



Аномалии в анизотропии реликтового излучения

Курсовая работа студента 210 группы
Грибова Владислава Максимовича
Научный руководитель:
член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук,
Горбунов Дмитрий Сергеевич





01

Реликтовое излучение



Анизотропия реликтового излучения

Распределение фотонов по энергиям имеет тепловой планковский спектр, характеризуемый температурой:

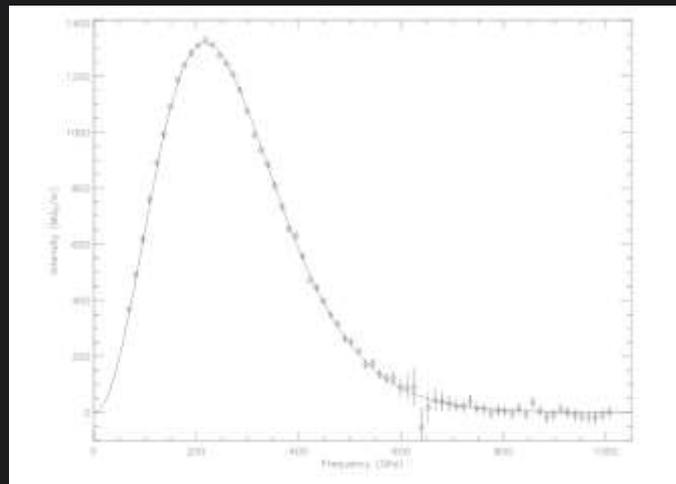
$$T_0 = 2,725 \pm 0,001K$$

$$\delta T/T_0 \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

$$\delta T_{\text{диполь}} = 3,346\text{мК}$$

$$T(\bar{e}) = \delta T_0(\bar{e})/T_0 = (T_0(\bar{e}) - T_0)/T_0$$

$$\delta T_0(\bar{e})/T_0 = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} Y_{lm}(\bar{e})$$



Спектр реликтового излучения

$$a_{l,m}^* = (-1)^m a_{l,-m}$$

$$a_{l,m} = \int d\bar{e} \frac{\delta T_0(\bar{e})}{T_0} Y_{lm}^*(\bar{e})$$

$$Y_{lm}(\Theta, \Psi) = \frac{1}{\pi \sqrt{\sin(\Theta)}} \cos \left[\left(l + \frac{1}{2} \right) \Theta - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi m}{2} \right] e^{im\Psi} + O\left(\frac{1}{l}\right)$$

при $l \gg 1$ и $l \gg m$, получаем, что гармоники Y_{lm} отвечают угловым масштабам $\sim \pi/l$. Таким образом, величина a_{lm} характеризует амплитуду флуктуаций углового размера $\sim \pi/l$

Для статистически изотропного неба гармонические коэффициенты ортогональны (т.е. не скоррелированы)

$$\langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle \propto \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

причём соответствующий коэффициент пропорциональности должен определяться только величиной углового момента l , но не его проекций m , т.е.

$$\langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle = C_l \cdot \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

Данные коэффициенты C_l полностью определяют свойства анизотропии реликтового излучения.

Усреднив по m квадраты модулей измеренных коэффициентов a_{lm} , мы получим приближенно набор коэффициентов C_l :

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{m=l} |a_{lm}|^2$$

Вариация коэффициентов C_l равна

$$(\delta C_l)^2 = \frac{2C_l^2}{2l+1}$$

Тогда относительная статистическая погрешность будет равна

$$1/\sqrt{1+l/2}$$

$$C(\Theta) = \langle T(\bar{e}_1)T(\bar{e}_2) \rangle = \sum_l C_l \sum_m Y_{lm}(\bar{e}_1)Y_{lm}^*(\bar{e}_2) = \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1)C_l P_l(\bar{e}_1\bar{e}_2) = \\ = \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1)C_l P_l(\cos(\Theta))$$

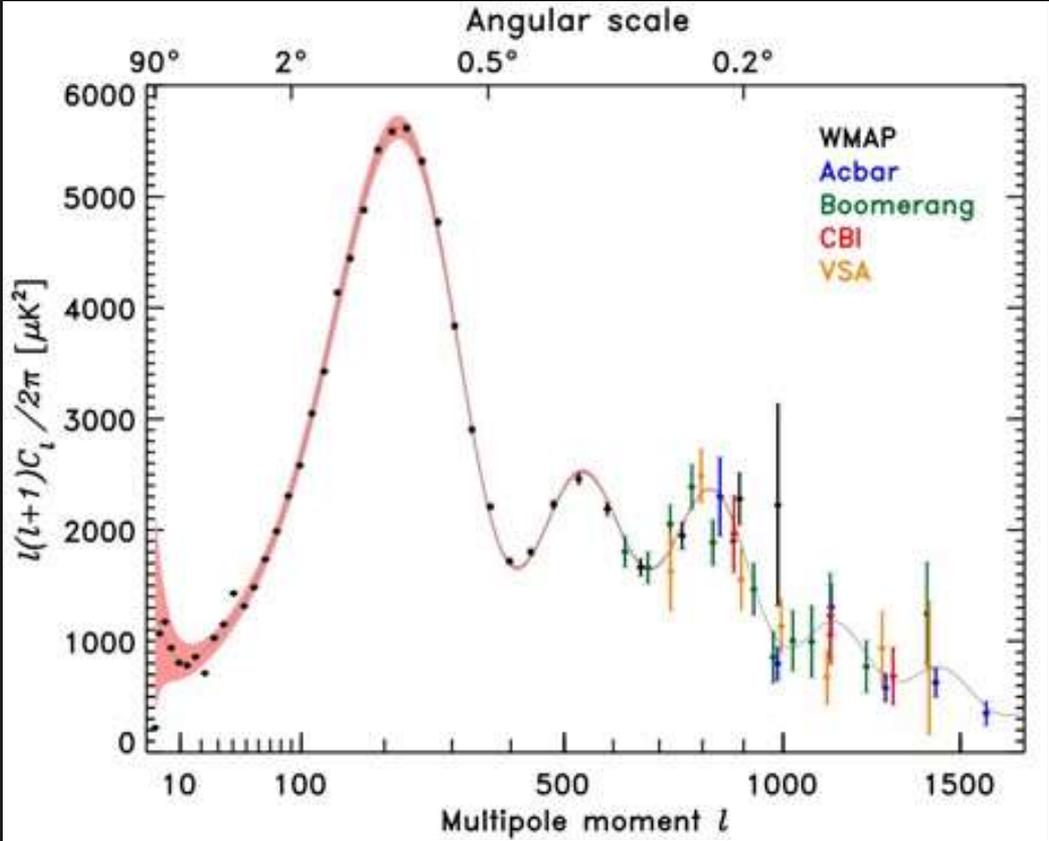
Для дисперсии флуктуаций температуры получаем

$$\langle \delta T_0^2(\bar{e}) \rangle = T_0^2 \cdot \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l \approx T_0^2 \cdot \int d \ln l \cdot \frac{(l+1)l}{2\pi} C_l$$

Величина

$$D_l = T_0^2 \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$$

определяет квадрат амплитуды флуктуаций на логарифмическом интервале гармоник. Как раз её и изображают на графиках.

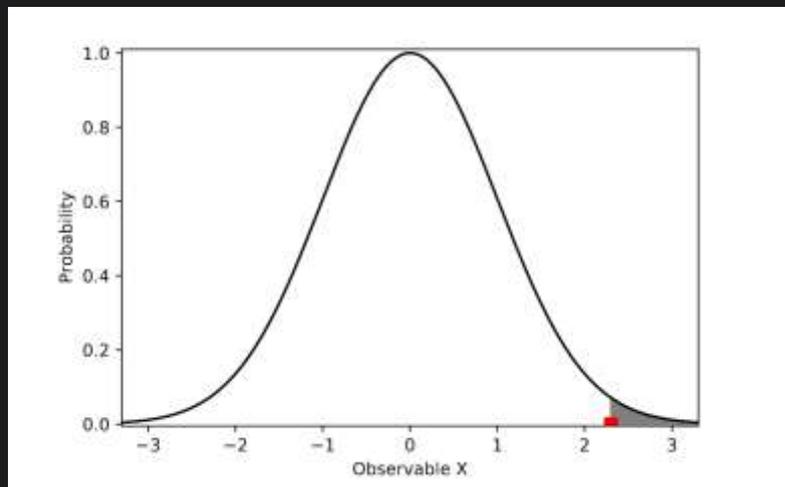




2

Аномалии реликтового излучения

Аномалии реликтового излучения

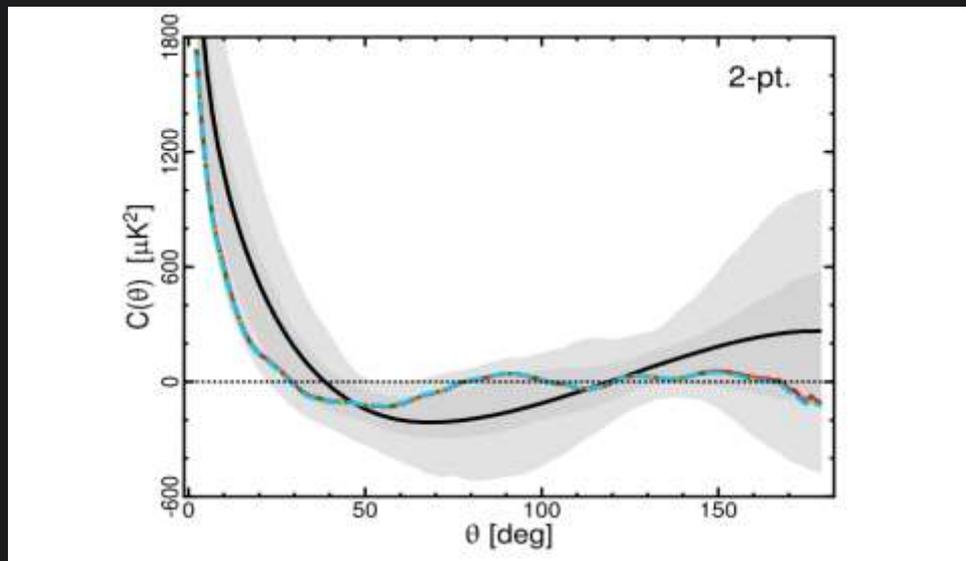


Концепция р-значения. На рисунке чёрным цветом показано распределение вероятностей некоторой наблюдаемой X согласно нулевой гипотезе. Наблюдаемое значение X показано красным. Заштрихованная область дает нам р-значение наблюдаемого значения X . Как видно из рисунка, меньшее р-значение подразумевает большее отклонение от нулевой гипотезы

Feature	p -value	Data
In angular space		
low variance ($N_{\text{side}} = 16$)	$\leq 0.5\%$	Planck 15
2-pt correlation $\chi^2(\theta > 60^\circ)$	$\leq 3.2\%$	Planck 15
2-pt correlation $S_{l/2}$	$\leq 0.5\%$	Planck 15
2-pt correlation $S_{l/2}$	$\leq 0.3\%$	Planck 13 and WMAP 9 yr
2-pt correlation $S_{l/2}$ (larger masks)	$\leq 0.1\%$	Planck 13
	$\leq 0.1\%$	WMAP 9 yr
Hemispherical variance asymmetry	$\leq 0.1\%$	Planck 15
Cold spot	$\leq 1.0\%$	Planck 15
In harmonic space		
Quadrupole-octopole alignment	$\leq 0.5\%$	Planck 13
$\ell = 1, 2, 3$ alignment	$\leq 0.2\%$	Planck 13
Odd parity preference $\ell_{\text{max}} = 28$	$\leq 0.3\%$	Planck 15
Odd parity preference $\ell_{\text{max}} < 50$ (LEE)	$\leq 2\%$	Planck 15
Dipolar modulation for $\ell = 2-67$	$\leq 1\%$	Planck 15

Известные аномалии и соответствующие им р-значения.

Отсутствие корреляции



$$S_{1/2} = \int_{-1}^{1/2} C(\Theta)^2 d(\cos(\Theta))$$

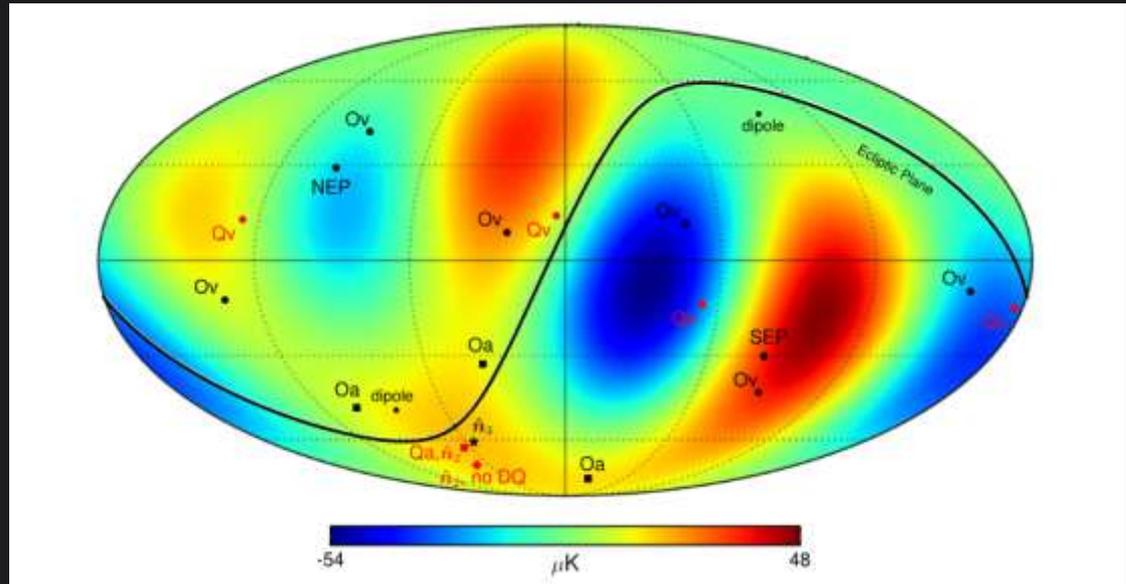
42000 μK^4 - Λ CDM

1290,2 μK^4 - Planck

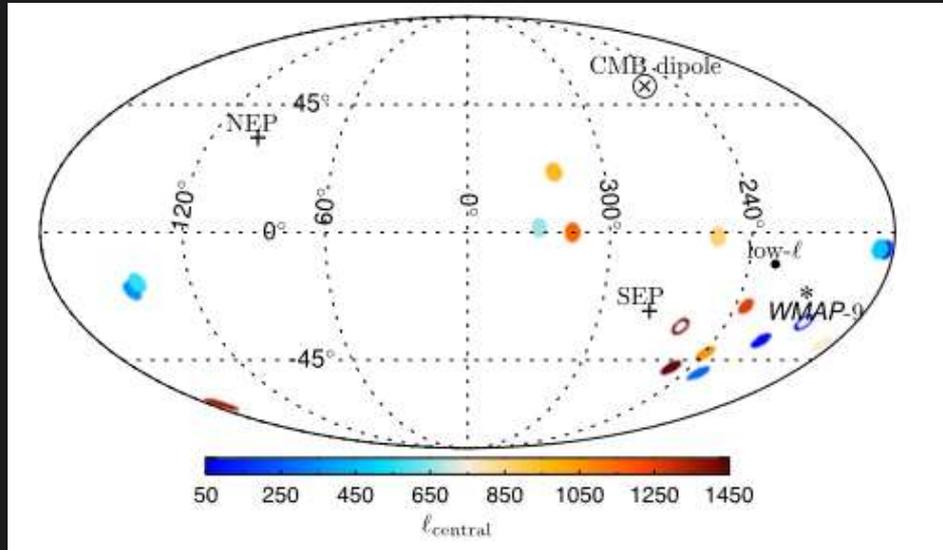
Угловая двухточечная корреляционная функция, рассчитанная Планком. Разноцветная кривая показывает расчёт спутника. Чёрная сплошная показывает расчёт по модели Λ CDM. Тёмно-серая область -- ожидание 68 %. Серая область -- ожидание 95 %

Сонаправленность квадруполя и октополя

Комбинированная квадрупольно-октопольная карта из выпуска Planck 2013. Показаны мультипольные векторы (v) квадруполя (красный) и октополя (черный), а также соответствующие им ориентированные площади (a).



Полусферическая асимметрия

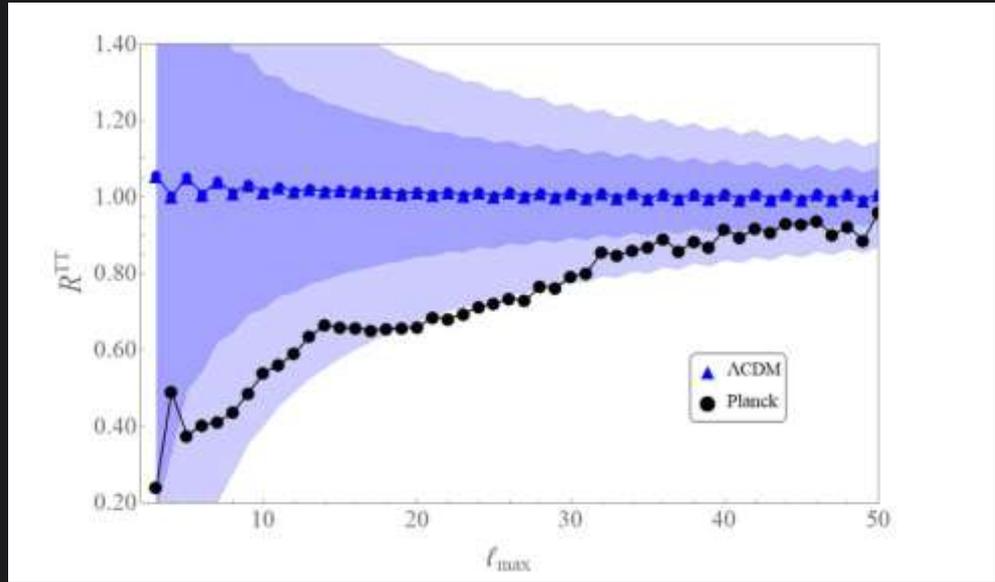


Из данных Планка и WMAP было обнаружено, что мощность в дисках на небе радиусом $\sim 10^\circ - 20^\circ$ оцененная в нескольких мультипольных бинах (промежутках), в одном полушарии неба больше, чем в другом.

Асимметрия чётности

-
-
-

$$R^{TT}(l_{max}) = \frac{D_+(l_{max})}{D_-(l_{max})}$$
$$D_{\pm}(l_{max}) = \frac{1}{l_{total}^{\pm}} \sum_{2, l_{max}}^{\pm} \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$$



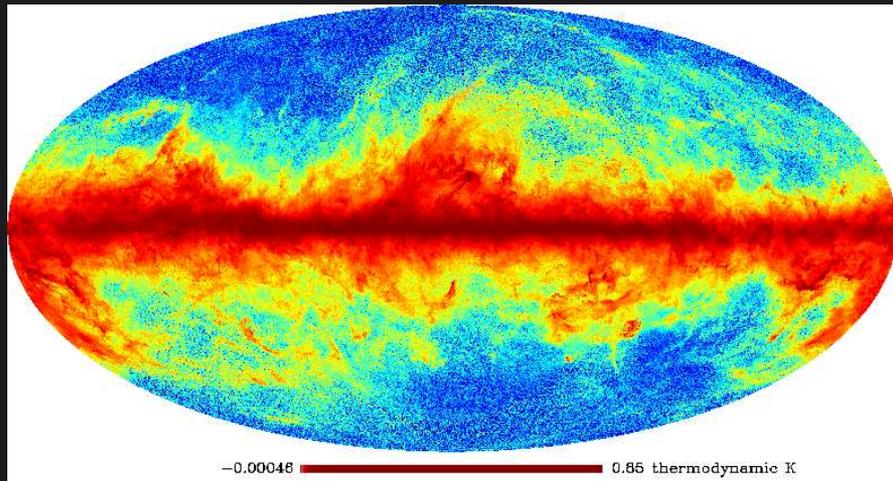
Данные СМВ в мультипольном диапазоне [2, 50] показывают явное превалирование нечетной четности по сравнению с нейтральной четностью, т.е. $R^{TT}(l_{max}) = 1$, как предсказано стандартной моделью



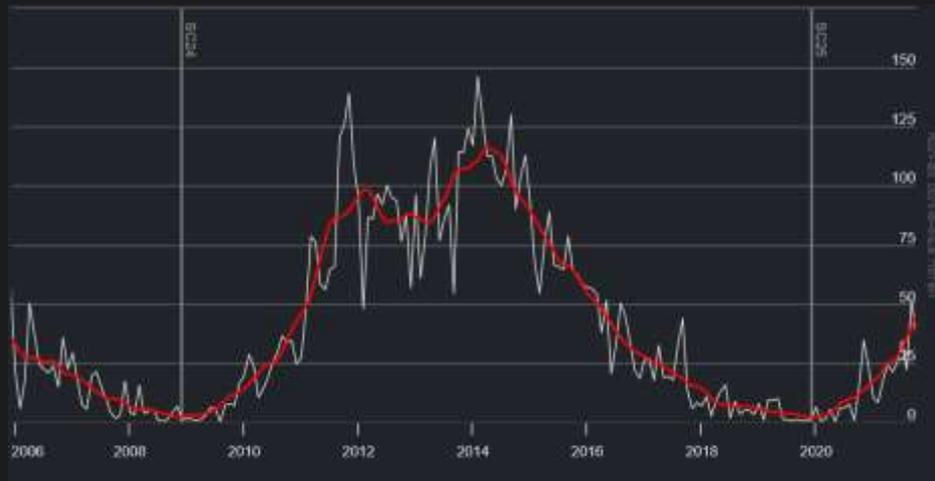
3

Анализ данных Planck

Анализ данных Planck

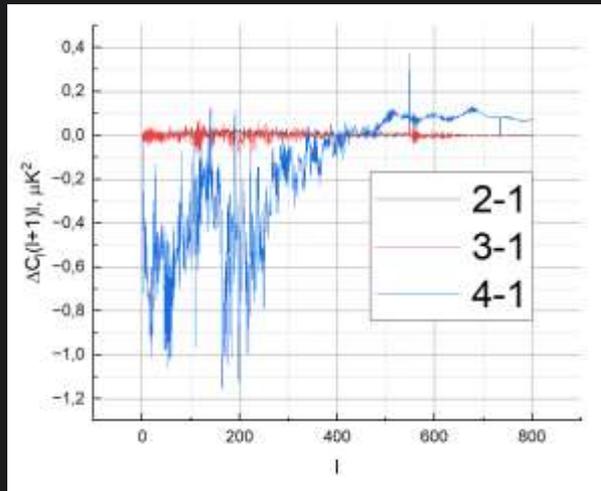


Пример карты спутника Planck для частоты 70 Гц

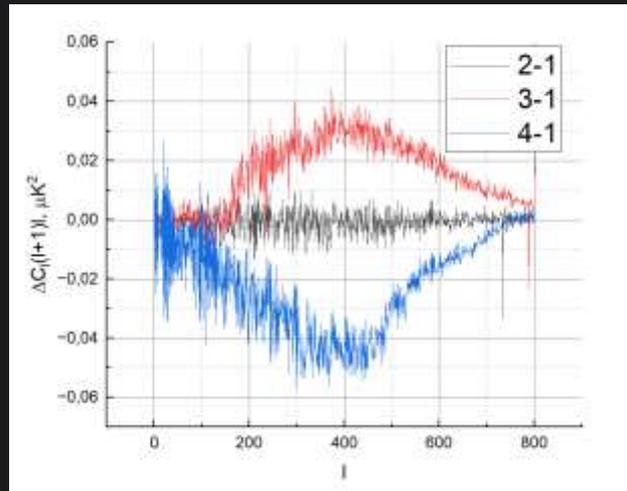


Солнечная активность в начале своего 24-го цикла. Красная прямая показывает количество солнечных пятен за последние 13 месяцев, в то время как белая показывает количество за последний месяц. Ориентируясь по красной линии, можно говорить, что активности в 2012 и в 2013 примерно равны

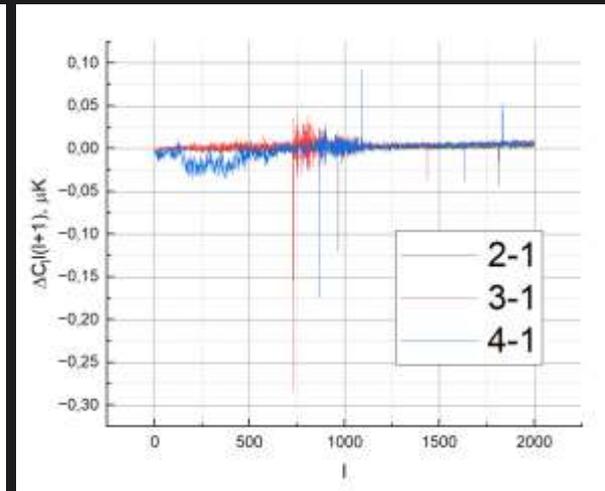
Зависимость разностей $C_l(l+1)l$ для разных годов активности солнца. 2-1 -- разность за второй и первый год; 3-1 -- разность за третий и первый год; 4-1 -- разность за четвертый и первый год



30 ГГц



44 ГГц

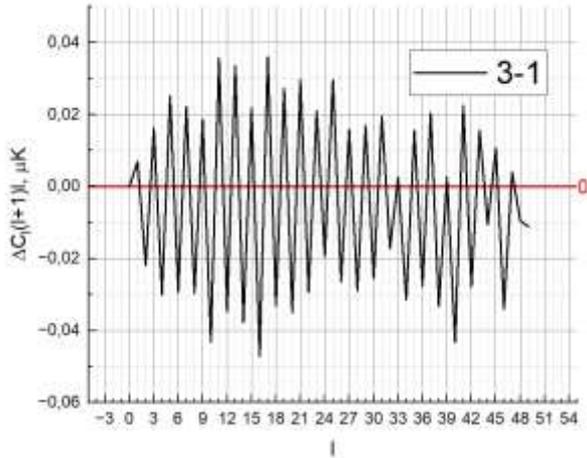


70 ГГц

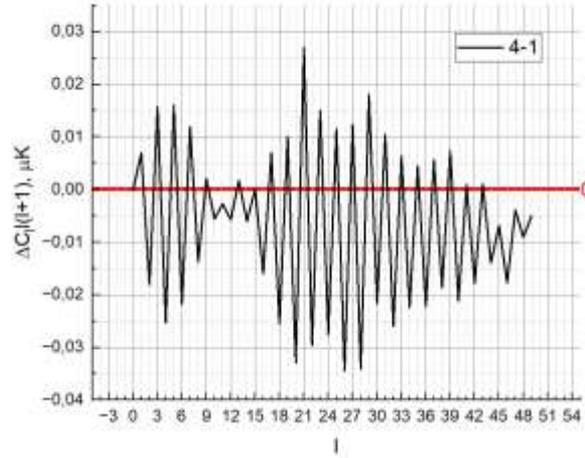




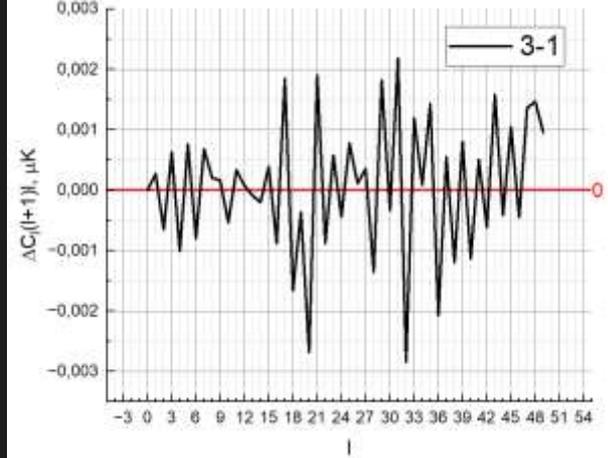
Зависимость разностей $C_l(l + 1)$ для мультиполей в $[2, 50]$. Чётко видна тенденция в росте разности для нечётных мультиполей и уменьшении для чётных.



30 ГГц



44 ГГц



70 ГГц

