

НОВЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА "ХОЛОД-80" ПО ПОИСКУ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ УГЛОВ $0,5 \pm 6^\circ$

Ю.Н.Парийский*, А.А.Старобинский⁺, А.В.Чепурнов*

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
357147, Ставропольский край, Нижний Архыз

⁺Институт теоретической физики им.Л.Д.Ландау РАН,
117334, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 ноября 1992 г.

Результаты эксперимента "Холод-80", проведенного на РАТАН-600, анализируются с помощью трехточечной дисперсии, которая не зависит от искаженных низкочастотных угловых гармоник исследуемого сигнала. После устранения шумов, связанных с нетепловым излучением Галактики (со спектральным индексом 2,55) и шумов атмосферного водяного пара, обнаружен коррелированный сигнал неизвестной природы, имеющий трехточечную дисперсию с максимумом на масштабе $3,5^\circ$ и провалом при 5° . Обсуждается возможность приписать этот сигнал флуктуациям реликтового фона и его связь с последними данными группы COBE.

Все попытки нашей группы обнаружить анизотропию 3К фона на различных масштабах (с 1968 по 1986 гг.) обобщены в ¹. Новые результаты для очень малых ($18'' \div 88''$) масштабов и верхние пределы для некоторых гармоник вокруг масштаба горизонта в эпоху рекомбинации были опубликованы в 1991 г. ². В этой статье мы пытаемся провести прямое сравнение данных глубокого обзора на 7,6 см, полученных в 1984 г. (см. ¹) с предсказаниями CDM-модели для масштабов меньших, чем масштабы в эксперименте COBE, используя недавно опубликованные этой группой уровни анизотропии на шкале от 7° до квадруполя ³.

Результирующий скан "Холода-80" (рис.1) был скомбинирован из одночасовых измерений на 7,6 см (самая чувствительная волна), 31 см (данные по галактическому шуму) и 2,08 см (атмосферный шум). Были выбраны 22 записи, соответствующие хорошим погодным условиям. После усреднения сканов по наблюдениям и устранения линейных уходов, из данных на 7,6 см были

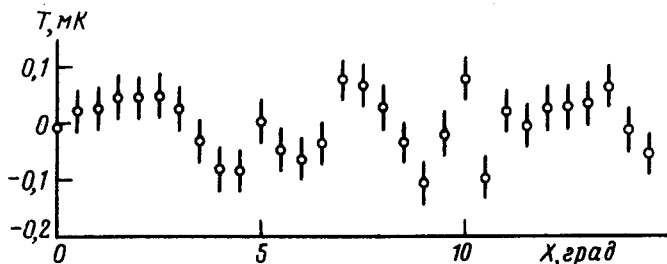


Рис.1. Результирующие данные глубокого обзора на РАТАН-600, $\lambda = 7,6$ см

вычтены все обнаруженные дискретные источники, затем была проделана линейная комбинация с данными на 31 и 2,08 см, чтобы устранить галактический и атмосферный шум. Результирующий скан был сжат до $0,5^\circ$ на пиксел (см. ¹).

Чтобы иметь возможность сравнить полученный скан с крупномасштабными данными эксперимента *COBE*, нам нужно было выбрать некую процедуру вторичной обработки, которая, с одной стороны, устраняет искаженный крупномасштабный сигнал, и, с другой стороны, результат которой можно сравнить с теоретическими предсказаниями, учитывающими квадруполь *COBE*. Для этого использовалась трехточечная (аллановская) дисперсия, в которой сильно подавлен вклад низших мультиполей:

$$D_A(\Delta\vartheta) = \overline{(T(\vartheta) - (T(\vartheta + \Delta\vartheta) + T(\vartheta - \Delta\vartheta))/2)^2}. \quad (1)$$

Эта функция, вычисленная прямо из данных на рис.1, содержит вклад белого шума, равный $3\sigma_{rec}^2/2$. Здесь σ_{rec} – средний квадрат шума приемной системы, равный 39 мКК при нашем времени накопления (более подробно о шуме системы см. ¹). Так как нас интересует коррелированный сигнал, этот вклад следует вычесть из каждого значения $D_A(\Delta\vartheta)$, исключая нулевую точку. Результирующие экспериментальные значения D_A для разных $\Delta\vartheta$ представлены на рис.2.

Трехточечная дисперсия может быть выражена через автокорреляционную функцию выходных данных радиотелескопа:

$$D_A(\Delta\vartheta) = \frac{3}{2}C(0) - 2C(\Delta\vartheta) + \frac{1}{2}C(2\Delta\vartheta), \quad (2)$$

которая, в свою очередь, выражается через автокорреляционную функцию флуктуаций реликтового фона C_{CMB} с использованием передаточной функции W прямоугольного фильтра, использованного для сжатия данных, а также автокорреляции диаграммы направленности радиотелескопа φ :

$$\tilde{C}(u) = \frac{1}{2\pi} \tilde{W}^2(u) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\varphi}(u, v) \tilde{C}_{CMB}(\sqrt{u^2 + v^2}) dv, \quad (3)$$

здесь \sim означает преобразование Фурье, u, v – угловые частоты.

Согласно ^{4,5}, в *CDM*-модели с плоским начальным спектром адиабатических возмущений получается следующее приближенное выражение для мультиполь-

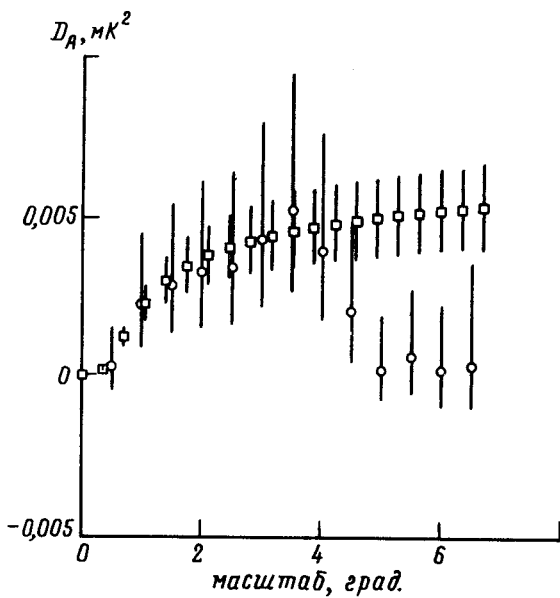


Рис.2. Трехточечная дисперсия как функция углового масштаба. \circ – эксперимент, \square – расчет с помощью CDM -спектра, нормированного по данным эксперимента $COBE$

ных гармоник автокорреляционной функции флуктуаций реликта:

$$\tilde{C}_{CMB}(p) = \frac{A^2 T^2}{100\pi} \frac{1}{p^2} \left(1 + \frac{0,9p}{l_1}\right) \exp\left(-\frac{p^2}{2l_\Delta^2}\right), \quad (4)$$

$$C_{CMB}(\vartheta) = \sum_{l=2}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} \tilde{C}_{CMB}\left(l + \frac{1}{2}\right) P_l(\cos \vartheta), \quad (5)$$

где $p = l + 1/2 \gg 1$, $A = (4 \pm 1) \cdot 10^{-4}$, $T = 2,74 \text{ K}$, $l_1 = 40(H/50)$, $l_\Delta = 450$. Расчет по точным формулам ^{4,9} приводит к такому же результату с точностью до 10%.

Это значение A соответствует квадруполью $COBE$ и попадает в интервал $(3 \div 10) \cdot 10^{-4}$, предсказанный в ⁶. Оно также практически совпадает с позднейшими оценками ^{7,8}.

Теоретическая кривая $D_A(\Delta\vartheta)$ для CDM -модели с плоским начальным спектром (нормированная по данным $COBE$ в области $\vartheta > 10^\circ$), рассчитанная с использованием формул (2-5), приведена на рис.2. Аналогичная кривая для модели с холодными частицами, космологической постоянной и плоским начальным спектром при $\Omega_{tot} = 1$, $\Omega_\Lambda = 0,25$, $H = 75$ (см., например, ^{10,11}) лежит примерно на 20% выше, а для CDM -модели с начальным спектром, содержащим ступеньку с подъемом амплитуды возмущений в 3 раза на масштабе $R = 125(50/H) \text{ Mpc}$ ⁸, – на 10÷20% ниже.

Экспериментальная кривая на рис.2 показывает присутствие коррелированного сигнала, который на промежутке до 4° может быть объяснен флуктуациями реликтового фона в стандартной CDM -модели с плоским начальным спектром (по крайней мере, на масштабах $L \geq 60(H/50)^{-1} \text{ Mpc}$, к которым чувствителен наш эксперимент). На масштабах около 5° в экспериментальной кривой наблюдается провал, который можно интерпретировать как присутствие дополнительного (к флуктуациям реликта) коррелированного сигнала с соответствующим периодом (так как $C(\vartheta)$ входит в выражение для трехточечной дисперсии с отрицательным знаком).

К сожалению, данные на рис.1 готовились только для получения верхнего предела на анизотропию реликтового фона, и природа этого сигнала не исследовалась. Он мог быть даже внесен во время обработки данных. Кроме того, не были учтены следующие источники коррелированного шума: тепловое излучение Галактики, эффекты вариации спектрального индекса сильного не-теплового излучения Галактики, эффекты вариации излучения Земли, которые различны на разных длинах волн, вариации излучения атмосферного кислорода (с помощью радиометра 2,08 см можно измерить только вклад излучения водяного пара), вариации теплового шума волноводов.

Если какие-либо из названных компонентов существенны, то наши результаты оказываются ниже предсказаний *CDM*-модели со спектром Гаррисона-Зельдовича, или данные *COBE* следует интерпретировать как верхний предел. Если это не так, то мы имеем хорошее согласие с самой популярной космологической моделью (по крайней мере на достаточно больших масштабах) и с последними результатами группы *COBE*.

С другой стороны, если не привязываться к конкретной космологической модели, то наблюдательную кривую на рис.2 можно интерпретировать как указание на присутствие сигнала с мультипольностью $l = 65 \pm 5$ и относительной амплитудой $\Delta T/T = (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$ для случая гармоники, ориентированной вдоль скана, или $(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$ для изотропного спектра. Наконец, если предположить, что космический сигнал имеет гауссову автокорреляционную функцию $C(\vartheta)/T^2 = \sigma_0^2 \exp(-\vartheta^2/2\vartheta_c^2)$, то используя данные для $\vartheta = 5^\circ$ как верхний предел и считая, что нет специальной систематической ошибки, занижающей корреляцию для этого масштаба, получаем верхнюю оценку $\sigma_0 < 1,8 \cdot 10^{-5}$ в интервале $1^\circ \leq \vartheta_c \leq 2^\circ$ и $\sigma_0 < 2 \cdot 10^{-5}$ в более широкой области $30' \leq \vartheta_c \leq 3^\circ$ на доверительном уровне 95%. Этот предел примерно в 2 раза лучше полученного в ¹² и стыкуется с пределом $\sigma_0 < 1,9 \cdot 10^{-5}$ для $\vartheta_c = 4^\circ$, приведенным в недавней статье ¹³.

-
1. Yu.N.Parijskij and D.Korol'kov, *Astrophys. and Space Phys. Rev.* **5**, 39 (1986).
 2. Yu.N.Parijskij et al., In: *Observational Tests of Cosmological Inflation*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991, p.437.
 3. G.F.Smoot et al., Submitted to the *Astrophys. J. Lett.*, 1992.
 4. А.А.Старобинский, Письма в Астрон. журн. **14** 394 (1988).
 5. А.А.Старобинский, Сообщения CAO **53**, 57 (1987).
 6. А.А.Старобинский, Письма в Астрон. журн. **9**, 579 (1983).
 7. G.F.Smoot, In: *Observational Tests of Cosmolog. Inflation*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1991, p.395.
 8. А.А.Старобинский, Письма в ЖЭТФ **55**, 477 (1992).
 9. J.R.Bond and G.Efstathiou, *MNRAS* **226**, 655 (1987).
 10. Л.А.Кофман, А.А.Старобинский, Письма в Астрон. журн. **11**, 643 (1985).
 11. K.M.Gorski, J.Silk, and N.Vittorio, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 733 (1992).
 12. P.Meinhold and P.Lubin, *Astroph. J.* **370**, L11 (1991).
 13. R.A.Watson et al., *Nature* **357**, 660 (1992).