

# Происхождение Вселенной и поляризация фонового космического микроволнового излучения

Перевод М.Х.Шульмана ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru))

----

arXiv:0902.3796v1 [astro-ph.CO] 22 Feb 2009

## The Origin of the Universe as Revealed Through the Polarization of the Cosmic Microwave Background

(Dated: February 24, 2009)

Настоящую Белую Тетрадь (White Paper) составил Скотт Додельсон (Scott Dodelson) при участии большого числа из подписавших ее. Это – часть деятельности программы НАСА по определению первичной поляризации (Primordial Polarization Program Definition Team – PPPDT), которой руководит Шауль Ханани (Shaul Hanany), а также работы по заказу НАСА Стива Мейера с сотрудниками (of a NASA award to Steve Meyer and colleagues) "Изучение инфляции с помощью CMB (A study for a CMB Probe of Inflation)" (07-ASMCS07-0012).

Scott Dodelson, Richard Easther, Shaul Hanany, Liam McAllister, Stephan Meyer, Lyman Page, Peter Ade, Alexandre Ambard, Amjad Ashoorioon, Carlo Baccigalupi, Amedeo Balbi, James Bartlett, Nicola Bartolo, Daniel Baumann, Maria Beltran, Dominic Benford, Mark Birkinshaw, Jamie Bock, Dick Bond, Julian Borrill, Francois Bouchet, Michael Bridges, Emory Bunn, Erminia Calabrese, Christopher Cantalupo, Ana Caramete, Carmelita Carbone, Sean Carroll, Suchetana Chatterjee, Xingang Chen, Sarah Church, David Chuss, Carlo Contaldi, Asantha Cooray, Paolo Creminelli, Sudeep Das, Francesco De Bernardis, Paolo de Bernardis, Jacques Delabrouille, F.-Xavier Dsert, Mark Devlin, Clive Dickinson, Simon Dicker, Michael DiPirro, Matt Dobbs, Olivier Dore, Jessie Dotson, Joanna Dunkley, Cora Dvorkin, Hans Kristian Eriksen, Maria Cristina Falvella, Dave Finley, Douglas Finkbeiner, Dale Fixsen, Raphael Flauger, Pablo Fosalba, Joseph Fowler, Silvia Galli, Evalyn Gates, Walter Gear, Yannick Giraud-Heraud, Krzysztof Gorski, Brian Greene, Alessandro Gruppuso, Josh Gundersen, Mark Halpern, Jean-Christophe Hamilton, Masashi Hazumi, Carlos Hernandez-Monteagudo, Mark Hertzberg, Gary Hinshaw, Christopher Hirata, Eric Hivon, Richard Holman, Warren Holmes, Wayne Hu, Johannes Hubmayr, Kevin Huffenberger, Howard Hui, Lam Hui, Kent Irwin, Mark Jackson, Andrew Jaffe, Bradley Johnson, Dean Johnson, William Jones, Shamit Kachru, Kenji Kadota, Jean Kaplan, Manoj Kaplinghat, Brian Keating, Reijo Keskitalo, Justin Khoury, Will Kinney, Theodore Kisner, Lloyd Knox, Hideo Kodama, Alan Kogut, Eiichiro Komatsu, Arthur Kosowsky, John Kovac, Lawrence Krauss, Hannu Kurki-Suonio, Jean-Michel Lamarre, Susana Landau, Charles Lawrence, Samuel Leach, Louis Leblond, Adrian Lee, Erik Leitch, Rodrigo Leonardi, Julien Lesgourgues, Andrew Liddle, Eugene Lim, Michele Limon, Marilena Loverde, Philip Lubin, Enrico Lunghi, Joseph Lykken, Carolyn MacTavish, Antonio Magalhaes, Davide Maino, Victoria Martin, Sabino Matarrese, John Mather, Harsh Mathur, Tomotake Matsumura, Pieter Meerburg, Alessandro Melchiorri, Laura Mersini-Houghton, Amber Miller, Michael Milligan, Kavilan Moodley, Michael Neimack, Hogan Nguyen, Alberto Nicolis, Ian O'Dwyer, Angela Olinto, Luca Pagano, Enrico Pajer, Bruce Partridge, Timothy Pearson, Hiranya Peiris, Marco Peloso, Francesco Piacentini, Michel Piat, Lucio Piccirillo, Elena Pierpaoli, Davide Pietrobon, Giampaolo Pisano, Levon Pogosian, Dmitri Pogosyan, Nicolas Ponthieu, Lucia Popa, Clement Pryke, Christoph Raeth, Subharthi Ray, Christian Reichardt, Sara Ricciardi, Paul Richards, Antonio Riotto, Graca Rocha, John Ruhl, Benjamin Rusholme, Robert Scherrer, Claudia Scoccola, Douglas Scott, Carolyn

Sealfon, Emiliano Sefusatti, Neelima Sehgal, Michael Seiffert, Leonardo Senatore, Paolo Serra, Sarah Shandera, Meir Shimon, Peter Shirron, Jonathan Sievers, Joe Silk, Kris Sigurdson, Robert Silverberg, Eva Silverstein, Suzanne Staggs, Glenn Starkman, Albert Stebbins, Federico Stivoli, Radek Stompor, Naoshi Sugiyama, Daniel Swetz, Andrea Tartari, Max Tegmark, Peter Timbie, Maxim Titov, Matthieu Tristram, Mark Trodden, Gregory Tucker, Jon Urrestilla, Marcella Veneziani, Licia Verde, Joaquin Vieira, Terry Walker, David Wands, Scott Watson, Steven Weinberg, Rainer Weiss, Benjamin Wandelt, Bruce Winstein, Edward Wollack, Mark Wyman, Amit Yadav, Ki Won Yoon, Olivier Zahn, Matias Zaldarriaga, Michael Zemcov, Jonathan Zwart

## **КРАТКИЕ ИТОГИ**

Современная космология заостряет тысячелетние вопросы о происхождении и природе нашего космического обиталища. Древние вопросы трансформировались в два первоочередных плацдарма для атаки в предстоящее десятилетие:

### **• Как началась история Вселенной?**

Современная космологическая парадигма успешно объясняет, как величественная структура, наблюдаемая в сегодняшней Вселенной, выросла из малых флуктуаций плотности материи. Какова физическая природа первичных зародышей, которые, в конечном счете, обусловили существование галактик, звезд, планет и людей во Вселенной? Естественно ожидать (и многие теории предсказывают), что те же причины обусловили также существование гравитационных волн – колебаний структуры пространства-времени, распространяющихся со скоростью света. Содержит ли на самом деле Вселенная спектр первичных гравитационных волн, порожденных тем же механизмом, который породил флуктуации плотности?

### **• Какие физические законы управляют Вселенной при сверхвысоких энергиях?**

Все объяснения начальной структуры связаны с физикой энергий, выходящих далеко за пределы, достижимые, например, с помощью Большого адронного коллайдера (ЦЕРН). Экспериментальное исследование этих зачаточных структур может дать информацию о новых частицах, силах и, возможно, даже о дополнительных размерностях пространства, доступных лишь при сверхвысоких энергиях.

Одним из наиболее очевидных окон, через которые можно попытаться увидеть ответы на эти вопросы, является картина поляризации космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background – CMB), которое является ныне единственным объектом, подвергшимся действию первичных гравитационных волн. Детектирование его особенностей, обусловленных действием гравитационных волн, может привести не только к беспрецедентным открытиям, но и стать прямым методом изучения физики, относящейся к самым ранним мгновениям существования нашей Вселенной. Эксперименты, позволяющие исследовать картину поляризации CMB в течение предстоящего десятилетия, приведут нас к первым ответам на вышеуказанные древние вопросы.

## **I. КАК НАЧИНАЛАСЬ ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ?**

По истечении миллиардов лет возмущения в ранней Вселенной были усилены в результате гравитационной неустойчивости, почти идеально однородная Вселенная превратилась в мир, содержащий планеты, звезды, галактики и галактические скопления. Эта космическая эволюция была количественно подтверждена: малые начальные возмущения, зафиксированные в СМВ, имеют в точности такую амплитуду, чтобы породить структуру Вселенной, наблюдаемую сегодня. Мы можем понять не только природу первичных возмущений, лежащих в основе зачаточных структур во Вселенной, но и природу Вселенной как таковой в целом.

Помимо конкретных значений амплитуды, начальные возмущения дают информацию о некоторых своих дополнительных свойствах [1]. Они почти масштабно-инвариантны: возмущения для всех длин волн имеют приблизительно одинаковую амплитуду. В основном они в точности гауссовы, т.е. их статистические свойства соответствуют классическому гауссовому случайному полю с относительной точностью до 0.001. Наиболее замечательно, что измерения СМВ указывают на синхронизацию возмущений в ранние моменты: разложив возмущения в ряд Фурье, можно увидеть, что каждая мода колебаний началась с одной и той же временной фазы.

Эта синхронизация раннего периода является, в частности, загадочной, поскольку она была заблокирована в период, когда пространственные масштабы были заведомо больше, чем расстояние, пройденное светом с начала времен (горизонт). Это открытие последнего десятилетия обостряет классическую проблему горизонта: почему излучение приходит с различных сторон Вселенной, имея одинаковую температуру?

Теперь эта проблема оказывается даже более глубокой: как же образовались начальные возмущения с их загадочной синхронизацией? Какой физический механизм мог бы породить эти первичные зародыши?

## **II. НОВЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ**

В следующее десятилетие необходимо исследовать эру, в течение которой сформировались зачатки структуры – возможно, 10–35 секунд после Большого Взрыва – нуклеосинтез (3 минуты) и рекомбинацию (380 000 лет), используя современные наблюдения как окно в первичную Вселенную. Однако рекомбинация и нуклеосинтез зависят от хорошо проверенных деталей атомной и ядерной физики соответственно, в то время как масштаб энергий, при котором возникли зародыши, кажутся столь большими, что фундаментальные образующие Вселенной и законы природы, действовавшие тогда, пока неизвестны. Наша способность смотреть через это новое окно перенесет раннюю Вселенную в лабораторию физики ультра-высоких энергий [1] для масштабов, целиком недоступных обычным земным экспериментам.

Ассоциируется ли новая физика с масштабом Великого Объединения, при котором три низкоэнергетические силы – слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия – становятся единым взаимодействием? Теория суперсимметрии в физике частиц объясняет, почему электрослабый масштаб так отличен от масштаба, ассоциируемого с гравитацией. Является ли новая физика частью теории суперсимметрии? Имеются ли другие, еще не открытые, частицы или поля, связанные с теми, которые генерировали первичные возмущения? Большинство всех моделей таких зародышей предсказывают эпоху ускорения в ранней Вселенной.

Управляла ли этим ускорением некоторая ранняя форма темной энергии? Ряд моделей связан со скрытыми размерностями. Имеет ли Вселенная большее, чем три, число пространственных измерений? Большинство моделей связано с допущениями о законах физики, справедливых вблизи энергий планковского масштаба, при котором квантовомеханические флуктуации делают общую теорию относительности неустойчивой. Тогда амплитуду формируемых гравитационных волн должна определять полная базовая теория, которая описывает физику при планковских масштабах – возможно, теория струн или еще неизвестная теория. В частности, симметрии этой фундаментальной теории могут оставить следы в сигнале первичной гравитационной волны, так что детектирование или получение ограничений для первичных гравитационных волн могло бы обеспечить первые наблюдательные ключи к разгадке природы квантовой гравитации.

### III. ИНФЛЯЦИЯ

Общее рассмотрение, приведенное выше, легче всего иллюстрируется в контексте наиболее изученной модели ранней Вселенной: инфляция – это идея, согласно которой Вселенная расширилась приблизительно экспоненциально быстро в самом начале своей истории. Инфляция разрешила некоторые классические проблемы в космологии и корректно предсказала наблюдаемые свойства первичных возмущений.

Раннее ускоренное расширение взаимно удалило небольшие области, которые до этого реально контактировали друг с другом. Квантовые флуктуации, обычно наблюдаемые в микроскопических масштабах, оказались усиленными до астрономических размеров и приобрели космическое значение в качестве зародышей широкомасштабной структуры. Длины волн этих флуктуаций стали столь велики – даже больше горизонта – что возмущения “замерзли”, сохранив постоянные амплитуды. Когда много позже они снова оказались внутри горизонта, все моды были уже синхронизированы, имея одинаковую временную фазу. Большинство моделей инфляции описываются некоторой наибольшей постоянной плотностью энергии (подобно современным моделям темной энергии), так что возмущения в модах с малой длиной волны, которые покинули горизонт позже, были сформированы при тех же условиях, что существовали в момент выхода за горизонт с большими длинами волн. Следовательно, спектр возмущений оказывается примерно масштабно-инвариантным, в согласии с наблюдениями. Кроме того, резкий рост устранил кривизну, в полном согласии с современными представлениями, что с точностью до процентов Вселенная является плоской.

Все модели инфляции предсказывают форму спектра плотности, амплитуду и форму спектра гравитационных волн и уровень отклонения от гауссовости. Многие из простейших моделей предсказывают существенный гравитационно-волновой сигнал, но не поддающиеся детектированию отклонения от гауссовости, тогда как альтернативы инфляции, как кажется, предсказывают Вселенную без поддающихся детектированию первичных гравитационных волн и, зачастую, сильно негауссову. Следовательно, амплитуда первичных гравитационных волн дает способ осуществить выбор между простыми моделями инфляции и возможными альтернативными моделями динамики ранней Вселенной.

Более того, амплитуда гравитационных волн непосредственно связана с масштабом энергии на стадии инфляции, так что их детектирование может дать ключи к новой физике, отвечающей за природу структуры Вселенной. Амплитуда

спектра гравитационных волн выражается через аналогичную величину для спектра возмущения плотности через параметр  $r$ . Текущие эксперименты ограничивают  $r < 0.3$ , и в предстоящее десятилетие будут достижимы значения  $r$  как минимум на уровне 0.01.

Эта амплитуда гравитационных волн представляет собой решающую мишень: теоретические модели с  $r > 0.01$  качественно отличаются от моделей с малыми  $r$ . Физики, работающие в области физики частиц, недавно достигли прогресса в понимании симметрий, лежащих в основе теорий этих двух классов [1], так что измерение или установление ограничений на  $r$  даст информацию об основных принципах, управляющих физикой ультра-высоких энергий. Суммируя резоны, по которым охота за первичными гравитационными волнами так притягательна, укажем, что измерения должны:

- Отвергнуть альтернативы инфляции,
- Уточнить масштаб энергии, при котором происходила инфляции,
- Подобрать ключи к симметриям, на которых основывается новая физика сверхвысоких энергий.

#### IV. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СМВ: РЕШАЮЩИЙ ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Первичные гравитационные волны оставляют уникальный отпечаток на микроволновом фоновом излучении, так как они воздействуют на и деформируют пространство, в котором взаимодействуют фотоны и электроны. Квадрупольная интенсивность анизотропии поля излучения формирует наблюдаемую поляризацию СМВ за счет комптоновского рассеяния.

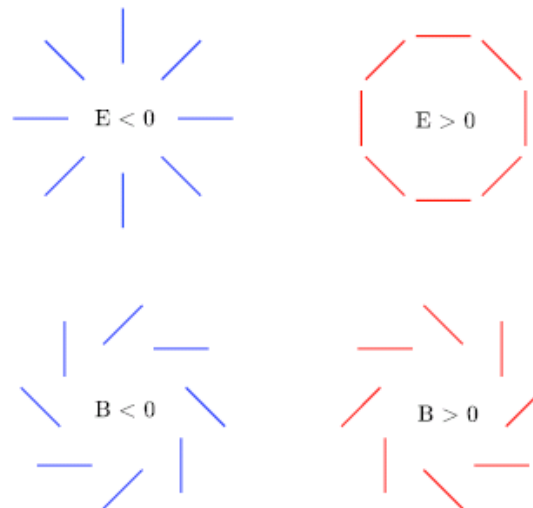


Рисунок 1: Любое поле поляризации может быть разложено на две моды. Положительные (отрицательные) E-моды окружают горячие (холодные) области. B-моды не могут быть созданы обычными возмущениями плотности, а формируются гравитационными волнами.

Когда гравитационные волны являются источниками анизотропии, картина поляризации выглядит, как B-моды на рисунке 1. С другой стороны, возмущения плотности являются источником только E-мод поляризации. На больших угловых масштабах наиболее правдоподобные космологические источники B-моды сигнала

являются первичные гравитационные волны, так что амплитуда В-моды сигнала является прямым измерением фоновой гравитационной волны и, таким образом, масштаба энергии инфляции. Успешное детектирование могло бы стать не только беспрецедентным открытием, но также и непосредственным началом работы с физикой, изучающей самые ранние наблюдаемые мгновения нашей Вселенной.

Рисунок 2 изображает угловые спектры двух мод СМВ-поляризации. Е-моды были реально детектированы, ряд экспериментов позволил оценить их спектр и, таким образом, ограничить возможные значения космологических параметров.

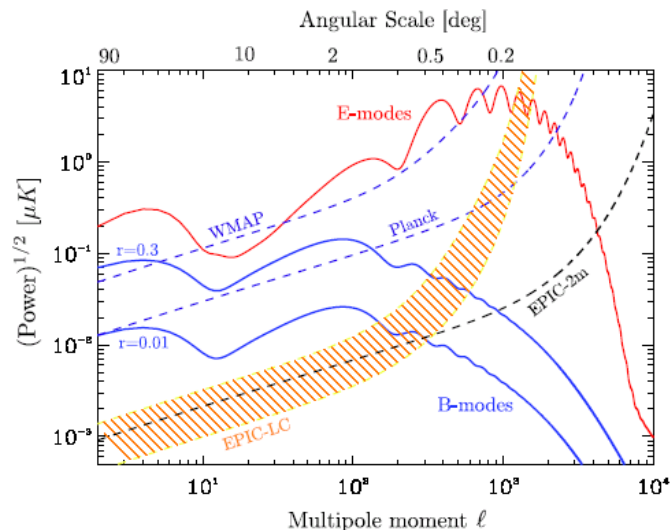


Рисунок 2: Предсказанные спектры Е- и В-мод (по вертикали – мощность; по горизонтали вверху – угловая шкала в град., внизу – номер мультипольного момента). Сплошные голубые кривые, изображающие В-моды, помеченные как  $r=0.3$  и  $r=0.01$ , соответствуют амплитудам строго ниже этих пределов и получены на основании поляризационных измерений со спутников. Заштрихованная область и пунктирная кривая, помеченная как “EPIC”, показывают уровни шума для двух возможных реализаций этой спутниковой миссии [4]. Пунктирные кривые, помеченные как “WMAP” и “Planck” соответствуют статистическим границам шума для этих спутников после работы в течение 9 лет и 1 года, соответственно. Все кривые шума усреднены по области  $\Delta l = 0.3l$ .

Спектр первичной В-моды имеет форму с двумя вершинами, первая соответствует большим угловым масштабам, она сформирована в конце Темных Веков, а вторая – углом, связанным с эпохой разделения электронов и фотонов в период рекомбинации. Амплитуда В-моды спектра неизвестна, поскольку инфляционные модели образуют диапазон предсказаний для амплитуды первичных гравитационных волн. Не существует технических ограничений [2] для достижения чувствительности, необходимой для детектирования  $r$  до  $10^{-3}$ . Ближнее астрофизическое излучение будет подавлено при такой чувствительности, но различные модели, использующие те или иные техники, показывают, что устойчивое детектирование  $r$  до уровня 0.01 – ключевой порог, обозначенный теоретическими моделями – достижимо для предстоящей спутниковой миссии [3].

Кроме этой основной научной ветви, измерения поляризации СМВ станет также побудительным импульсом для неинфляционной науки. Эти измерения определяют гравитационный потенциал вдоль линии взгляда на поверхность последнего рассеяния [5], таким образом ограничивающие модели темной энергии и, возможно, выявляющие исчезающие гравитационные потенциалы, формируемые массивными нейтрино. Поляризация СМВ будет также ограничивать реионизацию, отмечающую конец Темных Веков [6], и даст информацию о распределении магнитных полей в и вне нашей Галактики [7].

## **V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Поляризация космического микроволнового фона предлагает выдающуюся возможность пролить первый свет на физику, которая сформировала нашу Вселенную. Экспериментаторы показали, что координированная атака на эту проблему в течении предстоящего десятилетия, видимо, приведет к детектированию первичных гравитационных волн – в связи с чем возникнет обширная информация относительно новой физики при ультра-высоких масштабах энергии – или существенно ограничит сценарии, отвечающие за происхождение нашей Вселенной.

## **ССЫЛКИ**

- [1] D. Baumann et al. [CMBPol Study Team Collaboration], “CMBPol Mission Concept Study: Probing Inflation with CMB Polarization,” arXiv:0811.3919 [astro-ph].
- [2] J. Bock et al., “Task Force on Cosmic Microwave Background Research,” (2006), astro-ph/0604101.
- [3] J. Dunkley et al., “CMBPol Mission Concept Study: Prospects for polarized foreground removal,” arXiv:0811.3915 [astro-ph].
- [4] J. Bock et al., “The Experimental Probe of Inflationary Cosmology (EPIC): A Mission Concept Study for NASA’s Einstein Inflation Probe,” arXiv:0805.4207 [astro-ph].
- [5] K. M. Smith et al., “CMBPol Mission Concept Study: Gravitational Lensing,” arXiv:0811.3916 [astro-ph].
- [6] M. Zaldarriaga et al., “CMBPol Mission Concept Study: Reionization Science with the Cosmic Microwave Background,” arXiv:0811.3918 [astro-ph].
- [7] A. A. Fraisse et al., “CMBPol Mission Concept Study: Foreground Science Knowledge and Prospects,” arXiv:0811.3920 [astro-ph].