

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Корреляция данных по анизотропии реликтового излучения
в экспериментах WMAP и "Реликт-1"

Д.П. Скулачёв

Проведено сопоставление данных по анизотропии реликтового излучения, полученных со спутника WMAP (наблюдения 2001–2006 гг.) и в результате эксперимента "Реликт-1" (наблюдения 1983–1984 гг.). Показано, что в обнаруженной "Реликтом-1" области пониженной температуры находится самое "холодное" пятно радиокарты WMAP. Оценена взаимная корреляция данных двух экспериментов, которая оказалась положительной для всех проанализированных сканов небесной сферы. Сделан вывод о том, что с вероятностью 98 % в эксперименте "Реликт-1" наблюдался тот же самый сигнал, который был зарегистрирован спутником WMAP. Обсуждается правильность выбора параметров эксперимента "Реликт-1".

PACS numbers: 95.55. – n, 95.75. – z, 98.80. Es

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004c.0389

Содержание

1. Введение (389).
 2. Используемые данные спутника WMAP (389).
 3. "Холодное" пятно (390).
 4. Дипольная компонента (390).
 5. Высшие составляющие анизотропии (390).
 6. Сигнал, обнаруженный "Реликтом-1" (391).
 7. Метод исследования структуры сигнала (391).
 8. Анализ взаимной ковариации (391).
 9. Одночастотные измерения (391).
 10. Заключение (392).
- Список литературы (392).

1. Введение

Анизотропия космического реликтового излучения была обнаружена в обзорных наблюдениях в микроволновом диапазоне с борта искусственных спутников Земли [1, 2]. К середине 2009 г. было известно три космических эксперимента по исследованию реликтового излучения: "Реликт-1" (СССР, 1983–1984 гг.), COBE (Cosmic Background Explorer) (США, 1989–1993 гг.) и WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) (США, запущен в 2001 г.). В мае 2009 г. был успешно запущен европейский спутник "Planck" с аналогичными задачами исследований.

Чувствительность аппаратуры эксперимента "Реликт-1" была ограничена техническими возможностями

того времени и по современным меркам может считаться небольшой. Однако такой чувствительности оказалось достаточно для обнаружения и оценки параметров анизотропии реликтового излучения. Удалось измерить дипольную компоненту анизотропии [3] и величину квадрупольной составляющей для заданного спектра возмущений. На радиокarte небесной сферы было также найдено "холодное" пятно — область пониженной температуры [1]. Измерения проводились только на одной частоте и близко к порогу чувствительности, поэтому полученные выводы требовали подтверждения более точными наблюдениями.

Американский спутник COBE был запущен через шесть лет после "Реликта-1", и его аппаратура имела лучшие параметры. Оценки дипольной анизотропии и квадрупольной составляющей для заданного спектра показали, что в пределах погрешностей результаты COBE и "Реликта-1" не противоречат друг другу. "Холодное" пятно, обнаруженное "Реликтом-1", данные COBE не подтвердили [4, 5]. Но в интересующей нас области отношение сигнал/шум на радиокarte COBE было недостаточно большим.

Результаты любых наблюдений могут быть надёжно подтверждены или опровергнуты только на основе анализа независимых данных, имеющих хорошее отношение сигнала к шуму. В настоящее время подобные данные получены спутником WMAP в результате пяти лет непрерывных измерений [6]. Ниже описываются результаты сопоставления экспериментов WMAP и "Реликт-1".

2. Используемые данные спутника WMAP

Средняя частота измерительных каналов Ka и Q спутника WMAP совпадает с рабочей частотой радиометра "Реликт-1". Поэтому для дальнейшего анализа исполь-

Д.П. Скулачёв. Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 333-43-22
E-mail: dskulach@mx.iki.rssi.ru

Статья поступила 22 июня 2009 г.

зовались средние значения яркостных температур каналов Ka и Q спутника WMAP.

3. "Холодное" пятно

На рисунке 1 показана часть радиокарты, полученной WMAP, в эклиптических координатах. Данные сглажены с угловым разрешением 15° . Областям вблизи плоскости Галактики условно присвоена нулевая яркостная температура. Тёмным цветом обозначены места пониженной температуры. Светлым прямоугольником отмечена область, в которой "Реликт-1" обнаружил наиболее "холодное" пятно. Координаты прямоугольника взяты из работы [1].

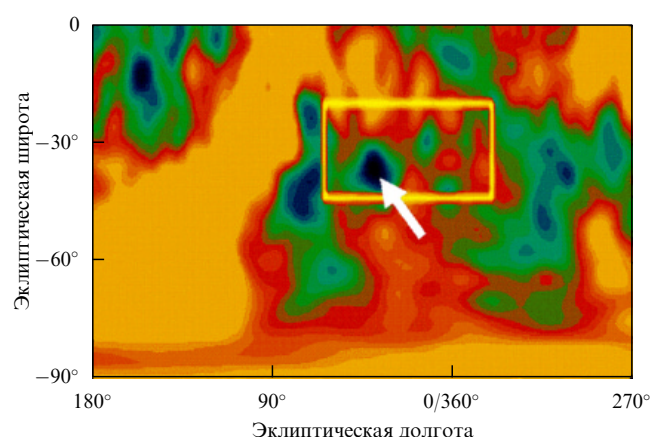


Рис. 1. "The Spot" WMAP (указано стрелкой) и область "холодного" пятна "Реликта-1" (внутри светлого прямоугольника).

Видно, что в указанной зоне на карте WMAP находится несколько "холодных" точек. Причём одна из них — знаменитое "The Spot" — самое "холодное" пятно на всей радиокarte WMAP [7] (оно указано стрелкой на рис. 1, эклиптические координаты "The Spot": $\lambda = 39^\circ$, $\beta = -37^\circ$, галактические: $l = 209^\circ$, $b = -57^\circ$). Выделение области пониженной температуры на карте "Реликта-1" проводилось путём дополнительного сглаживания данных. "Холодные" точки при этом, по-видимому, слились в одно большое пятно, которое и было обнаружено. В работе [1] указаны параметры измеренного минимума яркостной температуры. Точное положение самого пятна тогда определить не удалось из-за высокого уровня шума. Поэтому и была обозначена обширная зона внутри прямоугольника.

Следует отметить, что часть "холодной" области "Реликта-1" вблизи нулевых эклиптических долгот имеет на карте WMAP яркостную температуру, близкую к нулю. Можно предположить, что именно это место исследовали авторы работ [4, 5], когда пришли к выводу о несоответствии данных "Реликта-1" и COBE. Впрочем, в списке наиболее "холодных" пятен на карте COBE [8] нет и "The Spot" — самого "холодного" объекта, обнаруженного позднее в наблюдениях WMAP.

4. Дипольная компонента

Параметры дипольной компоненты реликтового излучения, определённые по данным WMAP [9] и "Реликт-1" [3], приведены в табл. 1. Погрешности соответствуют

Таблица 1. Оценки дипольной компоненты реликтового излучения

Эксперимент	Дипольная компонента	
	Амплитуда	Галактические координаты максимума
WMAP	$3,358 \pm 0,017$ мК	$l = 263,86^\circ \pm 0,04^\circ$, $b = 48,24^\circ \pm 0,1^\circ$
"Реликт-1"	$3,16 \pm 0,12$ мК	$l = 267,1^\circ \pm 3^\circ$, $b = 48,6^\circ \pm 3^\circ$

90%-ному доверительному интервалу. Использованы термодинамические значения яркостных температур.

Из таблицы 1 видно, что в пределах ошибок результаты двух экспериментов соответствуют друг другу. Небольшое различие в амплитудах диполя (примерно 6 %) объясняется систематической ошибкой калибровки радиометра "Реликт-1".

5. Высшие составляющие анизотропии

В случае "Реликта-1" оценки высших гармоник анизотропии найдены методом статистического моделирования в предположении, что первичные возмущения описываются спектром Харрисона–Зельдовича. В качестве оценки использовано среднеквадратичное значение квадрупольной компоненты ($Q_{\text{rms-ps}}$) для этого спектра [1].

В случае WMAP это значение определялось по следующей формуле [10]:

$$Q_{\text{rms-ps}} = \sqrt{\frac{5C_2}{4\pi}}. \quad (1)$$

Значение C_2 вычислялось по формуле

$$C_2 = \frac{2\pi}{6} \sum_{l=2}^{15} \frac{C_l l(l+1)/2\pi}{14}, \quad (2)$$

где $C_l l(l+1)/2\pi$ — l -я компонента спектра мощности анизотропии [11].

Пределы суммирования примерно соответствуют передаточной функции аппаратуры "Реликта-1" с учётом сглаживания. Усреднение по l в формуле (2) использовано для уменьшения неопределённости в оценке C_2 с учётом того факта, что для спектра Харрисона–Зельдовича значение $C_l l(l+1)$ не зависит от l .

Соответствующие величины (в микрокельвинах) приведены в табл. 2. Для "Реликта-1" указан интервал значений, соответствующий доверительной вероятности 90 %.

Из таблицы 2 следует, что в пределах ошибок наблюдений данные двух экспериментов не противоречат друг другу.

Необходимо отметить, что приведённые в табл. 2 значения представляют собой модельно зависимые оценки всей анизотропии, а не измеренные значения именно квадрупольных составляющих. Такие значения эти составляющие имели бы, если измеренная анизотропия была бы порождена первичными флуктуациями со спектром Харрисона–Зельдовича.

Таблица 2. Оценки высших составляющих анизотропии

Эксперимент	Квадрупольная компонента $Q_{\text{rms-ps}}$
WMAP	18,9 мК
"Реликт-1"	16,5–90 мК

6. Сигнал, обнаруженный "Реликтом-1"

Хотя оценки анизотропии, сделанные "Реликтом-1" подтверждаются данными WMAP, этот факт можно посчитать просто случайным совпадением, поскольку спектр и форма обнаруженного "Реликтом-1" сигнала на самом деле не были определены. Анизотропия в [1] вычислялась методом дисперсионного анализа по небольшому избытку измеренных значений в сравнении с чистым шумом. И совершенно неясно, вызван ли подобный избыток реальным сигналом или же совсем другими причинами, например электрическими помехами или побочными излучениями, попавшими на антенны приёмника. Поэтому необходимо более детальное исследование структуры измеренного "Реликтом-1" сигнала.

7. Метод исследования структуры сигнала

Прямое исследование структуры сигнала "Реликта-1" не представляется возможным из-за плохого отношения сигнал/шум. В отличие от измерений "Реликта-1", измерения WMAP характеризуются весьма низкими шумами. Это даёт возможность провести надёжный анализ взаимной ковариации данных WMAP и "Реликта-1". Если ковариация при этом окажется малой по величине или знакопеременной, то придётся признать, что обнаруженный "Реликтом-1" сигнал не имеет ничего общего с радиоизлучением наблюдаемого участка небесной сферы, т.е. результаты "Реликта-1" являются ошибочными.

8. Анализ взаимной ковариации

Радиокарта небесной сферы в эксперименте "Реликт-1" строилась из отдельных сканов, представляющих собой большие круги на небесной сфере [12]. Для целей последующего анализа были взяты 14 сканов "Реликта-1", что составило примерно 80 % доступного объёма наблюдений. Точно такие же сканы были сформированы из данных WMAP [13]. Для обоих экспериментов данные затем были сглажены с угловым разрешением 15° . Далее сравнение производилось между сформированными сканами WMAP и сканами "Реликта-1".

Взаимная ковариация COV данных WMAP и "Реликта-1" для каждого скана вычислялась по следующей формуле:

$$\text{COV} = \frac{1}{\sqrt{\sum W(i)}} \text{sign} \left(\sum T_{\text{WMAP}}(i) T_{\text{Rel}}(i) \right) \times \sqrt{\text{abs} \left(\sum T_{\text{WMAP}}(i) T_{\text{Rel}}(i) W(i) \right)}, \quad (3)$$

$T_{\text{WMAP}}(i)$ — яркостная температура в i -й точке скана WMAP, $T_{\text{Rel}}(i)$ — яркостная температура в i -й точке скана "Реликта-1", $W(i) = 1/N^2(i)$ — статистический вес i -й точки, $N(i)$ — уровень шума в i -й точке скана "Реликта-1". Суммирование ведётся по всем точкам скана. Статистический вес точек, расположенных в пределах $\pm 20^\circ$ от галактической плоскости, принят равным нулю. Шумы WMAP не учитываются, поскольку они пренебрежимо малы по сравнению с шумами "Реликта-1".

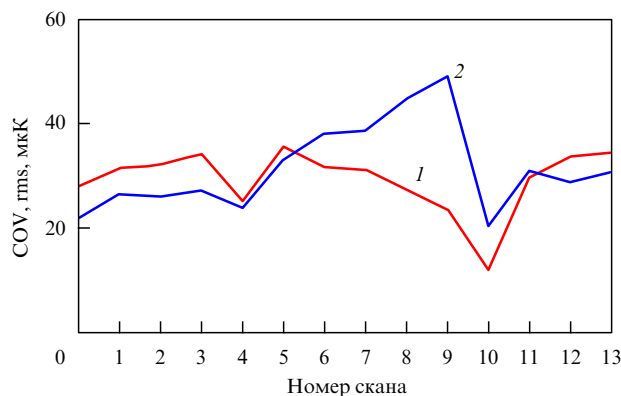


Рис. 2. Взаимная ковариация данных WMAP и "Реликта-1" (1) и эффективное значение сигнала WMAP (2).

Результаты анализа представлены на рис. 2. По оси абсцисс отложен порядковый номер скана. Кривая 1 показывает уровень взаимной ковариации данных WMAP и "Реликта-1" для каждого из сканов. Кривая 2 показывает эффективное значение сигнала (rms), измеренного WMAP в каждом из сканов.

Из рисунка 2 видно, что ковариация данных WMAP и "Реликта-1" является положительной для всех без исключения сканов. По интенсивности коррелирующая часть близка к сигналу WMAP. В принципе подобная конфигурация могла бы получиться и в отсутствие сигнала в результате чисто случайных вариаций шума на карте "Реликта-1". Методом статистического моделирования была определена вероятность такой ситуации: она оказалась менее 2 %. Исключение из анализа "холодного" пятна практически не изменяет полученный результат.

9. Одночастотные измерения

Аппаратура спутника WMAP работала в пяти частотных диапазонах, охватывающих полосу от 20 до 106 ГГц. Термодинамическая температура реликтового излучения, как известно, не зависит от частоты. Однако кроме реликтового излучения в антенны приёмников WMAP попадало распределённое радиоизлучение межзвёздного газа (тормозное и синхротронное) и тепловое излучение космической пыли. Спектры этих источников известны (с определённой точностью), что позволяет (также с определённой точностью) выделить сигнал анизотропии реликтового излучения на их фоне.

Зависимость уровня сигнала, измеренного WMAP, от частоты показана на рис. 3. Данные, которые, как и ранее, сглажены с угловым разрешением 15° , относятся к областям, удалённым от плоскости Галактики. Подъём на низких частотах объясняется влиянием тормозного и синхротронного излучений, а на высоких — влиянием радиоизлучения космической пыли. Оптимальными для исследований оказываются частоты между 40 и 85 ГГц, на которых мало влияние источников, не связанных с реликтовым излучением.

Рабочая частота "Реликта-1" отмечена на рис. 3 звёздочкой. Видно, что выбранная частота оказалась достаточно близкой к оптимальной.

Использование "Реликтом-1" единственной рабочей частоты заметно упростило эксперимент, но могло бы серьёзно затруднить интерпретацию результатов. Од-

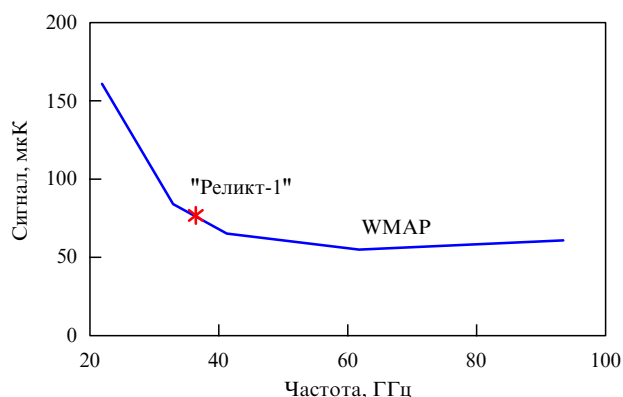


Рис. 3. Спектр сигнала, измеренного WMAP. Звёздочкой отмечена рабочая частота "Реликта-1".

нако данные WMAP свидетельствуют о том, что в этой частотной точке анизотропия более чем на 75 % определяется реликтовым излучением. Таким образом, выбор одночастотного метода измерений для "Реликта-1" следует признать вполне оправданным.

Конечно, этот вывод справедлив только для первого, поискового, эксперимента, каким и был "Реликт-1". Последующие, более точные и детальные, наблюдения, несомненно, требуют многочастотных измерений. Именно так сконструирована аппаратура спутников COBE, WMAP и "Planck".

10. Заключение

Данные измерений спутника WMAP характеризуются большим отношением сигнал/шум. Это позволяет использовать их для оценки качества других произведённых в частотном диапазоне от 20 до 100 ГГц наблюдений, имеющих угловое разрешение один градус и более. Анализ взаимной ковариации даёт возможность надёжной оценки даже тех измерений, которые имеют малое отношение сигнала к шуму.

Подобный анализ, выполненный для эксперимента "Реликт-1", показал, что с вероятностью 98% обнаруженный "Реликтом-1" сигнал соответствует реальной анизотропии реликтового излучения. Нашло подтверждение и "холодное" пятно, найденное на радиокarte "Реликта-1".

Автор благодарит А.А. Брюханова за полезные дискуссии. В работе использованы данные LAMBDA (Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis) [13]. Часть результатов получена с помощью программ HEALPix [14] и IDL Astronomy Library [15].

Список литературы

1. Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* **18** 387 (1992) [Strukov I A et al. *Astron. Lett.* **18** 153 (1992)]
2. Smoot G F et al. *Astrophys. J.* **396** L1 (1992)
3. Струков И А и др. *Письма в Астрон. журн.* **13** 163 (1987) [Strukov I A et al. *Astron. Lett.* **13** 65 (1987)] [Translated into English: Strukov I A et al., JPRS Report. Science & Technology. USSR: Space (1987) p. 59]
4. Bennett C L et al. *Astrophys. J.* **414** L77 (1993)
5. Banday A J *Lecture Notes Phys.* **429** 111 (1994)
6. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, <http://wmap.gsfc.nasa.gov>
7. Cruz M et al. *Astrophys. J.* **655** 11 (2007)
8. Cayon L, Smoot G *Astrophys. J.* **452** 487 (1995)
9. Hinshaw G *Astrophys. J. Suppl.* **170** 288 (2007)
10. Bennett C L et al. *Astrophys. J. Suppl.* **148** 1 (2003)
11. Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis: WMAP TT Power Spectra, http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/pow_tt_spec_get.cfm
12. Струков И А, Скулачев Д П, в сб. *Итоги науки и техники. Сер. Астрономия* Т. 31 (М.: ВИНТИ, 1986) с. 37
13. Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis: WMAP Five Year Smoothed Stokes I Sky Maps Per Differencing Assembly, http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/maps_da_smth_r9_i_5yr_get.cfm
14. HEALPix, <http://healpix.jpl.nasa.gov>
15. The IDL Astronomy User's Library, <http://idlastro.gsfc.nasa.gov>

Cosmic microwave background anisotropy data correlation in WMAP and Relikt-1 experiments

D.P. Skulachev

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 333-43 22
E-mail: dskulach@mx.iki.rssi.ru

A comparison is made of cosmic microwave background anisotropy data obtained from the WMAP satellite in 2001–2006 and from the Relikt-1 satellite in 1983–1984. It is shown that low-temperature area found by Relikt-1 is the location of the "coldest spot" of the WMAP radiomap. The mutual correlation of the two datasets is estimated and found to be positive for all sky regions surveyed. The conclusion is made that with the 98 probability, the Relikt-1 experiment had detected the same signal that was later identified by WMAP. A discussion is given of whether the Relikt-1 experiment parameters were chosen correctly.

PACS numbers: 95.55. – n, 95.75. – z, 98.80. Es

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004c.0389

Bibliography — 15 references

Received 22 June 2009

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **180** (4) 389–392 (2010)

Physics – Uspekhi **53** (4) (2010)