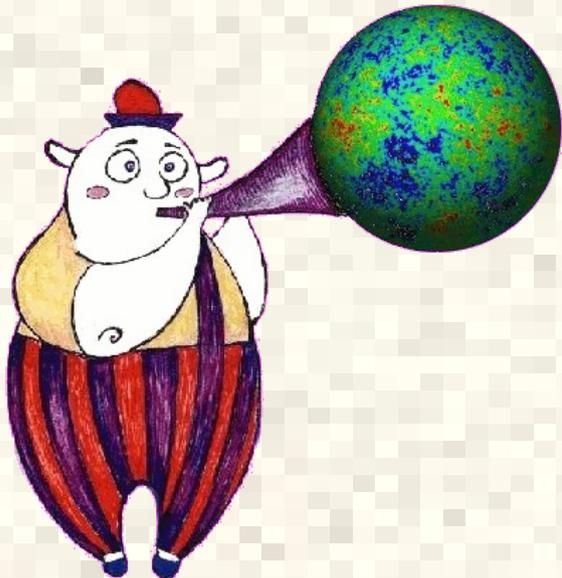


Реликтовое излучение Вселенной рассказывает о главном ...

Олег Верхованов

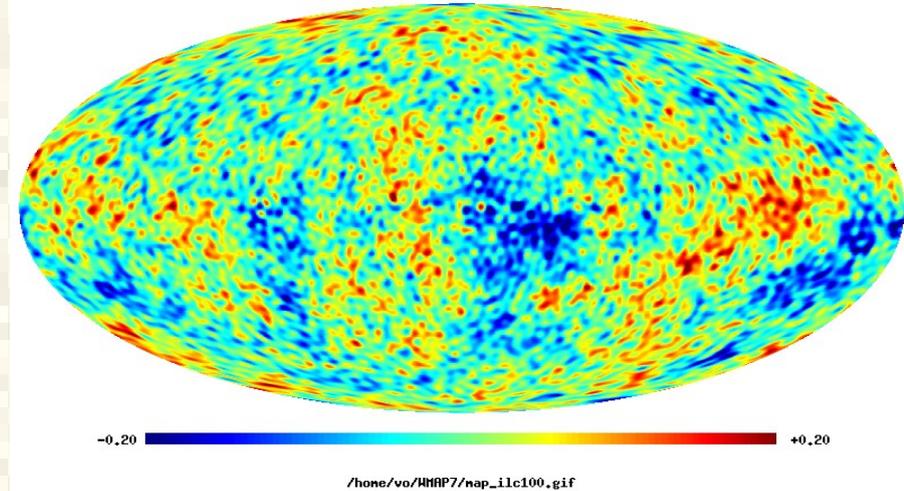
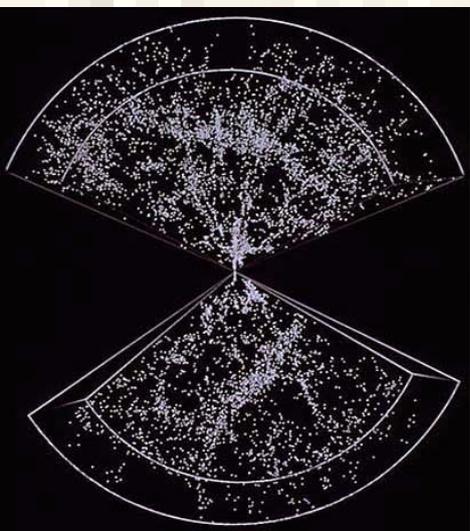
*Специальная астрофизическая обсерватория
Нижний Архыз*



Что мы знаем о космологических свойствах Вселенной?



0) Мы есть



0) Мы есть

1) Законы Природы везде одинаковы

2) Хим.состав Вселенной ($\sim 75\%$ H , $\sim 25\%$ He , $+0.01\%$)

3) Вселенная расширяется, ускоряясь

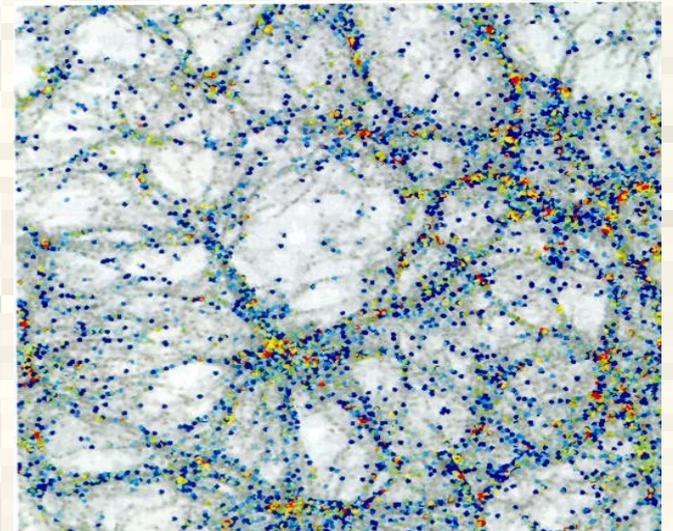
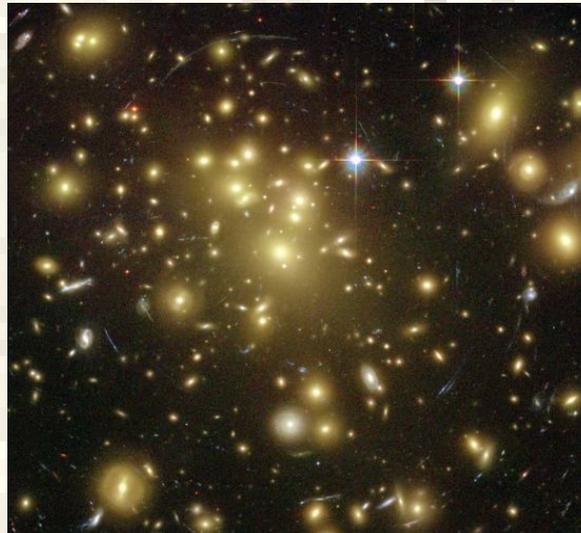
4) Есть реликтовое излучение (СМВ) и его искажения

5) Крупномасштабная структура Вселенной (LSS)

6) Присутствие темной материи в галактиках, скоплениях галактик, гравитационных линзах, при формировании флуктуаций СМВ и LSS

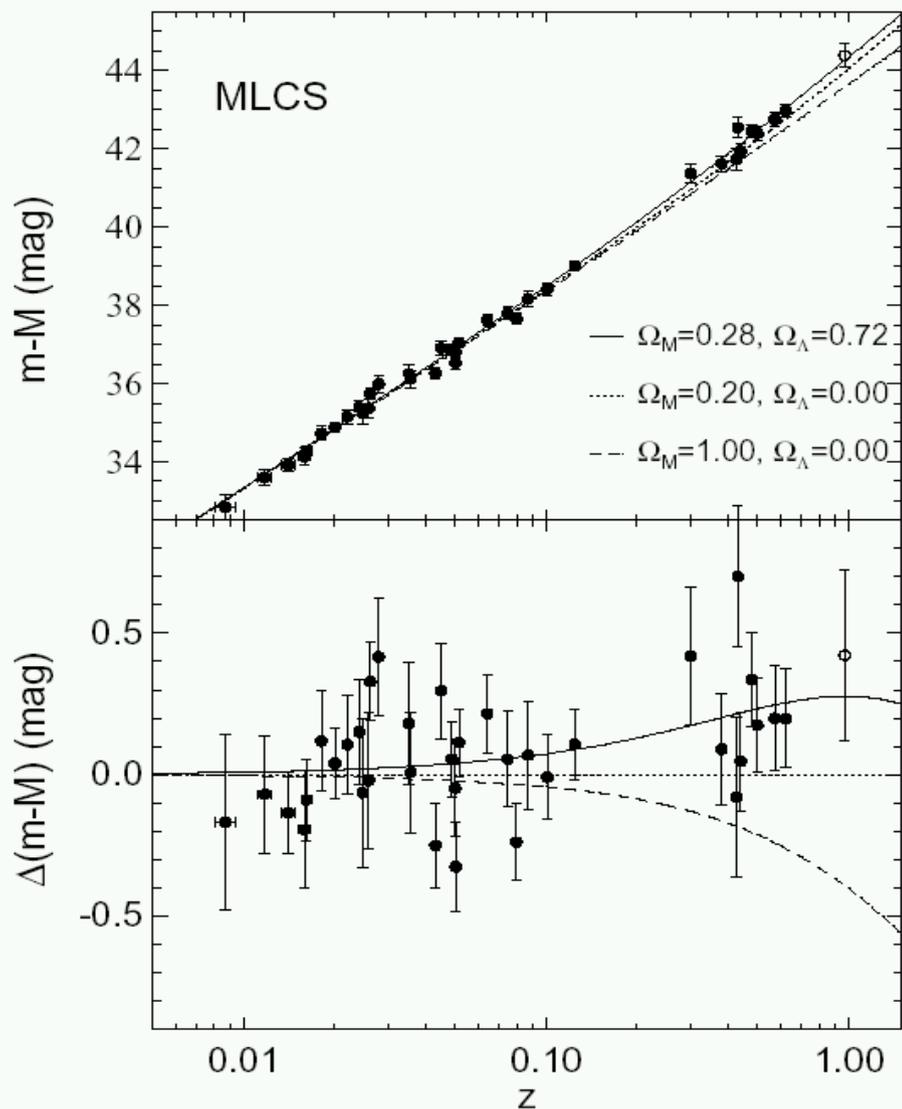
Темная материя:

- 1) Вращение галактик
- 2) Движение галактик в скоплениях галактики
- 3) Гравитационные линзы
- 4) Реликтовое излучение
- 5) Крупномасштабная структура



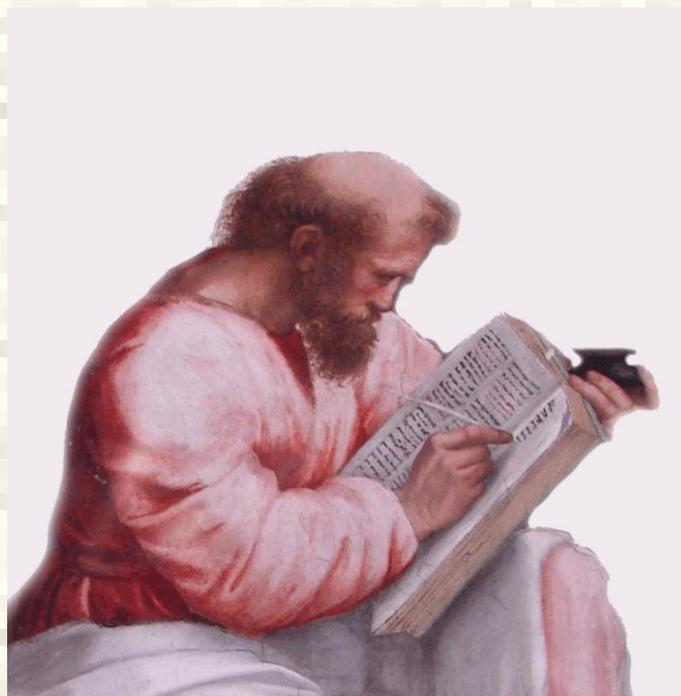
Темная энергия

Звездная величина – красное смещение для SN Ia



Fillipenko, Riess,
2000

Как описываем космологию ?



Метрика Фрийдмана-Леметра-Робертсона-Уокера

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)d\mathbf{x}^2$$

Красное смещение

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_e} = 1 + z = \frac{a_0}{a(t_e)}$$

Параметр Хаббла

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

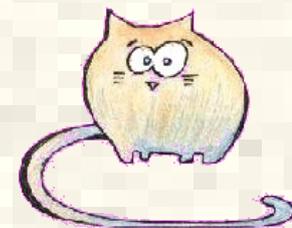
Уравнение Фрийдмана

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho - \frac{k}{a^2}$$



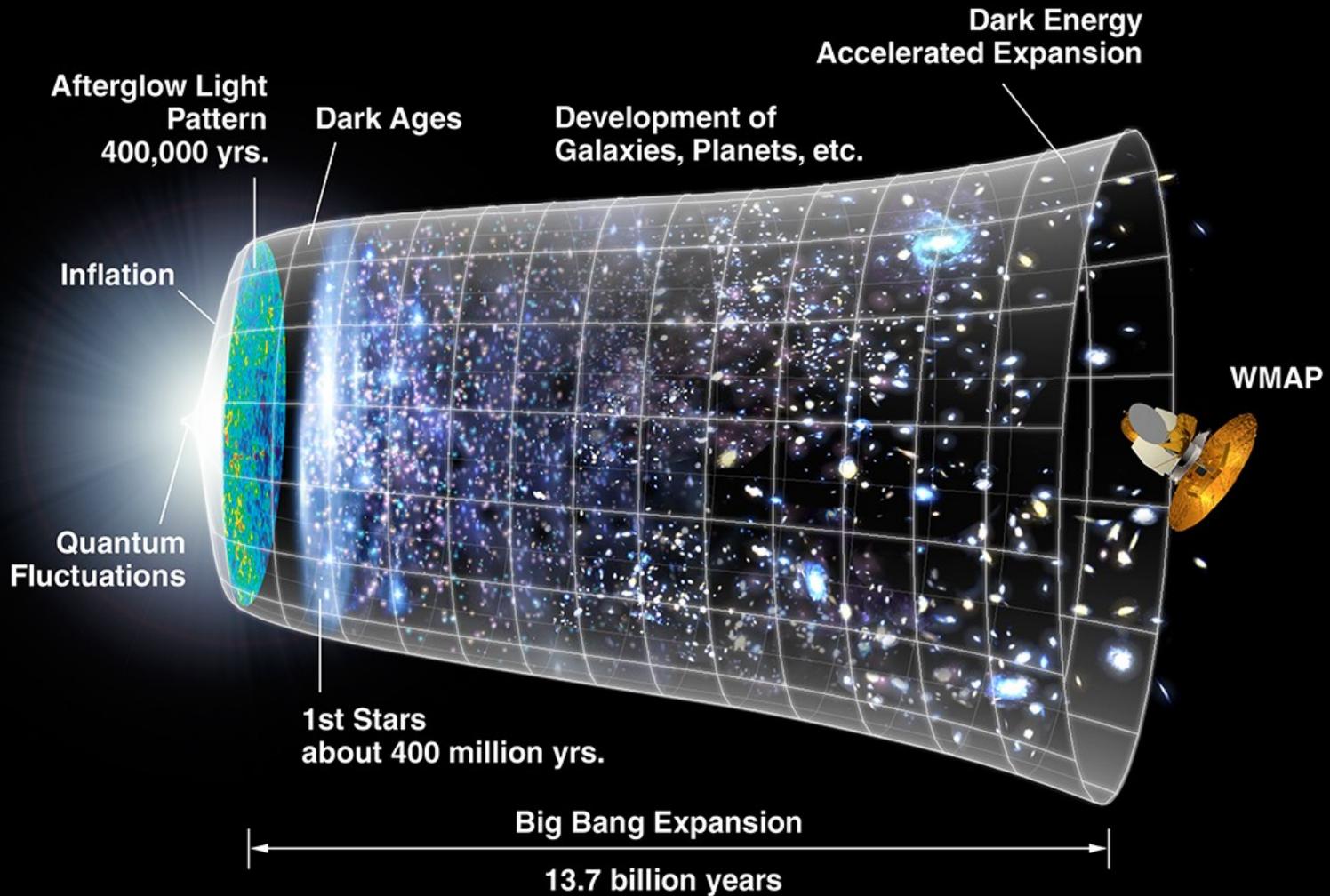
Общие представления, современная парадигма

Согласованная инфляционная
LambdaCDM космологическая модель —
модель Вселенной с доминированием *темной*
энергии и *темной материи*



Современная парадигма (наши представления о Вселенной)





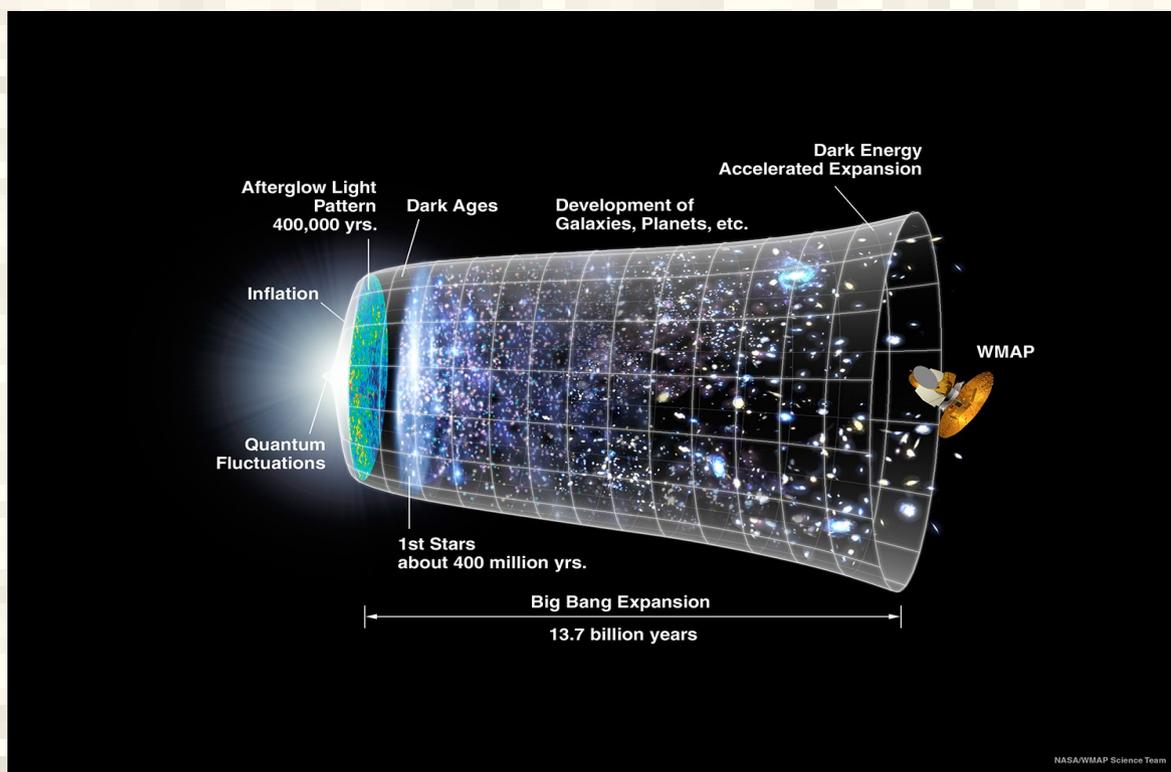
Инфляция: зачем она нужна ?



Инфляция: зачем она нужна ?

1) Принцип причинности: при обращении времени Вселенная не сходится в точку.

А законы Природы одинаковы в видимой Вселенной...

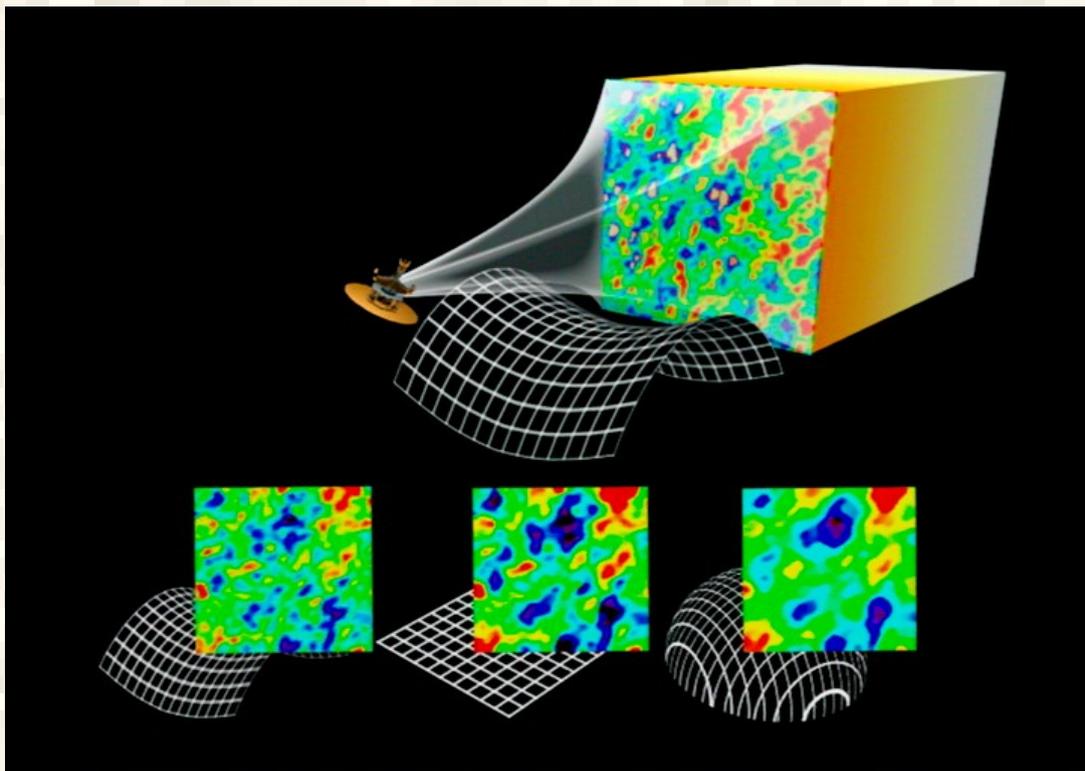


Инфляция: зачем она нужна ?

1) Принцип причинности: при обращении времени Вселенная не сходится в точку.

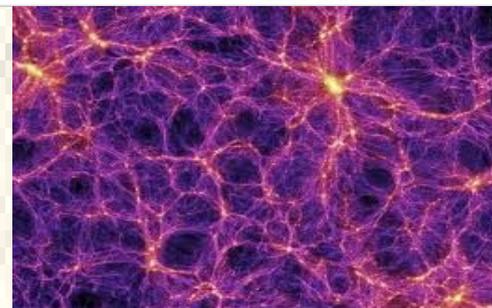
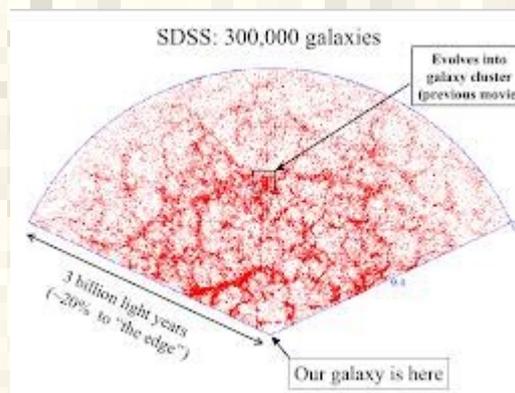
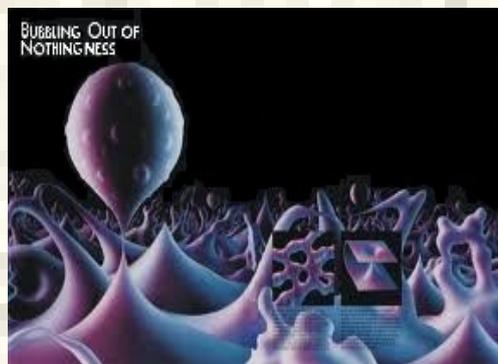
2) Вселенная плоская

Кривизна пространства: $\Omega_K = 1 - \Omega_0 = 0.001 \pm 0.006$



Инфляция: зачем она нужна ?

- 1) Принцип причинности: при обращении времени Вселенная не сходится в точку.
- 2) Вселенная плоская
- 3) Посев ячеек крупномасштабной структуры (выросших до 100 Мпк) в флуктуациях вакуума



Как проверить ?

Реликтовое излучение:

- 1) Статистика сигнала: гауссовость
- 2) Поляризация: гравитационные волн

И теперь о главном.

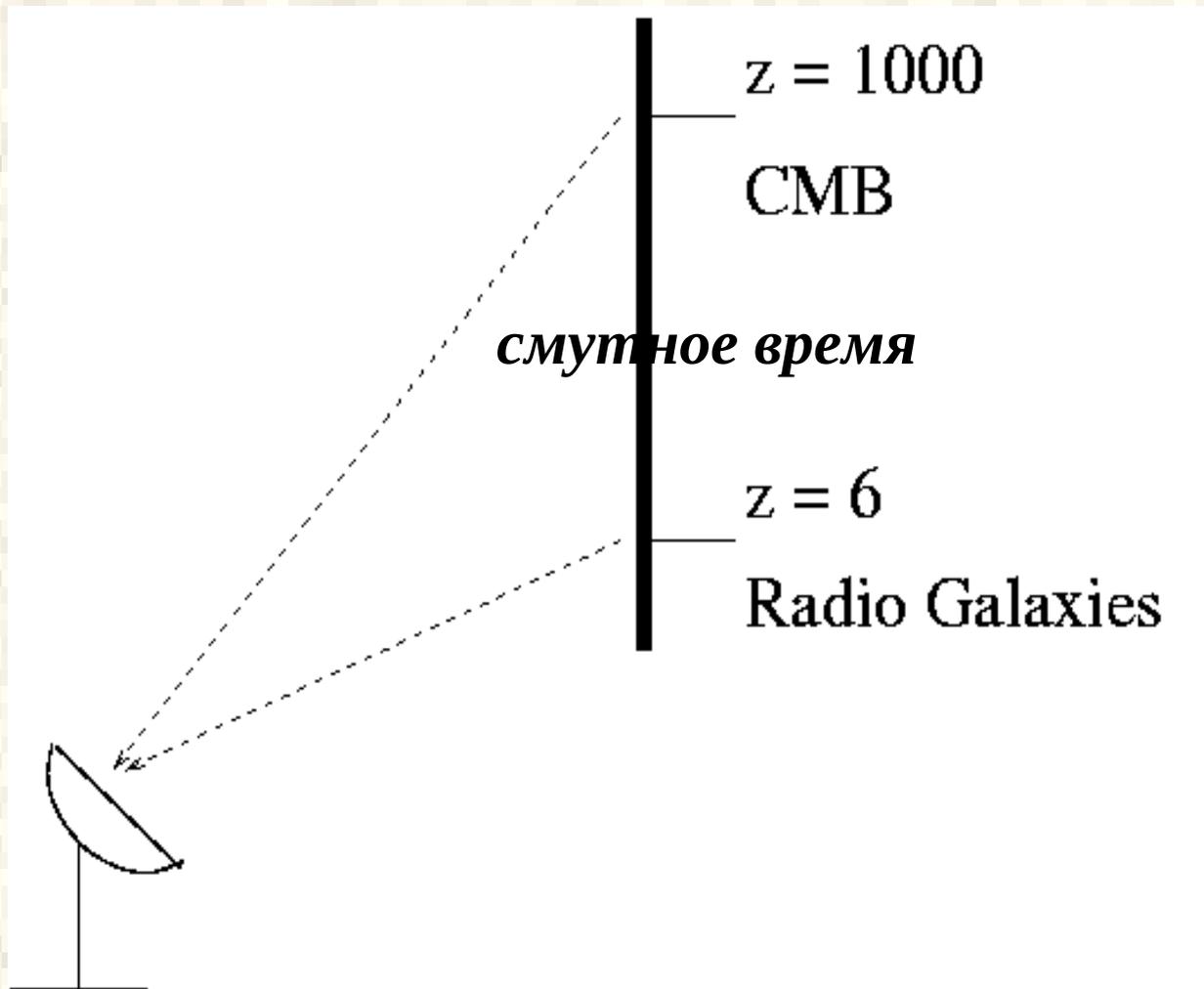
Реликтовое излучение -
оставшееся излучение
от Большого Взрыва
после аннигиляции частиц
и античастиц, когда
Вселенной было всего 10 сек



Радиоастрономический вклад в космологию

- 1) Отождествление радиогалактик (1947-1951)
- 2) Отождествление квазаров (1961)
- 3) Подсчеты радиоисточников $\log N - \log S$ (1964-1997)
- 4) Открытие реликтового излучения (1965, 1978)
- 5) Коррекция теории образования LSS
- 6) Апертурный синтез (1967-1974)
- 7) Открытие пульсаров (1967-1974)
- 8) Исследование двойного пульсара (1974, 1993)
- 9) Открытие флуктуаций СМВ (1992, 2006)
- 10) Определение космологических параметров (2003)

Методы радиокосмологии



Космологические тесты

- **Реликтовое излучение**

- а) Спектр мощности -

- Зависимость голичество энергии, содержащееся в пятнах карты излчения, от размера этих пятен

- б) Статистические свойства сигнала (гауссовость) – сколько и каких пиков (отрицательных, положительных) карты излучения есть на небе в разных напрвлениях

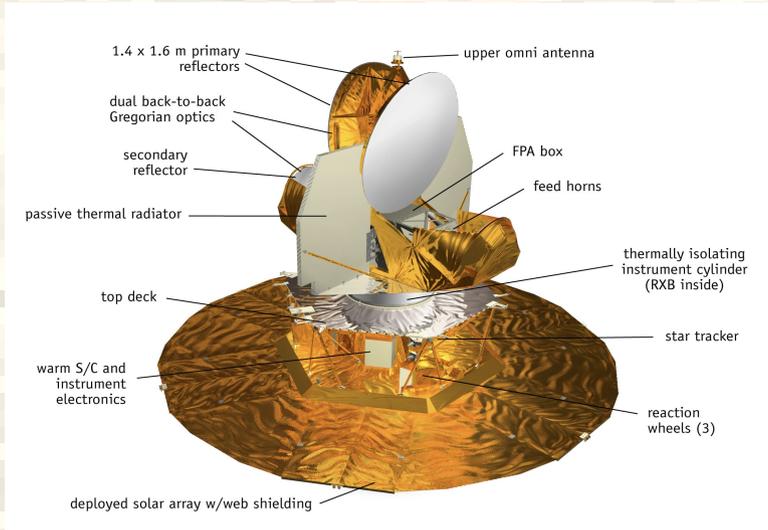
космологическое
тесто



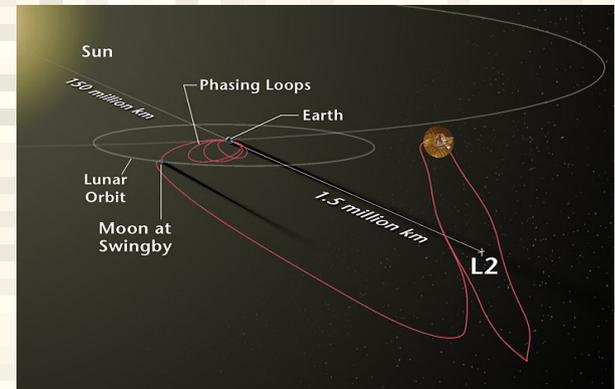
Немного истории

- 1) Э.МакКеллар: стороннее излучение для возбуждения линий циана, 1941
- 2) Предсказание группы Гамова, 1946
- 3) Т.Шмаонов: неудаляемый шум, 1957
- 4) А.Дорошкевич, И.Новиков, 1964
- 5) А.Пензиас, Р.Вильсон: **открытие СМВ**, 1965
- 6) Поиски флуктуаций (в т.ч. на РАТАН-600, группа Парийского) и коррекция теории.
- 7) Спутник Реликт I (1980-е)
- 8) Дж.Матер, Дж.Смут, **открытие флуктуаций СМВ**, 1992
- 9) Измерение космологических параметров и исследование проблемы негауссовости, сейчас (миссии WMAP & Planck).

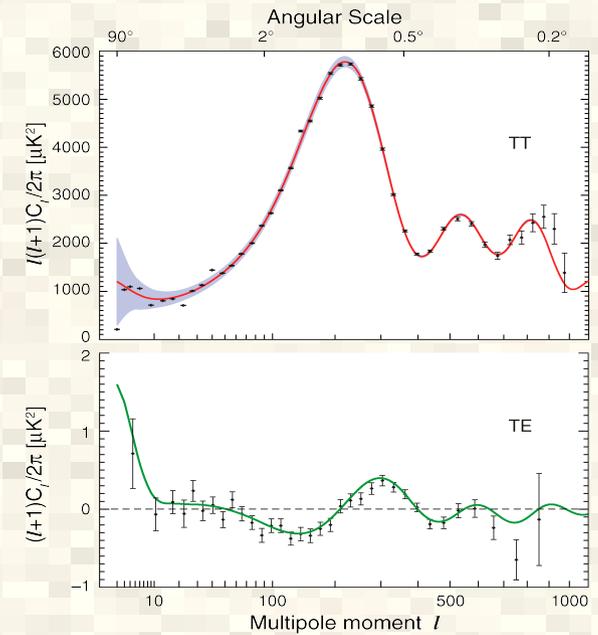
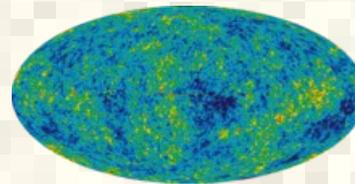
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP, NASA)



2001-2011

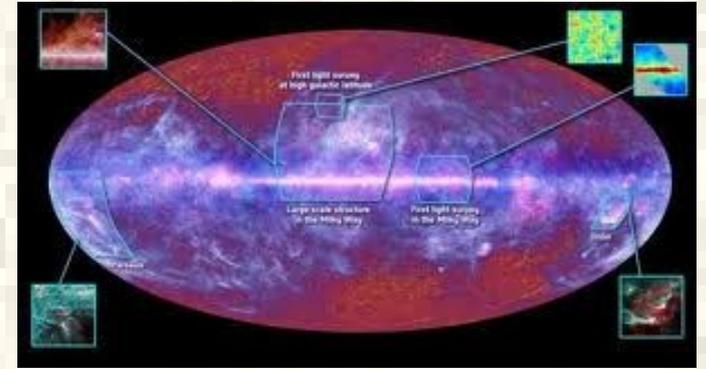
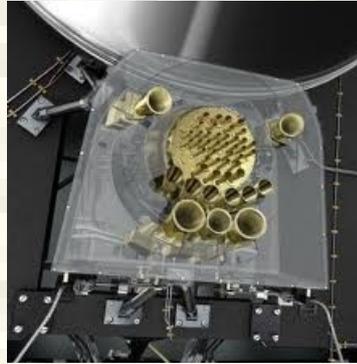


5 frequencies:
23, 33, 41, 61, 94 GHz



Лучшее определение
космологических параметров к 2011г. !

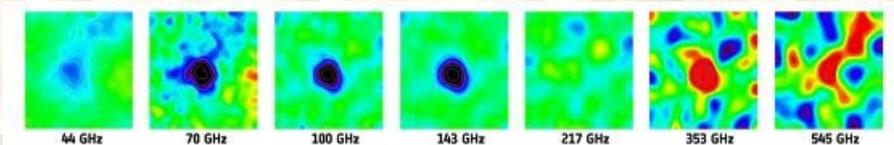
Planck mission, ESA



Низкие частоты: 30,44,70 ГГц

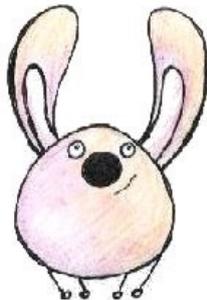
Высокие частоты: 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц

Zeldovich-Sunyaev effect

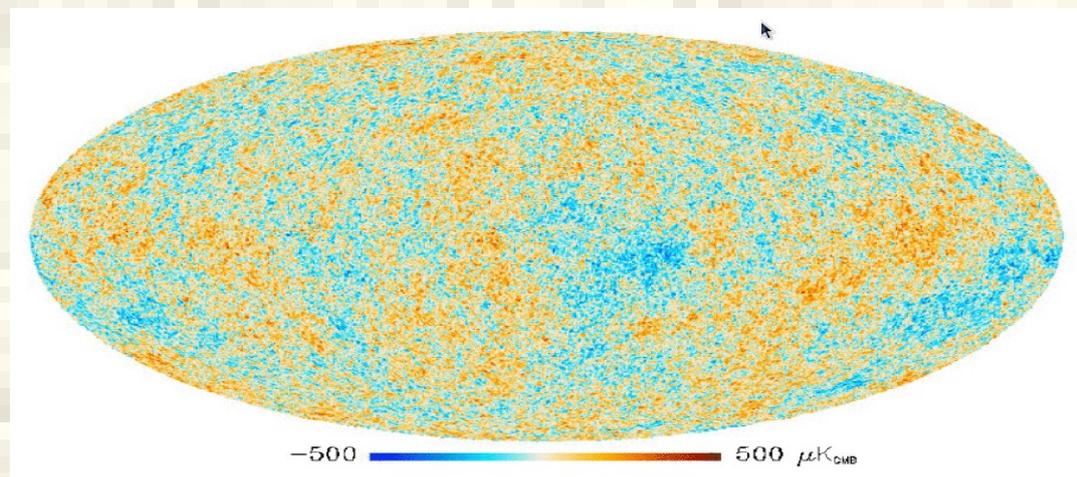
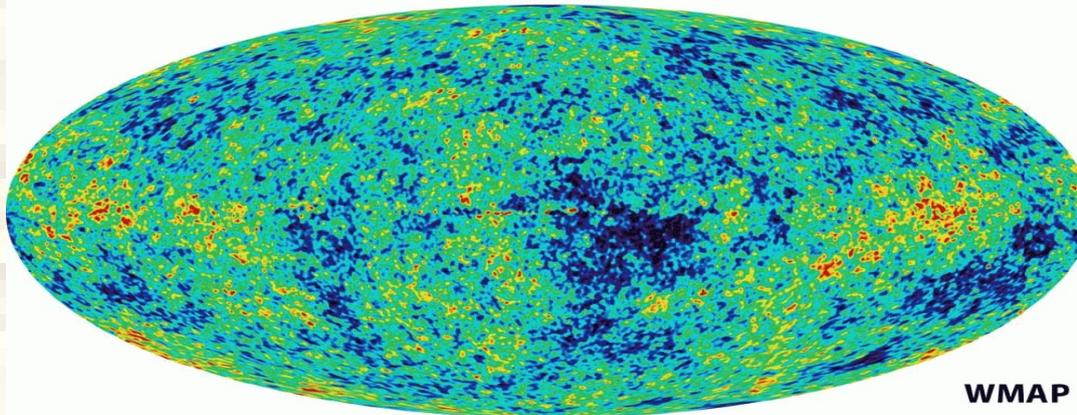
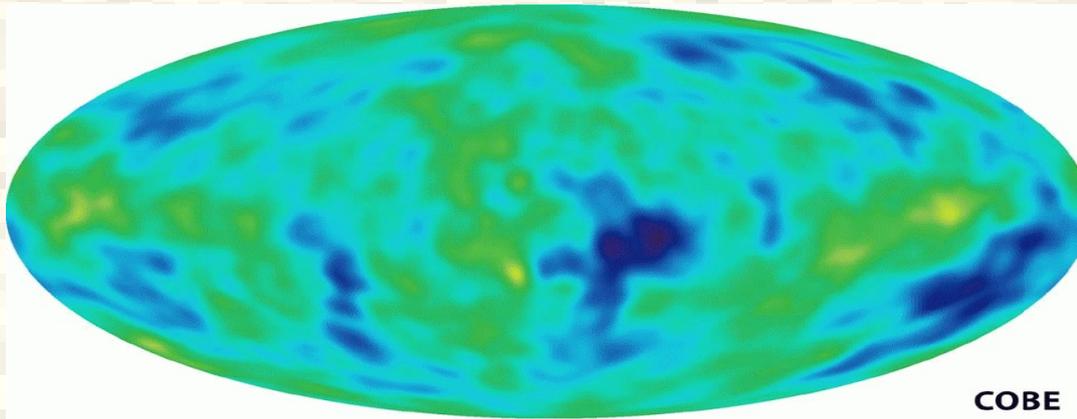


Гравитационные волны по В-моду поляризации ?

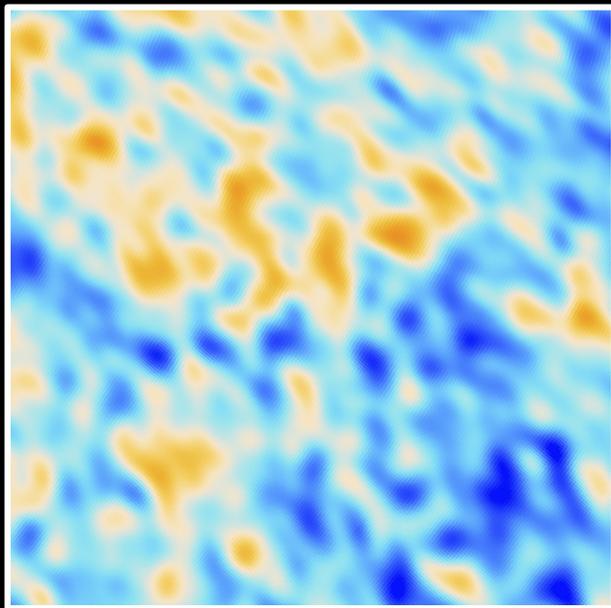
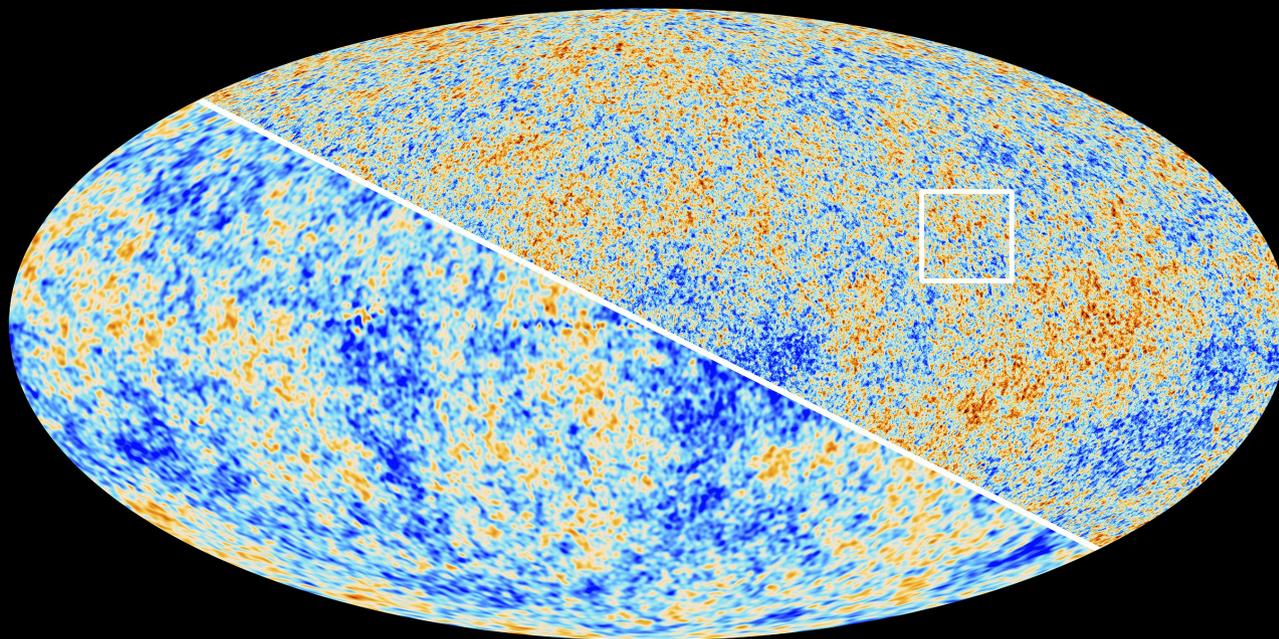
Что анализируем ?



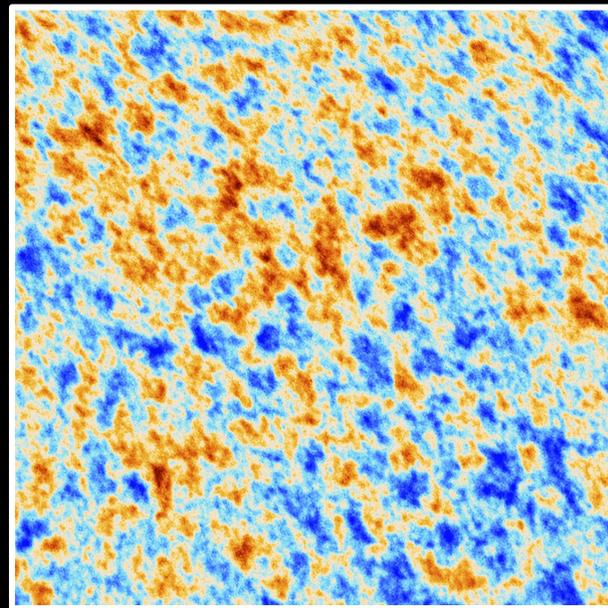
Карты



The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



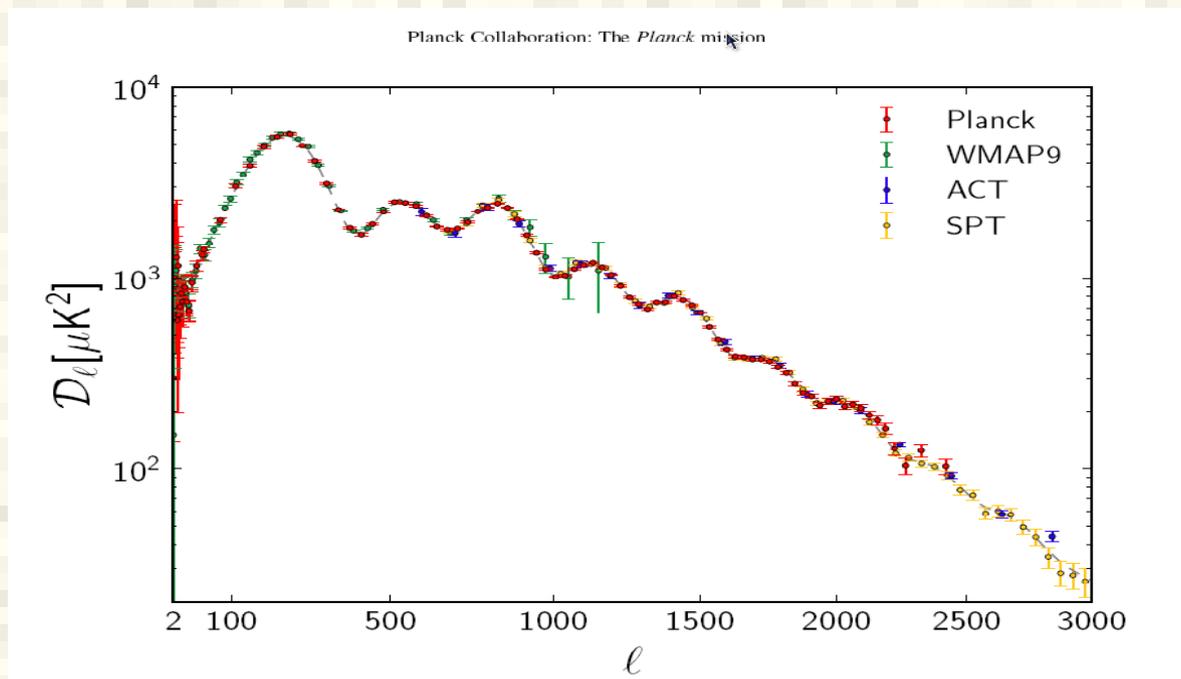
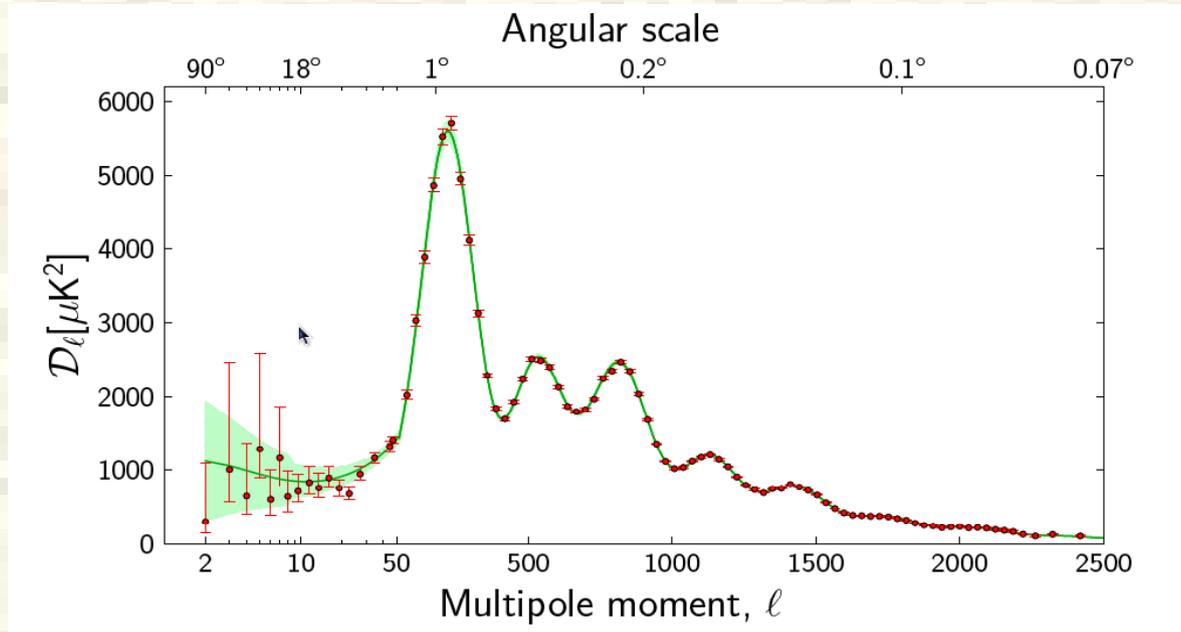
WMAP



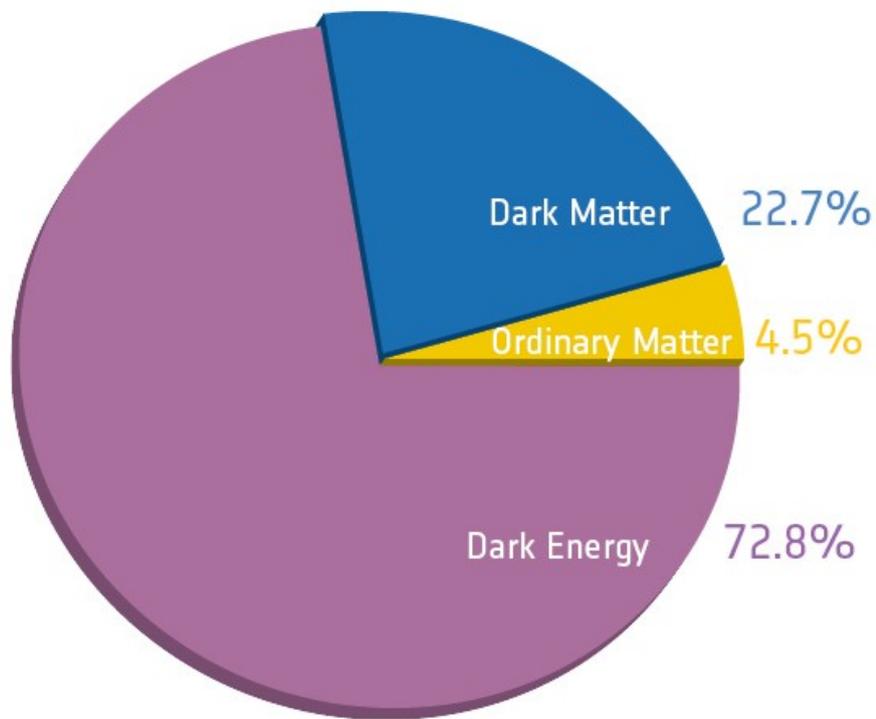
Planck

Спектр мощности флуктуаций РИ

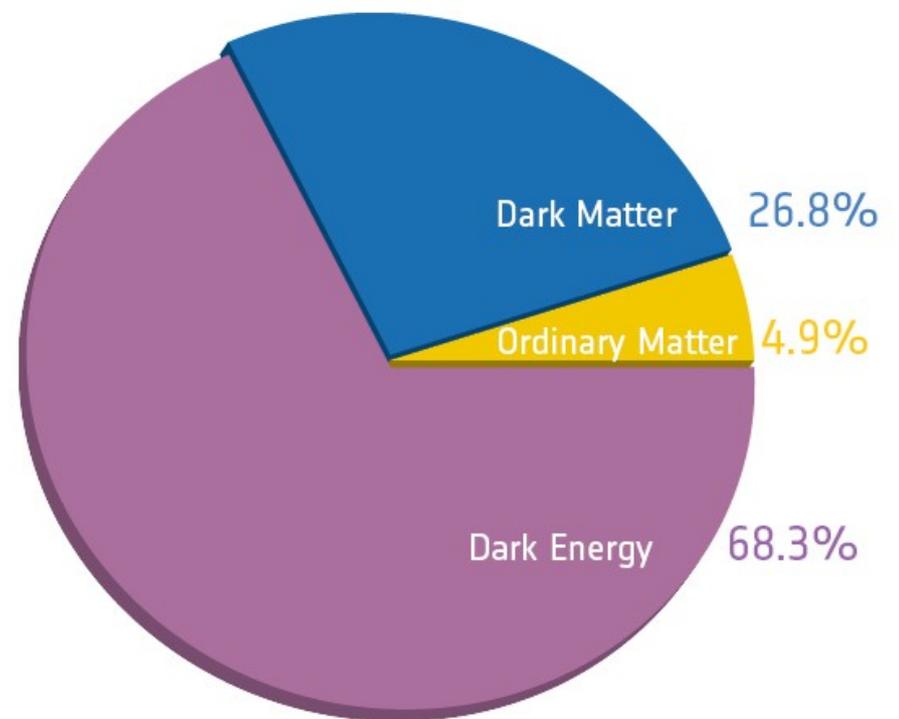
Planck



Description	Symbol	WMAP -only	WMAP +BAO+ H_0
Parameters for Standard Λ CDM Model ^a			
Age of universe	t_0	13.75 ± 0.13 Gyr	13.75 ± 0.11 Gyr
Hubble constant	H_0	71.0 ± 2.5 km/s/Mpc	$70.4^{+1.3}_{-1.4}$ km/s/Mpc
Baryon density	Ω_b	0.0449 ± 0.0028	0.0456 ± 0.0016
Physical baryon density	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$	0.02260 ± 0.00053
Dark matter density	Ω_c	0.222 ± 0.026	0.227 ± 0.014
Physical dark matter density	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056	0.1123 ± 0.0035
Dark energy density	Ω_Λ	0.734 ± 0.029	$0.728^{+0.015}_{-0.016}$
Curvature fluctuation amplitude, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^b	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	$(2.441^{+0.088}_{-0.092}) \times 10^{-9}$
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	σ_8	0.801 ± 0.030	0.809 ± 0.024
Scalar spectral index	n_s	0.963 ± 0.014	0.963 ± 0.012
Redshift of matter-radiation equality	z_{eq}	3196^{+134}_{-133}	3232 ± 87
Angular diameter distance to matter-radiation eq. ^c	$d_A(z_{\text{eq}})$	14281^{+158}_{-161} Mpc	14238^{+128}_{-129} Mpc
Redshift of decoupling	z_*	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$	$1090.89^{+0.68}_{-0.69}$
Age at decoupling	t_*	379164^{+5187}_{-5243} yr	377730^{+3205}_{-3200} yr
Angular diameter distance to decoupling ^{c,d}	$d_A(z_*)$	14116^{+160}_{-163} Mpc	14073^{+129}_{-130} Mpc
Sound horizon at decoupling ^d	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Mpc	146.2 ± 1.1 Mpc
Acoustic scale at decoupling ^d	$l_A(z_*)$	302.44 ± 0.80	302.40 ± 0.73
Reionization optical depth	τ	0.088 ± 0.015	0.087 ± 0.014
Redshift of reionization	z_{reion}	10.5 ± 1.2	10.4 ± 1.2
Parameters for Extended Models ^e			
Total density ^f	Ω_{tot}	$1.080^{+0.093}_{-0.071}$	$1.0023^{+0.0056}_{-0.0054}$
Equation of state ^g	w	$-1.12^{+0.42}_{-0.43}$	-0.980 ± 0.053
Tensor to scalar ratio, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^{b,h}	r	< 0.36 (95% CL)	< 0.24 (95% CL)
Running of spectral index, $k_0 = 0.002$ Mpc ⁻¹ ^{b,i}	$dn_s/d \ln k$	-0.034 ± 0.026	-0.022 ± 0.020
Neutrino density ^j	$\Omega_\nu h^2$	< 0.014 (95% CL)	< 0.0062 (95% CL)
Neutrino mass ^j	$\sum m_\nu$	< 1.3 eV (95% CL)	< 0.58 eV (95% CL)
Number of light neutrino families ^k	N_{eff}	> 2.7 (95% CL)	$4.34^{+0.86}_{-0.88}$



Before Planck



After Planck

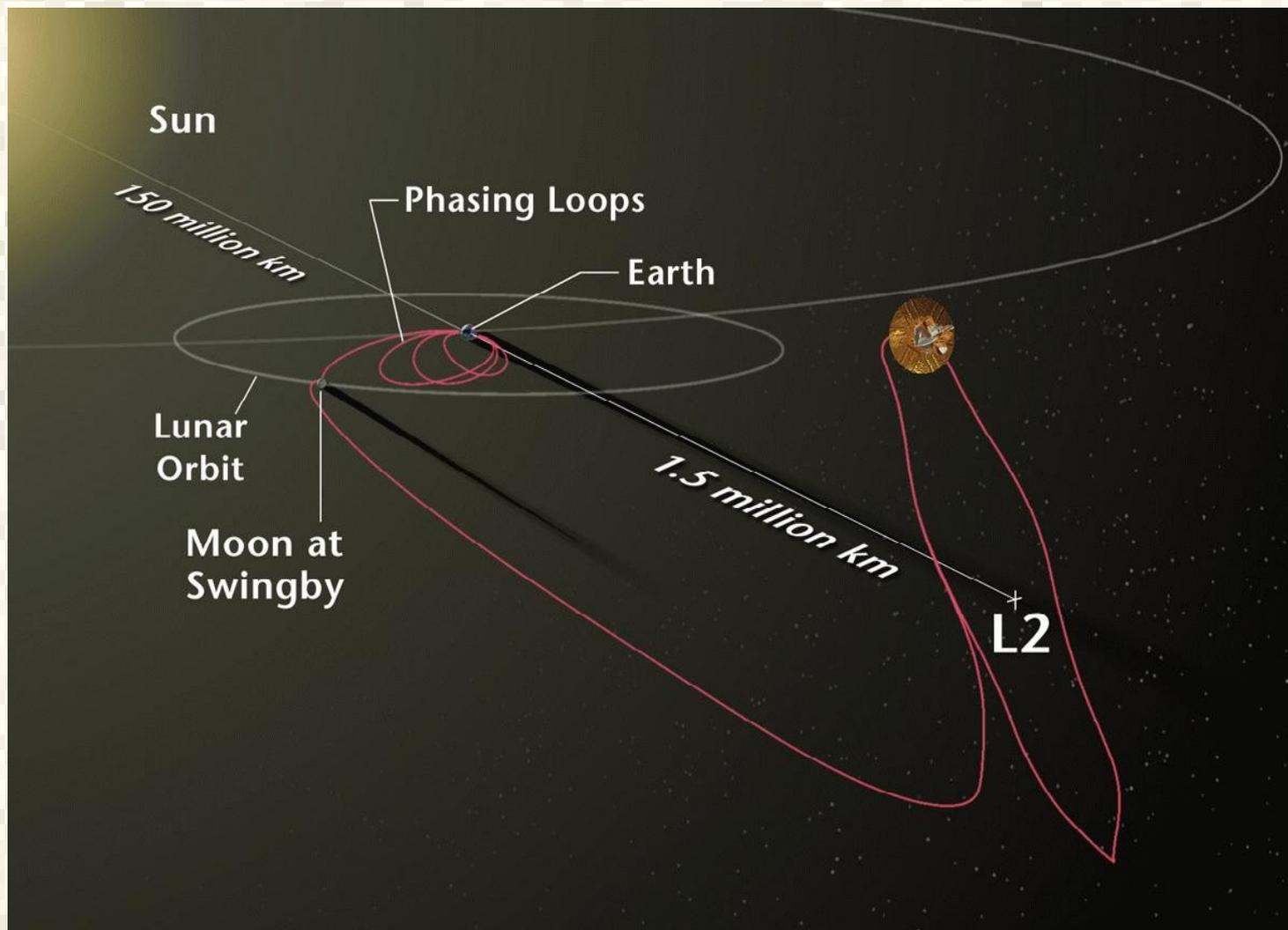
Как исследовать ?

- 1) Теория
- 2) Наблюдения
- 3) Моделирование



Как наблюдается ?

Траектория WMAP

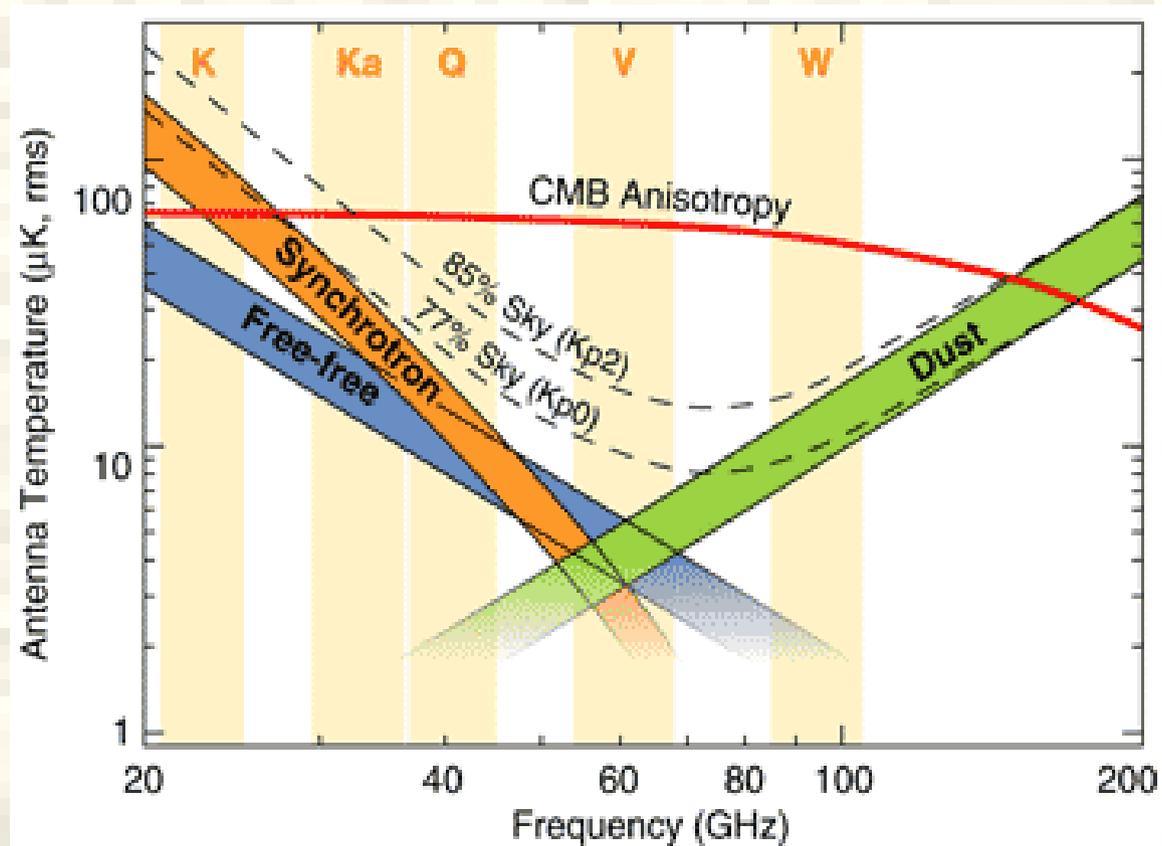


Как анализируем данные СМВ

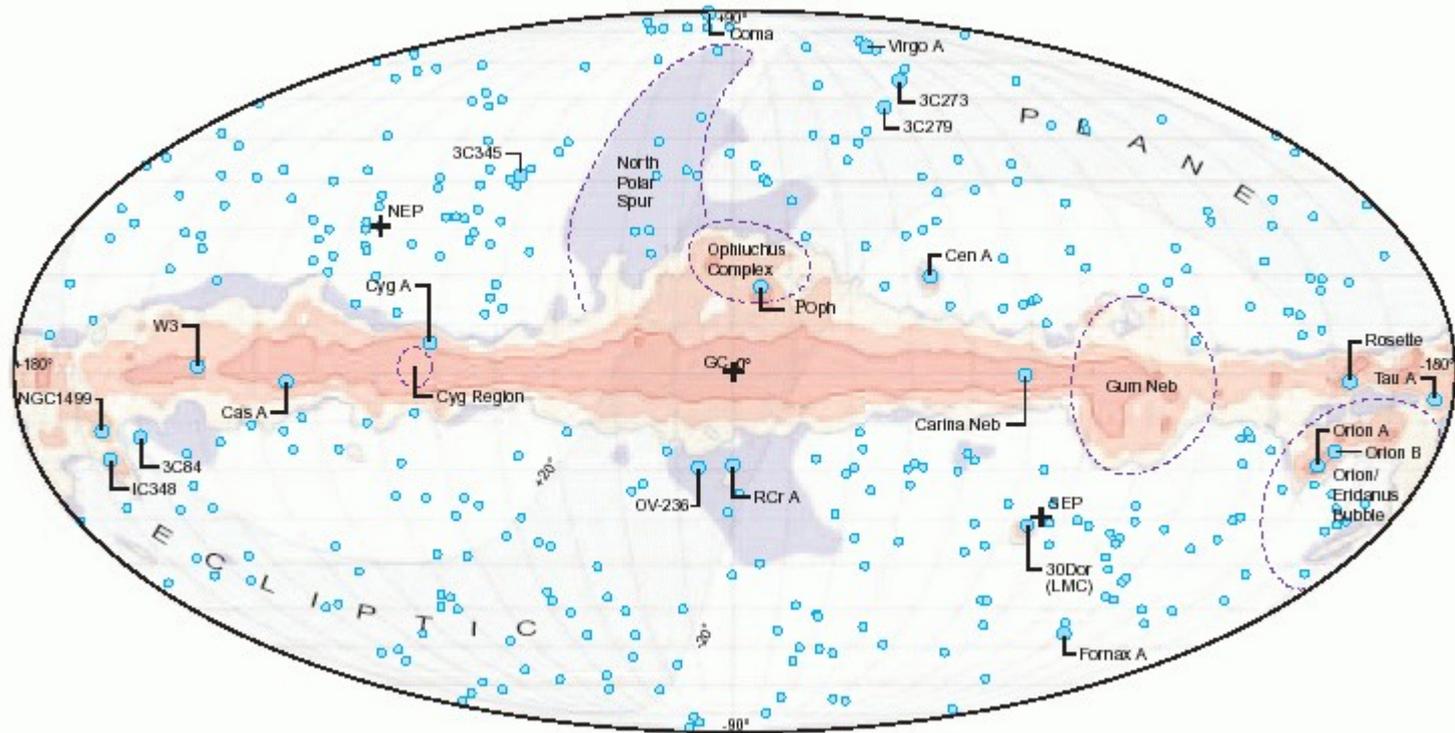
- Регистрация: time ordered data: $T(t)=T(l,b)$
- Пикселизация: map-making и осреднение данных в пикселах
- Разделение компонент
- Анализ статистики сигнала
- Анализ спектра мощности

Разделение компонент

Полосы WMAP



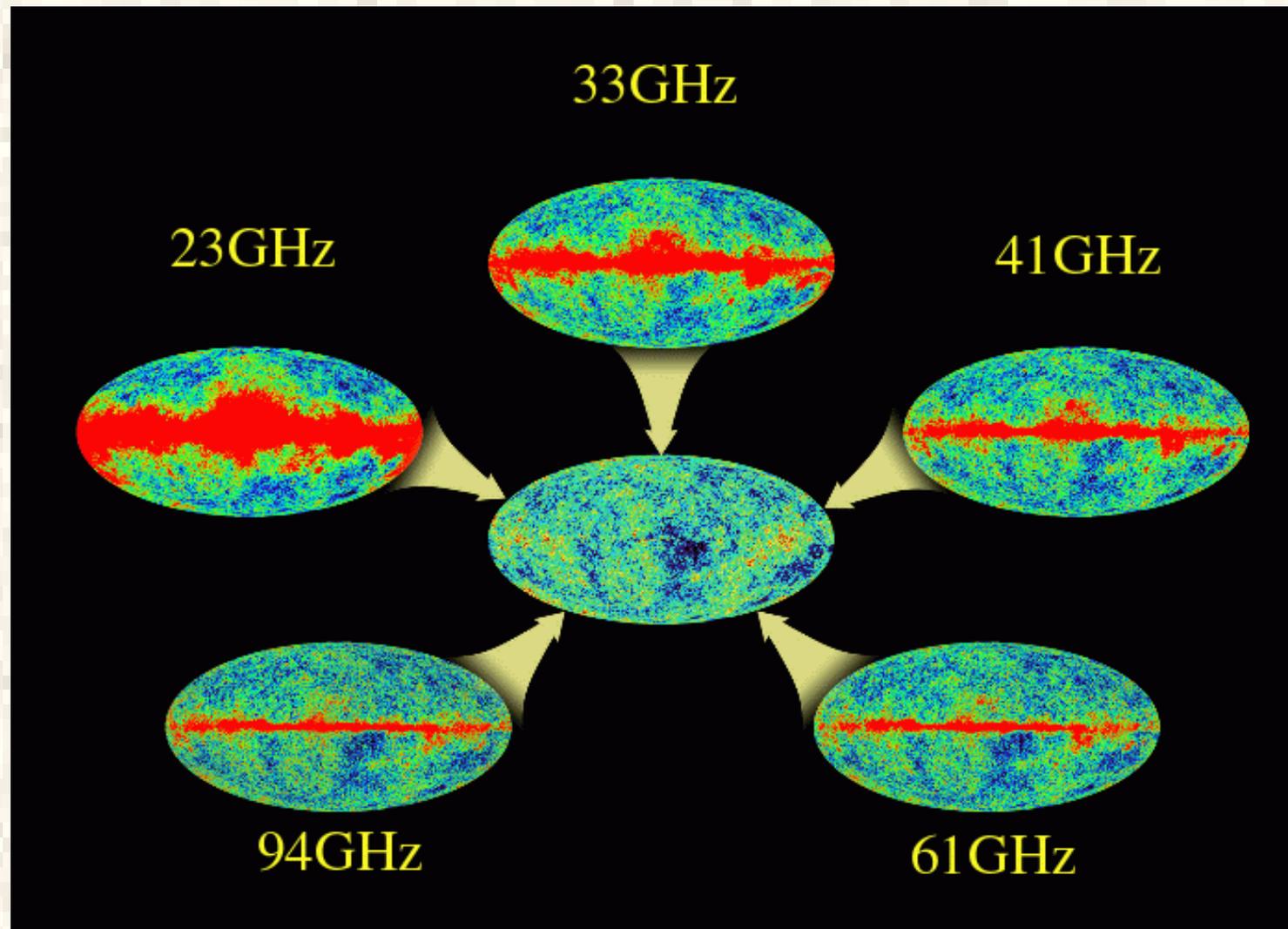
Радиоисточники



Разделение компонент:

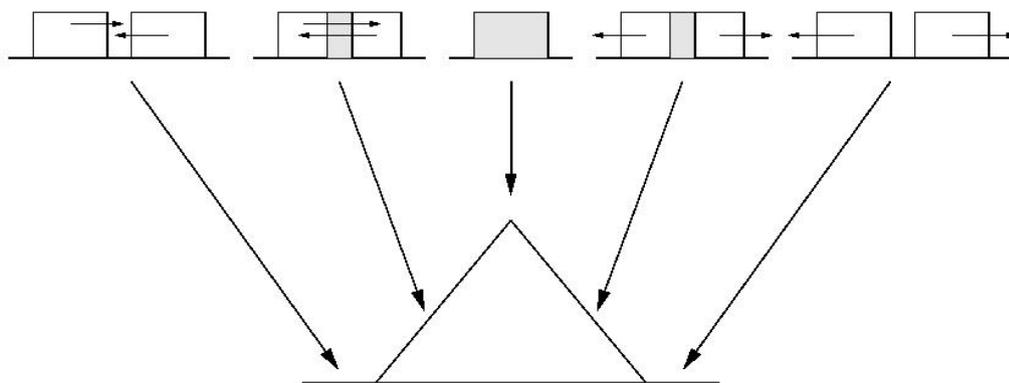
Сигнал = (РИ +

Синхротрон+пыль+FreeFree+источники)* Диаграмма + Шум



Примечание 1. Свертка

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x - x', y - y') A(x', y') dx' dy'$$



1)

2)

Сглаживание
и замытие
деталей, по
размеру
меньших ДН

Два свойства реликтового излучения:

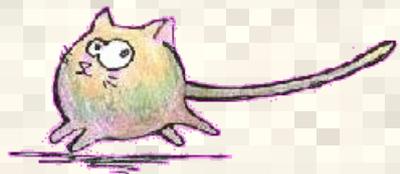
- 1) Одинаковая температура на всех длинах волн - чернотельность излучения;
- 2) Корреляция с мешающими фонами стремится к нулю: случайны гауссовый процесс

Выглядит так:

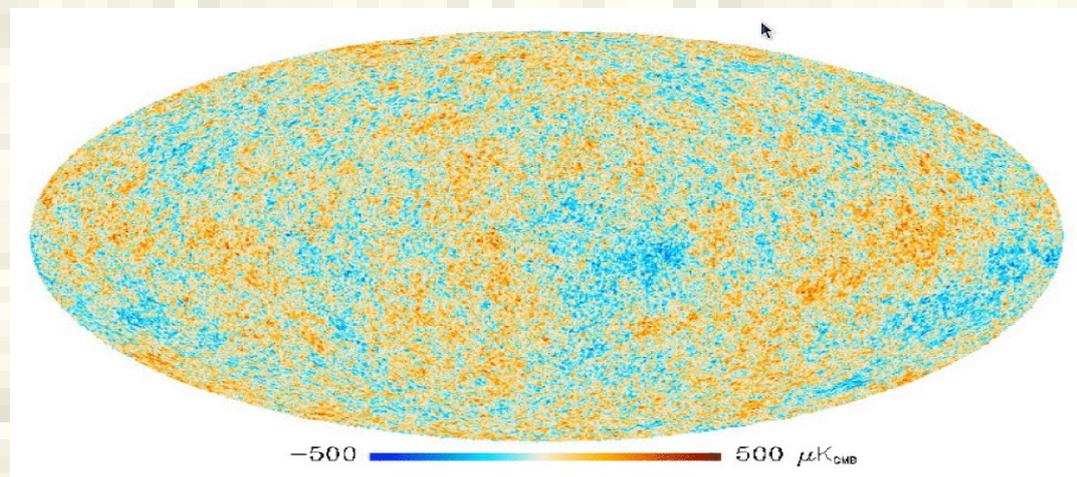
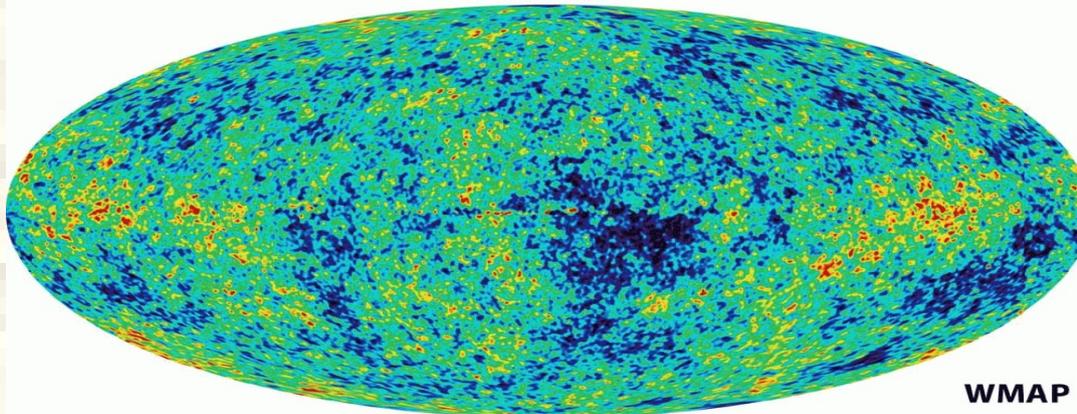
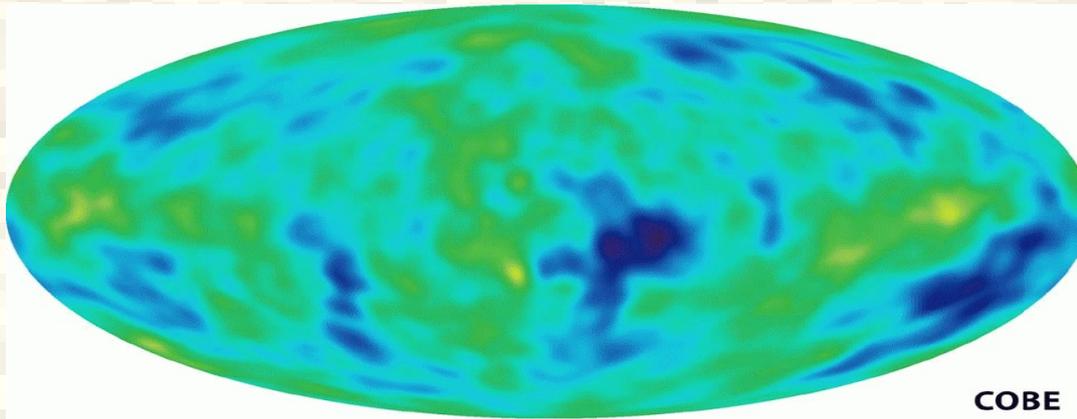
$$\sum_k w_k = 1 \text{ and } Var(c_j) \rightarrow \min(w_k).$$

$$c_p = T(\theta_j, \phi_p, \nu_k) - \sum_{i=1}^{J-1} w_p (T(\theta_p, \phi_p, \nu_k) - T(\theta_p, \phi_p, \nu_i)),$$

$$Var(c_p) = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{p \in \mathfrak{R}} [c_p - \langle c_p \rangle]^2, \quad \frac{\delta Var(c_p)}{\delta w_j} = 0$$



Карты

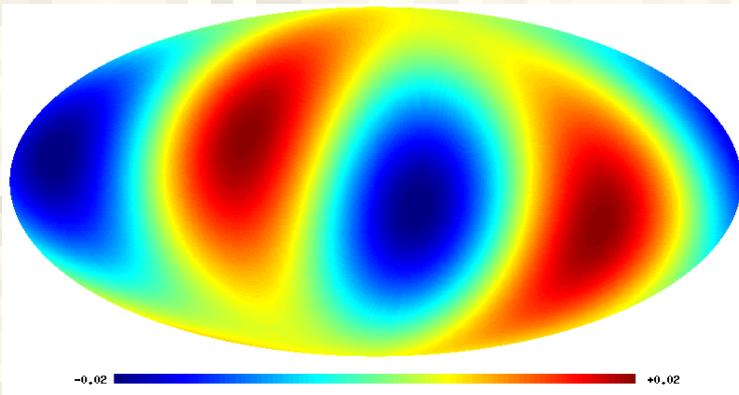


Planck

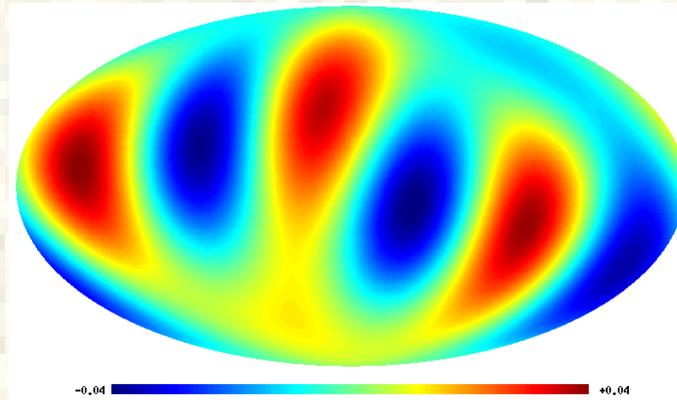
Мультипольное разложение

Multipole expansion

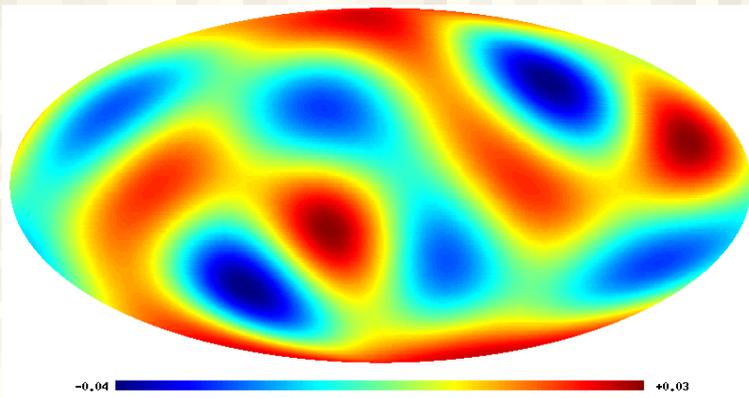
$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi)$$



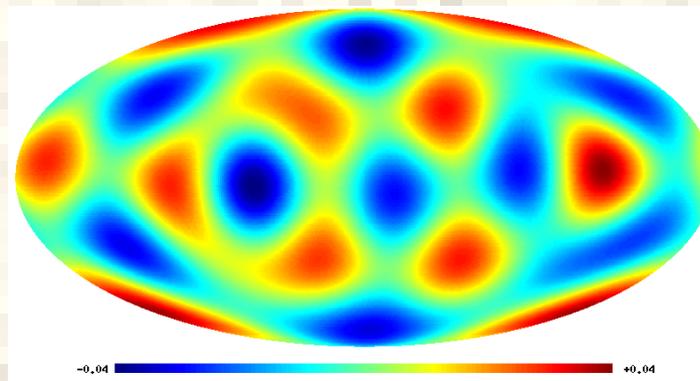
L = 2 (quadrupole)



L = 3 (octupole)

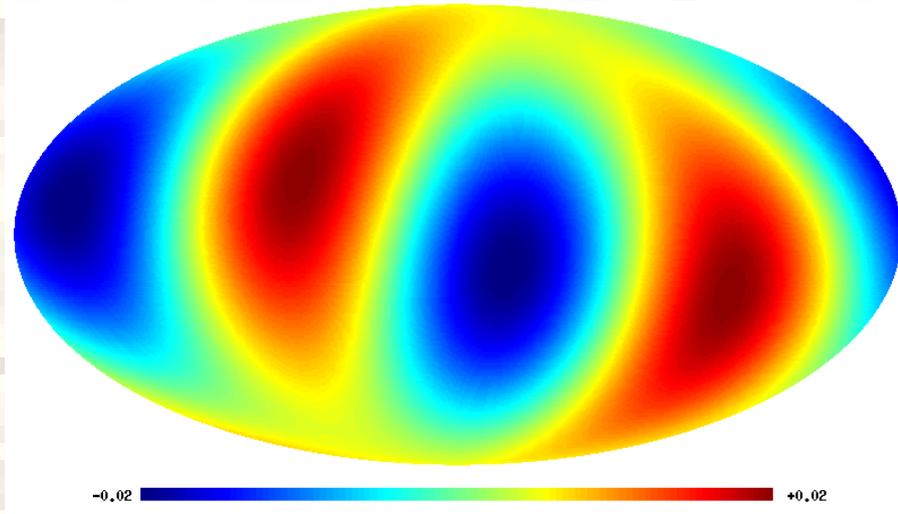


L = 4



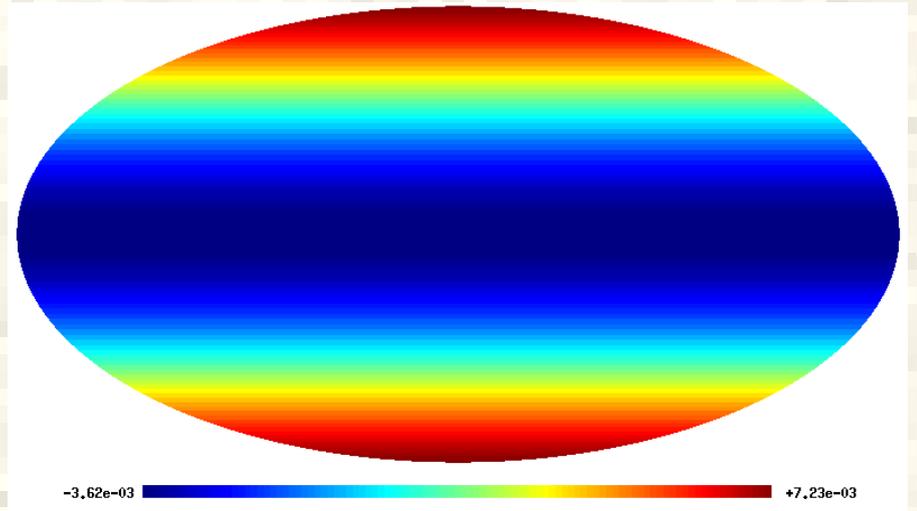
L = 5

Квадруполь



$L=2$

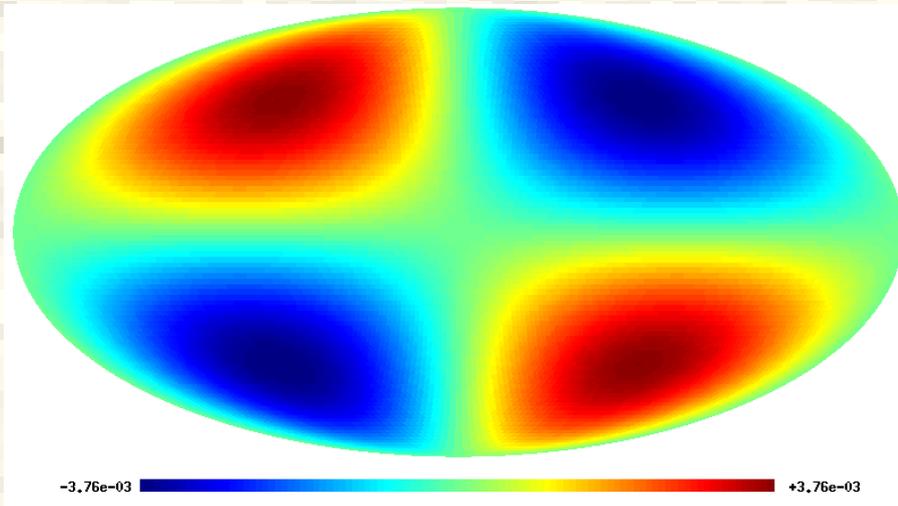
=



$(2,0)$

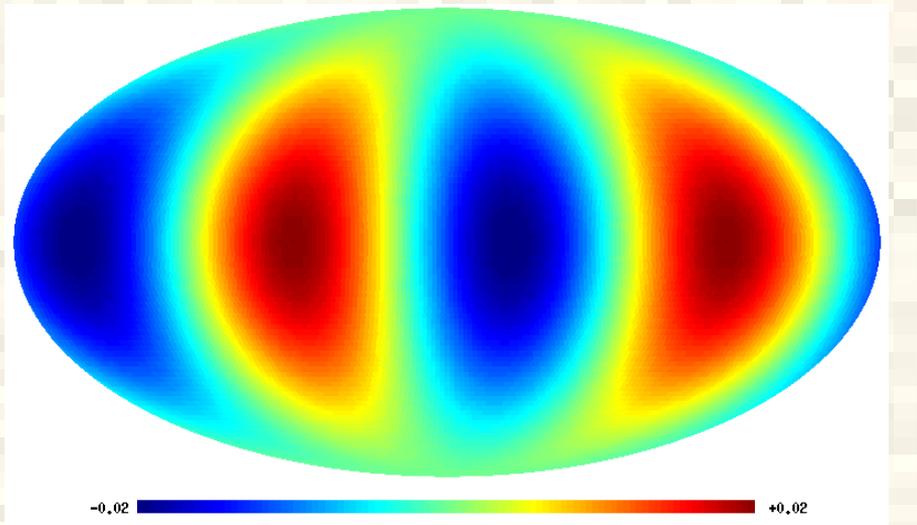
+

+



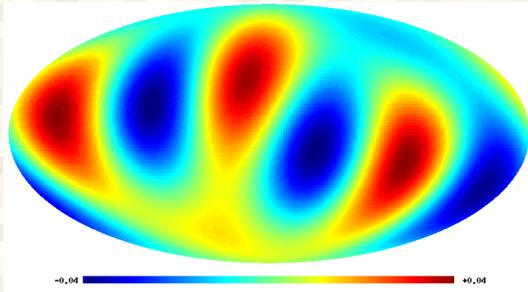
$(2,1)$

+



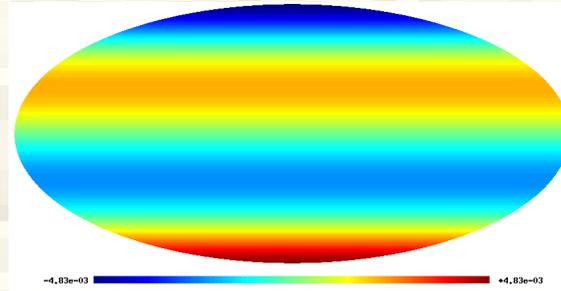
$(2,2)$

Октуполь



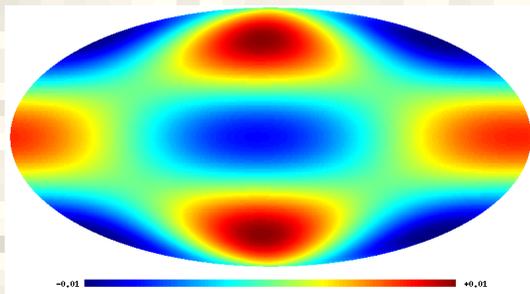
$L=3$

=



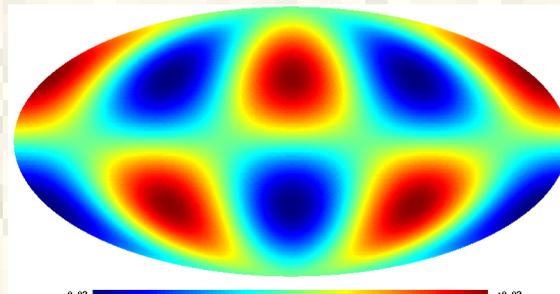
$(3,0)$

+



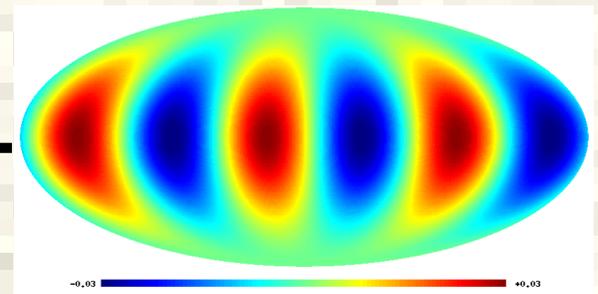
$(3,1)$

+



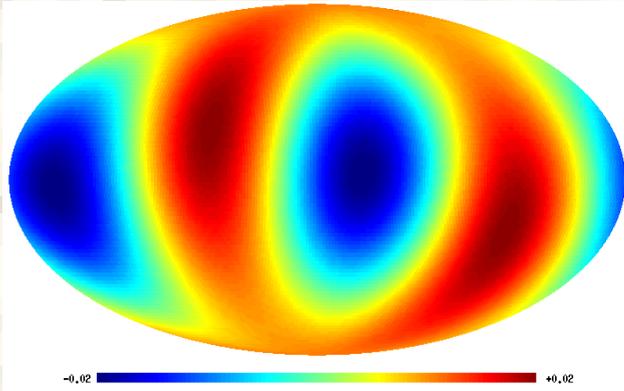
$(3,2)$

+

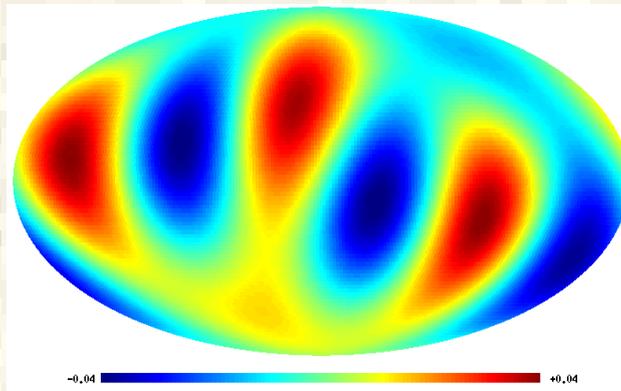


$(3,3)$

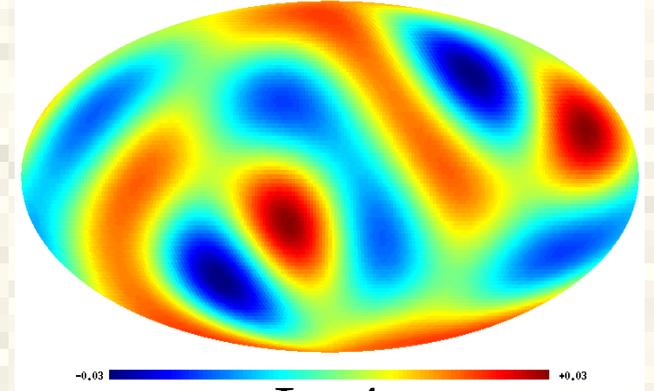
Low multipoles



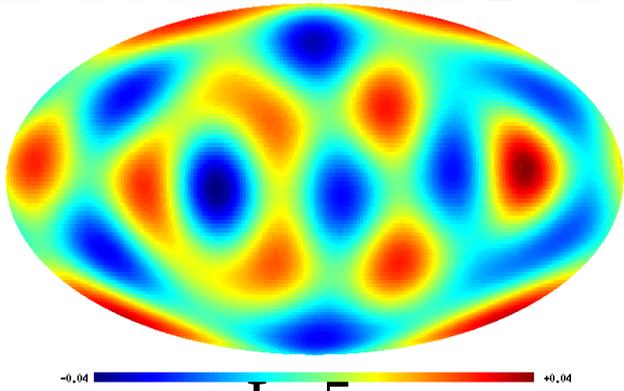
L=2



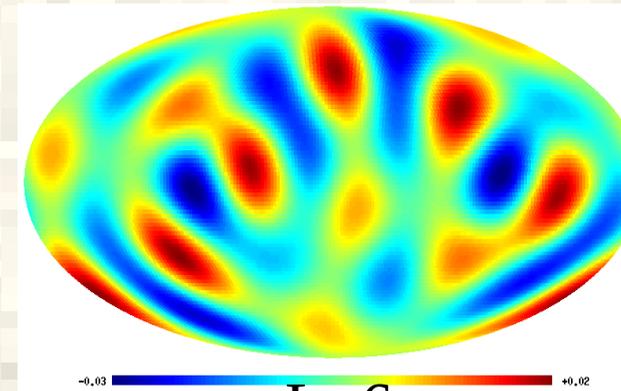
L=3



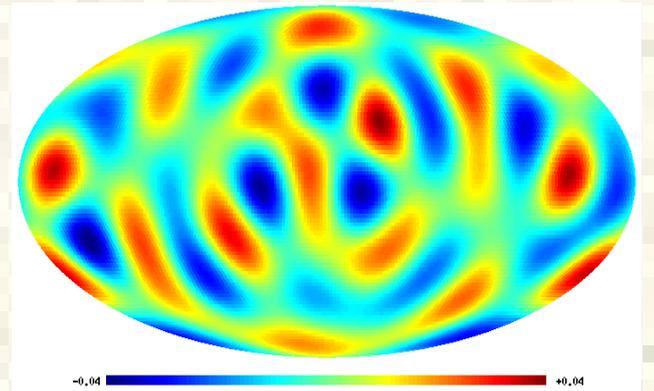
L=4



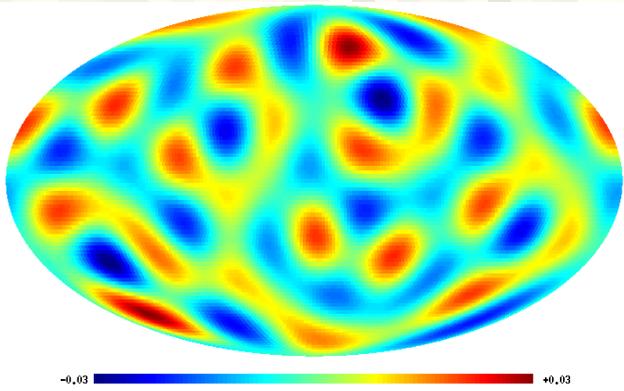
L=5



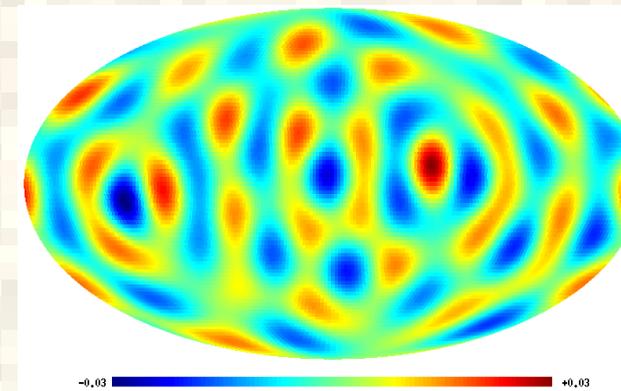
L=6



L=7



L=8



L=9

Формирование флуктуаций:

Возмущения плотности возникают в виде звуковых волн -
Сахаровские осцилляции (1965)

$$a_{\ell m} = 4(-i)^\ell \int \frac{d^3 \mathbf{k}}{(2\pi)^3} \Phi(\mathbf{k}) g_{T\ell}(\mathbf{k}) Y_{\ell}^* m(\hat{\mathbf{k}})$$

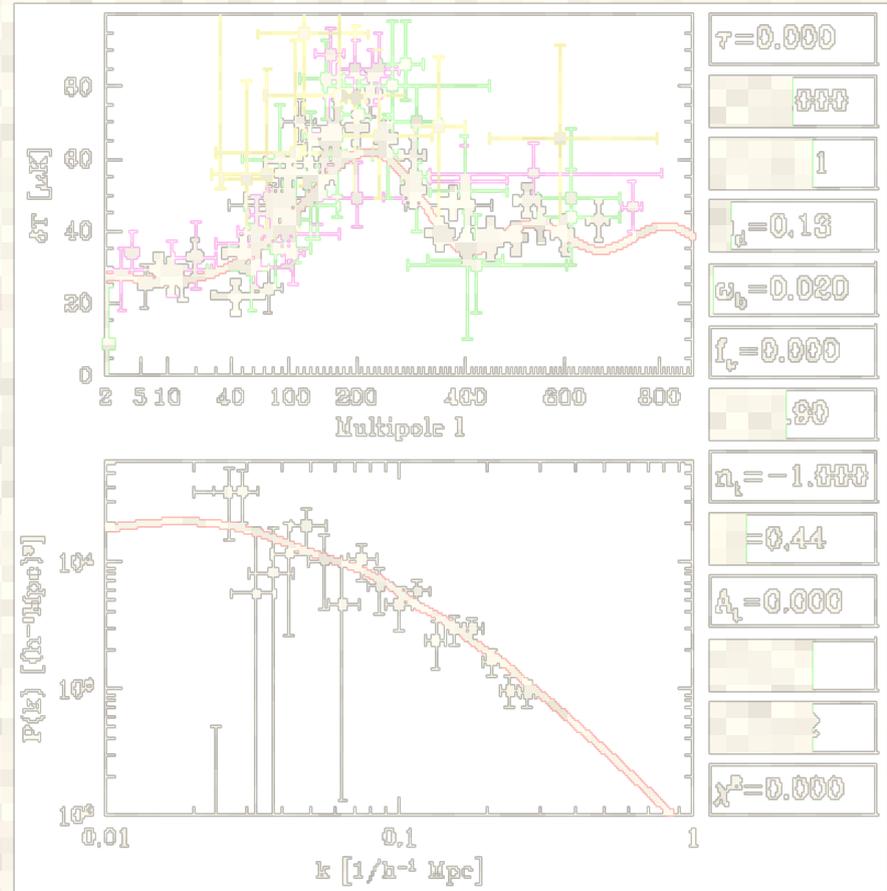
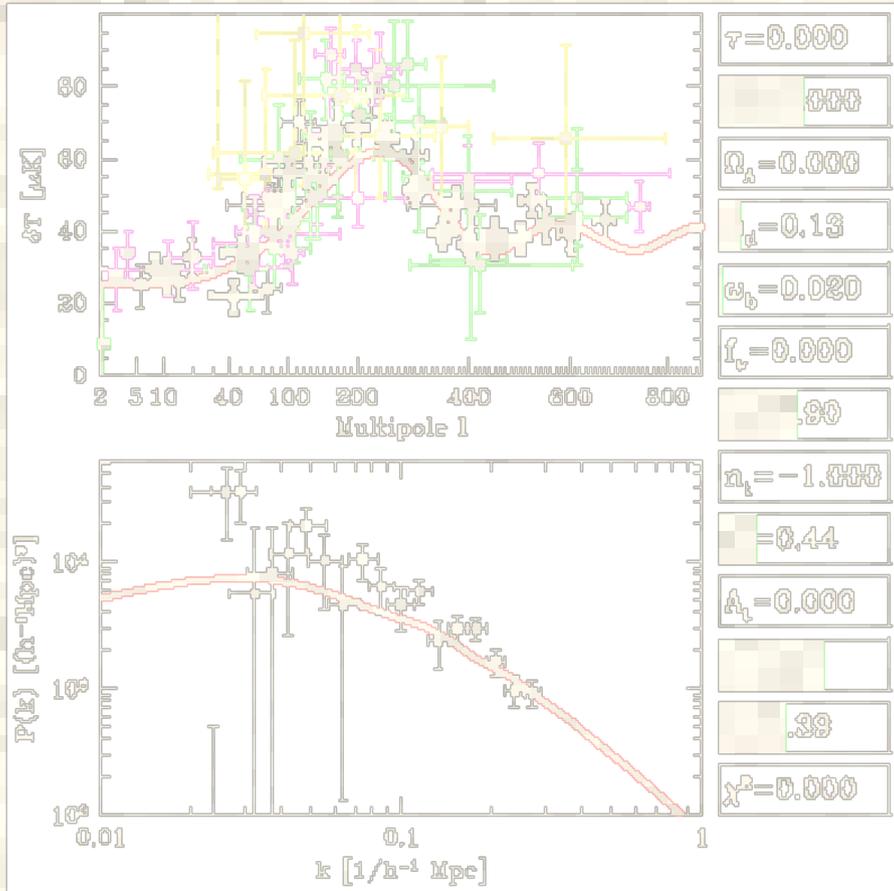


Спектр мощности флуктуаций РИ

$$C_\ell \equiv C_\ell(h, \Omega_b h^2, \Omega_{CDM} h^2, \Omega_\Lambda, \Omega_\nu, n, \dots)$$

CMBfast: *Seljak & Zaltariaga, 1997*

CAMB: *Lewis, Challinor, Lasenby, 2000*

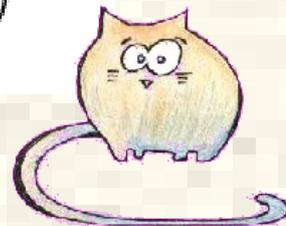


Спектр мощности флуктуаций РИ

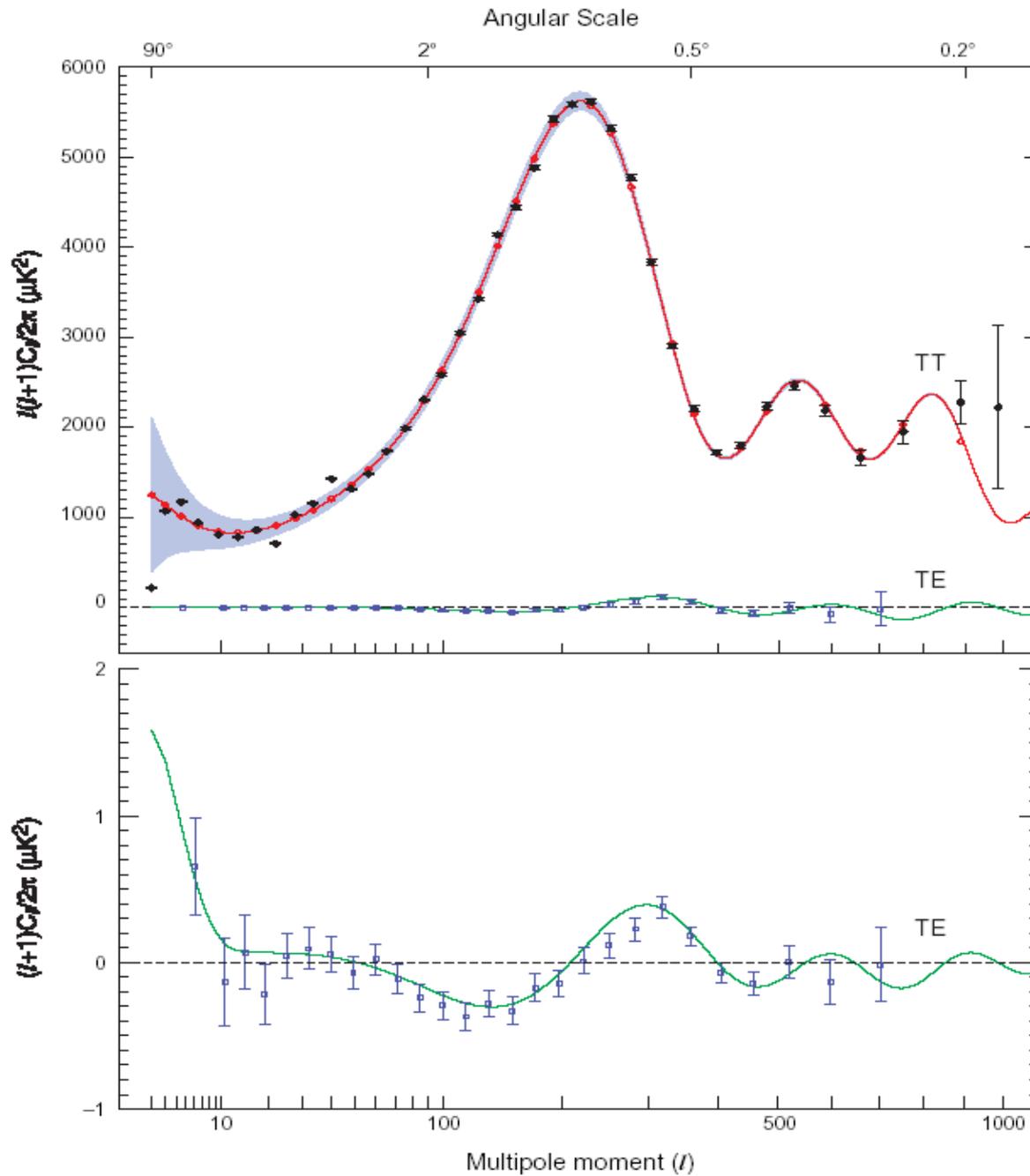
$$C(l) = \frac{1}{2l + 1} \left[|a_{l0}|^2 + 2 \sum_{m=1}^l |a_{l,m}|^2 \right]$$

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi)$$

$$a_{l,m} = \int_{-1}^1 dx \int_0^{2\pi} d\phi \Delta T(\theta, \phi) Y_{l,m}^*(x, \phi)$$



Спектр мощности WMAP



Оценки параметров

Космологические результаты WMAP9 и Planck

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

Comparison of *Planck*-only and *WMAP*-only Six-Parameter Λ CDM Fits^a

Parameter	<i>Planck</i> ("CMB+Lens")	<i>WMAP</i> (9-year)	Difference	
			value	<i>WMAP</i> σ
$\Omega_b h^2$	0.02217 ± 0.00033	0.02264 ± 0.00050	-0.00047	0.9
$\Omega_c h^2$	0.1186 ± 0.0031	0.1138 ± 0.0045	0.0048	1.1
Ω_Λ	0.693 ± 0.019	0.721 ± 0.025	-0.028	1.1
τ	0.089 ± 0.032	0.089 ± 0.014	0	0
t_0 (Gyr)	13.796 ± 0.058	13.74 ± 0.11	56 Myr	0.5
H_0 (km s ⁻¹ Mpc ⁻¹)	67.9 ± 1.5	70.0 ± 2.2	-2.1	1.0
σ_8	0.823 ± 0.018	0.821 ± 0.023	0.002	0.1
Ω_b	0.0481 ^b	0.0463 ± 0.0024	0.0018	0.7
Ω_c	0.257 ^b	0.233 ± 0.023	0.024	1.0

Революции нет ... Так это *прекрасно* !



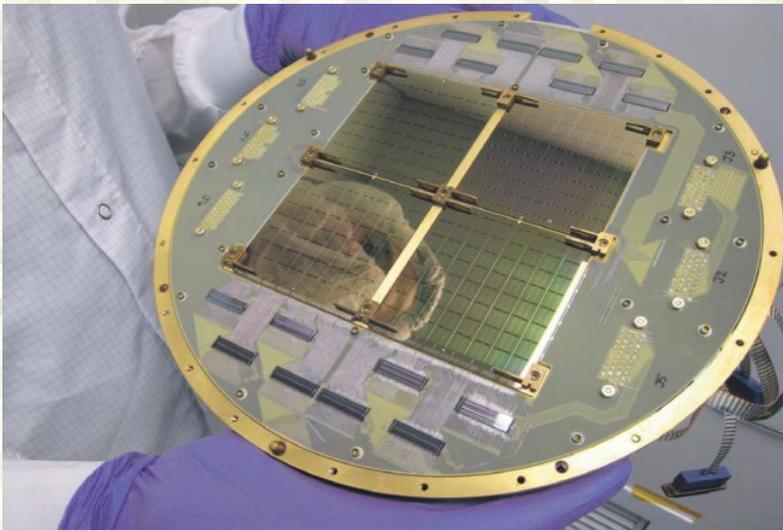
В-мода поляризации

В-мода поляризации

BICEP2 — background imaging cosmic
extergalactic polarization

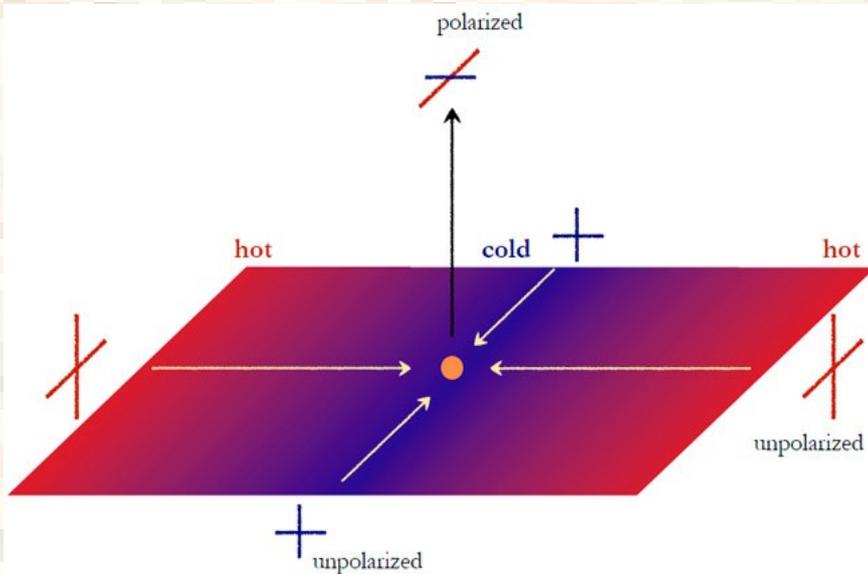


Апертура 26 см



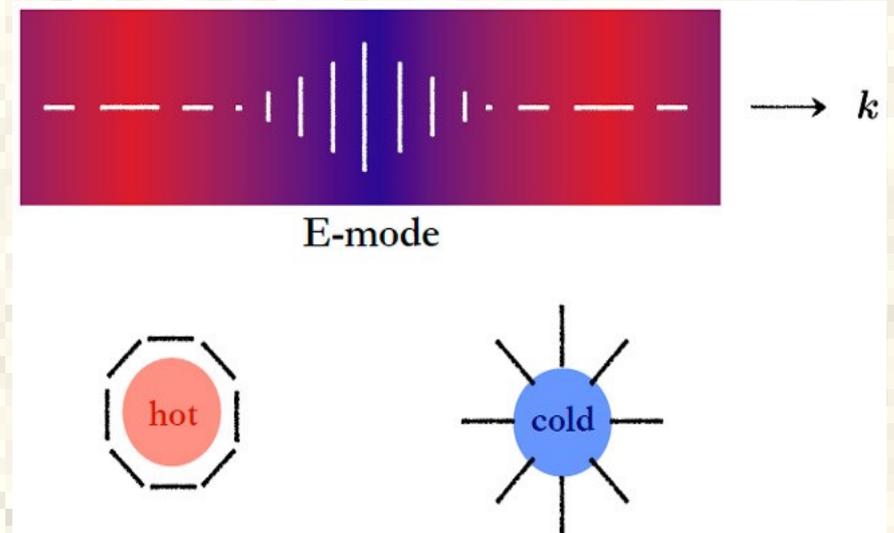
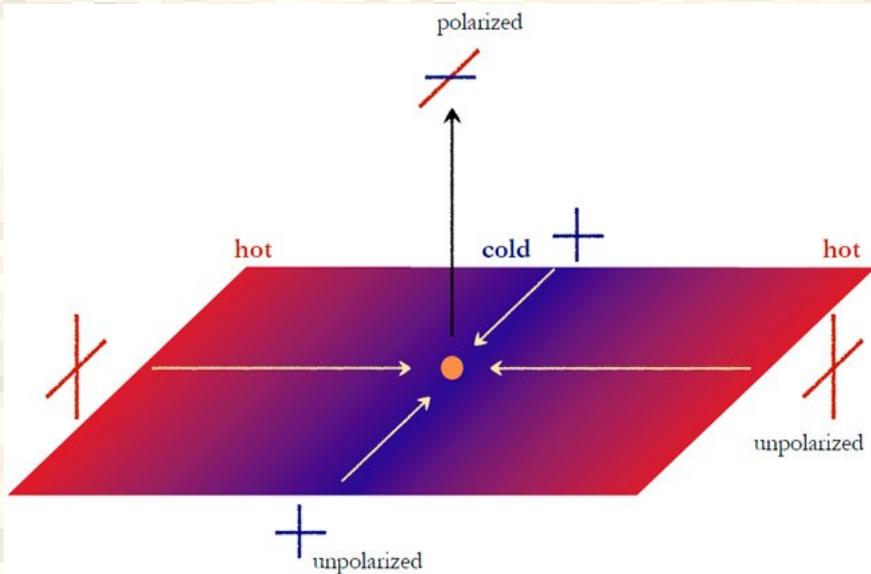
Матрица 512x512
150 ГГц

В-мода поляризации



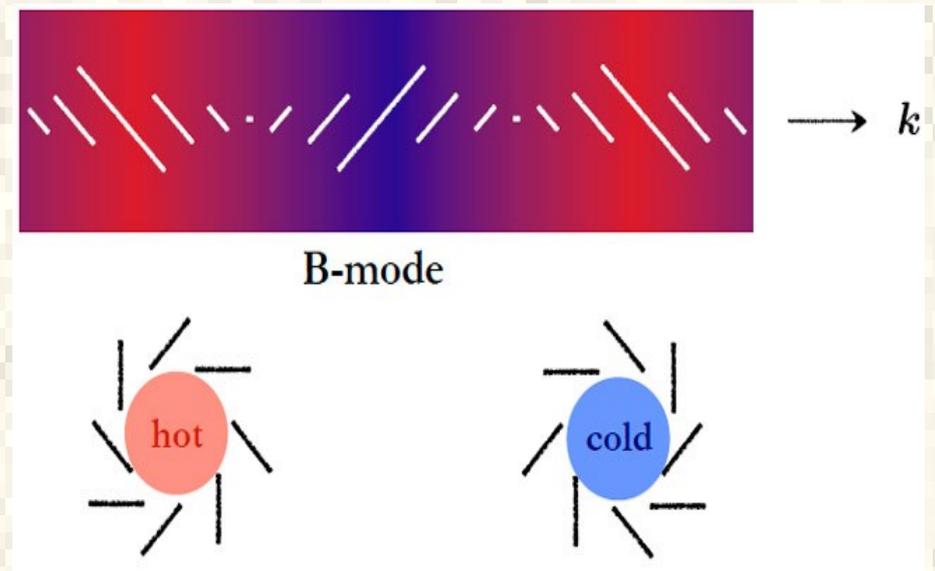
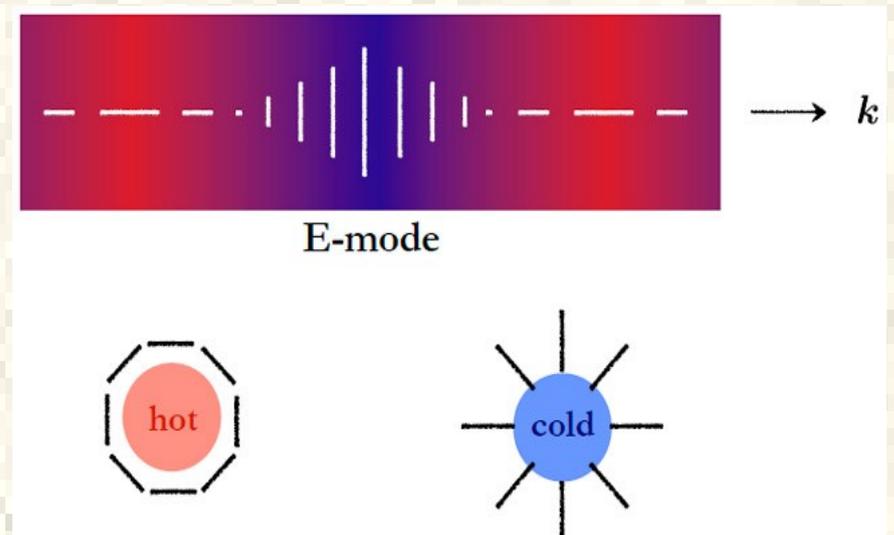
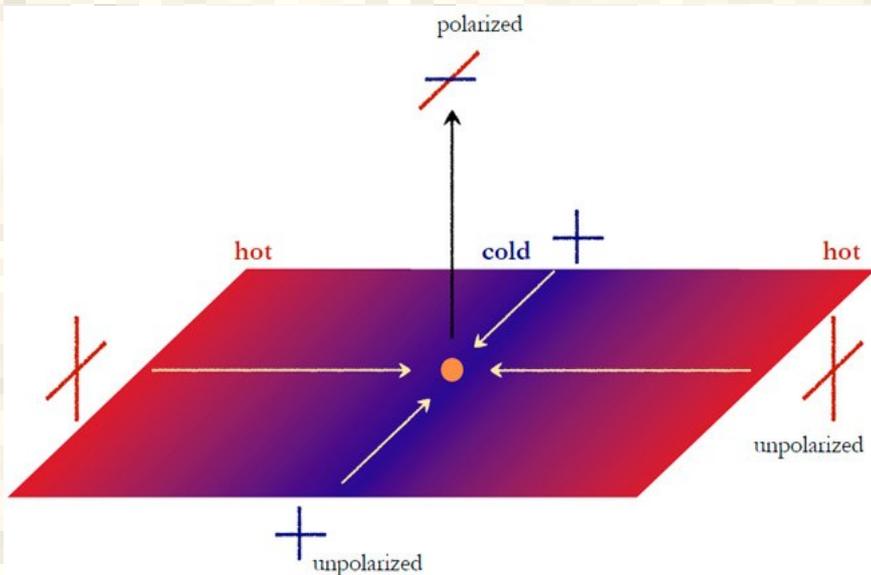
Поляризация на облаке электронов,
перпендикулярно движению фотона

В-мода поляризации



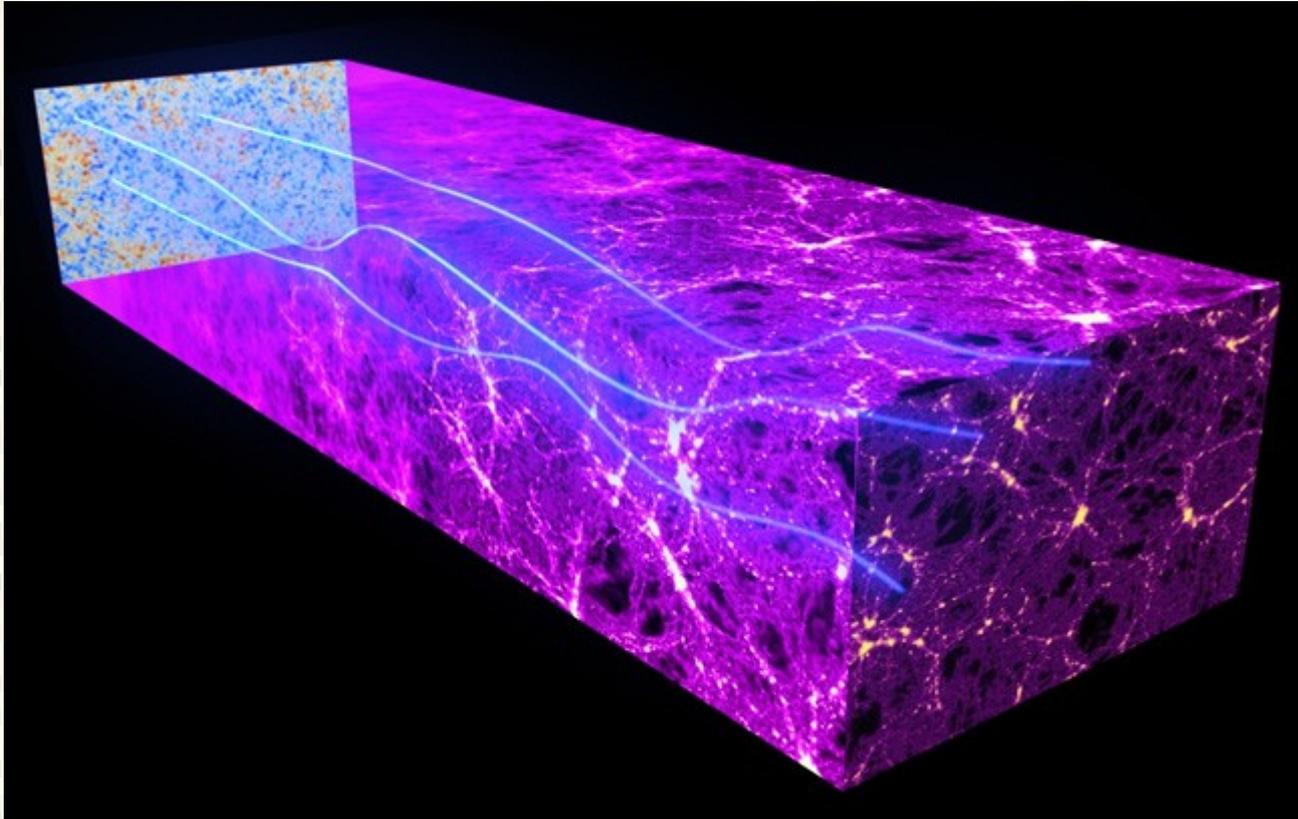
Е-мода:
частичная поляризация на
неоднородностях плазмы

В-мода поляризации



В-мода:
завихрения при прохождении
гравитационной волны

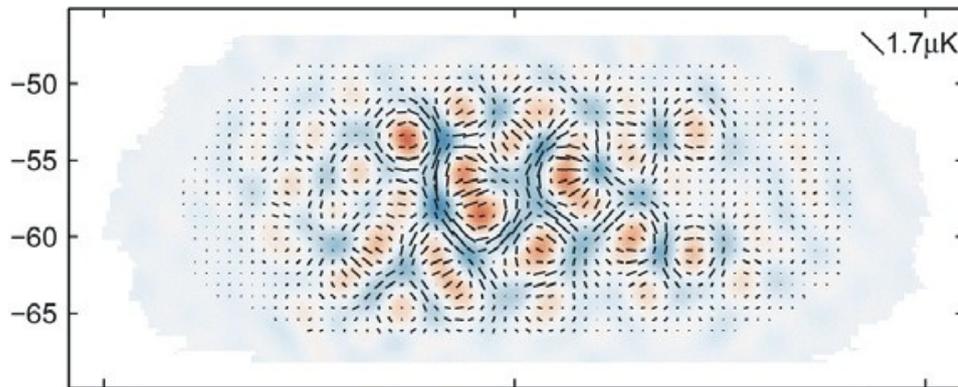
В-мода поляризации



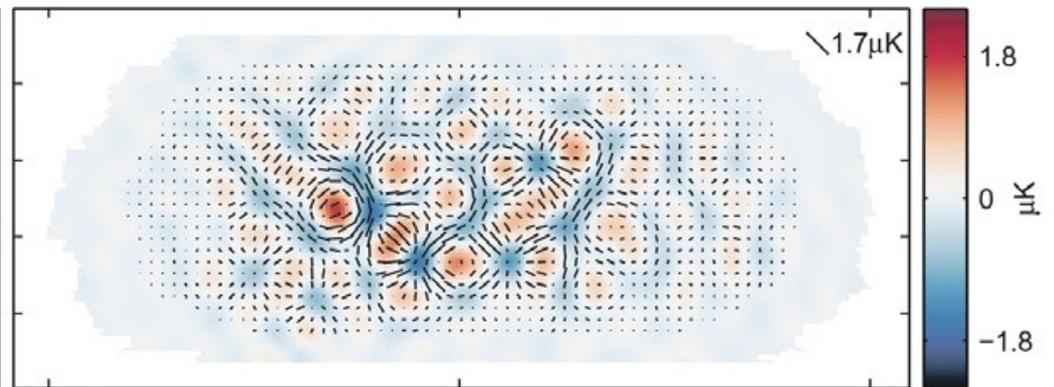
В-мода: линзирование на скоплениях галактик

В-мода поляризации

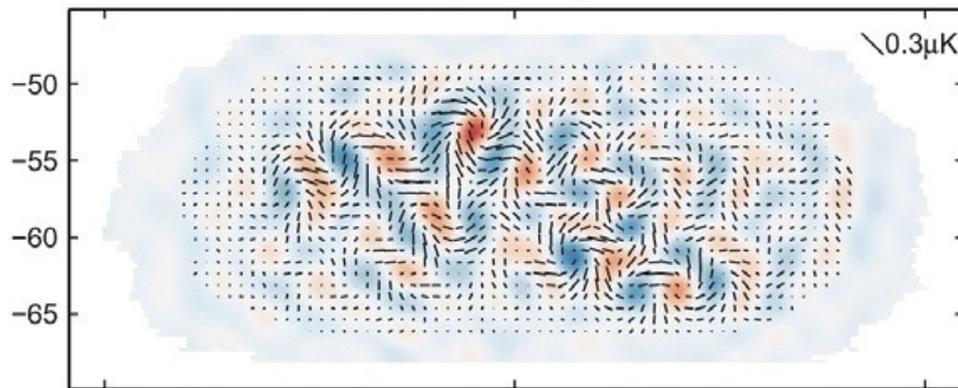
BICEP2: E signal



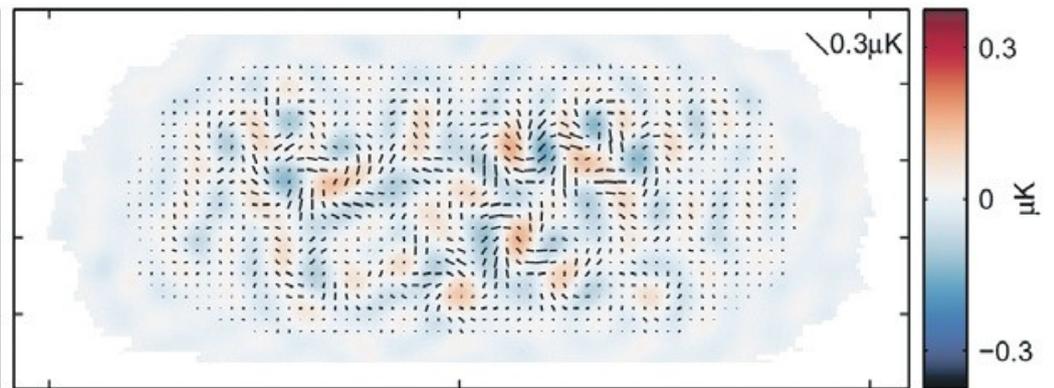
Simulation: E from lensed- Λ CDM+noise



BICEP2: B signal

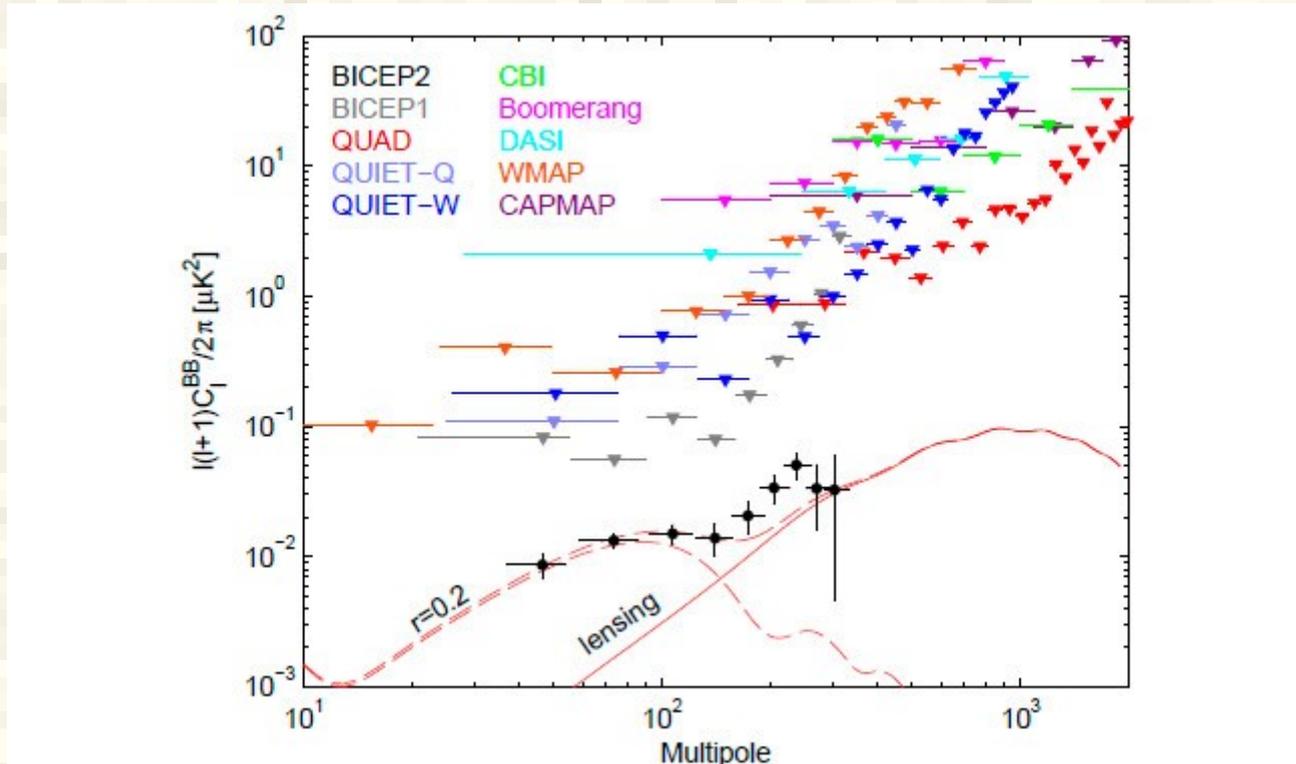


Simulation: B from lensed- Λ CDM+noise



Right ascension [deg.]

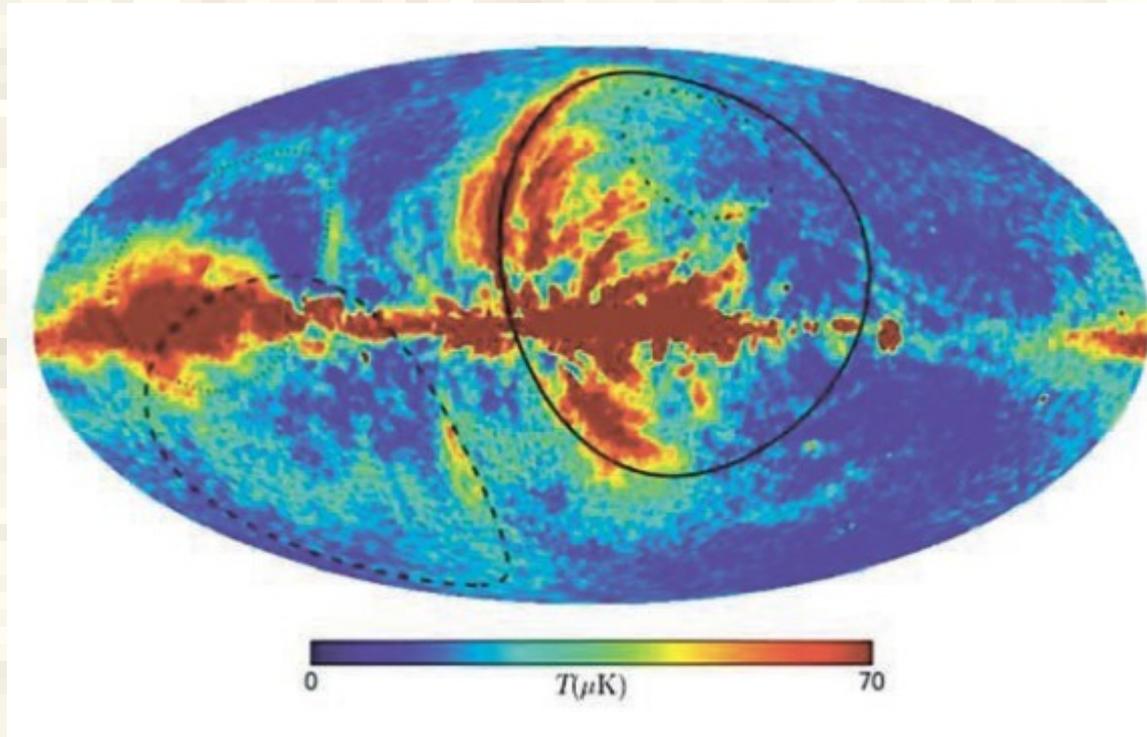
В-мода поляризации



В-мода поляризации

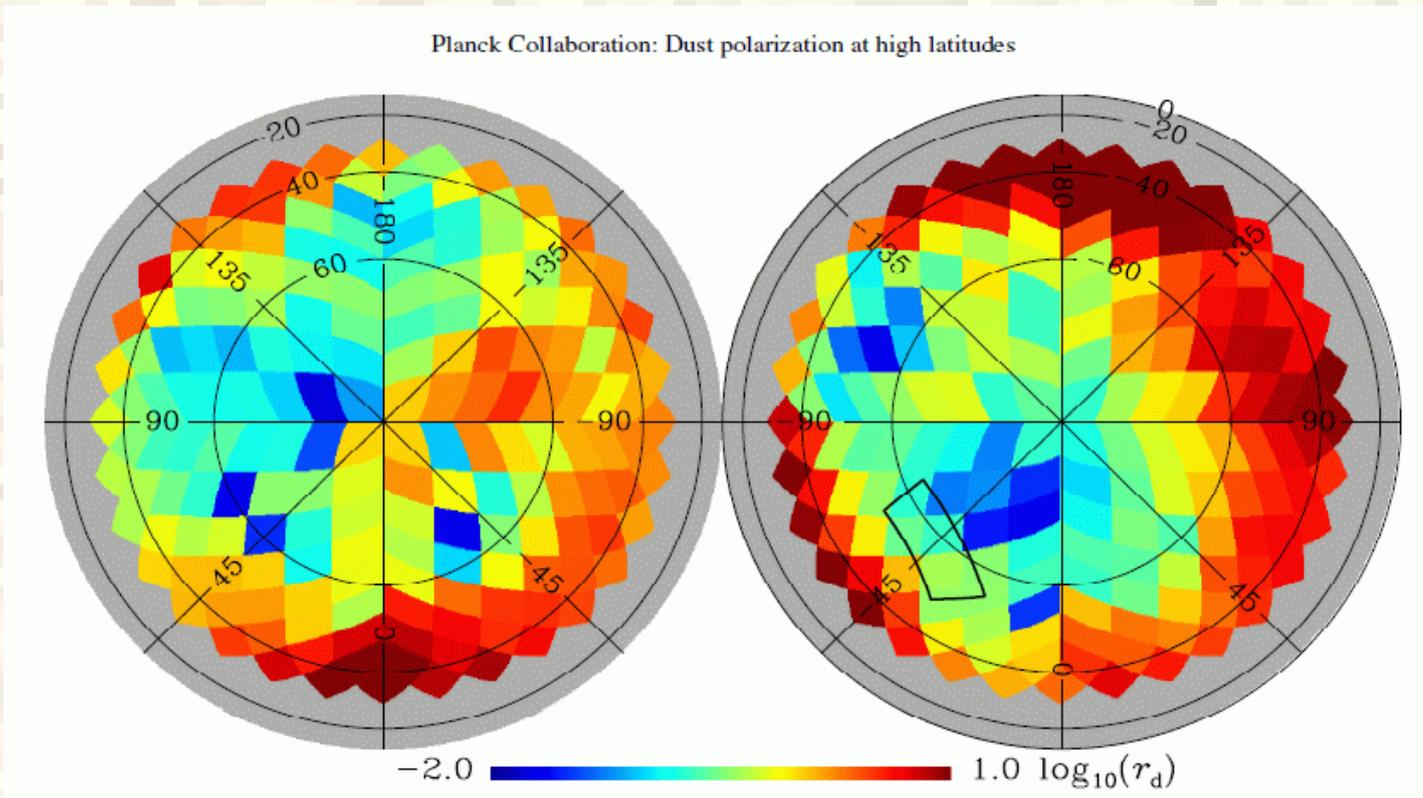
- 1) Подтверждение существования эпохи инфляции
- 2) Обнаружение признаков реликтовых гравитационных волн
- 3) Есть новое поле в физике элементарных частиц: инфлатон
- 4) Инфлатон и гравитационное поле испытывают квантовые флуктуации, гравитация квантуется.

Или все-таки еще ждем ?



Мимикрирование холодной заряженной пыли под грав.волны

Измерения Planck (arXiv:1409.5738)

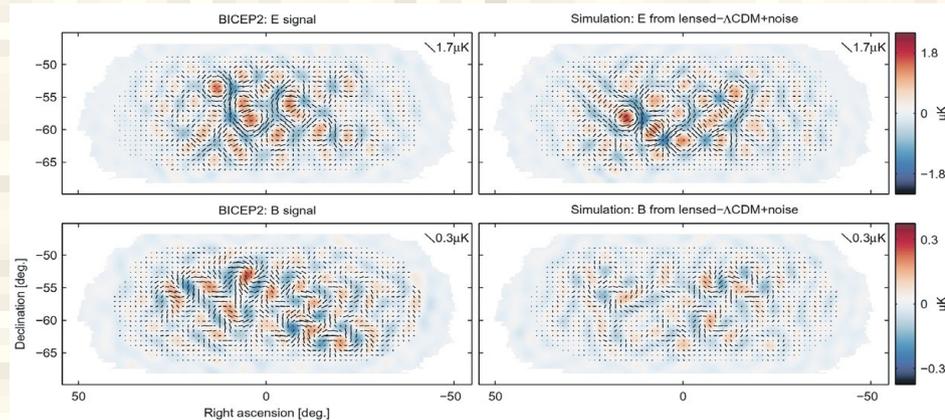
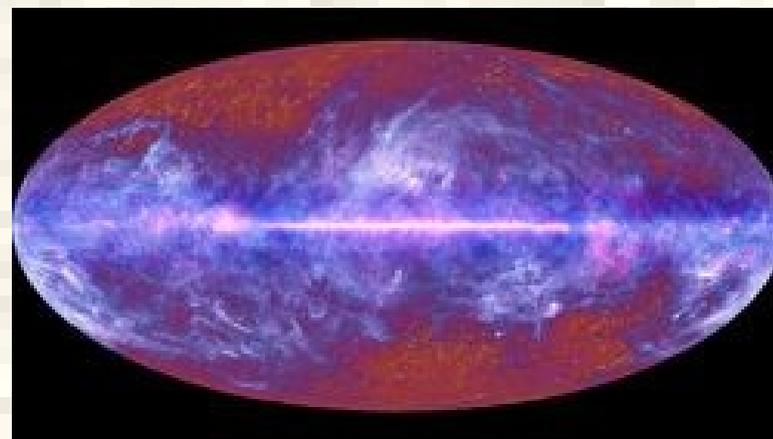


Параметр вклада пыли по отношению к тензорной моде

Выводы Planck intermediate results XXX, *arXiv:1409.5738*

- 1) загрязнение пылью есть на высоких широтах Галактики
- 2) используя лишь Planck, не выбрать чистые области
- 3) на площадке VICEP2 доминирует пыль
- 4) зависимость от частоты спектра мощности в В-моде поляризации соответствует ожидаемой для поляризованного излучения пыли
- 5) есть области на небе, где вклад пыли меньше в 2 раза, чем на площадке VICEP2

Ждем совместных результатов Planck и BICEP



И надеемся на лучшее...

