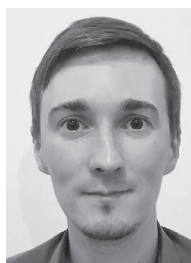


# К физике высоких энергий на гравитационных волнах. Точная космология и наблюдательные данные

**Н**акопление сведений к концу XX в. привело к формулировке современной стандартной космологической модели –  $\Lambda$ CDM, которая описывает эволюцию Вселенной, используя всего лишь 6 независимых параметров, и наилучшим образом соответствует всем известным наблюдательным данным.

Согласно этой модели, эволюция Вселенной началась из состояния плотной горячей плазмы, где все пространство было заполнено частицами высокой энергии, взаимодействующими между собой. В это раннее время космическое пространство расширялось монотонно в соответствии с теорией гравитации Эйнштейна. Со временем пространство увеличилось в размерах, что привело к понижению температуры плазмы. Когда Вселенная достигла возраста около 380 тыс. лет, энергия плазмы упала до такого уровня, что электроны и протоны начали объединяться, образуя первые атомы в процессе рекомбинации. Дальнейшее расширение и соответствующее остывание привели к уменьшению вероятности рассеяния фотонов, что сделало космическое пространство прозрачным для видимого света. Именно эти ранние фотоны, начавшие свое свободное путешествие по мирозданию после процесса рекомбинации, получили название реликтового излучения. Современные наблюдательные установки сегодня регистрируют эти реликтовые фотоны после их странствий на протяжении 13 млрд лет в виде космического микроволнового излучения.

Его исследование стало ключевым шагом в понимании эволюции Вселенной от периода рекомбинации до наших дней, фактически заложив основу для «точной космологии» [1]. Анализ данных, полученных от реликтового излучения, позволил ученым достичь большой точности космологических



**Иван Рыбак,**  
научный сотрудник Центра  
астрочастиц и физики высоких  
энергий университета  
Сарагосы (Испания), Института  
астрофизики и космических  
наук, Порту (Португалия), Ph.D

параметров нашей Вселенной. Например, на *рис. 1* иллюстрируется, как миссии WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) и «Планк» значительно улучшили точность определения постоянной Хаббла.

Стандартная космологическая модель  $\Lambda$ CDM предоставляет нам хорошее теоретическое описание практически всех явлений, происходящих от образования первых атомов водорода до настоящего момента. Однако большой фундаментальный интерес вызывают процессы, происходившие в самом раннем периоде Вселенной, задолго до рекомбинации. Этот период должен описываться физикой высоких энергий. Но человеческие знания о фундаментальных взаимодействиях во многом ограничены ресурсами ускорителей частиц в лабораториях. Таким образом, отсутствие прямого доступа к изучению таких явлений представляет сложную задачу для теоретиков, которым приходится экстраполировать имеющиеся знания на физику высоких энергий. Недавние открытия в области гравитационных волн могут помочь преодолеть эту преграду и позволить заглянуть в самый ранний период Вселенной для изучения фундаментальных взаимодействий.

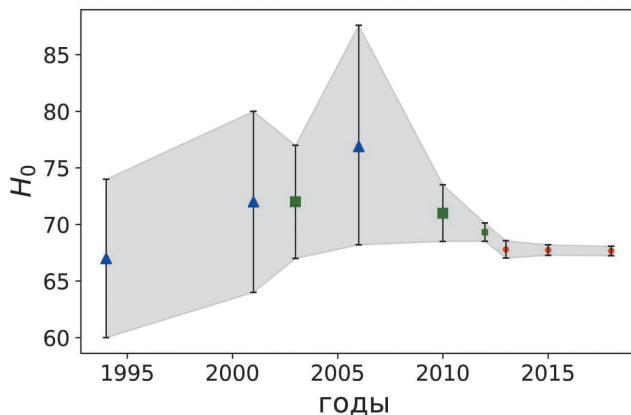


Рис. 1. Данные, отображающие значения постоянной Хаббла на протяжении различных лет: треугольниками обозначены данные от телескопов «Хаббл» и «Чандра», квадратами – от миссии WMAP, точками – от миссии «Планк» [1]

## Гравитационные волны

Коллаборация LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) и VIRGO (франко-итальянский детектор гравитационных волн, расположенный в Европейской гравитационной обсерватории EGO) 11 февраля 2016 г. анонсировала первое непосредственное детектирование гравитационных волн, вызванных слиянием черных дыр с массами, примерно равными 36 и 29 масс Солнца, на расстоянии 410 мегапарсек. Это историческое событие получило название GW150914, поскольку было зафиксировано 14 сентября 2015 г. [2]. В настоящее время регистрируется множество других событий прямого обнаружения гравитационных волн от двойных систем.

Такие волны являются прямым следствием теории гравитации Эйнштейна. Согласно ей, ускоренное движение массивных объектов вызывает возмущения в пространстве-времени, которые распространяются в виде излучения со скоростью света. Двойные системы звезд или черных дыр, вращающиеся вокруг центра масс, выступают источником таких возмущений. Распространяясь, гравитационные волны приводят к эффективному сжатию пространства в одном направлении и его растяжению в другом. В случае прохождения светового сигнала через зону воздействия гравитационной волны время достижения им детектора может различаться в зависимости от ориентации: при движении в одном направлении это происходит быстрее, чем в перпендикулярном ему [3]. Именно этот эффект был зафиксирован аппаратурой лазерно-интерфе-

рометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO и стал абсолютно новым методом изучения Вселенной.

В дополнение к привычному электромагнитному излучению, которое служило практически единственным источником информации для астрономических наблюдений до 2015 г., сегодня человечеству стало доступно использование гравитационного излучения, что буквально «открывает глаза» на ранее недоступные астрономические объекты. Кроме того, гравитационные волны, испущенные в процессах ранней Вселенной, которые происходили задолго до момента рекомбинации атомов, имеют потенциальную возможность быть обнаруженными в будущих миссиях. Это излучение позволит заглянуть в самый ранний период космоса, вплоть до момента его «рождения».

Совокупность гравитационных сигналов от различных астрономических источников формирует стохастический гравитационный фон, который предполагается существующим повсюду, подобно реликтовому электромагнитному излучению.

Детектирование и изучение этого фона может привести к такому же скачку развития физики и понимания Вселенной, которое случилось благодаря реликтовому излучению фотонов. Возможно, что это открытие случится уже в ближайшее время вследствие изучения массива данных от миллисекундных пульсаров. Наблюдательные миссии NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves), EPTA (European Pulsar

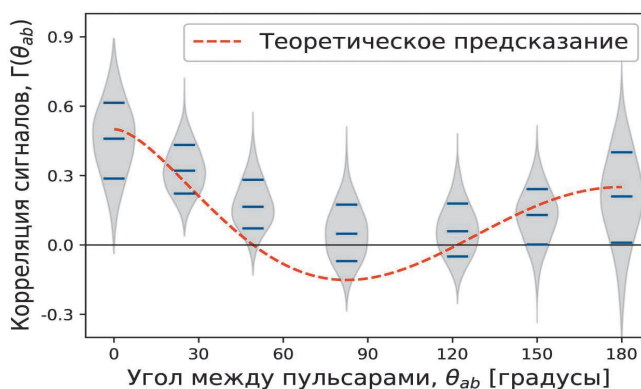


Рис. 2. Нормированная кривая Хеллингса – Даунса (штриховая линия), полученная на основе Байесовского анализа данных, собранных миссией NANOGrav за 15 лет. Вертикальные графики изображают апостериорные функции плотности с горизонтальными чертами, соответствующими их медианному значению и стандартному отклонению. График построен с использованием общедоступных данных, предоставленных NANOGrav на ресурсах <https://nanograv.org/science/data> и <https://github.com/nanograv>

Timing Array), PPTA (Parkes Pulsar Timing Array) и CPTA (Chinese Pulsar Timing Array) анонсировали возможность детектирования стохастического гравитационно-волнового фона в июне 2023 г. [4].

Идея использования пульсаров для регистрации гравитационного излучения была впервые предложена космологом и астрофизиком Михаилом Сажиным еще в 1978 г. [5]. Дальнейшее развитие этой концепции, связанной с набором пульсаров, расположенных под разными углами, привело к однозначному предсказанию, которое должно проявиться в виде квадрупольной корреляции, представленной кривой Хеллингса – Даунса (рис. 2) [6]. Данный метод наблюдения гравитационного фона основан на физическом принципе, аналогичном применяемому в лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO. Пульсары в данном случае служат источниками электромагнитных сигналов, проходящих на Землю с очень точной периодичностью. Их прохождение от пульсаров через гравитационные волны вызывает запаздывание или опережение прибытия импульса на Землю из-за пространственно-временной «ряби», обусловленной наличием стохастического гравитационного фона. Если рассматривать сигналы от пульсаров в одном направлении, то их запаздывание или опережение должно коррелировать положительно. В то же время сигналы от пульсаров, находящихся в перпендикулярных направлениях, будут иметь отрицательную корреляцию, известную как квадрупольная. Это ее характерное проявление – уникальный признак наличия стохастического гравитационного фона, предсказанный в работе [6]. Результаты сбора данных о корреляциях сигналов от пульсаров в течение 15 лет наблюдений миссией NANOGrav показано на рис. 2. Дальнейшее накопление информации от пульсаров позволит подтвердить или опровергнуть открытие стохастического гравитационного фона.

Массивы пульсаров по своей сути представляют собой природные интерферометры, аналогичные тем, которые используются в обсерватории LIGO на Земле. Однако расстояние между источником сигнала – пульсаром и приемником – Землей несоизмеримо больше, чем в случае лабораторных интерферометров LIGO. В результате гравитационные волны, обнаруживаемые с помощью пульсаров, имеют низкие частоты на уровне нГц, в то время как LIGO работает с частотами около 100 Гц. Для охвата диапазона гравитационных волн с промежуточными частотами между LIGO и массивами пульсаров предполагается использование проекта LISA (Laser Interferometer Space Antenna), который

будет ориентирован на частоты гравитационных волн порядка мГц. В таблице и на рис. 3 приведены диапазоны частот различных наблюдательных установок и источников гравитационных волн [7].

Детекторы	Частоты	Источники
Наземные установки: LIGO, VIRGO, KAGRA	104 – 1 Гц	Слияние черных дыр звездной массы, слияние нейтронных звезд в ближайших галактиках
Космические обсерватории: LISA, DECIGO	1 – 10-5 Гц	Слияние черных дыр звездной массы в удаленных галактиках
Массивы пульсаров: EPTA, IPTA, SKA	10-6 – 10-10 Гц	Слияние сверхмассивных черных дыр

Таблица. Диапазоны частот наблюдательных установок и источников гравитационных волн

## Отпечаток физики высоких энергий на гравитационном фоне

Астрономы и ранее обладали знаниями о черных дырах и нейтронных звездах. Однако благодаря обнаружению гравитационных волн, исходящих от двойных систем этих объектов, ученым удастся глубже понять их свойства и эволюцию. Гравитационное излучение может возникать не только от уже известных и хорошо изученных астрономических объектов. Высокоэнергетические процессы, происходившие на первоначальном этапе эволюции Вселенной задолго до рекомбинации, также могут быть потенциальными источниками гравитационных волн. Явления, происходившие в ней, представляют особый интерес с точки зрения фундаментальной физики, поскольку энергии в этот период значительно превосходят то, чего можно достичь с помощью ускорителей частиц. Благодаря гравитационным волнам (от ранней Вселенной) исследователи получают возможность изучения физики высоких энергий, которая ранее была им недоступна.

В ранней Вселенной выделяются 3 основных гипотетических источника гравитационных волн, обладающих наибольшим потенциалом для обнаружения: космологическая инфляция, фазовые переходы и космические струны. Ожидается, что частотный диапазон гравитационных волн, испускаемых этими процессами, будет находиться в пределах области исследования будущей миссии LISA.

Космическая инфляция представляет собой экспоненциально быстрое расширение Вселенной в самый ранний период ее существования. Уже в 1980-х гг.

стало очевидно, что для того, чтобы объяснить несколько ключевых наблюдательных характеристик (близкой к нулю кривизны Вселенной, однородности реликтового излучения и генерации первичных флуктуаций, которые послужили основой для формирования ее крупномасштабной структуры), необходима новая теория – инфляция. Она успешно решила эти проблемы и стала неотъемлемой частью стандартной модели космологии. Однако на сегодняшний день нет наблюдательных данных, подтверждающих предсказания модели ранней Вселенной. Флуктуации, возникшие в результате инфляции, также могут служить источником гравитационного стохастического фона. Некоторые ее реализации благодаря гравитационному излучению попадают в область чувствительности детекторов миссии LISA, что открывает перспективу исследования этого процесса в ближайшие 10 лет [8].

Другим физическим явлением, которое может стать источником гравитационного стохастического фона в ранней Вселенной, выступают фазовые переходы. Множество теоретических концепций, выходящих за рамки Стандартной модели физики частиц, предсказывают такую возможность при высоких значениях энергии. Если эти идеи верны, то фазовые переходы должны проявиться в высокоэнергетическом периоде эволюции Вселенной. В случае фазового перехода первого рода в ней образуются пузыри с новой фазой. Они расширяются и сталкиваются с пузырями, образовавшимися в других областях пространства, подобно кипячению воды. Эти процессы вызывают флуктуации в пространстве, создавая стохастический гравитационно-волновой фон – один из потенциальных кандидатов на обнаружение миссией LISA [8].

С ее же помощью потенциально возможно выявление одномерных топологических дефектов – космических струн, предсказанных еще в 1970-х гг. Интерес к данному объекту в космологии основывается на том, что высокоэнергетические расширения Стандартной модели физики частиц предполагают их существование на определенных этапах эволюции Вселенной. Например, один из способов разрешения сильной CP-проблемы в квантовой хромодинамике – объяснение, почему сильные взаимодействия инвариантны относительно зарядового сопряжения  $C$  и четности  $P$ , – предсказывает частицы под названием аксионы. Наличие этих частиц в ранней Вселенной связано с появлением космических струн. Некоторые модели, объясняющие наличие массы у нейтрино за счет механизма «качелей», сценарии теории великого объединения, такие как модели Пати – Салама и теория струн, также предполагают образование одномерных топологических дефектов [9].

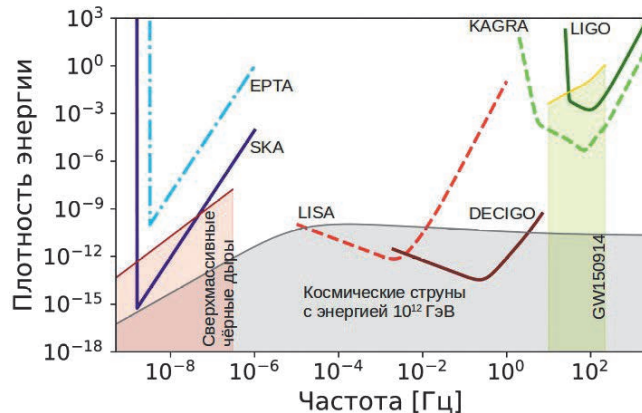


Рис. 3. Графики чувствительности детекторов гравитационного излучения. Наземные установки LIGO и KAGRA ориентированы на гравитационные волны высоких частот. Космические обсерватории LISA и DECIGO покрывают средний диапазон частот, а данные от массивов пульсаров, обозначенные проектами EPTA и SKA, исследуют низкочастотные гравитационные волны. Закрашенными областями отмечены источники гравитационных волн [7]

При построении использовались общедоступные данные, предоставленные платформой Gwplotter: <https://github.com/robsci/Gwplotter>

Таким образом, если космические струны будут обнаружены, они обеспечат грандиозный прорыв в понимании физики высоких энергий и позволят открыть явления, которые имели место во Вселенной. В противном случае это исключит множество моделей физики высоких энергий [8]. Пример теоретического предсказания стохастического гравитационно-волнового фона от космических струн изображен на рис. 3. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Turner M.S. The road to precision cosmology / M.S. Turner // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2022. Vol. 72. P. 1–35.
2. Abbott B.P. Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914 / LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / B.P. Abbott // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 241102.
3. The LIGO Scientific Collaboration, Advanced LIGO // Class. Quantum Grav. 2015. Vol. 32. 074001.
4. Agazie G. The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background / G. Agazie et al // ApJL. 2023. Vol. 951. L8.
5. Сажин М.В. Возможности детектирования сверхдлинных гравитационных волн / М.В. Сажин // Астрономический журнал. 1978. Т. 55, №1. С. 65–68.
6. Hellings R.W. Upper limits on the isotropic gravitational radiation background from pulsar timing analysis / R.W. Hellings, G.S. Downs // Astrophys. J. 1983. Vol. 265. P. L39–L42.
7. Moore C.J. Gravitational-wave sensitivity curves / C.J. Moore, R.H. Cole, C.P.L. Berry // Class. Quantum Grav. 2015. Vol. 32. 015014.
8. Caprini C. Cosmological backgrounds of gravitational waves / C. Caprini, D.G. Figueroa // Class. Quantum Grav. 2018. Vol. 35. 163001.
9. Copeland E.J. Cosmic strings and superstrings / E.J. Copeland, T.W.B. Kibble // Proc. R. Soc. 2010. Vol. 466. P. 623–657.