



# КОСМОЛОГИЯ: ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ



**Юрий Выблый,**  
ведущий научный  
сотрудник Центра  
теоретической физики  
Института физики  
им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси,  
кандидат физико-  
математических наук

Космологические модели, то есть решения уравнений гравитационного поля, описывающие Вселенную, рассматривались сразу после появления общей теории относительности. В основе этих моделей лежит так называемый космологический принцип – построенное на астрономических наблюдениях предположение о пространственной однородности и изотропности Вселенной в больших масштабах.

**В** 1922 г. русский ученый А. Фридман предложил версию нестационарной расширяющейся Вселенной, в которой расстояния между космическими объектами менялись с течением времени. Эта модель приводила к эффекту красного космологического смещения частот в спектрах галактик и получила наблюдательное подтверждение после открытия американским астрофизиком Э. Хабблом в 1929 г. пропорциональности величины красного смещения в спектрах галактик расстоянию до них (закон Хаббла).

Важным подтверждением данной идеи является существование реликтового микроволнового излучения, которое в высокой степени изотропно, то есть имеет одинаковую энергию (или температуру) по всем направлениям в пространстве. Оно образовалось на ранней стадии эволюции Вселенной, когда электромагнитное излучение смогло отделиться от вещества. В 1948 г. этот

феномен предсказали физики Г. Гамов, Р. Альфер и Р. Герман, а в 1965 г. он был открыт их американскими коллегами А. Пензиасом и Р. Вильсоном [1].

Реликтовое излучение изотропно только с точностью примерно 0,01%. В 1992 г. на основании анализа данных эксперимента РЕЛИКТ-1 российские ученые объявили об открытии анизотропии такого излучения. Чуть позднее флуктуации температуры обнаружили американские астрофизики благодаря данным спутникового эксперимента COBE и WMAP. Результаты исследования анизотропии реликтового излучения, а также его возможной поляризации весьма важны для построения теоретических моделей ранних стадий космологической эволюции [2].

Благодаря однородности и изотропности пространства метрический тензор для космологического решения уравнений в общем виде содержит одну неизвестную функцию времени, называемую масштабным фактором, и один параметр,

обуславливающий постоянную кривизну трехмерного пространства, которая может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Указанные неизвестные величины должны быть найдены с помощью системы уравнений Эйнштейна и уравнения состояния материи, которая существует на разных этапах эволюции Вселенной. Требуемая информация должна быть получена путем астрофизических наблюдений.

Исторически первый и очень важный способ определения этих величин – измерение красного смещения источников излучения света в зависимости от расстояния до них, позволяющее установить, как меняется со временем скорость изменения масштабного фактора, называемая параметром Хаббла, и параметр ускорения расширения. Возникает вопрос: как измерять расстояние от источника излучения до наблюдателя? Для относительно близких к нам источников астрономы предложили ряд косвенных методов, которые, однако, не пригодны для очень далеких звезд и галактик, а именно такие нужны для космологии. Решение задачи было найдено в сравнении видимой и абсолютной яркости источника (энергия, излучаемая звездой во всех направлениях за секунду). Оказалось, что существуют звездные объекты, у которых в силу одинакового механизма их свечения абсолютная яркость одинакова, где бы они ни находились. Такими наиболее удобными источниками оказались так называемые сверхновые типа Ia [1], получившие название «стандартных свечей», и, измерив их видимую светимость, можно определить расстояние до них. Оно называется фотометрическим, а его зависимость от параметра красного смещения – диаграммой Хаббла.

Измерения красного смещения далеких источников и ряд других экспериментов хорошо под-

тверждали космологический сценарий общей теории относительности, согласно которому в нынешнюю эпоху Вселенная расширяется с постоянным замедлением. Однако в 1998 г. при наблюдениях за совокупностью сверхновых типа Ia было обнаружено, что на диаграммах Хаббла они имеют меньшую, чем предсказывалось, яркость [3, 4]; в дальнейшем эти результаты были неоднократно подтверждены. Отсюда следует вывод, что Вселенная расширяется не замедленно, как этого требуют уравнения общей теории относительности при наличии обычной материи, а ускоренно. Дальнейшие измерения подтвердили это открытие, за которое в 2011 г. астрофизики С. Перлмуттер, Б.П. Шмидт и А. Рисс получили Нобелевскую премию по физике.

Для моделирования этого явления было введено в рассмотрение понятие «темной энергии» – однородной и изотропной субстанции, обладающей только гравитационным взаимодействием и отрицательным давлением, если рассматривать ее как идеальную жидкость. Наиболее естественно введение в уравнения Эйнштейна так называемого  $\Lambda$ -члена (где  $\Lambda$  – постоянная величина, называемая космологической константой).

Точные измерения темпа ускорения расширения должны сыграть решающую роль в установлении модели темной энергии. Именно она в современную эпоху вносит основной вклад в энергетический состав Вселенной. Имеющиеся наблюдательные данные и космологические парадигмы вместе с теорией элементарных частиц позволили создать сценарий эволюции мироздания: наблюдаемая нами сейчас Вселенная возникла приблизительно 13,8 млрд лет назад из некоторого начального состояния, названного Большим взрывом, и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается. В раннем своем состоя-



Рис. 1. Изображение остатка сверхновой типа Ia, сделанное при помощи космической обсерватории «Чандра»  
Источник: <http://spacegid.com>



Рис. 2. Космическая обсерватория «Планк» на пути к точке Лагранжа  $L_2$   
Источник: [http://esa.int/Enabling\\_Support/operations/Planck](http://esa.int/Enabling_Support/operations/Planck)

нии она представляла собой высокооднородную и изотропную среду с очень высокими плотностью энергии, температурой и давлением (горячая Вселенная) [5]. В результате расширения и охлаждения в ней происходили фазовые переходы, приводящие к образованию различных элементарных частиц, частиц темной материи, барионов (протонов и нейтронов), атомов, а затем сгущений барионной материи в виде звезд, планет и галактик. По мере космологического расширения и падения плотности остальных видов материи начинает доминировать темная энергия.

Для того чтобы описать космологический сценарий – эволюцию Вселенной от ее рождения до настоящего времени, – необходимо знать, как устроена правая часть уравнений Эйнштейна, то есть понимать эволюцию материи. Эту информацию дает нам астрофизика. Наиболее важной здесь является ее часть, касающаяся очень далеких высокоэнергетических звездных объектов, галактик и их соединений. Таким образом, астрофизики получили информацию о другой весьма существенной и загадочной компоненте Вселенной – темной материи [6].

Исследование скоплений галактик в начале 1930-х гг. привели американского астрофизика Ф. Цвикки к выводу о существовании скрытой массы, ненаблюдаемой в электромагнитном диапазоне Вселенной. В начале 1970-х гг. было показано значительное несоответствие масс и светимостей в таких скоплениях, а также получены данные о движении материи во внешних областях самих галактик. Оказалось, что скорость их кругового движения не уменьшается по мере движения от центральных областей к периферийным, как должно быть при сосредоточенности массы в светящихся областях в соответствии с ньютоновским приближением общей теории относительности. Эти и ряд других наблюдательных данных сформировали в середине 1970-х гг. мнение о наличии темной материи, природа которой неизвестна. Согласно одной модели, горячая темная материя называется так потому, что она отщепляется от обычного вещества, будучи релятивистской. С другой стороны, к началу 1980-х гг. изучались новые гипотетические частицы, которые могли составлять холодную темную материю, отделяемую от другого вещества Вселенной, будучи нерелятивистской. Было продемонстрировано, что только в таких моделях появляется тонкая структура сверхскоплений (так назы-

ваемые филаменты, или нити из галактик), что стало решающим аргументом в ее пользу. Совокупность наблюдательных данных по измерению пекулярных скоростей галактик (дополнительных к хаббловскому расширению) указывали, что плотность темной материи составляет примерно 0,2–0,3 критической космологической плотности, а барионной материи – около 0,05, так что большая часть гравитирующей массы во Вселенной имеет небарионный характер.

После открытия и подтверждения ускоренного космологического расширения и учета существования темной материи сформировалась стандартная космологическая  $\Lambda$ CDM-модель (модель с  $\Lambda$ -членом и холодной темной материей), в которой, согласно опубликованным в 2015 г. данным наблюдений космической обсерватории «Планк», общая энергия Вселенной состоит (с точностью до округлений) на 69,1% из темной энергии, на 25,9% из темной материи и только на 5% из барионной материи.

Очень важную информацию о структуре ранней Вселенной и о космологических параметрах дает исследование анизотропии реликтового излучения. В 2018 г. после обработки данных космической обсерватории «Планк» было получено уточненное значение постоянной Хаббла  $H_0$  [7], которое значительно отличается от ее современного значения, полученного из анализа диаграмм Хаббла [8]. Это различие получило название  $H_0$ -расхождение ( $H_0$ -tension), оно соответствует более четырем стандартным отклонениям ( $4\sigma$ ) и пока не получило удовлетворительного объяснения. В физике элементарных частиц в таких случаях говорят о «возможном выходе за рамки Стандартной модели» и об «указании на новую физику».

Следует отметить, что  $\Lambda$ CDM-модель – не единственная в рамках общей теории относительности. Ее определенным недостатком является отсутствие физической интерпретации  $\Lambda$ -члена. В настоящее время она удовлетворяет всей совокупности наблюдательных данных, но увеличение точности астрофизических измерений должно показать, действительно ли  $\Lambda$ -член должен быть постоянным. Если окажется, что это не так, в правую часть уравнений Эйнштейна придется добавить тензор энергии-импульса какой-то другой материальной субстанции. Наиболее простым и естественным кандидатом на эту роль является действительное скалярное поле, которое не взаимодействует с электромагнитным. В литературе

такие теории гравитации называются скалярно-тензорными, они рассматриваются применительно к космологии на протяжении длительного времени [5]. Проблема этого подхода состоит в выборе уравнения скалярного поля, то есть в неоднозначности теории. С другой стороны, скалярно-тензорные теории являются более гибкими, чем  $\Lambda$ CDM-модель, где ускоренное расширение в дальнейшем будет происходить вечно.

В частности, эти теории допускают модель пульсирующей Вселенной, когда расширение сменяется сжатием и последующим «отскоком», который является аналогом Большого взрыва [9]. Не исключено, что скалярное поле как дополнительная компонента гравитационного взаимодействия – это и есть «новая физика». Конечно, нужно иметь в виду, что сценарии будущей космологической эволюции могут обсуждаться только на основе моделей, хорошо подтвержденных наблюдательными данными в прошлом.

Космология, основанная на эйнштейновской теории гравитации и огромном массиве астрофизических наблюдений, продолжает активно развиваться, ставя перед учеными все новые вопросы. Важнейшие проблемы, такие как природа темной энергии и темной материи, проблемы ранней Вселенной и будущей эволюции, ждут своего решения. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вейнберг С. Космология. – М. УРСС, 2013.
2. Смут Дж. Ф. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, №12. С. 1294–1317.
3. Riess A.G. [et al.]. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant // The Astronomical journal. 1998. Vol. 116. P. 1009–1038.
4. Perlmutter S. Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae // The Astrophysical journal. 1999. Vol. 517. P. 565–586.
5. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: теория горячего Большого взрыва. – М. 2016.
6. Drees M., Gerbier G. [Particle Data Group] 26. Dark matter // Chinese Physics C, 2016. Vol. 40. 100001.
7. Aghanim N. [et al.]. [Planck Collaboration] Planck 2018 results, VI Cosmological parameters. Astronomy and Astrophysics // 2020. Vol. 641. P. A6.
8. Riess A.G. [et al.]. Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond Lambda CDM // The Astrophysical journal. 2019. Vol. 876. P.85
9. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. – М. 2016.

В отличие от других областей физики, астрономия лишена возможности проводить эксперименты в строгом смысле этого слова и полагается на регистрацию и анализ наблюдательных данных, полученных из космоса. По сути, сама Вселенная является огромным экспериментом, наблюдение за которым помогает ученым понять физические процессы. За последние полвека благодаря прогрессу технологий, которые помогают воплотить научные идеи в измерения астрономических событий, произошло стремительное развитие этой области науки. Об этом свидетельствует, например, список нобелевских лауреатов по физике, где результаты, полученные учеными в астрономии, все чаще заслуживают высокую оценку научного сообщества. Эти успехи можно объяснить двумя ключевыми факторами. Во-первых, Вселенная выступает привлекательным «испытательным полигоном» для проверки всевозможных теоретических идей в физике: здесь есть возможность наблюдать физические процессы в экстремальных условиях, недоступных в экспериментальных установках, созданных человеком на Земле. Во-вторых, современное развитие технологий позволяет получать сведения с невероятной точностью.