

# Археология Вселенной: от плазменной эры к микроволновому излучению



**Сергей Черкас,**  
ведущий научный  
сотрудник  
Института ядерных  
проблем БГУ,  
кандидат физико-  
математических  
наук



**Владимир Калашников,**  
научный сотрудник  
Норвежского  
научно-технического  
университета, кандидат  
физико-математических  
наук

Археологи прилагают огромные усилия, изучая реликвии древнего мира, и задаются вопросом, имеют ли смысл их изыскания, если, согласно известной метафоре, невозможно войти в одну и ту же реку дважды. Кажется, что ответ кроется в понимании того, что будущее, настоящее и прошлое тесно переплетены, объединенные общими идеями или концепциями. В античном мире космос рассматривался как последний абсолют, источник самодостаточности. Следовательно, гармония с ним и его понимание считались ключом к истинному счастью. Однако стоит помнить, что это лишь античная, языческая и дохристианская перспектива, которую не следует воспринимать слишком буквально.

В глубине своей Вселенная складывается из удивительно простых элементов: она есть не что иное, как вспышка плазмы. Занимательно, что подобные явления мы можем воспроизвести и на нашей планете. Так, на *рис. 1* представлен момент, когда пропущенный через две тонкие медные проволоки электрический ток вызывает взрыв. Этот процесс порождает практически чистую медную плазму с температурой около 5000 К, богатую ионами меди различной валентности и электронами.

Величественная эволюция мироздания началась с момента, когда ее температура была невообразимо высока – достигала величины, сопоставимой с массой Планка, оцениваемой по порядку в  $10^{19}$  ГэВ, что эквивалентно примерно  $10^{32}$  К. С течением времени эта цифра снизилась до скромных 3 К реликтового излучения, окутывающего нас сегодня. Отталкива-

ясь от школьных знаний, мы понимаем температуру как меру средней кинетической энергии частиц в состоянии теплового равновесия.

На пороге технологического прогресса стоит пуск ускорителя FCC в 2025 г., обещающего достигнуть энергий в 100 ТэВ, что приблизит нас к пониманию поведения материи при таких экстремальных условиях. Однако важно осознавать, что данные, получаемые в результате столкновений отдельных частиц в ускорителях, не дают полного представления о свойствах плазмы Вселенной в ее ранних периодах, ведь плазма была значительно более плотной, чем условия, воссоздаваемые в лабораториях.

При энергиях в  $10^{19}$  ГэВ мы сталкиваемся с огромным пробелом в знаниях, так как на данном этапе отсутствует теория квантовой гравитации, которая могла бы объяснить физические процессы,

происходящие при подобных космических масштабах энергии. Понимание физических явлений начинает оформляться на уровне температур в 146 ГэВ, соответствующих массе топ-кварка – самой массивной частицы в рамках Стандартной модели физики частиц. Среди других «тяжеловесов» выделяются хиггсовский бозон (с массой 125 ГэВ) и векторные бозоны (80 и 90 ГэВ). Таким образом, в области сотен ГэВ можно предположить, что плазма будет состоять из элементарных частиц Стандартной модели. Впрочем, создать плазму с температурой 146 ГэВ в лабораторных условиях нам вряд ли под силу, поскольку давление в ней при заметной плотности окажется запредельным. Тем не менее, на сегодняшний день в Дубне возводится ускоритель для столкновений тяжелых ионов, включая ядра гольмия и других элементов. В ходе центральных столкновений таких частиц ожидается формирование кварк-глюонной плазмы.

В масштабах Вселенной плазма подобного рода остается скрытой от наблюдений, так как не пропускает фотоны. С падением температуры начинается процесс смещения равновесия в направлении формирования стабильных частиц, что приводит к космологическому нуклеосинтезу. В его результате возникают протоны, дейтерий, гелий и ряд легких элементов. Их конкретное количественное распределение зависит от законов расширения Вселенной и отношения количества барионов к фотонам. До недавнего времени предполагалось, что стандартная

космологическая модель, известная как  $\Lambda$ CDM, адекватно описывает этот процесс расширения. Однако свежие данные, полученные космическим телескопом «Джеймс Уэбб», свидетельствуют о существовании полностью сформированных галактик уже на стадии  $z=7$ , что ставит под сомнение предпосылки модели  $\Lambda$ CDM о временных рамках формирования галактик.

В *таблице* представлены итоги процесса нуклеосинтеза, основанные на параметрах стандартной космологической модели, а также на одной из альтернативных теорий – модели с замедленным расширением Вселенной, известной как теория доминирования вакуумных флуктуаций (VFD). В рамках последней давление и плотность вакуума квантовых полей играют ключевую роль в определении закона, по которому это происходит.

Было тщательно подобрано количество барионной материи – 0,05 (в единицах критической плотности Вселенной) для модели и 0,87 для VFD, чтобы точно воссоздать наблюдаемое соотношение между гелием и водородом. В рамках стандартной космологической модели сценарии количества дейтерия согласуется с имеющимися данными, однако наблюдается трехкратное избыточное производство лития-7. Модель VFD, в свою очередь, не способна синтезировать дейтерий, однако предсказывает слегка завышенное количество лития, что вплотную приближается к приемлемым значениям.

Телескоп «Джеймс Уэбб», хотя иногда поражает воображение и созданием великолепных снимков, является в первую очередь спектрометром, предназначенным для исследования космоса. Открытие им объектов с повышенным содержанием дейтерия могло бы указать на существование не учтенных космологическими моделями механизмов синтеза данного элемента. Одним из впечатляющих достижений телескопа стало обнаружение воды в газовом облаке Хамелеон I, фотография которого приводится на *рис. 2*. Это облако находится на ранних стадиях звездообразования, ввиду чего предполагается, что кислород, обнаруженный в его составе, имеет космологическое происхождение. Из анализа данных, представленных в *таблице*, становится очевидно, что количество элементов CNO, сформированных на космическом уровне в рамках модели VFD, заметно превышает аналогичные показатели модели  $\Lambda$ CDM. Помимо этого, в других газовых облаках, которые еще не подверглись процессу звездообразования, были обнаружены органические молекулы, что подтвердило предположение о возможности синтеза элементов CNO космологически.

	$\Lambda$ CDM	VFD
H	0,75	0,75
$Y_p=4Y_{He}$	0,25	0,25
$D/H \times 10^5$	2,6	$<10^{-25}$
${}^3\text{He}/H \times 10^5$	1,1	$<10^{-8}$
$T/H \times 10^8$	7,9	$<10^{-32}$
$({}^7\text{Li} + {}^7\text{Be})/H \times 10^{10}$	5,7	2,1
${}^6\text{Li}/H \times 10^{14}$	1,2	$<10^{-25}$
${}^9\text{Be}/H \times 10^{19}$	9,2	$<10^{-34}$
${}^{10}\text{B}/H \times 10^{21}$	2,9	$<10^{-8}$
${}^{11}\text{B}/H \times 10^{16}$	3,3	$<10^{-10}$
$\text{CNO}/H \times 10^{16}$	8,0	$5,6 \times 10^7$

*Таблица.* Результаты моделирования распространенности элементов, синтезированных в результате космологического нуклеосинтеза, для  $\Lambda$ CDM модели при количестве барионной материи  $\Omega_b=0,05$  и VFD модели при  $\Omega_b=0,87$ . Величина  $\Omega_b$  представляет собой отношение плотности барионной материи к критической плотности материи во Вселенной. Распространенности всех элементов, кроме водорода и гелия даны по отношению к водороду.

Рис. 1. Поздняя стадия электрического взрыва двух медных проволочек



Рис. 2. Молекулярное облако Хамелеон I, в котором телескоп «Джеймс Уэбб», обнаружил молекулы воды. Фото: собственность НАСА



Рис. 3. Медная копия самой ранней скульптуры лошади. Оригинал, сделанный около 30 тыс. лет назад из кости мамонта, был найден в Баден-Вюртемберге, Германия



Величественная глава космической истории открывается перед нами через изучение микроволнового реликтового излучения – света из самой далекой точки, доступной нашему взору, от поверхности последнего рассеяния. Он начал свой путь к нам в момент, когда, охладившись до примерно 3000 К, в сочетании с рекомбинацией водорода, Вселенная стала прозрачной, позволяя фотонам свободно путешествовать сквозь пространство и время. Измерение расстояния до поверхности последнего рассеяния предпочтительно выражать через красное смещение  $z$  – загадочный показатель, который рассказывает нам о древности областей пространства-времени, через которые прошел свет: чем выше красное смещение, тем старше исследуемая область. Анализ флуктуаций анизотропии микроволнового излучения раскрывает картину акустических пиков, архитектурных величин космоса, угловой размер которых оценивается примерно в полградуса. Эти пики – свидетельства колебаний плотности в ранней Вселенной, создавшие структуру космоса, в котором мы существуем.

В зарисовке космической Одиссеи, с одной стороны, есть возможность измерить угол и раскрыть тайну величины характерной неоднородности в тот момент времени, когда Вселенная переживала эпоху рекомбинации; с другой – открывается перспектива исследовать масштабы мироздания, анализируя массивы распределения космических тел одного рода, таких как каталоги галактик, и из этих глубин выта-

щить ключ к пониманию масштабов характерной неоднородности. Принято верить, что они должны гармонизировать друг с другом. И в реалиях стандартной космологической модели они действительно находят свое взаимное отражение.

Однако в теории медленного расширения Вселенной горизонт на заре рекомбинации предстает чрезвычайно обширным и не может служить мериллом для измерений. В то же время толщина поверхности последнего рассеяния, характеризующая время рекомбинации, оказывается ключом к пониманию углового масштаба флуктуаций реликтового микроволнового излучения, предоставляя необходимую меру для их оценки. И здесь вступает в игру дуализм масштабов, ведь в эпоху рекомбинации существует двойственность скоростей распространения волн в космической плазме. Одна, более быстрая, скользит по плазме, в то время как вторая, медленная, проходя по нейтральному водороду, раскрывает перед нами еще один уровень понимания структуры макрокосмоса.

В наш век, наполненный многочисленными открытиями, Вселенная предстает загадочной книгой, полной тайн. Это напоминает образ летящей лошади с ее изяществом, лаконичностью и внушительной древностью в 40 тыс. лет – великолепная метафора для понимания мироздания. С одной стороны, это воплощение материального мира, основанного на заметных и знакомых нам образах, с другой – оно переносит нас за пределы обыденного, напоминая, что даже отсутствие видимых средств для полета, таких как крылья, не является препятствием для стремления вперед через время и пространство. Так и Вселенная, переполненная необъясненными явлениями, продолжает вдохновлять нас на поиск ответов, открывая новые горизонты для размышлений и исследований. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лосев А.Ф. Античный космос и современная наука / А.Ф. Лосев. – Москва, 2023.
2. A.E. Barysevich, S.L. Cherkas. Testing the equation of state and electrical conductivity of copper by the electrical wire explosion in air: experiment and magnetohydrodynamic simulation // *Physics of Plasmas*. 2011. Vol. 18, №5, P. 052703.
3. B.S. Haridasu, S.L. Cherkas, V.L. Kalashnikov. Reference level of the vacuum energy density of the Universe and astrophysical data // *Fortschritte der Physik*. 2020. Vol. 68, №7, P. 2000047.
4. S.L. Cherkas, V.L. Kalashnikov. AEther as an Inevitable Consequence of Quantum Gravity // *Universe*. 2022. №8(12). P. 626.