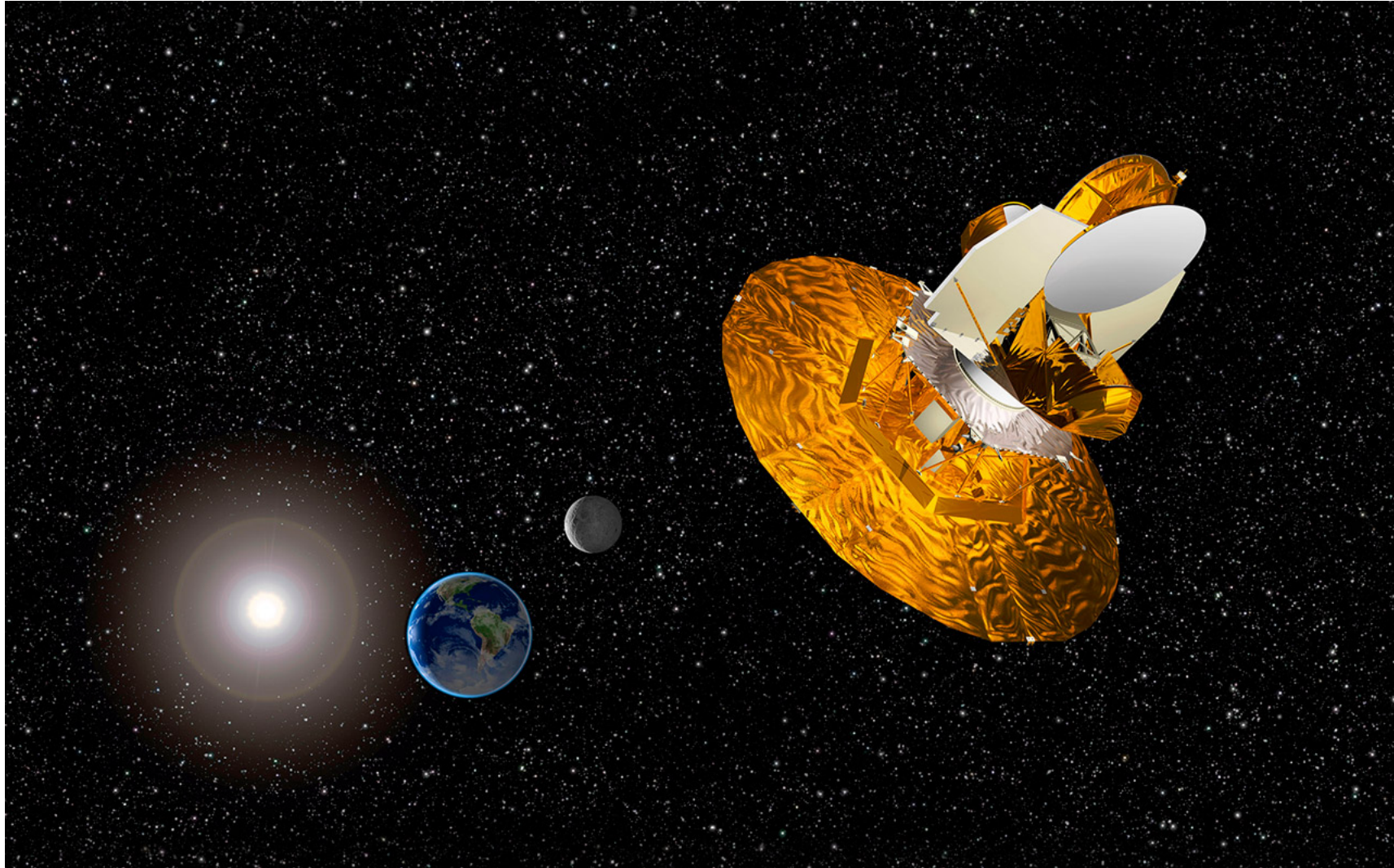
Карта распределения температуры СМВ на небесной сфере,
 $T=2.725\text{K}$, $\delta T/T \sim 10^{-5}$

WMAP: наблюдение в 5 диапазонах

(22–90 ГГц)



WMAP



1.5 млн км от Земли, в точке L2 земной орбиты

Power spectrum – спектр мощности анизотропии

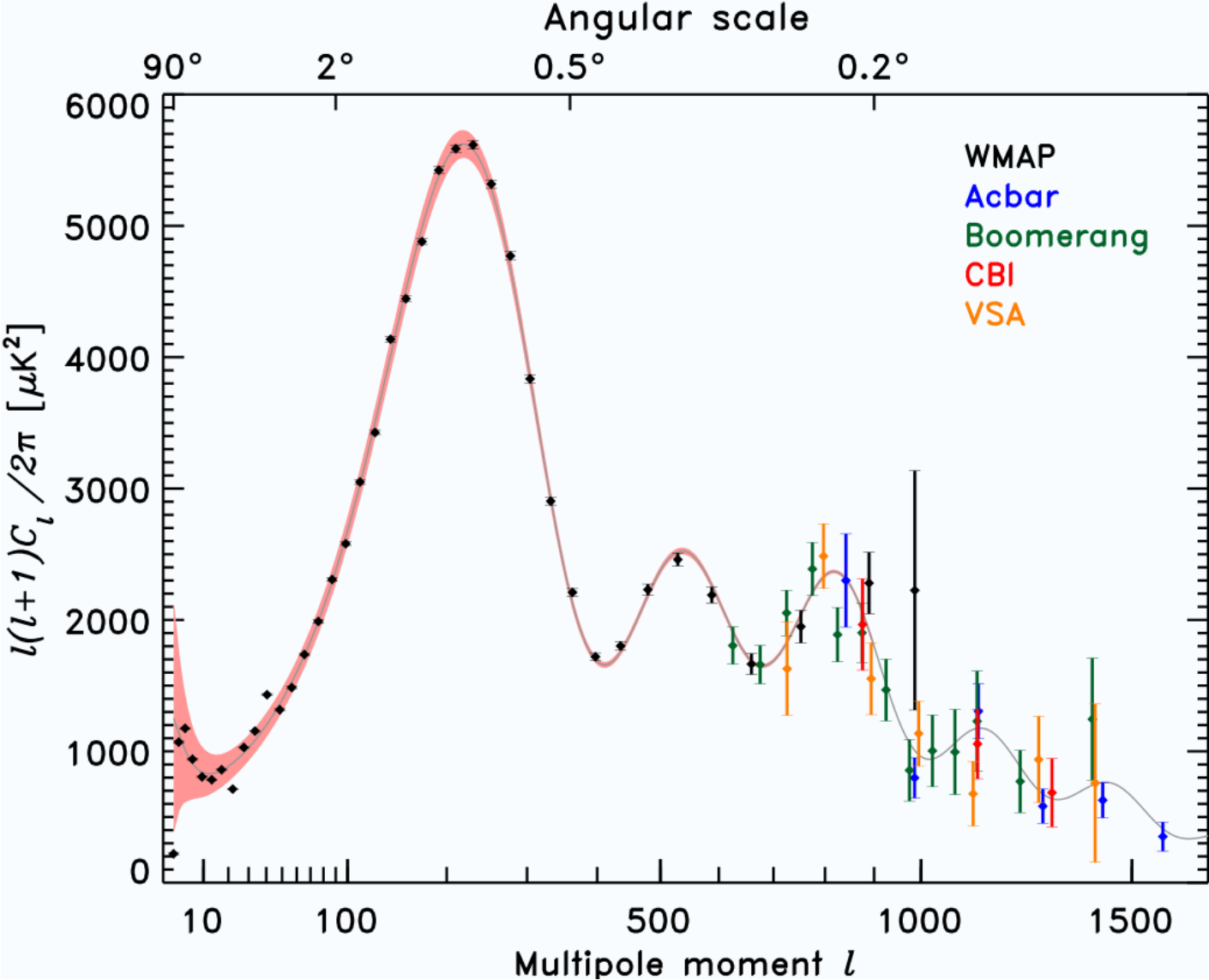
Разложение по сферическим гармоникам:

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi); \quad C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2$$

Спектр мощности $c_l \equiv l(l+1)C_l/2\pi$.

l – мультипольный момент

Power spectrum – спектр мощности анизотропии



Эффекты, обуславливающие анизотропию СМВ

- На сфере последнего рассеяния

- ⇒ эффект Силка (адиабатические флуктуации плотности барионов)
- ⇒ Допплеровский эффект из-за наличия скоростей барионов
- ⇒ эффект Сакса-Вульфа (гравитационное красное смещение)

- По пути до нас

- ⇒ эффект Сюняева-Зельдовича (комptonовское рассеяние в облаках горячего газа вокруг скоплений галактик)
- ⇒ Интегральный эффект Сакса-Вульфа (гравитационное красное смещение при движении в меняющемся потенциале)

- Движение приёмника относительно фона

- ⇒ дипольная компонента – скорость ~ 370 км/с

Барионные акустические колебания

$$\rho_\gamma \propto \rho_{\text{bar}}, \quad v_\gamma = v_{\text{bar}}$$

Акустические колебания в плазме приводят к появлению неоднородности плотности и наличию скоростей вдоль луча зрения.

Масштаб неоднородностей \sim размер горизонта на момент рекомбинации

Неоднородность плотности \Rightarrow неоднородность температуры излучения;
скорость вдоль луча зрения \Rightarrow доплеровский сдвиг температуры

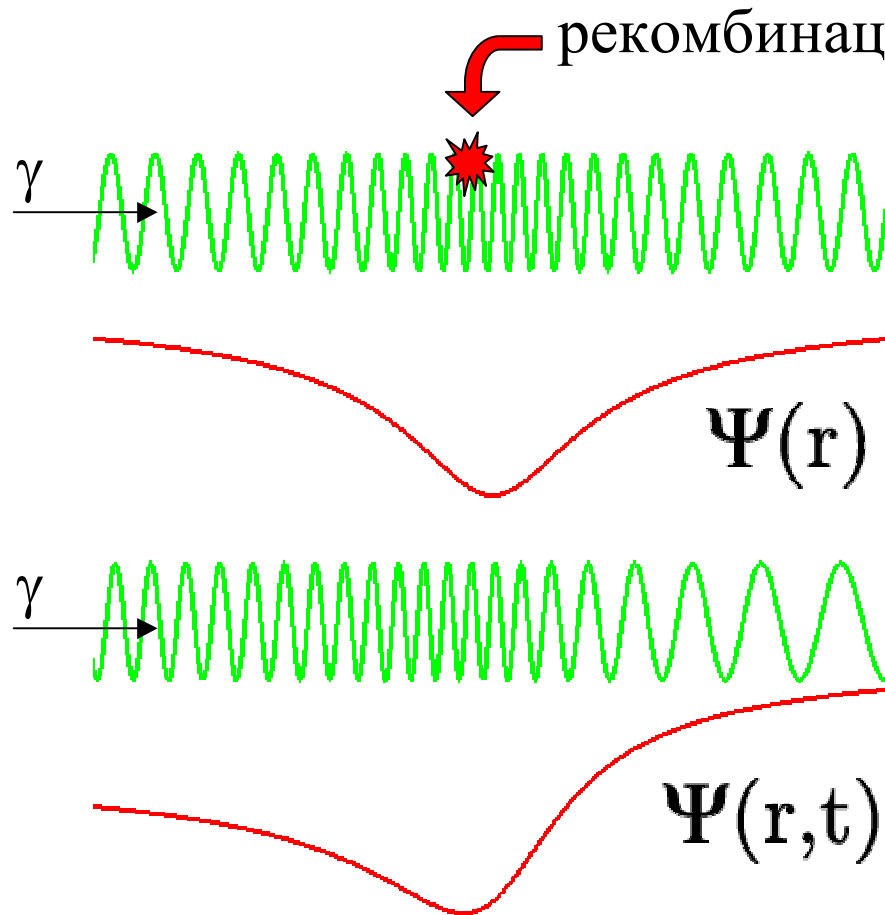
Угловой размер неоднородностей: $\theta = \frac{\lambda}{L}(1+z) \sim \frac{t_{\text{rec}} z_{\text{rec}}}{t_0} \sim 2^\circ$,

номер мультиполя $l = 2\pi/\theta \sim 200$.

Затухание Силка (диффузия фотонов)

на масштабах меньше $\lambda \sim (\lambda_{\text{Thomson}} d_{\text{Horizon}})^{1/2} \leftrightarrow l > 10^3$)

Sachs-Wolfe и Integrated Sachs-Wolfe



отражает неоднородности
грав.потенциала на поверхности
последнего рассеяния

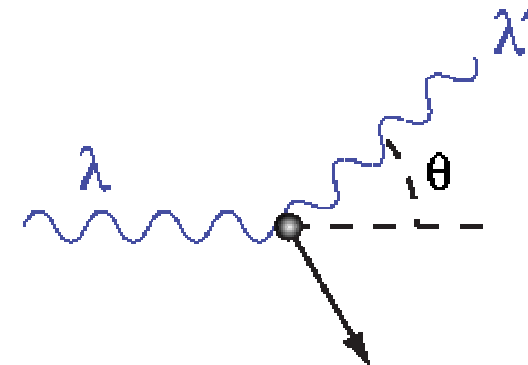
интегрированный:

Движение в переменном
гравитационном потенциале
(после рекомбинации)

Уменьшение Ψ за счёт ускоренного
расширения (тёмной энергии)

Эффект Сюняева-Зельдовича (Комптоновское рассеяние)

Обратное комптоновское рассеяние
на горячих электронах ($T \sim 5$ КэВ)
в газе в скоплениях галактик



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

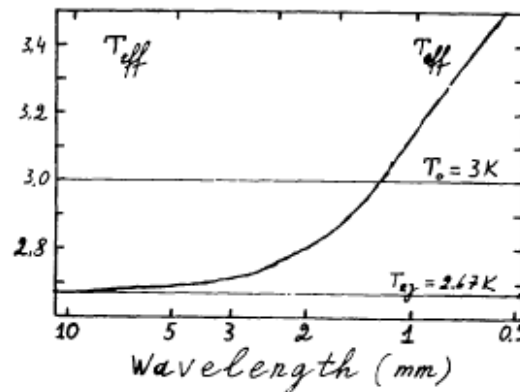
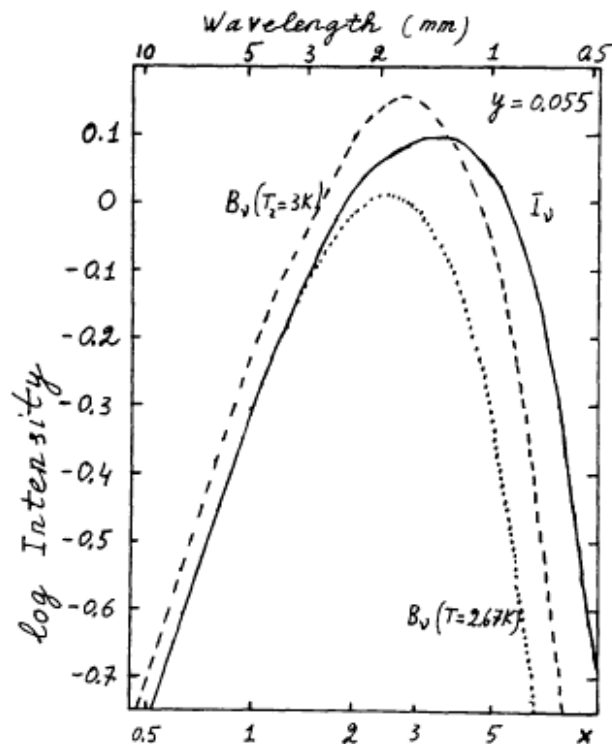
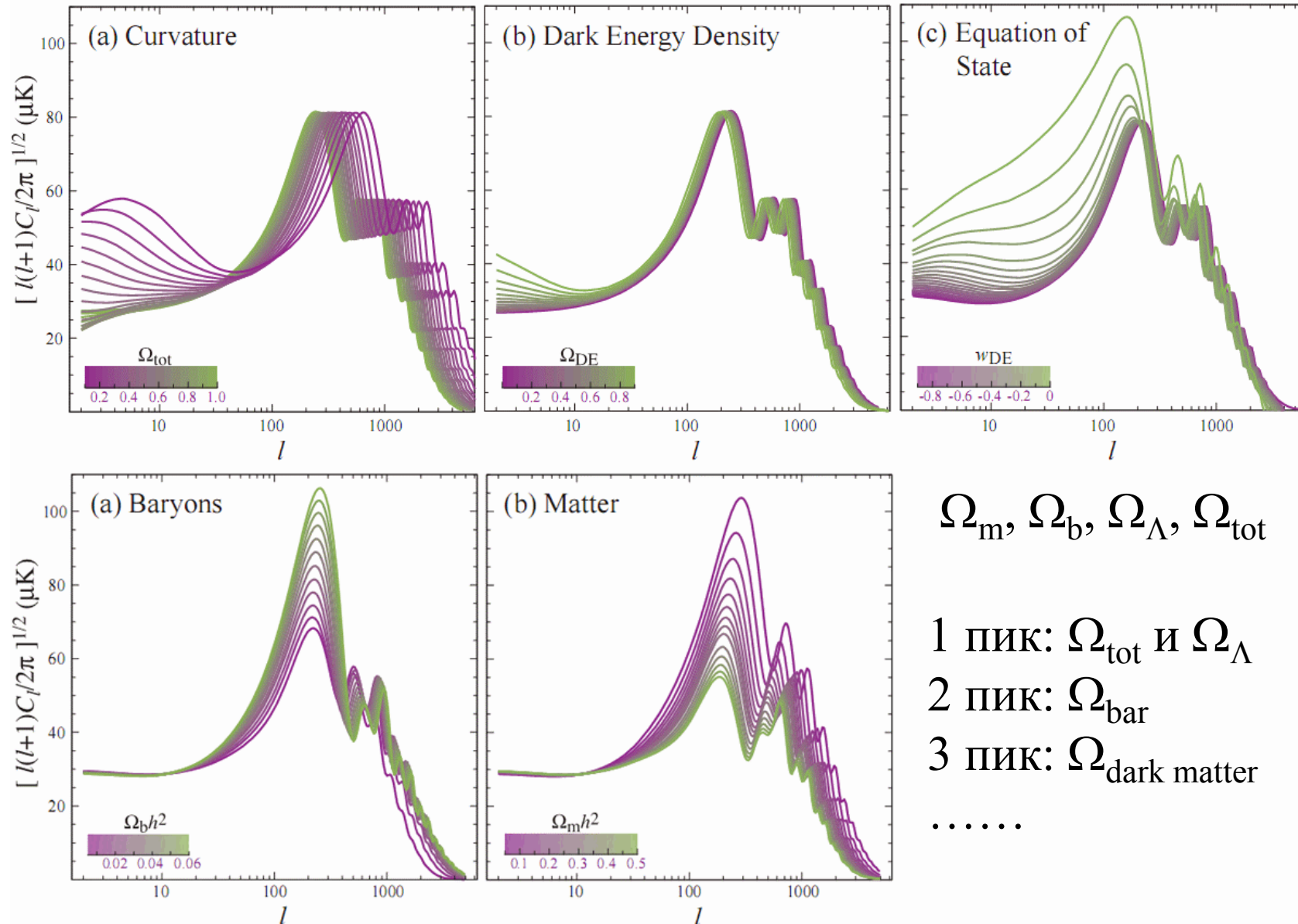


Figure 2 The effect of Compton scattering on the spectrum of the microwave background in the case of late energy release. The broken line corresponds to the initial blackbody spectrum, the solid line corresponds to the spectrum that results from Compton scattering, and the dotted line to a blackbody spectrum that mimics the spectrum produced by Compton scattering at long wavelengths. In the lower part of the figure the effective temperature of the Compton-scattered radiation is shown as a function of the wavelength. The effective temperature is defined as the temperature of blackbody radiation with the same intensity at a given wavelength.

Космологические параметры из наблюдений СМВ



$\Omega_{\text{m}}, \Omega_{\text{b}}, \Omega_{\Lambda}, \Omega_{\text{tot}}$

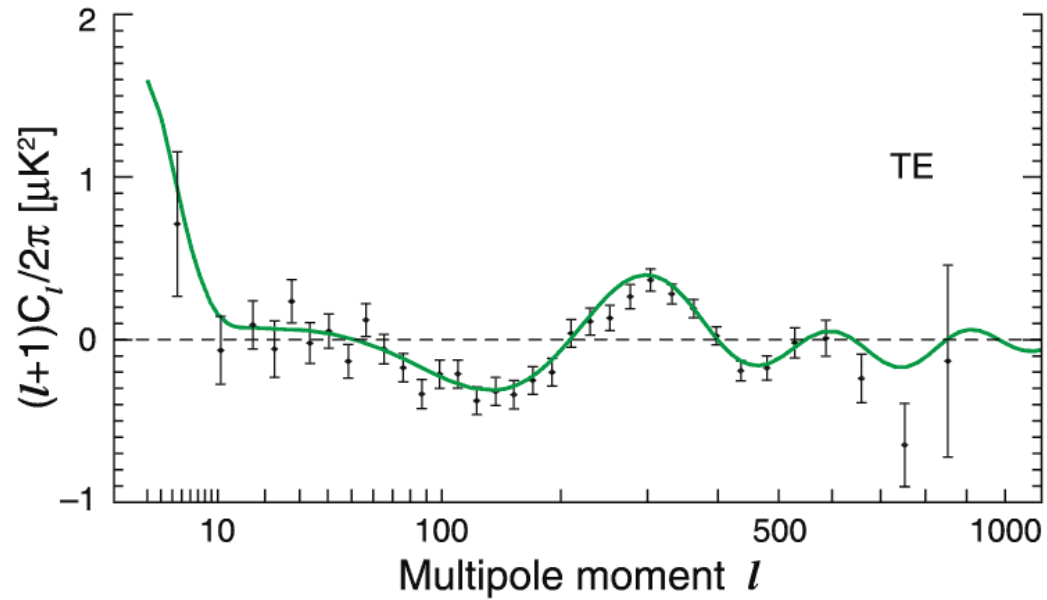
1 пик: Ω_{tot} и Ω_{Λ}

2 пик: Ω_{bar}

3 пик: $\Omega_{\text{dark matter}}$

.....

Поляризация СМВ



Гравитационные волны (тензорная мода): $T/S < 0.2$

Инфляция и ранняя Вселенная

...