

## ИССЛЕДОВАНИЯ СМВ

*О. В. Верхованов*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Кратко рассмотрены основные эксперименты по исследованию СМВ и их результаты за последние 15 лет.

We consider some fundamental experiments on CMB studies and obtained results in the last 15 years.

PACS: 96.75.-z; 98.70.Vc; 98.80.-k

### ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение флуктуаций реликтового излучения (или космического микроволнового фона — Cosmic Microwave Background — СМВ) спутником COBE стало революционным событием в наблюдательной космологии, резко сузив множество допустимых космологических моделей. В то время как открытие реликтового излучения [1] зафиксировало модель горячей Вселенной, открытие флуктуаций этого излучения в эксперименте COBE подтвердило теорию образования крупномасштабной структуры Вселенной [2]. Обнаружение флуктуаций СМВ высветило путь дальнейшим исследованиям, в результате чего количество проводимых и планируемых экспериментов по измерению уровня этих флуктуаций на различных угловых масштабах к началу XXI в. исчислялось десятками. Улучшение качества проводимых наблюдений и моделирование теоретических параметров позволяет говорить в настоящее время о том, что эпоха точной космологии («precision cosmology» — высказывание М. Лонгейера в Манчестере в 2000 г.) наступила 15 лет назад. Оба подхода (наблюдения и моделирование) требуют высокого качества обработки первичных данных, что включает чистку от шумов и оценку параметров сигнала на уровне, в сотни раз превосходящем тот, что был 25 лет назад. Измерение космологических параметров, которое было проведено специализированной космической миссией NASA WMAP [3] с целью исследования неоднородностей реликтового излучения, стало фундаментальным вкладом в космофизику и зафиксировало современную стандартную космологическую модель с недостижимой ранее точностью. Кроме того, такая точность

измерения флуктуаций фона позволила начать исследования проблемы не-гауссовости фона, особенно важной для понимания физических процессов в эпоху инфляции, а позднее перейти к изучению самого периода инфляции с помощью измерения  $B$ -моды поляризации СМВ. Отметим некоторые существенные, на наш взгляд, эксперименты последних 15 лет, изменившие наши представления о качестве данных наблюдений космического микроволнового фона, а также точности измерений космологических параметров. Реальное количество проведенных экспериментов за 50 лет — более 60, в том числе советско-российские на телескопе РАТАН-600 [4–6] и спутнике «Реликт» [7].

### DASI

Среди первых качественных данных следует упомянуть результаты наблюдений на интерферометре DASI (Degree Angular Scale Interferometer), проводившем измерения на градусных угловых масштабах. Телескоп представляет

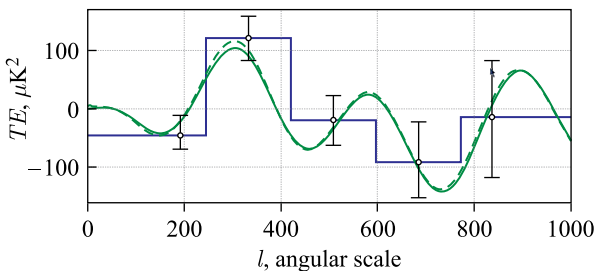


Рис. 1. Вверху: команда исследователей проекта на фоне интерферометра DASI. Внизу: поляризационный кросс-спектр ( $T-E$ ) по данным DASI. Рисунки воспроизведены с сайта <http://astro.uchicago.edu/dasi/>

собой 13-элементный интерферометр (рис. 1, сверху), созданный для исследования анизотропии температуры и поляризации СМВ с высокой чувствительностью и установленный Чикагским университетом на станции Амундсена–Скотта на Южном полюсе. В инструменте использованы охлаждаемые усилители НЕМР, работающие в частотном диапазоне 26–36 ГГц.

Кроме подтверждения и измерения флуктуаций СМВ на высоких гармониках (мультиполи  $\ell > 500$ ), DASI доказал существование  $E$ -моды поляризации СМВ [8] и измерил поляризационный кросс-спектр (рис. 1, внизу).

### BOOMERanG

Среди аэростатных экспериментов, таких как BOOMERanG, MAXIMA, Archeops и др., первый — BOOMERanG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics — аэростатные наблюдения миллиметрового внегалактического излучения и для геофизики), с нашей точки зрения,

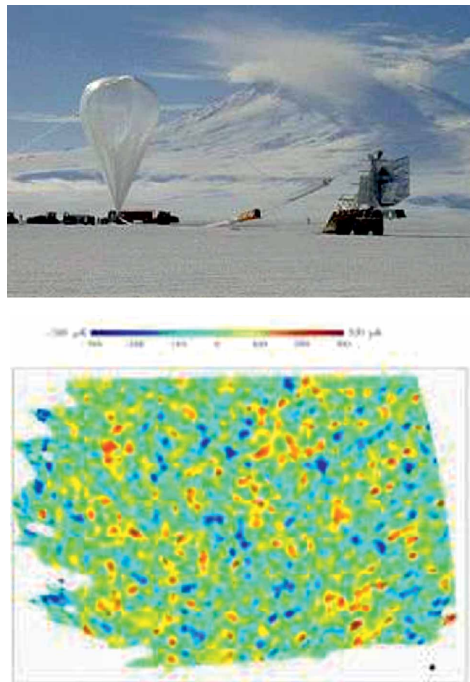


Рис. 2. Вверху: аэростат и телескоп эксперимента BOOMERanG. Внизу: карта СМВ по данным эксперимента BOOMERanG. Рисунки воспроизведены с сайта [http://www.astro.caltech.edu/~lgg/boomerang/boomerang\\_front.htm](http://www.astro.caltech.edu/~lgg/boomerang/boomerang_front.htm)

является наиболее эффективным при учете мешающих фоновых компонент. Наблюдения BOOMERanG проводились на высоте 37 км над Антарктидой около 12 сут (с декабря 1998 по январь 1999 г. и в 2003 г.). Полет аэростата (рис. 2, вверху) поддерживался стабильным полярным вихревым ветром вокруг Южного полюса, действие которого и дало название эксперименту. При наблюдениях использовались 1,2-м зеркало и 16 рупоров-приемников на фокальной плоскости для регистрации в трех частотных полосах: 145, 245 и 345 ГГц [9]. При полете 2003 г. в BOOMERanG был установлен прототип поляризационного приемника Planck HFI на частоте 143 ГГц.

Среди основных результатов эксперимента — подтверждение существования темной энергии и плоской геометрии Вселенной, построение карты (рис. 2, внизу), а также измерение поляризации СМВ (*E*-мода) по данным поляризационных наблюдений второго запуска.

## МИССИЯ WMAP

Космическая миссия NASA WMAP\* (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (рис. 3) — зонд им. Уилкинсона для исследования микроволновой анизотропии) стала экспериментом нового поколения [3]. Его значимость заключена не только в уровне решаемых задач, включающих определение геометрии, состава и особенностей эволюции Вселенной по картам анизотропии СМВ с 13-минутным угловым разрешением, но и в качестве анализа данных, впервые проведенного для полного неба с детальным анализом фоновых компонент. Прогрессивное мышление команды WMAP проявилось еще и в предоставлении архива наблюдений, промежуточных и результирующих карт анизотропии температуры и поляризации в общее пользование. Выбор орбиты миссии, выбор стратегии сканирования неба и выбор дизайна спутника были ориентированы на 1) получение некоррелированного пиксельного шума, 2) минимизацию систематических ошибок, аккуратную калибровку и 3) проведение многочастотных наблюдений. Спутник WMAP обращался вокруг точки L2 с направленной от Солнца антенной и проводил сканирование неба, измеряя три моды поляризации (параметры Стокса I, Q, U) в пяти частотных полосах: 23 (K), 33 (Ka), 41 (Q), 61 (V) и 94 ГГц (W). Причем в полосах K и Ka использовались 2 радиометра, в Q и V — 4, в W — 8, которые записывали измерения температуры в виде временных рядов (Time Ordered Data — TOD) с 2001 по 2010 г. Данные описаны и открыты для мирового сообщества за 1-й, 3-й, 5-й и 7-й, 9-й годы наблюдений на сайте WMAP.

---

\* Адрес сайта с описанием и архивом миссии WMAP: <http://lambda.gsfc.nasa.gov>.

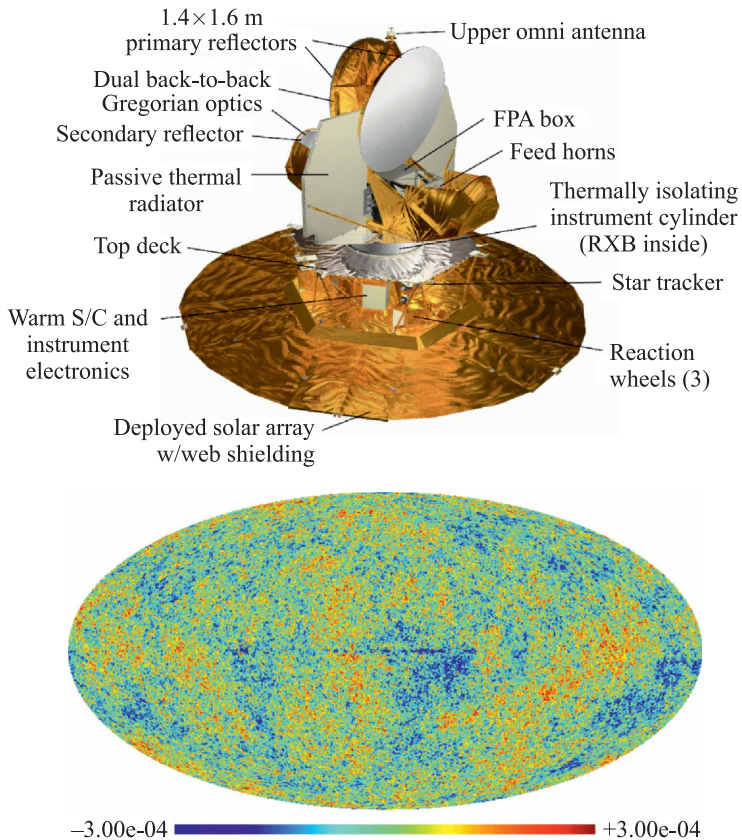


Рис. 3. Вверху: зонд WMAP. Рисунок воспроизведен с <http://lambda.gsfc.nasa.gov>. Внизу: карта СМВ WMAP 9-го года наблюдений

## МИССИЯ PLANCK

Наблюдения космической обсерватории Planck [10], благодаря лучшему, чем у WMAP, угловому разрешению ( $\sim 5$  минут дуги) и чувствительности, кроме изучения СМВ и других фоновых компонент позволили проводить исследования как точечных источников разных популяций, так и протяженных, размером от нескольких минут до десятков минут дуги, ассоциированных со скоплениями галактик. В этом плане при изучении скоплений галактик в микроволновом диапазоне космическая обсерватория Planck сыграла наиболее существенную роль, а построенные в результате ее работы карты полного неба на девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143,

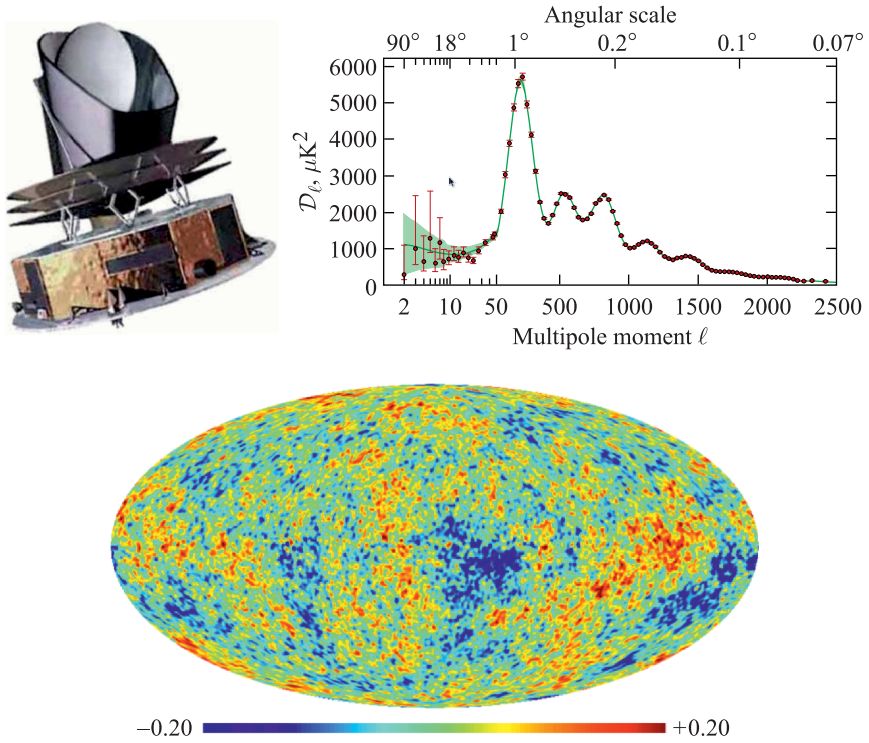


Рис. 4. Вверху: спутник Planck; угловой спектр мощности CMB по данным Planck. Рисунки воспроизведены с сайта <http://www.rssd.esa.int/Planck/>. Внизу: карта SMICA Planck

217, 353, 545 и 857 ГГц, являются основой для большого числа научных исследований, проводящихся в различных институтах разных стран. Карты спутника Planck\* [10] Европейского космического агентства (ESA) были открыты для научного сообщества в 2013 г. и сразу стали эффективным инструментом в решении многих задач галактической и внегалактической астрономии. Были представлены карты компонент протяженного микроволнового фонового излучения, каталоги обнаруженных источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения, имеющих галактическое и внегалактическое происхождение. Измерения потоков излучения в миссии были проведены на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами

\*<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

100 ГГц и более высоких частот, а также на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на частотах ниже 100 ГГц. Угловое разрешение карт на частоте 30 ГГц составило  $\sim 32'$ , частотах выше 145 ГГц —  $\sim 5'$ . Точность определения координат источников на различных наблюдательных частотах варьируется от  $50''$  до  $40''$ . Поляризационные измерения были проведены на всех частотах, кроме 545 и 857 ГГц. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA\*) содержит как карты компонент излучения, так и списки обнаруженных объектов, включая скопления галактик с эффектом Зельдовича–Сюняева.

В отличие от команды WMAP, представившей одну карту СМВ, в релизах данных Planck были описаны 4 карты реликтового фона. Они были получены в результате применений различных методов разделения компонент [11]. Из этих карт (SMICA, NILC, SEVEM и COMMANDER) три, построенные по большему диапазону наблюдательных частот, имеют лучшее разрешение ( $\sim 5'$ ). Основные методы разделения компонент карт в эксперименте Planck [11]: спектральная подгонка независимых компонент фона в гармоническом пространстве (SMICA), алгоритм внутренней линейной комбинации в пространстве нидлетов (NILC) и метод, основанный на разделении компонент с использованием шаблонов мешающих фоновых излучений (foregrounds), восстановленных из низкочастотных и высокочастотных наблюдательных каналов в пиксельном пространстве (SEVEM). Отметим, что данные миссии Planck подтвердили с высокой точностью (для основных космологических параметров с точностью  $1,1\sigma$ ) результаты миссии WMAP. Эти же результаты касаются и углового спектра мощности  $C_\ell$  (рис. 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим основные результаты исследований СМВ на момент завершения работы обсерватории Planck. Из трех наиболее важных целей Planck: измерение космологических параметров с высокой точностью, поиск и составление каталога скоплений галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича и измерение сигнала в  $B$ -моду поляризации для проверки теории инфляции — можно считать достигнутыми первые две. Для выполнения третьей задачи понадобятся дополнительные наблюдения на других инструментах с лучшей чувствительностью и частотным покрытием и прогрессом в методах разделения поляризационных компонент при выделении сигнала СМВ. Открытие холодной намагниченной пыли, которая мимикрирует под  $B$ -моду поляризации СМВ, генерируемую первичными гравитационными волнами, тоже представляет большой интерес. Результаты измерения космологических параметров

---

\*<http://pla.esac.esa.int/>

по угловым спектрам мощности, построенным по данным анизотропии температуры и поляризации Planck, подтвердили основную (стандартную) космологическую модель  $\Lambda$ CDM [12] (см. также [13]). Данные Planck уточнили параметры этой модели. Среди них: угловой размер акустического горизонта эпохи последнего рассеяния, который оценивается по положению пиков в угловом спектре мощности, обозначается  $100 \times \theta_*$  (домножается на 100) и равен  $(1,04112 \pm 0,00029)$  рад; амплитуда первичных возмущений  $A_s$  с домножением на  $10^{10}$ , записываемая в виде натурального логарифма:  $\ln(10^{10}A_s) = 3,064 \pm 0,023$ ; скалярный спектральный индекс  $n_s = 0,9667 \pm 0,0040$ ; плотность барионной и темной материи соответственно  $\Omega_b h^2 = 0,02230 \pm 0,00014$  ( $\Omega_b = 0,049$ ) и  $\Omega_{\text{CDM}} h^2 = 0,1188 \pm 0,0010$  ( $\Omega_{\text{CDM}} = 0,259$ ), а их относительная сумма — плотность материи  $\Omega_m = 0,3089 \pm 0,0062$ , а также эпоха вторичной ионизации, когда нейтральный газ во Вселенной стал ионизованным за счет ультрафиолетового излучения первых звезд и активных ядер галактик. Эпохе вторичной ионизации соответствует красное смещение  $z_{\text{re}} = 8,8_{-1,1}^{+1,2}$ . Вместо последнего параметра  $z_{\text{re}}$  в расчетах используют другую, но полностью соответствующую ему величину — оптическую толщину  $\tau$  в эпоху реионизации:  $\tau = 0,066 \pm 0,012$ .

Измеренные параметры позволяют зафиксировать космологическую модель и определить остальные параметры как с использованием только данных Planck, так и с применением данных других экспериментов в согласованных оценках. Среди остальных параметров отметим плотность темной энергии  $\Omega_\Lambda = 0,6911 \pm 0,0062$ , величина которой связана и с размером  $\theta_*$ , и с прохождением фотонов РИ сквозь формирующиеся скопления галактик за космологическое время (эффект Сакса–Вольфа). Другим важным параметром является параметр расширения Хаббла в настоящую эпоху — постоянная Хаббла (по данным Planck  $H_0 = (67,74 \pm 0,46)$  км/с/Мпк). С параметром Хаббла связан и возраст Вселенной  $t_0 = (13,799 \pm 0,021)$  млрд лет. Знание оптической толщины, которая определяет свойства среды и связана с плотностью материи, а также применение данных о гравитационном линзировании фиксируют дисперсию спектра мощности распределения вещества. Эта величина описывается параметром  $\sigma_8 = 0,8159 \pm 0,0086$ , характеризующим скучивание материи в кубе радиусом 8 Мпк. Еще один параметр плотности —  $\Omega_K = 1 - \Omega_0$ , описывающий кривизну Вселенной, связан с суммарной плотностью всех компонент энергии  $\Omega_0$ , объединяющей  $\Omega_\Lambda$ ,  $\Omega$ ,  $\Omega_b$ , плотности излучения и нейтрино, и с размером характерных пятен РИ на момент рекомбинации  $\theta_*$ . Используя только данные РИ, куда входят и измерения Planck и учитываются линзирование и данные оптических обзоров, имеем оценку кривизны:  $\Omega_K = 0,0008_{-0,0039}^{+0,0040}$ . Малое значение  $\Omega_K$  является признаком того, что наша Вселенная с высокой точностью плоская (т. е. сумма углов любого треугольника, построенного на больших масштабах, равна  $180^\circ$ ), что, в свою очередь, говорит в пользу теории инфляционного расширения. Отметим еще пять



параметров расширенной модели: массу нейтрино  $\sum \nu_i < 0,194$  эВ, эффективное число типов нейтрино ( $N_{\text{eff}} = 3,04 \pm 0,33$ ), долю барионов в первичном гелии  $Y_P = 0,249_{-0,026}^{+0,025}$ , верхнюю границу на уровень отношения тензорной моды возмущений к скалярной  $r_{0,002} < 0,113$ , что удовлетворяет инфляционной модели Старобинского  $R^2$  [14], параметр квинтэссенции для случая темной энергии, описываемой динамическим полем:  $w = -1,0119_{-0,80}^{+0,075}$ .

Подводя итог, можно сказать, что тип космологической модели —  $\Lambda$ CDM, практически совпадающей по параметрам с измерениями WMAP, твердо установлен. Это является прекрасным результатом. Множественное измерение эффекта Сюняева–Зельдовича, построение карты молекулярного газа Галактики и другие важные результаты открыли новые возможности в астрофизике. Аномалии на карте РИ все еще нуждаются в убедительном объяснении. Исследования, проведенные по программе космической миссии Planck, кроме научных результатов, позволили продемонстрировать ряд независимых космологических тестов, основанных исключительно на наблюдениях СМВ. Их можно коротко перечислить:

- угловой спектр мощности  $C_\ell$  отдельно на низких ( $2 \leq \ell \leq 50$ ), средних ( $50 < \ell < 600$ ) и высоких гармониках для независимого определения космологических параметров;

- корреляционные спектры мощности  $C_\ell^{TE}$  и  $C_\ell^{EE}$  для определения параметров эпохи реионизации; низкие гармоники  $E$ -моды для совместного  $C_\ell^{TT}$  определения космологических параметров;

- корреляционные спектры мощности  $C_\ell^{TB}$  и  $C_\ell^{BB}$  для поиска первичных гравитационных волн и определения параметров инфляционной модели;

- статистические свойства сигнала — гауссовость как параметр инфляционной модели; амплитуда гармоник — для анализа топологии и геометрии Вселенной; статистическая анизотропия — как тест на сложную инфляционную модель;

- скопления галактик, проявляющиеся на карте СМВ из-за эффекта Сюняева–Зельдовича, как способ измерения ряда космологических параметров и масс скоплений галактик;

- линзирование СМВ;

- распределение сигнала СМВ на картах как тест на топологию Вселенной.

Из-за лучшего углового разрешения и лучшей чувствительности количество тестов, проведенных Planck, значительно больше, чем WMAP. Независимость определения параметров и большое число независимых точек на угловом спектре мощности, амплитуда которых многократно проверялась и уточнялась, несомненно, вызывает доверие к полученным данным и результатам их анализа.

Отметим, что исследования реликтового излучения еще не закончены. Необходимо улучшить учет вклада холодной намагниченной пыли, чтобы про-

двинуться дальше в исследованиях  $B$ -моды поляризации. Ощущается неполнота каталога скоплений галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича. Измерения потоков от точечных источников на уровне менее  $5\sigma$  на картах Planck представляют дополнительный интерес при изучении анизотропии сигнала на высоких гармониках. Исследование аномалий CMB также продолжается.

В скором времени ожидаются результаты как минимум двух экспериментов по измерению  $B$ -моды поляризации CMB, один из которых — BICEP3\* — сейчас проводится, а второй — CORE\*\* [15] — находится на стадии проработки. Как ожидается, CORE даст ограничения на параметр отношения тензорной моды к скалярной  $r_{0,002}$  на уровне  $\sim 10^{-3}$  и на сумму масс нейтрино —  $\sum \nu_i < \sim 0,03$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Penzias A. A., Wilson R. W.* // *Astrophys. J.* 1994. V. 142. P. 419.
2. *Smoot G. F., Bennett C. L., Kogut A., Wright E. L., Aymon J., Boggess N. W., Cheng E. S., de Amici G., Gulkis S., Hauser M. G., Hinshaw G., Jackson P. D., Janssen M., Kaita E., Kelsall T. et al.* // *Astrophys. J. Lett.* 1992. V. 396. P. L1.
3. *Bennett C. L., Halpern M., Hinshaw G., Jarosik N., Kogut A., Limon M., Meyer S. S., Page L., Spergel D. N., Tucker G. S., Wollack E., Wright E. L., Barnes C., Greason M. R., Hill R. S. et al.* // *Astrophys. J. Suppl.* 2003. V. 148. P. 1.
4. *Пари́йский Ю. Н., Петров З. Е., Черков Л. Н.* // *Астрон. журн.* 1977. Т. 3. С. 483.
5. *Пари́йский Ю. Н., Корольков Д. В.* Эксперимент «Холод». Первый глубокий обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600 // *Итоги науки и техники. Астрономия.* М.: ВИНТИ, 1986. Т. 31. С. 31.
6. *Pariiskii Yu. N., Verkhodanov O. V.* // *Astron. Rep.* 2017. V. 61. P. 332.
7. *Strukov I. A., Brukhanov A. A., Skulachev D. P., Sazhin M. V.* // *MNRAS.* 1992. V. 258. P. P37.
8. *Kovac J. M., Leitch E. M., Pryke C., Carlstrom J. E., Halverson N. W., Holzzapfel W. L.* // *Nature.* 2002. V. 420. P. 772.
9. *de Bernardis P., Ade P. A. R., Bock J. J., Bond J. R., Borrill J., Boscaleri A., Coble K., Contaldi C. R., Crill B. P., De Troia G., Farese P., Ganga K., Giacometti M., Hivon E., Hristov V. V. et al.* // *Astrophys. J.* 2002. V. 564. P. 559.
10. *Adam R., Ade P. A. R., Aghanim N., Akrami Y., Alves M. I. R., Argüeso F., Arnaud M., Arroja F., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Ballardini M., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G. et al. (Planck Collab.)* // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 594. P. A1.

\*<https://www.cfa.harvard.edu/CMB/bicep3/>\*\*<http://www.core-mission.org>

- 
11. *Adam R., Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Bartolo N., Basak S., Battaner E., Benabed K., Benoit A. et al. (Planck Collab.) // Ibid. P. A9.*
  12. *Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Bartolo N., Battaner E., Battye R., Benabed K., Benoit A., Benoit-Levy A. et al. (Planck Collab.) // Ibid. P. A13.*
  13. *Верходанов О. В. // УФН. 2016. Т. 186. С. 3 (Verkhodanov O. V. // Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 3).*
  14. *Starobinsky A. A. // Phys. Lett. B. 1970. V. 91. P. 99.*
  15. *Delabrouille J., de Bernardis P., Bouchet F. R., Achucarro A., Ade P. A. R., Allison R., Arroja F., Artal E., Ashdown M., Baccigalupi C., Ballardini M., Banday A. J., Banerji R., Barbosa D., Bartlett J., Bartolo N. et al. // JCAP. 2017 (submitted); arXiv:1706.04516.*