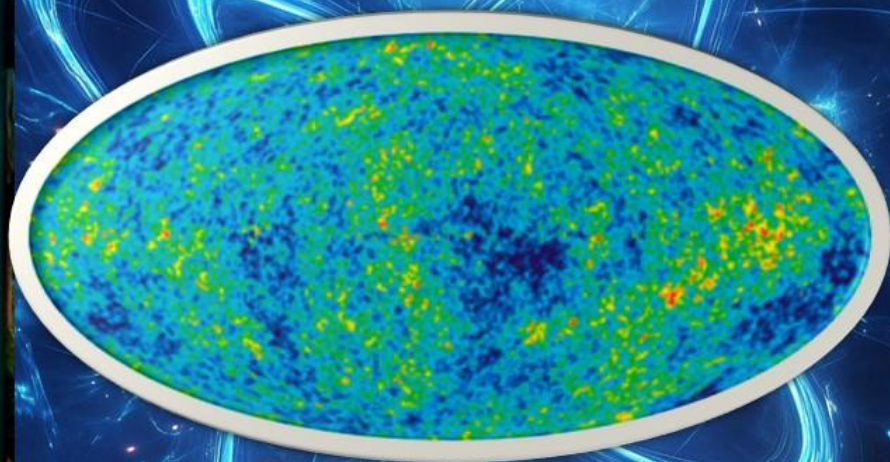


**БОРИС КРИГЕР**



**РЕЛИКТОВОЕ  
ИЗЛУЧЕНИЕ**

БОРИС КРИГЕР

# РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



© 2025 Boris Kriger

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from both the copyright owner and the publisher.

Requests for permission to make copies of any part of this work should be e-mailed to [krigerbruce@gmail.com](mailto:krigerbruce@gmail.com)

Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc.

*Реликтовое излучение*

Эта книга доступно объясняет, как слабый микроволновый сигнал, воспринимаемый когда-то как помеха, стал решающим доказательством горячего Большого Взрыва и позволил ученым реконструировать раннюю историю Вселенной. В книге подробно разбираются механизмы формирования реликтового излучения, его спектр, анизотропии и влияние на развитие крупномасштабных структур космоса. Читатель узнает, как изучение реликтового фона дало представление о темной материи и темной энергии, подтвердило инфляционную теорию и помогло определить возраст и геометрию Вселенной. Эта книга делает сложную космологию понятной и захватывающей, раскрывая, как фундаментальные законы природы проявляются в каждом уголке бескрайнего космоса.

## РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В тот день воздух над холмами Нью-Джерси был густ от летней влажности, а солнце, просачиваясь сквозь редкие облака, неторопливо нагревало металлические поверхности огромной рупорной антенны. Время двигалось неспешно, как то бывало в 1960-е, когда на дворе царила эра ламповой техники, транзисторы еще казались роскошью, а бумажные расчеты и карандашные чертежи оставались основой любой инженерной работы. Ничто не предвещало того, что день войдет в историю науки, и мысли занимали обыденные заботы – предстояло разобраться с досадным шумом, мешавшим измерениям.

Антенна, массивная и неуклюжая, стояла на устойчивых опорах, устремляясь своим огромным рупором в бескрайнее небо. Она предназначалась для исследования радиоизлучения, а потому любые помехи казались досадной случайностью, досадной, но, разумеется, объяснимой. Искажение сигнала казалось делом рук природы или, что вероятнее, голубей, оккупировавших конструкцию и, судя по всему, превративших ее в удобное место жительства.

Занимаясь очисткой антенны, приходилось соскребать липкие, въевшиеся в металл следы их жизнедеятельности, скрупулезно проверять каждый узел, чтобы не осталось ни малейшего источника помех. Тонкий слой перьевой пыли и высохшие комки птичьих экскрементов вызывали раздражение, но после долгих часов работы, наконец, появлялась надежда – антенна очищена, приборы настроены, теперь ничего не должно мешать эксперименту. Однако шум, едва заметный, но упорный, всё равно не исчезал.

Неизвестная помеха не поддавалась устранению. Проверялись все возможные источники – излучение от близлежащих городов, радиосигналы, даже фоновый шум земной атмосферы, но ничего не соответствовало упорно фиксируемому сигналу. В тот момент не приходило в голову, что этот самый шум – не просто помеха, а голос самой Вселенной, отголосок событий, произошедших миллиарды лет назад.

Только позже, осознав значение находки, стало ясно, что этот сигнал – реликтовое излучение, самое древнее эхо Большого Взрыва, заполнившее космос после рождения мироздания. Открытие, сделанное случайно, принесло Нобелевскую премию, но в тот день, среди инструментов, металлического скрипа антенны и раздражения от настойчивых голубей, ничто не намекало на триумф. Лишь шум, безмолвный свидетель древнейшей истории Вселенной, продолжал звучать, ожидая, когда люди поймут его значение.

В тот день, когда реликтовое излучение впервые привлекло внимание ученых, главными действующими лицами оказались Арно Пензиас и Роберт Вильсон — два американских радиоастронома, работавших в лабораториях Bell Telephone Laboratories. Они не искали следов Большого Взрыва, не пытались подтвердить космологические гипотезы — их задачей было вовсе не это. Они занимались настройкой антенны, построенной еще в 1959 году для совершенно иных целей — исследования радиосигналов, в частности, спутниковых коммуникаций.

Арно Пензиас, сын немецких евреев, бежавших от нацистов в 1930-х годах, был человеком дотошным, с

инженерным складом ума и вниманием к деталям. Он родился в 1933 году в Мюнхене, но его семья эмигрировала в США, где он окончил колледж, затем получил докторскую степень в Колумбийском университете. Его коллега, Роберт Вильсон, американец по рождению, был не менее одержим точностью и надежностью эксперимента. Родился он в 1937 году, учился в Технологическом институте Калифорнии и, так же как Пензиас, оказался вовлечен в исследования радиоастрономии.

За открытие реликтового излучения Пензиас и Вильсон получили Нобелевскую премию по физике за 1978 год. Ирония судьбы заключалась в том, что они ни в коей мере не искали этот сигнал — они всего лишь пытались избавиться от «помех». Но именно случайность, помноженная на тщательность их работы, привела к одному из важнейших открытий в истории астрофизики, а может быть и в истории человечества.

Прежде чем углубляться в тему реликтового фонового излучения, полезно вспомнить основы электромагнитных волн и природы света. Электромагнитное излучение — это колебания электрического и магнитного полей, которые распространяются в пространстве со скоростью света. Оно обладает двойственной природой: с одной стороны, ведёт себя как поток частиц, называемых фотонами, с другой — как волна, имеющая длину и частоту. Длина волны — это расстояние между двумя соседними пиками волны, а частота показывает, сколько таких колебаний

происходит за секунду. Чем больше частота, тем короче длина волны и тем больше энергия у излучения.

Часть электромагнитного спектра, которую человеческий глаз способен воспринимать, называется видимым светом. Ещё в XVII веке Исаак Ньютон, проводя эксперименты с призмой, показал, что белый свет можно разложить на спектр цветов, образующих радуго – от красного до фиолетового. Позже выяснилось, что это лишь небольшая часть более обширного спектра. За пределами красного цвета находятся инфракрасные волны, которые ощущаются как тепло, а ещё дальше начинаются микроволны и радиоволны, имеющие самую большую длину волны и низкую частоту. В другую сторону, за фиолетовым светом, идут ультрафиолетовые лучи, затем рентгеновское излучение, используемое, например, в медицине, а за ним – гамма-излучение, обладающее самой высокой энергией и способное проникать через плотные материалы.

Когда Вселенная только родилась в результате Большого взрыва, она была чрезвычайно горячей и плотной. Первоначально излучение находилось в гамма-диапазоне, так как температура составляла триллионы градусов, а фотоны обладали огромной энергией. По мере расширения космоса температура снижалась, и гамма-кванты постепенно растягивались, превращаясь в рентгеновские, затем в ультрафиолетовые, потом в видимый свет, а позже – в инфракрасное и, наконец, в микроволновое излучение. Именно в таком виде оно дошло до нас сегодня, распространяясь по всей Вселенной и оставаясь в виде слабого микроволнового фона с температурой около 2,7 К. Это и есть реликтовое

излучение — свет, который некогда заполнял весь космос, но со временем остывал, меняя свою природу.

Энергия, высвободившаяся в момент Большого взрыва, действительно никуда не исчезла, а лишь распределилась по расширяющемуся пространству, изменяя свою форму. В ранней Вселенной энергия была сконцентрирована в излучении и частицах, которые находились в состоянии невероятно горячей и плотной плазмы. Со временем, по мере расширения, излучение растягивалось, теряя свою первоначальную высокую энергию, а вещество формировало галактики, звёзды и другие космические структуры. Однако если бы существовал способ суммировать всю энергию Вселенной — во всех её проявлениях, включая реликтовое излучение, кинетическую энергию движения галактик, массу вещества и даже загадочную тёмную энергию, — её общее количество осталось бы тем же самым.

Это можно сравнить с тем, как капля чернил, растворённая в огромном океане, не исчезает, а лишь становится менее заметной, распространяясь на всё больший объём. Аналогично энергия ранней Вселенной, некогда сосредоточенная в одном крошечном, но сверхэнергичном состоянии, сегодня разбавлена на колоссальных космических масштабах.

Реликтовое излучение является одним из наиболее очевидных следов той древней энергии, но со временем оно растянулось настолько, что теперь его температура составляет всего 2,7 Кельвина. Вещество, которое тоже изначально существовало в виде высокоэнергичных частиц, собралось в звёзды и галактики, но его суммарная масса-энергия по-прежнему является частью той же самой системы. Тёмная энергия, играющая главную роль в ускоренном расширении Вселенной, тоже может быть



одной из форм той исходной энергии, но её природа остаётся загадкой.

Таким образом, если бы можно было учесть всю энергию Вселенной — во всех формах, включая реликтовый свет, массу материи и даже энергию пустого пространства, — её общая сумма осталась бы неизменной. Она лишь распределилась по бескрайнему космосу, став менее концентрированной, но никуда не исчезнув.

Слово «реликтовое» происходит от латинского *relictus*, что означает «оставленный» или «переживший своё время». Применительно к излучению этот термин подчёркивает его древнее происхождение и сохранность с эпохи, когда Вселенная только начинала остывать после горячей фазы своего развития. Это свет, который некогда заполнял всё пространство, но с течением времени изменился, растянулся и перешёл в микроволновый диапазон, оставаясь при этом своеобразным свидетельством далёкого прошлого.

Реликтовое излучение появилось в момент, когда горячая и плотная Вселенная начала охлаждаться настолько, что свободные протоны и электроны стали соединяться в нейтральные атомы водорода. До этого момента свет не мог распространяться свободно, постоянно сталкиваясь с заряженными частицами плазмы и рассеиваясь в разные стороны. Однако после образования атомов вещество перестало активно взаимодействовать с фотонами, и свет, который прежде был поглощён этим первичным туманом, наконец вырвался на свободу, начав беспрепятственное путешествие по космосу.

Этот древний свет, некогда имеющий температуру в несколько тысяч градусов, с тех пор постепенно

охлаждался, смещая свою длину волны от видимого диапазона к инфракрасному, а затем и к микроволнам. Сегодня его температура составляет всего около 2,7 Кельвина, что соответствует слабому микроволновому свечению, равномерно заполняющему всю Вселенную. Несмотря на эту тусклость, реликтовое излучение несёт в себе отпечаток первичной структуры космоса, сохраняя следы малейших неоднородностей, из которых впоследствии сформировались галактики, звёзды и планеты. Именно благодаря этому его изучение позволяет заглянуть в глубины времени, раскрывая детали ранней эволюции Вселенной и подтверждая гипотезу о её горячем начале.

Итак, реликтовое излучение, – это слабый микроволновый сигнал, который приходит со всех направлений в космосе. Чтобы его зарегистрировать, нужны специальные антенны, чувствительные к микроволновым волнам. Принцип работы такой антенны похож на обычную спутниковую тарелку, но с гораздо более высокой чувствительностью.

Основной элемент антенны, – рефлектор, который собирает микроволновые волны и направляет их в приёмник. Этот приёмник преобразует сигнал в электрический ток, который затем усиливается и передаётся на компьютер для анализа. Так учёные измеряют температуру излучения, его небольшие колебания и направление откуда он приходит.

Для изучения реликтового излучения запускались несколько космических миссий. Одной из первых была COBE, что расшифровывается как Cosmic Background

Explorer, что на русский язык переводится как «Исследователь космического фонового излучения». Этот спутник был запущен в 1989 году для изучения реликтового излучения и стал первой миссией, подтвердившей его соответствие спектру абсолютно чёрного тела, о котором мы будем говорить далее.

Позднее, в 2001 году, была запущена миссия WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), расшифровывается как Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, что на русский язык переводится как «Микроволновый зонд анизотропии имени Уилкинсона». Анизотропия — это термин, обозначающий неравномерность или различие свойств в разных направлениях. Применительно к реликтовому излучению анизотропия означает, что его температура и плотность слегка меняются в зависимости от направления наблюдения.

Имя Уилкинсона в названии аппарата появилось в честь американского физика Дэвида Уилкинсона, внёсшего значительный вклад в изучение реликтового излучения. Основная задача миссии заключалась в детальном изучении малейших вариаций температуры реликтового излучения. Эти неоднородности, представляющие собой следы плотностных флуктуаций в ранней Вселенной, сыграли ключевую роль в формировании галактик, звёздных скоплений и других крупных структур космоса. Благодаря высокой точности измерений WMAP удалось существенно уточнить возраст Вселенной, который оказался равным 13,8 миллиарда лет, а также определить соотношение её основных компонентов. Согласно данным миссии, Вселенная состоит примерно на 72% из тёмной энергии, на 23% из тёмной материи и лишь около

5% приходится на обычное вещество, из которого состоят звёзды, планеты и всё видимое вещество.

Аппарат работал на удалении в 1,5 миллиона километров от Земли, находясь в так называемой точке Лагранжа  $L_2$ , что позволяло минимизировать влияние земного излучения. Его антенны были спроектированы так, чтобы измерять микроволновый фон с исключительной точностью, фиксируя колебания температуры реликтового излучения с точностью до миллионных долей градуса.

Полученные WMAP данные не только подтвердили основные положения современной космологии, но и заложили фундамент для ещё более детального изучения структуры Вселенной, что позже было реализовано в рамках миссии Planck в 2009 году, которая предоставила ещё более точные данные, позволяя изучить мельчайшие неоднородности, из которых позже сформировались галактики.

Все эти миссии использовали антенны с высокой чувствительностью и специальными охлаждающими системами, чтобы свести к минимуму шум от самого прибора. Они работали в космосе, чтобы избежать помех от земной атмосферы, которая мешает наблюдениям в микроволновом диапазоне.

Реликтовое излучение стало ключевым доказательством теории Большого Взрыва, подтвердив, что в далеком прошлом Вселенная была горячей и плотной. Это излучение, пронизывающее всё пространство, представляет собой остаточное тепло первичного огненного состояния космоса, которое со временем охладилось и растянулось до микроволнового диапазона.

Его обнаружение не только дало возможность заглянуть в самые ранние этапы эволюции мироздания, но и стало испытанием для различных космологических моделей, многие из которых оказались несостоятельными перед его неоспоримыми данными.

Сам факт существования этого излучения соответствует предсказаниям теоретиков, работавших над моделью Большого Взрыва задолго до его обнаружения. В 1948 году физики Ральф Альфер и Роберт Герман, развивая идеи Джорджа Гамова, предсказали, что если Вселенная действительно возникла из горячего и плотного состояния, то её первоначальное излучение должно было остаться в виде слабого микроволнового фона. Однако на тот момент никто не мог его зафиксировать.

Когда же в 1965 году Арно Пензиас и Роберт Вильсон случайно наткнулись на этот таинственный шум, а параллельно с ними группа физиков во главе с Робертом Дике в Принстонском университете уже готовилась к его поиску, стало очевидно: это не просто фоновые помехи, а свидетельство глубоких космологических процессов. С этого момента реликтовое излучение стало фундаментальным тестом для всех моделей происхождения и эволюции Вселенной. Оно однозначно подтвердило, что в прошлом космос действительно был горячим и плотным, что исключало альтернативные теории, такие как модель стационарной Вселенной, долгое время конкурировавшую с Большим Взрывом.

С тех пор детальное изучение реликтового излучения позволило извлечь из него огромный объем информации. Оно не просто существует — его мелкие флуктуации

отражают неравномерности плотности в ранней Вселенной, ставшие зародышами будущих галактик и скоплений. Спутниковые миссии, такие как COBE, WMAP и Planck, измерили его температуру и спектр с беспрецедентной точностью, что дало возможность проверить многие гипотезы, связанные с инфляцией и структурой космоса.

Считается, что аннигиляция материи и антиматерии происходила гораздо раньше, чем возникло реликтовое излучение. Этот процесс завершился в первые доли секунды после Большого взрыва, в эпоху, когда Вселенная была невероятно горячей и плотной.

Сразу после Большого взрыва частицы и античастицы рождались в огромных количествах и сталкивались друг с другом, превращаясь в излучение. Если бы материя и антиматерия полностью уравнивали друг друга, они бы полностью аннигилировали, и Вселенная осталась бы только в виде фотонов, без вещества. Однако, по неизвестной пока причине, в ранней Вселенной существовал небольшой избыток материи над антиматерией — примерно на один лишний протон или нейтрон на миллиард частиц-античастиц. Когда вся антиматерия уничтожилась в результате аннигиляции, этот крошечный остаток материи остался и впоследствии сформировал галактики, звёзды и всё остальное вещество, которое мы видим сегодня.

Энергия, выделившаяся при аннигиляции, не исчезла, а перешла в виде высокоэнергичных фотонов, заполнявших раннюю Вселенную. Эти фотоны продолжали участвовать в процессах рассеяния и

взаимодействия с частицами плазмы. Однако спустя сотни тысяч лет, когда температура снизилась до нескольких тысяч градусов, произошло событие, известное как эпоха рекомбинации. Электроны и протоны соединились в нейтральные атомы, и вещество перестало эффективно поглощать фотоны. Именно тогда свет, оставшийся после этих ранних процессов, получил возможность распространяться беспрепятственно.

Этот свет и есть реликтовое излучение, которое мы наблюдаем сегодня. Оно сильно остыло из-за расширения Вселенной и сместилось в микроволновый диапазон, но всё ещё несёт следы тех процессов, которые происходили в далёком прошлом. Таким образом, энергия аннигиляции не исчезла — она была преобразована в излучение, а затем растянулась вместе со Вселенной, став частью реликтового фона.

Реликтовое излучение стало одним из самых важных инструментов для проверки космологических теорий, и его свойства соответствуют сразу нескольким ключевым тестам, подтверждающим модель горячей и плотной ранней Вселенной.

Астроном Олег Васильевич Верхованов предложил четыре теста для реликтового излучения, которые позволяют проверить его происхождение и соответствие теории Большого Взрыва. Эти тесты помогают убедиться, что наблюдаемый микроволновый фон действительно является остаточным излучением ранней Вселенной, а не побочным эффектом других астрофизических процессов.

Первым и самым фундаментальным доказательством стало само наличие этого излучения. Если бы Вселенная действительно когда-то была в состоянии высокой температуры и плотности, то остаточное тепло того периода должно было сохраниться и сегодня.

Но одного факта существования излучения недостаточно — важно, чтобы его характеристики соответствовали расчетам. Вторым критически важным тестом стал анализ спектра реликтового излучения. Если оно действительно возникло в результате первичного горячего состояния Вселенной, его спектр должен быть спектром абсолютно черного тела — именно таким, какой испускает идеальный нагретый объект.

Название «черное тело» связано с его свойством поглощать всё падающее на него излучение без отражения и пропускания, из-за чего такой объект в видимом свете выглядел бы абсолютно черным. Однако термин относится не к цвету, а к идеальной модели излучающего объекта, спектр которого определяется только температурой.

Спектр абсолютно черного тела — это особый тип излучения, возникающий, когда объект поглощает и излучает электромагнитные волны без каких-либо потерь. На уровне фотонов этот процесс можно описать следующим образом. Внутри любого нагретого объекта атомы и молекулы находятся в постоянном движении, сталкиваясь друг с другом и изменяя свою энергию. Эти столкновения приводят к испусканию фотонов — мельчайших квантов света, несущих энергию. Чем выше температура объекта, тем больше энергии у испускаемых фотонов и тем короче их длины волн, что смещает излучение в сторону более высоких частот.



Если объект является идеальным черным телом, он обладает двумя важными свойствами. Первое — он поглощает все падающие на него фотоны, не отражая их и не пропуская сквозь себя. Это означает, что любая поступающая энергия полностью уравнивается испусканием фотонов. Второе — он испускает излучение с определенным спектром, зависящим только от температуры, но не от состава или структуры объекта. Такой спектр является непрерывным и содержит фотоны всех возможных длин волн, но их интенсивность распределена по строгому закону, известному как закон Планка.

Этот закон описывает, сколько фотонов испускается при каждой длине волны для заданной температуры. При низких температурах большая часть излучения приходится на длинные волны — инфракрасный диапазон, невидимый глазу. При нагревании пик спектра смещается к более коротким волнам — сначала в видимый свет, затем в ультрафиолет и рентгеновский диапазоны. Однако независимо от температуры форма спектра остается неизменной: это плавная кривая, на которой присутствуют фотоны всех длин волн, но их распределение строго подчиняется законам термодинамики.

Спектр излучения может быть разным в зависимости от того, каким образом свет создаётся. В большинстве случаев свет возникает при переходах электронов между уровнями энергии в атомах или молекулах. Такой процесс даёт спектры с **линиями поглощения** и **линиями испускания**, зависящими от состава вещества. Однако существует и другой вид спектра — **спектр абсолютно чёрного тела**, который формируется

исключительно за счёт теплового движения частиц и не имеет резких линий.

Когда вещество излучает свет благодаря электронным переходам, оно создаёт **линейчатый спектр**. Если атомы нагретого газа испускают свет, то в спектре появляются **яркие линии испускания** — каждая из них соответствует определённому переходу электрона между уровнями энергии в атоме. Если же свет проходит через холодный газ, то некоторые фотоны поглощаются атомами, возбуждая их электроны, а затем переизлучаются в случайных направлениях. В результате в непрерывном спектре возникают **тёмные линии поглощения** — они соответствуют тем же переходам, но выглядят как «потери» света на этих длинах волн. Именно такой спектр мы видим, например, у звёзд, где горячая поверхность излучает свет, а верхние слои атмосферы частично поглощают определённые длины волн.

В отличие от этого, **спектр абсолютно чёрного тела** не зависит от химического состава, а определяется только температурой объекта. Такое излучение возникает не из-за переходов электронов, а из-за хаотического движения заряженных частиц внутри вещества. Чем выше температура, тем больше энергии излучается и тем большее смещение происходит в сторону коротких волн. Например, раскалённый металл сначала светится красным, затем жёлтым, а при ещё более высокой температуре — голубовато-белым.

Главное отличие спектра абсолютно чёрного тела от линейчатых спектров состоит в том, что он **не содержит отдельных линий**, а представляет собой плавную кривую, показывающую, сколько энергии излучается на

каждой длине волны. Этот закон был установлен в XIX веке и описан с помощью закона Планка.

Реликтовое излучение имеет именно **спектр абсолютно чёрного тела** с температурой 2,7 Кельвина. Это означает, что его источник — не переходы электронов в атомах, а чисто тепловое излучение, возникшее из-за движения частиц в горячей плазме ранней Вселенной. При этом его спектр является идеальным примером абсолютно чёрного тела, что подтверждает его происхождение из той эпохи, когда вещество и излучение находились в тепловом равновесии.

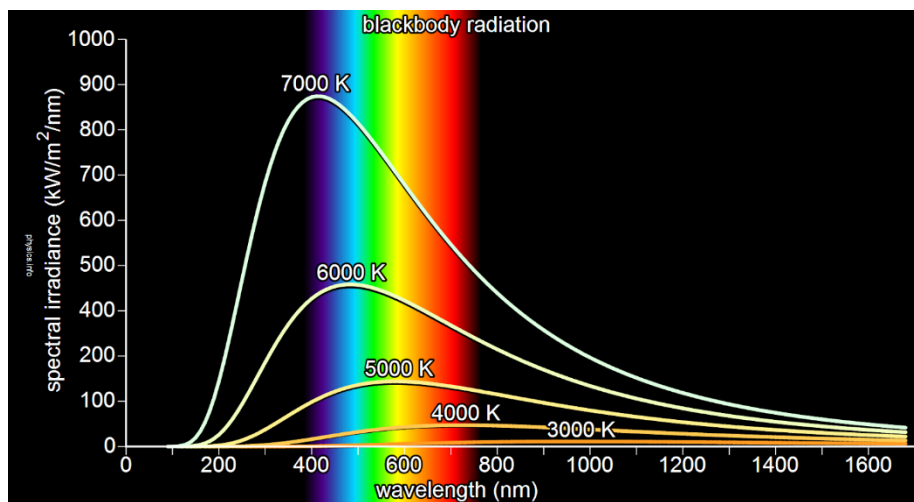
Спектр излучения может быть **смешанным**, если одновременно присутствуют и тепловое излучение, и излучение, связанное с переходами электронов. Например, у звёзд спектр в целом напоминает излучение абсолютно чёрного тела, но поверх него накладываются **линии поглощения**, вызванные взаимодействием света с газами в атмосфере звезды.

В случае реликтового излучения его спектр пока соответствует идеальному **спектру абсолютно чёрного тела**, что говорит о том, что в момент своего освобождения (эпоха рекомбинации) оно находилось в тепловом равновесии с веществом. Однако теоретически вполне возможно, что в будущем мы обнаружим в реликтовом излучении **слабые спектральные линии**, которые могли появиться из-за взаимодействия фотонов с веществом на более поздних этапах эволюции Вселенной.

Некоторые гипотезы предполагают, что крайне слабые следы атомарного водорода или более сложных процессов во время темных веков Вселенной (до появления первых звёзд) могли оставить отпечатки в спектре реликтового излучения. Особенно интересен в

этом плане **21-сантиметровый спектральный переход водорода**, который мог влиять на микроволновое фоновое излучение, создавая слабые отклонения от идеального спектра.

Кроме того, если существовали какие-то экзотические процессы в ранней Вселенной — например, распад частиц тёмной материи или взаимодействие с неизвестными элементами, — они могли оставить следы в виде дополнительных линий. Пока таких отклонений не обнаружено, но будущие сверхчувствительные телескопы, возможно, позволят увидеть мельчайшие особенности в структуре реликтового излучения, открывая новые главы в понимании эволюции Вселенной.



Реликтовое излучение, заполняющее всю Вселенную, имеет именно такой спектр, соответствующий температуре около 2,7 Кельвинов. Это означает, что в ранней Вселенной, когда температура была значительно выше, фотоны находились в термодинамическом равновесии с окружающей плазмой, постоянно

поглощаясь и испускаясь в процессе взаимодействия с электрически заряженными частицами. Когда же Вселенная остыла до состояния, при котором атомы стали нейтральными, фотоны перестали активно взаимодействовать с веществом и начали свободно распространяться, сохранив тот же спектр, который соответствует идеальному черному телу. Именно это является одним из главных доказательств, что реликтовое излучение — остаток эпохи горячего Большого Взрыва, а не результат каких-либо вторичных астрофизических процессов.

Спутниковые исследования, начиная с COBE и WMAP и заканчивая Planck, подтвердили, что излучение обладает именно таким спектром, что исключает альтернативные гипотезы, например, возможность того, что оно возникло из-за рассеяния звездного света или других вторичных процессов.

Третий тест связан с тем, что реликтовое излучение несет в себе информацию о неоднородностях ранней Вселенной. Современные крупномасштабные структуры — галактики, скопления галактик, сверхскопления — не могли бы образоваться, если бы в начальный момент вся материя была распределена совершенно равномерно. Именно поэтому теория Большого Взрыва предсказывала, что в реликтовом излучении должны присутствовать небольшие флуктуации температуры, отражающие первичные возмущения плотности в молодой Вселенной. Эти неоднородности были обнаружены сначала спутником COBE, а затем измерены с невероятной точностью миссиями WMAP и Planck. Эти

данные не только подтвердили космологические модели, но и позволили уточнить параметры Вселенной, включая ее возраст, плотность материи и темной энергии.

Последний важнейший тест связан с температурной зависимостью реликтового излучения. Если Вселенная действительно расширяется, как это предсказывает космологическая модель, то температура реликтового излучения в прошлом должна была быть выше. В результате наблюдений стало ясно, что с увеличением красного смещения температура реликтового фона возрастает ровно так, как это предсказывает теория. Это служит прямым доказательством того, что Вселенная в своем прошлом была горячее и плотнее, а значит, действительно прошла через фазу горячего Большого Взрыва.

Каждый из этих тестов не просто подтверждает существование реликтового излучения, но и доказывает, что его свойства полностью соответствуют предсказаниям модели горячей ранней Вселенной. Их совокупность делает реликтовое излучение одним из самых надежных инструментов в изучении происхождения и эволюции космоса.

Важно также понимать, что гравитационные эффекты играют важную роль в формировании и изменении характеристик реликтового излучения, оставляя на его структуре своеобразные отпечатки, которые позволяют изучать крупномасштабные свойства Вселенной. Одним из наиболее значимых явлений, связанных с этим

воздействием, является эффект Сюняева-Зельдовича. Этот эффект возникает, когда фотоны реликтового излучения проходят через горячий межгалактический газ в скоплениях галактик и взаимодействуют с высокоэнергетическими электронами, находящимися в нем. В результате таких столкновений фотоны получают дополнительную энергию, что приводит к изменению их спектра: часть из них смещается в область более высоких частот. Это позволяет использовать наблюдения реликтового излучения для изучения распределения горячего газа в скоплениях галактик, а также определять их массу и другие характеристики.

Дополнительно необходимо отметить, что обычный и обратный комптоновский эффекты связаны с рассеянием фотонов на свободных электронах, но происходят в разных энергетических режимах.

Обычный Комптоновский эффект, названный в честь Артура Комптона, заключается в том, что рентгеновский или гамма-фотон сталкивается со свободным электроном и передает ему часть своей энергии. В результате фотон теряет энергию, а его длина волны увеличивается (смещается в красную область спектра). Это явление подтверждает корпускулярную природу света и играет важную роль в физике высоких энергий.

Обратный комптоновский эффект — это тот же процесс, но в противоположном направлении. Здесь высокоэнергетический электрон сталкивается с низкоэнергетическим фотоном (например, реликтовым излучением) и передает ему часть своей энергии. В результате фотон получает дополнительную энергию и смещается в область рентгеновских или гамма-лучей, а электрон теряет часть своей кинетической энергии. Этот процесс важен в астрофизике, например, в скоплениях

галактик, где горячие электроны межгалактической плазмы увеличивают энергию реликтовых фотонов, что приводит к эффекту Сюняева-Зельдовича.

Александр Компанеец вывел уравнение, описывающее, как фотоны меняют энергию при многократном обратном комптоновском рассеянии в горячей плазме. Уравнение Компанейца учитывает не только увеличение энергии фотонов, но и их диффузию в частотном пространстве, что важно для описания эволюции спектра реликтового излучения в горячей среде.

Но воздействие гравитации на реликтовый фон этим не ограничивается. Гравитационные потенциалы, создаваемые крупными структурами во Вселенной, также влияют на флуктуации температуры реликтового излучения. Этот эффект проявляется в том, что при прохождении через гравитационные ямы, образованные массивными объектами, фотоны либо теряют, либо приобретают дополнительную энергию. В результате изменяется не только их температура, но и угловое распределение неоднородностей в реликтовом фоне.

Эффект интегрального Сакса-Вольфа связан с тем, как фотоны реликтового излучения меняют свою энергию, проходя через огромные гравитационные «ямы» и «горки» во Вселенной, созданные массивными структурами, такими как скопления галактик и темная материя. Слово «интегральный» в названии явления указывает на то, что эффект накапливается постепенно по мере движения фотонов через всю крупномасштабную структуру Вселенной, а не возникает мгновенно в одной точке. В отличие от обычного эффекта Сакса-Вольфа



(который проявляется в локальных гравитационных ямах при рассеянии фотонов в ранней Вселенной), интегральный эффект возникает позже, когда фотоны проходят через расширяющееся пространство, где гравитационные ямы меняются со временем.

Когда фотон попадает в гравитационную яму (например, в область с высокой концентрацией массы), он ускоряется и набирает энергию. Однако, выходя из нее, он должен снова преодолевать гравитацию, что обычно забирает обратно всю приобретенную энергию. В статичной Вселенной энергии фотона на входе и выходе было бы одинаково, но из-за того, что Вселенная расширяется, ямы могут изменяться за время прохождения фотона.

Если Вселенная расширяется ускоренно (из-за темной энергии), гравитационные ямы становятся менее глубокими, пока фотон их проходит. В результате он теряет меньше энергии при выходе, чем получил при входе, и становится немного более энергичным (его длина волны становится короче). Это приводит к тому, что в некоторых областях неба реликтовое излучение чуть теплее.

Изучая этот эффект, ученые могут не только подтвердить существование темной энергии, но и измерить, как именно распределена масса во Вселенной.

Реликтовое излучение стало важнейшим инструментом для измерения фундаментальных параметров Вселенной, позволяя заглянуть в эпоху, когда космосу было всего около 380 тысяч лет. Именно в этот период, когда горячая

плазма остыла до состояния нейтрального газа, фотоны смогли свободно распространяться, оставляя на реликтовом фоне информацию о плотности материи, структуре пространства и динамике расширения.

Одним из главных параметров, который удалось определить благодаря детальному изучению реликтового излучения, стала плотность темной материи и темной энергии. Хотя темная материя не взаимодействует с электромагнитным излучением напрямую, ее влияние на формирование ранних флуктуаций реликтового фона заметно через характерные анизотропии — небольшие вариации температуры. Анализируя эти колебания, ученые смогли вычислить, что темная материя составляет около 27% от общей массы-энергии Вселенной, обеспечивая дополнительную гравитацию, необходимую для формирования галактик и их скоплений.

Не менее значимым стало определение доли темной энергии, загадочной компоненты, ответственной за ускоренное расширение Вселенной. Измеряя угловой размер флуктуаций реликтового излучения, ученые пришли к выводу, что геометрия Вселенной близка к плоской, что возможно только при наличии дополнительного источника энергии. Дальнейшие расчеты показали, что около 68% всей энергии во Вселенной приходится именно на темную энергию, действующую как антигравитация и ускоряющую расширение космоса.

Кроме того, реликтовый фон позволил уточнить значение скорости расширения Вселенной, известной как

постоянная Хаббла. По данным спутников WMAP и Planck, это значение составляет примерно 67–70 км/с на мегапарсек, хотя независимые измерения, основанные на наблюдениях сверхновых и галактик, дают несколько иные результаты, что породило так называемый «кризис постоянной Хаббла» — одну из главных нерешенных проблем современной космологии.

Наконец, анализ реликтового излучения дал наиболее точную оценку возраста Вселенной. Учитывая параметры расширения и состав Вселенной, ученые вычислили, что возраст мироздания составляет около 13,8 миллиарда лет. Этот результат получен на основе модели горячего Большого Взрыва и подтверждается различными независимыми методами, включая изучение древнейших звездных систем.

Современное представление о структуре и эволюции Вселенной основано на космологической модели  $\Lambda$ CDM, которая объединяет два ключевых компонента: темную энергию ( $\Lambda$ ) и холодную темную материю (CDM). Эта модель является стандартной в современной космологии, так как успешно объясняет множество наблюдаемых явлений, включая структуру реликтового излучения, распределение галактик и ускоренное расширение космоса.

Темная энергия, обозначенная символом  $\Lambda$ , представляет собой гипотетическую форму энергии, равномерно заполняющую пространство и оказывающую эффект, противоположный гравитации. Ее влияние проявляется в ускоренном расширении Вселенной, обнаруженном в конце XX века благодаря наблюдениям далеких сверхновых типа Ia. Эти данные показали, что скорость

разбегания галактик не уменьшается со временем под действием гравитации, а наоборот — растет, что указывает на наличие дополнительного компонента, воздействующего на динамику Вселенной. Современные измерения указывают, что на долю темной энергии приходится примерно 68% от общей плотности энергии Вселенной.

Холодная темная материя (Cold Dark Matter, CDM) составляет еще около 27% и представляет собой невидимую субстанцию, взаимодействующую с обычной материей только через гравитацию. Она называется «холодной», потому что ее частицы, если они существуют, двигались с малыми скоростями в ранней Вселенной, что позволило им эффективно образовывать гравитационные ямы, послужившие основой для формирования галактик и их скоплений. Без этого компонента структуры, наблюдаемые в космосе, не могли бы образоваться в те временные масштабы, которые определены астрономическими наблюдениями.

Нужно понимать, что отпечаток галактик на фоновом реликтовом излучении (реликтовом фоне) отражает картину Вселенной на крайне ранних стадиях её существования, примерно через 380 тысяч лет после Большого взрыва. Это свет, излучённый в тот момент, когда Вселенная впервые стала прозрачной и свет смог свободно распространяться. Небольшие вариации температуры реликтового излучения соответствуют регионам с немного большей или меньшей плотностью материи в тот период, из которых позднее выросли галактики и скопления.

Современные же кластеры и галактики, которые мы наблюдаем сегодня, образовались значительно позже, в результате миллиардов лет гравитационного притяжения, слияний, и взаимодействий между материей и тёмной материей. В процессе эволюции Вселенной первоначальные малые флуктуации плотности многократно усилились, изменили форму, сместились и сгруппировались совершенно иначе, чем это было на начальном этапе.

Поэтому карты, отражающие «отпечаток» галактик на реликтовом излучении (например, выявляемые с помощью эффекта Сюняева-Зельдовича и гравитационного линзирования), не совпадают с сегодняшним расположением галактик и скоплений. То, что мы видим на реликтовом фоне, это не сами галактики, а их далёкие «зародыши», предшественники, которые были значительно менее выраженными по контрасту и имели иную пространственную структуру. Современные структуры значительно отличаются по форме и расположению, поскольку за миллиарды лет произошло перераспределение материи и формирование новых, более крупных и сложных структур.

В 2006 году на конференции в Гарварде я встретился и беседовал с Джоэлом Примаком, одним из создателей модели холодной темной материи и соавтором современной космологической теории, включающей темную энергию.

Джоэл Примак — американский астрофизик, один из ведущих исследователей в области космологии, который сыграл важную роль в создании современной теории

строения и эволюции Вселенной. Эта теория, известная как «модель лямбда-холодной темной материи», описывает поведение космоса с учетом двух ключевых компонентов: темной энергии, обозначаемой буквой «лямбда», и холодной темной материи, которая формирует крупномасштабные структуры, такие как галактики и их скопления.

В 1980-х годах Примак вместе с коллегами разработал концепцию холодной темной материи, предполагая, что невидимая субстанция, составляющая большую часть массы во Вселенной, состоит из частиц, движущихся медленно по сравнению со скоростью света и взаимодействующих с обычным веществом только через гравитацию. Эта идея помогла объяснить, каким образом мелкие возмущения плотности, наблюдаемые в реликтовом излучении, со временем привели к образованию галактик, звездных скоплений и сверхскоплений.

Однако к концу 1990-х стало ясно, что расширение Вселенной не просто продолжается, а ускоряется, что невозможно объяснить только наличием темной материи. В 1998 году астрономические наблюдения сверхновых звезд показали, что в космосе существует дополнительная сила, препятствующая гравитационному замедлению расширения. Эта сила получила название темной энергии и стала вторым важным элементом модели.

Так была сформирована модель лямбда-холодной темной материи, которая на сегодняшний день является ведущей космологической теорией. Она объясняет реликтовое

излучение, структуру Вселенной и поведение скоплений галактик, а также предсказывает будущее эволюции космоса.

Кроме того, Примак активно работал над гипотезами о частицах темной материи, которые, возможно, слабо взаимодействуют с обычным веществом. Он участвовал в разработке моделей, предсказывающих свойства этих частиц, а также в поиске возможных экспериментальных подтверждений их существования.

Модель  $\Lambda$ CDM подтверждена различными независимыми измерениями. Спутниковые миссии, такие как WMAP и Planck, предоставили детальные данные о реликтовом излучении, полностью соответствующие предсказаниям этой модели. Наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной, включая распределение галактик и гравитационное линзирование, также укладываются в рамки  $\Lambda$ CDM. Дополнительно измерения барионных акустических осцилляций, возникающих в ранней Вселенной и оставляющих след в распределении галактик, подтверждают основные параметры модели.

Хотя  $\Lambda$ CDM является наиболее успешной космологической теорией, она все же оставляет ряд открытых вопросов. Например, природа темной энергии остается неизвестной, а разница в измерениях постоянной Хаббла в рамках различных методов наблюдений вызывает споры среди ученых. Однако на сегодняшний день именно эта модель лучше всего описывает эволюцию и структуру Вселенной, опираясь на надежные наблюдательные данные.

Инфляционная стадия ранней Вселенной представляет собой гипотетический период сверхбыстрого экспоненциального расширения, который произошел в первые доли секунды после Большого Взрыва. Эта концепция была предложена в 1980-х годах и стала важным дополнением к стандартной космологической модели, позволяя объяснить ряд наблюдаемых особенностей Вселенной, которые не могли быть удовлетворительно объяснены без инфляции.

Одним из ключевых следствий инфляции стало объяснение происхождения неоднородностей, которые впоследствии привели к образованию галактик и крупномасштабных структур. Согласно инфляционной гипотезе, крошечные квантовые флуктуации, существовавшие в самом начале, в ходе быстрого расширения Вселенной растянулись до макроскопических масштабов. Эти вариации плотности позже стали гравитационными «зародышами» для формирования галактик, скоплений галактик и других космических структур. Наблюдаемые неоднородности температуры реликтового излучения, зафиксированные спутниками WMAP и Planck, полностью соответствуют предсказаниям инфляционной теории, что является одним из ее главных подтверждений.

Еще одно предсказание инфляции связано с возможным существованием реликтовых гравитационных волн — искривлений пространства-времени, возникавших во время этого периода экстремального расширения. Эти волны должны были оставить характерный след в



поляризации реликтового излучения, особенно в так называемом В-моде поляризации, который представляет собой специфическую закрученную структуру в распределении микроволнового фона. Обнаружение такого сигнала стало бы важным доказательством инфляционной стадии, однако пока что надежных данных о наличии этих волн не получено.

Несмотря на отсутствие прямых свидетельств реликтовых гравитационных волн, инфляционная гипотеза подтверждена многими косвенными наблюдениями. Она объясняет не только неоднородности, но и тот факт, что Вселенная выглядит чрезвычайно однородной и изотропной на больших масштабах, а также практически плоской, что подтверждается измерениями угловых флуктуаций реликтового излучения. Без инфляции трудно объяснить, почему регионы космоса, которые никогда не могли находиться в причинной связи друг с другом, демонстрируют одинаковые физические свойства.

Хотя инфляционная теория еще требует окончательной экспериментальной проверки, она остается наиболее логичным и успешным объяснением ранних этапов эволюции Вселенной, заполняя пробелы, оставленные классической моделью Большого Взрыва.

Еще одной важной деталью является, что поляризация реликтового излучения является одним из ключевых инструментов для изучения ранней Вселенной, поскольку несет в себе информацию о процессах, происходивших на самых первых этапах ее эволюции.

Одним из главных аспектов поляризации реликтового фона является возможность обнаружения следов реликтовых гравитационных волн, которые, согласно инфляционной гипотезе, должны были возникнуть в период сверхбыстрого расширения космоса.

Поляризация реликтового излучения — это явление, связанное с тем, как фотоны реликтового фона изменяли направление своего движения в ранней Вселенной при столкновениях с заряженными частицами. Говоря простыми словами, поляризация означает, что световые волны приобрели определенное направление колебаний, вместо того чтобы распространяться хаотично во всех направлениях. Это происходит, когда фотоны неоднократно рассеиваются на электронах, особенно если среда, через которую они проходят, неравномерна.

Поляризация реликтового излучения бывает двух типов. Один из них связан с обычным рассеянием фотонов на электронах и подтверждает процессы, происходившие в тот момент, когда Вселенная стала прозрачной для света. Другой тип поляризации более интересен, так как теоретически может содержать следы первичных гравитационных волн, которые появились в результате быстрого расширения космоса сразу после Большого Взрыва. Если удастся обнаружить такие волны, это станет важнейшим доказательством гипотезы об инфляционном расширении Вселенной.

В 2014 году группа исследователей объявила, что они зафиксировали такой сигнал, но последующий анализ показал, что на результат могло повлиять излучение пыли внутри нашей Галактики. Дальнейшие исследования показали, что этот фактор действительно мог исказить данные, поэтому первичное открытие не

подтвердилось. Однако поиски продолжаются, так как обнаружение этого сигнала дало бы ученым уникальную возможность изучить самые ранние моменты жизни Вселенной и проверить теории о ее происхождении.

Хотя поляризация реликтового излучения напрямую не связана с эффектами Сакса-Вольфа и Сюняева-Зельдовича, обсуждёнными выше, все эти явления помогают понять строение и эволюцию космоса. Напоминаем, что **Эффект Сакса-Вольфа** показывает, как гравитация изменяет энергию фотонов, проходящих через области с разной плотностью вещества, что проявляется в изменении температуры реликтового излучения, в то время как **Эффект Сюняева-Зельдовича** связан с тем, что фотоны реликтового фона получают дополнительную энергию при столкновениях с горячими электронами в скоплениях галактик, что также влияет на их спектр.

Практическим образом, поляризация реликтового излучения — это ключ к пониманию ранней Вселенной, а также один из возможных способов обнаружения гравитационных волн, оставшихся после инфляционного расширения.

Карты неоднородностей реликтового излучения, составленные спутниками COBE, WMAP и Planck, стали одним из важнейших достижений современной космологии, позволив заглянуть в ранние этапы эволюции Вселенной. Эти карты представляют собой подробные изображения микроволнового фона, на которых зафиксированы мельчайшие вариации температуры, свидетельствующие о неоднородностях плотности на заре существования космоса. Именно эти первичные флуктуации позже привели к формированию

галактик, скоплений и крупномасштабных структур Вселенной.

Первым шагом к их изучению стал спутник COBE, запущенный в 1989 году. Он впервые зафиксировал флуктуации реликтового излучения, подтвердив предсказания теории Большого Взрыва. Позже, в начале XXI века, спутник WMAP с гораздо более высоким разрешением уточнил эти измерения, предоставив детализированную карту температурных неоднородностей. Самым точным на сегодняшний день инструментом стал спутник Planck, который не только улучшил разрешение карты, но и позволил исследовать поляризацию реликтового излучения, открывая новые возможности для проверки инфляционной модели и распределения материи в ранней Вселенной.

Однако помимо стандартных предсказанных флуктуаций карты реликтового излучения выявили ряд аномалий, природа которых до сих пор остается загадкой. Одна из наиболее обсуждаемых — так называемая «Ось зла» (Axis of Evil). Этот эффект заключается в том, что крупномасштабные флуктуации температуры реликтового излучения кажутся выровненными вдоль одной оси, что противоречит ожиданиям изотропной Вселенной. Если это явление реально и не связано с систематическими ошибками наблюдений, оно может указывать на влияние неизвестных космологических факторов или даже на необходимость пересмотра стандартной модели.

Название «Ось зла» (Axis of Evil) было предложено астрофизиками Жоао Магейжу и Кейт Ланд в 2005 году, когда они анализировали данные о реликтовом

излучении, полученные спутником, и обнаружили неожиданный эффект: крупные флуктуации температуры оказались выстроены вдоль одной оси, хотя согласно стандартной модели Вселенная должна быть изотропной, то есть одинаковой во всех направлениях.

Название было выбрано в шуточной манере, но с намеком на серьезность проблемы. В то время термин «ось зла» широко использовался в политическом контексте — так американский президент Джордж Буш-младший назвал ряд стран, которые, по его мнению, представляли угрозу для международной безопасности. Магейжу и Ланд использовали этот термин, чтобы подчеркнуть, что обнаруженная аномалия противоречит традиционным представлениям о Вселенной и может создать значительные трудности для существующих космологических моделей.

Хотя до сих пор неясно, является ли этот эффект реальным свойством Вселенной или просто случайной особенностью данных (либо систематической ошибкой измерений), он продолжает привлекать внимание ученых, поскольку его существование может потребовать пересмотра стандартной космологии.

Еще одна загадка — так называемое Холодное пятно, область неба с аномально низкой температурой реликтового фона. Оно заметно выделяется среди остальных флуктуаций, и его происхождение остается неясным. Некоторые гипотезы связывают его с гигантской пустотой (сверхпустотой) в крупномасштабной структуре Вселенной, которая могла исказить сигнал за счет гравитационного эффекта Сакса-

Вольфа. Другие теории рассматривают возможность того, что эта аномалия является следствием неизвестных физических процессов, происходивших в ранней Вселенной.

Хотя окончательного объяснения этих эффектов пока не найдено, изучение подобных аномалий может привести к новым открытиям в фундаментальной физике. Возможно, они связаны с влиянием ближнего окружения — нашей Галактики, солнечной системы или даже локального движения, но если эти аномалии подтвердятся как проявления новых космологических процессов, это может радикально изменить представления о строении и эволюции Вселенной.

Реликтовое излучение, пронизывающее весь космос, оказалось не только ключом к пониманию ранней Вселенной, но и источником множества новых загадок. Детальные радиокарты, составленные с помощью спутников COBE, WMAP и Planck, выявили тысячи неизученных радиоисточников, присутствующих на фоне микроволнового излучения. Однако количество таких источников оказалось значительно меньшим, чем ожидаемое число флуктуаций реликтового излучения, что указывает на фундаментальные различия в их происхождении. Если радиоисточники представляют собой астрофизические объекты вроде активных галактических ядер или остатков сверхновых, то неоднородности реликтового излучения несут в себе

отпечаток первичных плотностных возмущений, зародившихся еще в эпоху инфляции.

Анализ мощности спектра реликтового фона позволяет выявлять различные аномалии, которые до сих пор остаются предметом исследований. Одной из таких аномалий являются отклонения в амплитуде квадрупольных гармоник реликтового излучения. В идеальной модели горячего Большого Взрыва ожидается равномерное распределение флуктуаций на всех масштабах, но наблюдения показали, что низкочастотные компоненты спектра, включая квадруполь, оказываются слабее предсказанных значений. Причины этого пока неясны: возможно, это связано с особенностями статистики наблюдений или неизвестными эффектами, возникшими в ранней Вселенной.

Еще одна загадка — космическая вариация, проявляющаяся в том, что параметры реликтового излучения могут изменяться в зависимости от точки наблюдения. Этот эффект может быть связан с локальным движением Млечного Пути относительно реликтового фона или указывать на более глубокие космологические процессы.

Некоторые ученые предполагают, что отклонения в распределении реликтового излучения могут намекать на необычную топологию Вселенной. В частности, если космос имеет форму трехмерного тора — своеобразного «замкнутого» многомерного пространства, — это могло бы объяснить повторяющиеся структуры или неожиданное затухание крупных флуктуаций. Однако на

данный момент поиск характерных отражений собственной структуры Вселенной не дал убедительных результатов, и гипотеза остается неподтвержденной.

Постоянная Хаббла, показывающая скорость расширения Вселенной, долгое время оставалась одной из главных загадок науки о строении и эволюции космоса. Уже в 1990-х годах ученые столкнулись с серьезными расхождениями в ее значении: одни исследования давали скорость около пятидесяти километров в секунду на каждый миллион парсеков, тогда как другие указывали на величину около восьмидесяти. Такое различие было слишком велико, чтобы объясняться случайными ошибками, и требовало пересмотра основных представлений о развитии Вселенной.

Решение этой проблемы появилось после открытия темной энергии. В конце двадцатого века наблюдения вспышек далеких сверхновых звезд показали, что расширение Вселенной не просто продолжается, но ускоряется. Это привело к необходимости включить в расчеты дополнительный фактор — неизвестную ранее темную энергию, обладающую особым свойством: она вызывает ускоренное удаление галактик друг от друга. С учетом этого открытия удалось скорректировать космологические модели и привести значения постоянной Хаббла к более согласованному уровню.

Однако даже после введения темной энергии расхождения не исчезли полностью. Современные измерения, выполненные с помощью спутникового изучения реликтового излучения, дали значение



примерно шестьдесят восемь километров в секунду на миллион парсеков, что соответствует существующей теории строения Вселенной. В то же время другой метод, основанный на наблюдениях переменных звезд и вспышек сверхновых, дает более высокое значение — около семидесяти четырех. Это несоответствие, известное как кризис постоянной Хаббла, остается одной из главных нерешенных проблем современной науки о Вселенной.

Возможные объяснения этой нестыковки включают как локальные эффекты, так и ошибки в моделировании темной энергии. Одна из гипотез предполагает, что наша Галактика находится в области с пониженной плотностью материи, что может повлиять на измерения, проведенные с помощью сверхновых. Другая возможность заключается в том, что темная энергия со временем изменяет свои свойства, что пока не учитывается в стандартной модели.

На данный момент расхождение между разными методами измерения постоянной Хаббла остается нерешенной проблемой. Если оно подтвердится, это может означать, что стандартная космологическая модель нуждается в пересмотре, а во Вселенной существуют дополнительные эффекты или физические процессы, еще не учтенные в современных теориях.

Красное смещение — это способ измерять, насколько далеко от нас находится источник света и как давно он его испустил. Когда астрономы говорят, что у какого-то объекта красное смещение 1, это означает, что длина световой волны, пока шла к нам, увеличилась в два раза.

Если говорят, что красное смещение 10, значит, длина волны растянулась в 11 раз. А если 1100, как у реликтового излучения, то длина волны стала больше в 1100 раз по сравнению с той, что была в момент испускания.

Эта величина обозначается буквой  $z$  и записывается просто числом без единиц измерения, потому что она показывает во сколько раз изменился свет, а не какую-то конкретную физическую величину вроде скорости или расстояния. Это просто отношение того, каким был свет, когда он вышел из источника, к тому, каким он стал, когда мы его поймали.

Красное смещение работает потому, что Вселенная расширяется, и по мере ее роста расстояния между галактиками увеличиваются. Из-за этого свет, который идет к нам, буквально растягивается вместе с пространством, и чем дальше находится объект, тем сильнее его свет изменился.

Когда мы смотрим на далекие галактики, их свет сместился в сторону красного диапазона, потому что Вселенная расширялась, пока этот свет к нам шел. Но реликтовое излучение — это совсем другое. Оно было испущено, когда Вселенная была совсем молодой, и его длины волн увеличились в тысячи раз, так что вместо видимого или инфракрасного света мы теперь принимаем его как слабый микроволновый фон, заполняющий весь космос.

Красное смещение помогает нам буквально заглядывать в прошлое, потому что чем больше оно, тем раньше был

испущен свет. Мы видим галактики, какими они были миллиарды лет назад, потому что их свет только сейчас дошел до нас. Но есть огромный разрыв между самыми ранними галактиками (примерно при красном смещении 13–14) и реликтовым излучением (при 1100), потому что между этими эпохами Вселенная была слишком темной и пустой, и мы пока не можем видеть, что происходило в этот период.

Итак, красное смещение реликтового излучения связано с расширением Вселенной, которое растягивает длины волн фотонов, увеличивая их до более длинноволновой области спектра. В отличие от света галактик, где красное смещение можно измерить по смещению линий поглощения и излучения, у реликтового излучения нет таких узких спектральных линий, так как оно имеет спектр абсолютно черного тела, представляющий собой плавное распределение интенсивности в зависимости от длины волны. Однако его смещение можно определить, измеряя его температуру.

В момент, когда реликтовые фотоны стали свободно распространяться (это произошло через примерно 380 тысяч лет после Большого Взрыва), температура Вселенной составляла около трех тысяч градусов по Кельвину, и спектр реликтового излучения соответствовал тепловому спектру с таким значением. Однако с тех пор Вселенная расширялась, и длины волн этого излучения увеличились более чем в тысячу раз. Это означает, что его красное смещение составляет примерно 1100 — именно во столько раз увеличилась длина волны фотонов, и именно во столько раз

охладилась температура излучения, которая сейчас составляет 2,73 градуса Кельвина.

Если сравнить это с красным смещением самых дальних галактик, видимых телескопом "Джеймс Уэбб", то у них значения намного меньше — самые далекие известные галактики имеют красное смещение около 13-14, что означает, что их свет стал длинноволновым всего примерно в четырнадцать раз по сравнению с тем, каким он был при испускании. Это создает огромный разрыв между светом первых галактик и реликтовым фоном: нет наблюдаемых объектов в промежутке между красным смещением 13 и 1100.

Этот "провал" объясняется тем, что в этот период во Вселенной еще не было звезд и галактик — это была эпоха, когда существовал только горячий газ, который со временем остывал и постепенно начал собираться в первые звезды и галактики. Эта "темная эпоха" продолжается от момента формирования реликтового излучения до появления первых источников света, которые могли бы быть замечены телескопами.

На практике это означает, что реликтовое излучение и свет от самых дальних галактик видны нам в совершенно разных формах. Реликтовый фон мы наблюдаем как микроволновое излучение, равномерно заполняющее все небо, тогда как галактики видны точечно, и их спектры содержат линии поглощения и излучения, по которым можно определить их красное смещение. Этот разрыв в данных также означает, что изучение ранней Вселенной между этими эпохами требует других методов, например,

поиска слабых следов газа или рассеянного ультрафиолетового излучения от первых звезд.

Примерно через 3–4 миллиона лет после Большого Взрыва температура реликтового излучения снизилась до около 20 градусов Цельсия, что действительно можно назвать комфортной температурой, сравнимой с приятным днем на Земле.

В этот период Вселенная уже не была горячей плазмой, как во времена формирования реликтового излучения, но еще не стала темной и холодной, как в более поздние эпохи. Она представляла собой разреженный газ, в основном состоящий из нейтрального водорода и гелия, равномерно прогретый остаточным излучением.

Это важно, потому что в такой теплой среде могли начать формироваться первые сложные молекулы. Некоторые ученые предполагают, что в этот период могли образовываться простейшие молекулы водорода, а возможно, даже условия для возникновения химических реакций, которые позже стали ключевыми в звездообразовании.

Однако несмотря на такую «комфортную» температуру, вселенной тогда не существовало твердых поверхностей или объектов, способных удерживать тепло, как это происходит на планетах. Это был разреженный межгалактический газ, пронизанный равномерным тепловым фоном.

Со временем, по мере дальнейшего расширения космоса, температура реликтового излучения продолжила

снижаться, и сейчас оно имеет температуру всего 2,73 градуса Кельвина (примерно минус 270 градусов Цельсия), что делает его почти абсолютным холодом. Но тот короткий момент, когда во Вселенной было тепло, остается важной частью ее истории!

Несмотря на успех  $\Lambda$ CDM, продолжаются исследования альтернативных теорий, которые пытаются объяснить некоторые оставшиеся загадки. Среди них — гипотезы об измененной природе темной материи, взаимодействующей с другими компонентами космоса, или же вариации свойств темной энергии со временем. Однако на данный момент ни одна из этих моделей не получила подтверждения, и все существующие наблюдения лучше всего описываются именно стандартной моделью.

Дополнительным независимым подтверждением  $\Lambda$ CDM стали наблюдения барионных акустических осцилляций — следов плотностных волн, распространявшихся в ранней Вселенной и оставивших отпечаток в распределении галактик. Измеряя масштаб этих осцилляций, ученые получают данные о скорости расширения Вселенной и свойствах темной материи, которые полностью соответствуют предсказаниям стандартной модели.

В дополнение к сказанному, нужно учитывать, что вопрос о глобальной форме Вселенной остается одной из самых интригующих проблем современной космологии. Данные реликтового излучения, полученные спутником Planck, указывают на то, что пространство в больших

масштабах является практически плоским. Однако это не исключает возможности, что Вселенная обладает сложной топологией — например, может быть конечной, но замкнутой, наподобие трехмерной сферы или других многосвязных геометрий.

Одним из возможных вариантов является трехмерная сфера (гиперсфера), в которой пространство замкнуто, но при этом не имеет краев. В такой Вселенной два луча света, двигаясь из одной точки в противоположных направлениях, могли бы в конечном итоге встретиться снова, подобно тому, как на поверхности Земли можно обойти планету и вернуться в исходную точку. Косвенные данные из анализа реликтового фона действительно намекают на небольшие отклонения от идеальной плоскости, что может указывать на такую структуру.

Другие гипотезы предполагают еще более экзотическую топологию, например торообразную Вселенную, где пространство имеет периодические границы, и свет, проходя через один край, возвращается с противоположной стороны. Еще одна версия рассматривает додекаэдрическую топологию, основанную на идее, что Вселенная могла бы иметь форму многогранника с зеркальными гранями, создавая иллюзию повторяющихся участков пространства. Однако на данный момент данные реликтового излучения не подтверждают существование таких периодичностей в распределении флуктуаций.

Один из способов проверить гипотезу о многосвязной Вселенной — поиск зеркальных структур, то есть

областей неба, которые являются повторяющимися версиями друг друга из-за специфической геометрии пространства. Если бы Вселенная была действительно замкнутой с повторяющейся топологией, можно было бы обнаружить одинаковые паттерны в разных частях небосвода. Однако тщательный анализ данных WMAP и Planck не выявил таких совпадений, что ставит под сомнение гипотезу о замкнутой торообразной или додекаэдрической Вселенной.

Хотя современные наблюдения указывают на то, что Вселенная в больших масштабах ведет себя как бесконечное плоское пространство, окончательный ответ на этот вопрос остается открытым. Возможно, более точные измерения реликтового излучения или новые методы исследования помогут в будущем окончательно определить глобальную топологию космоса.

Реликтовое излучение играет ключевую роль в изучении Вселенной, служа своеобразным «отпечатком» ее ранней истории. Анализируя его характеристики, ученые получают сведения о фундаментальных процессах, происходивших на самых ранних стадиях космической эволюции, и уточняют ключевые параметры, определяющие развитие космоса.

Одним из важнейших открытий, сделанных благодаря реликтовому излучению, стало определение времени образования первых звезд. Когда Вселенная была молода, после периода рекомбинации она представляла собой темное пространство, заполненное нейтральным водородом и гелием. Спустя 200–400 миллионов лет



после Большого Взрыва начали формироваться первые звезды и галактики, что привело к повторной ионизации межгалактического газа. Этот процесс оставил заметный след в поляризации реликтового излучения, позволив ученым установить временные рамки эпохи реионизации.

Еще один важнейший результат анализа реликтового фона — точное определение параметров темной материи и темной энергии. Темная материя, не излучая и не поглощая свет, влияет на распределение флуктуаций температуры реликтового излучения, формируя его характерный спектр. Сравнивая наблюдаемые данные с теоретическими моделями, ученые пришли к выводу, что темная материя составляет около 27% общей массы-энергии Вселенной. Темная энергия, в свою очередь, определяет динамику расширения космоса, и измерения реликтового излучения подтверждают, что она доминирует, составляя 68% общей плотности энергии.

Реликтовое излучение также позволило уточнить верхнюю границу массы нейтрино. Эти элементарные частицы обладают чрезвычайно малой массой, но их влияние на эволюцию Вселенной оставляет след в анизотропии реликтового фона. Спутник Planck зафиксировал, что суммарная масса всех поколений нейтрино не превышает примерно 0.13 электрон вольт, что накладывает строгие ограничения на теоретические модели нейтринной физики.

Кроме того, реликтовый фон несет информацию о первичном соотношении химических элементов во Вселенной. Согласно теории нуклеосинтеза, в первые

минуты после Большого Взрыва произошло образование легких элементов: водорода, гелия и небольшого количества лития. Анализ состава реликтового излучения подтвердил, что массовая доля водорода составляет около 75%, а гелия — около 25%, что полностью соответствует предсказаниям теории.

Наконец, реликтовое излучение можно рассматривать как универсальный «код», понятный любой разумной цивилизации. Будучи фундаментальной характеристикой Вселенной, оно не зависит от культурных и технологических особенностей наблюдателей. Если когда-либо будет установлена связь с внеземными цивилизациями, реликтовый фон может служить общим ориентиром во времени и пространстве, понятным любым существам, обладающим достаточным уровнем научных знаний.

Будущее исследований реликтового излучения связано с решением ключевых вопросов современной космологии, которые остаются открытыми даже после десятилетий наблюдений и анализа. Новые миссии направлены на более детальное изучение поляризации реликтового фона, поиск следов первичных гравитационных волн и уточнение свойств темной материи и темной энергии.

Одним из главных направлений исследований остается изучение поляризации реликтового излучения. Спутники WMAP и Planck уже зафиксировали Е-моду поляризации, возникающую в результате рассеяния фотонов на электронах после эпохи рекомбинации. Однако более важной целью является обнаружение В-моды, которая

может содержать следы первичных гравитационных волн, предсказанных инфляционной теорией. Новые наземные и космические проекты, такие как BICEP Array, Simons Observatory и будущая миссия CMB-S4, направлены на регистрацию этого слабого сигнала с беспрецедентной точностью, устраняя возможные помехи от межгалактической пыли.

Поиск первичных гравитационных волн остается одной из самых сложных задач. Если их следы в реликтовом излучении будут обнаружены, это станет прямым подтверждением инфляционной модели Вселенной и поможет раскрыть физику раннего космоса на энергиях, недоступных современным ускорителям. Помимо поляризационных исследований, гравитационные волны могут быть зафиксированы с помощью будущих гравитационно-волновых обсерваторий, таких как LISA, которые будут исследовать космическое пространство в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне.

Еще одной важнейшей задачей остается уточнение природы темной материи и темной энергии. Хотя их влияние на эволюцию Вселенной хорошо описано в рамках модели  $\Lambda$ CDM, фундаментальная природа этих компонентов остается загадкой. Предстоящие миссии, такие как Euclid и Roman Space Telescope, будут анализировать крупномасштабную структуру Вселенной и особенности гравитационного линзирования, чтобы выявить возможные отклонения от стандартной модели. В частности, если темная материя не является полностью «холодной», а обладает слабым взаимодействием с обычной материей, это может проявиться в

распределении галактик и анизотропии реликтового излучения.

Темная энергия также остается предметом активных исследований. Если ее свойства изменяются со временем, это потребует пересмотра стандартной космологической модели. Наблюдения барионных акустических осцилляций, сверхновых типа Ia и кластеров галактик помогут определить, является ли темная энергия космологической константой или динамической величиной, эволюционирующей во времени.

Будущее исследований реликтового излучения обещает ответить на самые фундаментальные вопросы о строении и происхождении Вселенной. В ближайшие десятилетия новые миссии позволят значительно уточнить нашу картину космоса, открывая горизонты для новых открытий в физике элементарных частиц, гравитации и квантовой природы мироздания.

Космология продолжает углублять понимание устройства Вселенной, совершенствуя модели, основанные на данных реликтового излучения и других астрономических наблюдениях. Современная картина мироздания, описываемая моделью  $\Lambda$ CDM, с высокой точностью объясняет крупномасштабную структуру космоса, его состав и эволюцию. Однако, несмотря на все достижения, остаются нерешенные вопросы, требующие новых подходов и, возможно, пересмотра фундаментальных физических принципов.

Одним из главных вызовов современной науки остается природа темной материи и темной энергии. Эти компоненты составляют более 95% всей энергии во Вселенной, но их физическая сущность пока неизвестна. Темная материя проявляет себя через гравитационное воздействие, но до сих пор не обнаружена напрямую, несмотря на многочисленные попытки зафиксировать ее частицы в лабораторных экспериментах. Темная энергия, вызывающая ускоренное расширение Вселенной, остается еще более загадочным феноменом, природа которого может потребовать пересмотра теории гравитации или даже введения новых фундаментальных полей.

Наблюдаемые аномалии в реликтовом излучении и распределении галактик подталкивают ученых к поиску новых физических механизмов, которые могли бы объяснить эти отклонения. Необычные особенности, такие как «ось зла» или холодное пятно, могут указывать на неизвестные космологические эффекты или даже на сложную топологию пространства. Развитие новых методов наблюдений, включая детальное изучение поляризации реликтового излучения, позволяет тестировать альтернативные теории, такие как измененная гравитация или динамическая темная энергия.

Точные измерения реликтового излучения не только позволяют реконструировать прошлое Вселенной, но и дают возможность делать прогнозы о ее будущем. В зависимости от свойств темной энергии возможны разные сценарии: бесконечное расширение с постепенным охлаждением, ускоренный разрыв

структуры Вселенной («Большой разрыв»), или, напротив, циклическая эволюция с возможностью нового коллапса. Дальнейшие исследования позволят уточнить эти предсказания и, возможно, раскрыть еще не известные законы природы.

Реликтовое излучение остается важнейшим инструментом для понимания происхождения, структуры и судьбы Вселенной. Его изучение не только уточняет существующие модели, но и открывает перспективы для новых открытий, которые могут изменить фундаментальные представления о физике мироздания.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Planck, M. (1900). On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. *Annalen der Physik*, 4(3), 553–563.
2. Einstein, A. (1917). On the Quantum Theory of Radiation. *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121–128.
3. Peebles, P. J. E. (1993). *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press.
4. Dodelson, S. (2003). *Modern Cosmology*. Academic Press.
5. Fixsen, D. J. (2009). The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *The Astrophysical Journal*, 707(2), 916–920.
6. Hawking, S. (1974). Black Hole Explosions? *Nature*, 248, 30–31.
7. Kolb, E. W., & Turner, M. S. (1990). *The Early Universe*. Addison-Wesley.
8. Planck Collaboration. (2018). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
9. Stancil, P. C., Lepp, S., & Dalgarno, A. (1998). The Chemistry of the Early Universe. *The Astrophysical Journal*, 509(1), 1–10.
10. Galli, D., & Palla, F. (2013). The Dawn of Chemistry. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, 163–206.

11. Mather, J. C., & Boslough, J. (2008). *The Very First Light: The True Inside Story of the Scientific Journey Back to the Big Bang*. Basic Books.
12. Lineweaver, C. H. (1999). The Cosmic Microwave Background and the Arrow of Time. *Nature*, 401(6756), 443–446.
13. Maccone, C. (2012). *Mathematical SETI: Statistics, Signal Processing, Space Missions*. Springer.
14. Kriger, B. (2024). The inability to explain blackbody radiation by vacuum radiation: Theoretical and empirical limitations of vacuum fluctuations as a source of blackbody radiation. *Global Science News*.
15. Kriger, B. (2025). Conservation and transformation of energy in an expanding universe: The persistence of primordial energy across cosmic scales. *Global Science News*.
16. Kriger, B. (2025). The warm epoch of the early universe: A forgotten thermal equilibrium. *Global Science News*.
17. Kriger, B. (2025). The cosmic microwave background as a universal reference for interstellar communication. *Global Science News*.