



**БОРИС КРИГЕР**

**ИЗМЕРЕНИЕ  
РАССТОЯНИЙ  
ВО ВСЕЛЕННОЙ**

БОРИС КРИГЕР

ИЗМЕРЕНИЕ  
РАССТОЯНИЙ  
ВО ВСЕЛЕННОЙ



© 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.

### *Измерение расстояний во Вселенной*

Книга предлагает глубокое и последовательное исследование методов измерения расстояний в космосе, которые лежат в основе нашего понимания масштабов и структуры Вселенной. Историческое развитие этой области, начиная с древнегреческих геометрических вычислений и заканчивая использованием сверхточных современных технологий, раскрывает, как астрономы шаг за шагом раздвигали границы познания. Особое внимание уделено ключевым концепциям, таким как метод параллакса, "стандартные свечи" в лице цефеид и сверхновых типа Ia, а также красное смещение, основанное на эффекте Доплера. Эти подходы, последовательно выстраиваясь в "космическую лестницу расстояний", демонстрируют, как совокупность методов позволяет исследовать объекты от ближайших звёзд до самых удалённых галактик.

Кроме того, книга подробно анализирует физические основы явлений, таких как пульсации звёзд и эффекты расширяющейся Вселенной. Она объясняет роль технологий, включая телескопы и спутники, и подчёркивает значение этих методов для открытия таких фундаментальных явлений, как ускоренное расширение Вселенной и тёмная энергия. Автор иллюстрирует, как измерение расстояний становится инструментом для изучения истории и будущего космоса, связывая локальные наблюдения с глобальными моделями. Книга служит ярким примером того, как точные методы и теоретическая база помогают осмысливать масштабы Вселенной и нашу роль в её изучении.

## Содержание

Глава первая. История измерения расстояний в Космосе .....	5
Глава вторая. Радарные измерения расстояний на относительно небольших масштабах .....	9
Глава третья. Параллакс: Метод триангуляции .....	30
Глава четвертая. Цефеиды - Стандартные свечи Вселенной .....	37
Глава пятая. Сверхновые типа Ia и измерение расстояний до далёких галактик .....	55
Глава шестая. Красное смещения Доплера для оценки масштабов Вселенной .....	67
Глава седьмая. Космическая лестница расстояний .....	89
Глава восьмая. Реальное положение дел с измерениями расстояний во Вселенной .....	96

## **ГЛАВА ПЕРВАЯ. ИСТОРИЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ В КОСМОСЕ**

Вопрос измерения расстояний в космосе представляет собой одну из наиболее сложных задач современной науки. Грандиозные масштабы Вселенной, где расстояния измеряются не в привычных километрах, а в световых годах и парсеках, делают невозможным использование прямых методов измерения. Поэтому астрономы вынуждены полагаться на изощренные и косвенные подходы, опираясь на законы физики, свойства света и гравитацию.

Основная сложность заключается в том, что даже ближайшие объекты находятся на колоссальных дистанциях. Свет, путешествующий с невероятной скоростью, преодолевает тысячи, миллионы и миллиарды лет, чтобы достичь Земли. Наблюдатели, анализируя световые сигналы, могут лишь догадываться о расстояниях на основе моделей и сравнений. Для определения масштабов используется ряд методов, каждый из которых базируется на тщательных расчетах и наблюдениях за космическими объектами, будь то звезды, галактики или сверхновые.

История измерения расстояний во Вселенной — это повествование о том, как человечество шаг за шагом расширяло свои представления о размерах и структуре космоса, начиная от ближайших объектов и заканчивая далекими галактиками. Эти измерения необходимы для определения размеров Вселенной, изучения её структуры, возраста, темпов расширения и эволюции. Они также помогают понять природу тёмной энергии, гравитации и другие фундаментальные процессы.

В древности, до появления научных инструментов,

представления о космических расстояниях основывались на мифах и наблюдениях невооружённым глазом. Первые попытки количественного определения расстояний связаны с наблюдениями Луны. Аристарх Самосский в III веке до нашей эры предложил геометрический метод измерения расстояния до Луны и Солнца, используя угловые размеры и пропорции. Его расчёты дали неточные, но важные для того времени результаты, заложив основу для геометрического подхода.

В эпоху Ренессанса открытие гелиоцентрической системы Николая Коперника позволило рассматривать планеты как объекты, движущиеся по орбитам вокруг Солнца. В XVII веке Иоганн Кеплер вывел свои законы движения планет, включая третий закон, который связывал периоды обращения планет с их средними расстояниями от Солнца. Это позволило вычислить относительные размеры орбит, хотя абсолютные значения оставались неизвестными.

В XVIII веке метод параллакса стал первым инструментом для измерения расстояний до звёзд. Впервые его успешно применил Фридрих Бессель в 1838 году, определив расстояние до звезды 61 Лебедя. Этот метод основывался на наблюдении углового смещения звезды относительно удалённого фона при наблюдении с разных точек орбиты Земли. Результаты Бесселя дали начало количественным исследованиям за пределами Солнечной системы.

Для более удалённых объектов, где параллакс не работает из-за малости угловых смещений, в XX веке были разработаны методы «стандартных свечей». Первыми такими свечами стали цефеиды — звёзды с

переменной яркостью, открытые Анриеттой Ливитт. Она установила, что период пульсации цефеиды связан с её абсолютной светимостью. Этот метод позволил Эдвину Хабблу измерить расстояния до галактик, доказав, что Млечный Путь — лишь одна из многих галактик, и открыв расширение Вселенной.

Для ещё более далёких расстояний стали использовать сверхновые типа Ia, которые имеют предсказуемую светимость в момент максимума. Эти объекты позволили измерить расстояния до галактик на сотни миллионов и миллиарды световых лет. Исследование этих расстояний привело к открытию ускоренного расширения Вселенной и существования тёмной энергии.

В XX веке метод красного смещения стал основным инструментом для измерения расстояний на космологических масштабах. Эффект Доплера, выражающийся в смещении спектра света галактик к красной части, показал, что галактики удаляются с тем большей скоростью, чем дальше они находятся. Закон Хаббла, связывающий скорость удаления галактики с её расстоянием, стал основой современной космологии.

Эти измерения играют фундаментальную роль в понимании Вселенной. Они позволяют вычислить её возраст, масштаб и структуру, определить распределение тёмной материи и энергии, а также уточнить законы физики. Знание космических расстояний открывает путь к изучению эволюции галактик, звёзд и других объектов, формируя наше представление о месте человечества во Вселенной.

Очевидным образом, измерение расстояний в космосе — это процесс, требующий не только глубоких знаний, но и постоянного совершенствования инструментов и теорий. Лишь благодаря сочетанию точных наблюдений и передовых технологий можно приблизиться к пониманию необъятных просторов Вселенной.



## ГЛАВА ВТОРАЯ. РАДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНО НЕБОЛЬШИХ МАСШТАБАХ

Для определения расстояний на относительно небольших масштабах, в пределах ближних областей Солнечной системы, применяются радарные измерения, которые основаны на использовании радиоволн. Этот метод позволяет с высокой точностью определять расстояния до ближайших объектов, таких как ближайшие планеты, астероиды и даже некоторые кометы. Его принцип заключается в отправке радиосигнала в сторону исследуемого объекта и измерении времени, которое сигнал затрачивает на то, чтобы достичь цели, отразиться от её поверхности и вернуться обратно.

Радар (сокращение от **Radio Detection and Ranging**, то есть «радиообнаружение и дальномер») — это устройство, использующее радиоволны для обнаружения, определения расстояния, скорости и других характеристик объектов. Принцип действия радара основан на излучении электромагнитных волн, их отражении от цели и анализе возвращённого сигнала. Этот метод широко применяется в различных областях, включая авиацию, морскую навигацию, военное дело, метеорологию и астрономию.

Электромагнитные волны — это распространение энергии в виде колебаний электрических и магнитных полей, которые движутся вместе, поддерживая друг друга. Эти волны не требуют среды для передачи, поэтому могут распространяться даже в космосе, проходя через вакуум. Они окружают нас повсюду и включают широкий диапазон типов излучения: радиоволны, микроволны, инфракрасное излучение,

свет, ультрафиолет, рентгеновские и гамма-лучи. Различие между ними заключается в длине волны и энергии. Да, да! И свет, и радио волны, и рентген – все имеют одну природу и являются волнами, которые состоят из двух компонентов: электрического и магнитного полей. Эти поля колеблются перпендикулярно друг другу и направлению движения волны. Например, если электрическое поле изменяется вверх-вниз, то магнитное — вправо-влево, а сама волна движется вперёд. Источником электромагнитных волн являются заряженные частицы, которые ускоряются или меняют своё движение. Радиоволны, например, возникают, когда электроны движутся в проводах антенны, создавая колебания полей.

Радиоволны — это самые длинные электромагнитные волны. Они используются для передачи информации на большие расстояния: в радио- и телевидении, мобильной связи, навигации, а также в астрономии для изучения Вселенной. Радиоволны легко проходят через атмосферу и распространяются на значительные расстояния, что делает их идеальными для коммуникаций. Например, сигналы радиостанций, телевидения и сотовой связи передаются именно с помощью радиоволн. В зависимости от длины волны они делятся на разные диапазоны: длинные, средние, короткие и ультракороткие волны. Каждый диапазон используется для своих целей — от вещания до спутниковой связи.

Микроволны — это более короткие электромагнитные волны, которые используются в радарх, спутниковой связи и в бытовых устройствах, таких как микроволновые печи. Их особенность в том, что они могут проникать в материалы и нагревать их. Например,

в микроволновке молекулы воды внутри пищи начинают колебаться под воздействием микроволн, что приводит к нагреванию. В технике микроволны применяются для передачи данных, включая Wi-Fi и спутниковую связь, поскольку они обладают высокой проникающей способностью и устойчивостью к атмосферным помехам.

Радиоволны и микроволны широко используются в науке и технологиях. Радиоастрономия, например, позволяет изучать удалённые объекты во Вселенной, такие как пульсары и галактики, наблюдая излучение в радиодиапазоне. Микроволны, в свою очередь, используются для радарного наблюдения Земли и планет, а также для изучения реликтового излучения — древнего света, оставшегося после Большого взрыва.

Эти волны стали основой современного мира связи и технологий, позволяя передавать энергию и информацию, нагревать, сканировать и исследовать окружающую Вселенную.

Физическая основа работы радара заключается в свойствах радиоволн, которые способны распространяться в пространстве со скоростью света, отражаться от объектов и улавливаться специальными приёмниками. Радар излучает радиосигнал, который направляется на исследуемую область или объект. При попадании на препятствие часть сигнала отражается обратно, а радар фиксирует время, затраченное на этот процесс. С учётом известной скорости распространения радиоволн можно рассчитать расстояние до объекта.

Кроме измерения расстояний, радар позволяет определять скорость движущихся объектов с помощью эффекта Доплера. Если объект приближается к радару

или удаляется от него, частота отражённого сигнала изменяется. Анализ этой частотной разницы даёт информацию о скорости объекта.

Современные радары часто включают фазовые антенные решётки, позволяющие одновременно отслеживать множество целей и создавать детализированные изображения. Это особенно полезно в авиации и военной сфере. В метеорологии радары используют для наблюдения за погодными явлениями, такими как дождевые облака, грозы и даже торнадо, измеряя интенсивность осадков и направление движения воздушных масс.

Очевидным образом, радар является универсальным инструментом для исследования окружающего мира, позволяя получать данные с высокой точностью в самых различных условиях.

Радарные измерения расстояний в Солнечной системе представляют собой один из самых точных методов определения расстояний до ближайших астрономических объектов, основанный на отправке радиоволн к исследуемому объекту и измерении времени, которое сигнал затрачивает на прохождение пути туда и обратно.

История этого метода берёт начало в середине XX века, когда технологический прогресс позволил использовать радиосигналы для изучения космоса. Идея применения радиоволн для измерения расстояний появилась вскоре после изобретения радара в 1930-х годах. Первый успешный эксперимент был проведён в 1946 году в рамках проекта «Диана» в США, где радиосигналы были направлены на Луну и после отражения от её поверхности зафиксированы обратно на Земле. Это

событие стало ключевым моментом в развитии радиолокационной астрономии, доказав возможность прямого взаимодействия с космическими объектами с помощью радиоволн. В последующие годы метод радарных измерений получил активное развитие и стал применяться для изучения планет, астероидов и комет.

Например, для Венеры, находящейся на сравнительно близком расстоянии от Земли, радарные измерения позволяют уточнить её орбиту с точностью до километра. Эти данные особенно важны для навигации космических аппаратов, поскольку они дают возможность рассчитывать траектории с минимальными ошибками.

Однако метод имеет свои ограничения. Во-первых, он эффективен только на сравнительно небольших расстояниях, так как мощность радиосигнала снижается пропорционально квадрату расстояния, а отражённый сигнал становится слабым и трудным для регистрации. Это ограничивает применение радарных измерений в пределах Солнечной системы, хотя с улучшением технологий удаётся изучать всё более удалённые объекты. Во-вторых, качество измерений зависит от характеристик поверхности исследуемого объекта. Например, гладкие поверхности, как у некоторых спутников, отражают радиоволны более эффективно, тогда как пористые или неровные поверхности создают значительные искажения сигнала. Наконец, на результаты могут влиять помехи от других источников радиоволн, включая земные, а также влияние атмосферы Земли на прохождение сигнала, хотя эти эффекты минимизируются за счёт проведения измерений в строго определённых диапазонах частот.

Создание мощного радиосигнала и его фиксация после отражения требуют высокотехнологичных устройств, которые обеспечивают надёжность и точность измерений. Основные аспекты включают генерацию радиоволн, их излучение в сторону объекта, приём отражённого сигнала, обработку данных и устранение помех, включая влияние атмосферы.

Для генерации мощных радиосигналов используются специализированные передатчики, которые создают радиоволны высокой интенсивности. В основе таких систем лежат магнетроны, клистроны или гиротроны — устройства, способные генерировать стабильные электромагнитные колебания на заданных частотах. Эти передатчики соединены с антеннами, которые усиливают и направляют сигнал.

Магнетрон является генератором микроволн, где электроны взаимодействуют с электрическим и магнитным полями. Основные элементы магнетрона включают катод, испускающий электроны, анод с системой резонаторов и магнитную систему. Под действием электрического поля электроны движутся к аноду, а поперечное магнитное поле заставляет их вращаться по спиральным траекториям. Эти электроны взаимодействуют с резонаторами анода, вызывая генерацию высокочастотных электромагнитных волн. Магнетроны отличаются простой конструкцией, высокой эффективностью и частотами в диапазоне от одного до сорока гига герц, что делает их подходящими для радаров и микроволновых печей, хотя стабильность частоты у них ограничена.

Клистрон, напротив, используется как усилитель или генератор радиоволн и работает на принципе модуляции

плотности электронного пучка. Электронная пушка создаёт пучок электронов, который проходит через резонаторы, расположенные вдоль траектории его движения. В первом резонаторе электроны модулируются по скорости, а во втором резонаторе происходит их сгущение, что приводит к выделению энергии в виде электромагнитных колебаний. Клистроны обеспечивают высокую стабильность частоты, работая в диапазоне от сотен мегагерц до десятков гигагерц, и широко используются в телекоммуникациях, радиолокации и научных экспериментах.

Гиротрон, в свою очередь, представляет собой генератор миллиметровых и субмиллиметровых волн, основанный на взаимодействии высокоэнергетических электронов, движущихся по спирали в сильном магнитном поле, с электромагнитным резонатором. В гиротроне электроны, ускоренные до больших энергий, проходят через резонатор, где часть их энергии преобразуется в электромагнитное излучение на сверхвысоких частотах. Гиротроны достигают частот в диапазоне от десятков до сотен гигагерц и используются в термоядерных исследованиях, радиоспектроскопии и метеорологии.

Основное различие между этими устройствами заключается в принципах их работы, частотных диапазонах и применении. Магнетроны просты, надёжны и подходят для массового использования, клистроны обеспечивают высокую стабильность сигнала и используются там, где важна точность, а гиротроны эффективны для работы на сверхвысоких частотах и сложных научных задачах.

Антенны, как правило, представляют собой крупные

параболические рефлекторы, концентрирующие радиоволны в узкий пучок, чтобы минимизировать рассеивание энергии. Величина передаваемой мощности может достигать десятков мегаватт в импульсе, что позволяет сигналу достигать даже далёких объектов, таких как Марс или астероиды.

Наведение астрономического радара на объект в космосе — это сложный процесс, требующий высокой точности и координации множества систем. Оно начинается с расчёта точного местоположения объекта и использования сложных алгоритмов для управления антеннами, учитывая движение объекта, вращение Земли и атмосферные условия.

Первым шагом является определение координат объекта. Для этого используются эфемериды — таблицы, содержащие данные о положении небесных тел в заданный момент времени. Эти координаты вычисляются на основе законов небесной механики, с учётом влияния гравитации, орбитальных возмущений и других факторов. Если объект находится в движении, например, астероид или комета, его траектория рассчитывается заранее, включая предсказания будущего положения.

После определения координат начинается настройка антенны радара. Современные радиотелескопы и радарные системы оснащены мощными приводами, которые позволяют точно ориентировать антенну на выбранный объект. Управление этими приводами осуществляется автоматическими системами, которые следят за изменениями положения объекта из-за вращения Земли и его собственного движения. Эти системы обновляют направление антенны в реальном



времени, чтобы удерживать цель в фокусе.

Для учёта вращения Земли используются географические координаты обсерватории и расчёты её текущего положения относительно объекта. Астрономические обсерватории обычно расположены в местах с минимальным уровнем радиопомех, что облегчает наведение и улучшает качество получаемых данных.

После того как антенна наведена, радар излучает радиосигнал в направлении объекта. При наведении на движущийся объект учитывается эффект Доплера: изменение частоты сигнала из-за относительного движения радара и цели. Корректировка частоты и направления излучения позволяет компенсировать этот эффект и повысить точность измерений.

Наведение также требует учёта атмосферных условий. Плотность атмосферы и её свойства могут влиять на прохождение радиоволн, особенно в нижних слоях. Для минимизации этих эффектов используется специальное программное обеспечение, которое вносит поправки в параметры антенны и сигнала.

Современные астрономические радары, такие как Аресибо (до его разрушения) и РТ-70, оснащены высокоточными системами управления, которые могут отслеживать объекты с точностью до долей угловой секунды. Этот процесс требует слаженной работы программного обеспечения, механики и вычислительных систем, чтобы обеспечить точное наведение и успешное выполнение научных задач.

Для приёма отражённого сигнала используется та же

антенна, которая излучает радиоволны, либо отдельная, связанная с высокочувствительным радиоприёмником. Этот приёмник оснащён усилителями низкого шума, которые увеличивают слабый сигнал, возвращающийся от удалённого объекта. После этого сигнал проходит через фильтры, устраняющие шумы, и преобразуется в цифровую форму для дальнейшего анализа.

Одним из ключевых компонентов является устройство обработки сигнала — коррелятор, который сопоставляет временные характеристики переданного и принятого сигнала, чтобы точно измерить время его хода. Это время используется для расчёта расстояния до объекта.

Радарные системы в астрономии используют радиочастоты в диапазоне от нескольких сотен мегагерц до десятков гига герц . Для планетарных радаров обычно применяются частоты в диапазоне от двух до двадцати гига герц, поскольку такие волны лучше проходят через земную атмосферу и обеспечивают оптимальное соотношение между дальностью и разрешением. Например, для изучения Луны, Венеры или Марса часто используются частоты около 13,5 гига герц .

Земная атмосфера вносит искажения, поглощая и рассеивая радиоволны, особенно на более высоких частотах. Для минимизации этого эффекта используются несколько стратегий. Во-первых, выбираются частоты, для которых поглощение атмосферой минимально, например, диапазон радиоволн, которые не подвергаются сильному влиянию водяного пара или кислорода. Во-вторых, радарные обсерватории располагают в местах с минимальными атмосферными помехами, например, на больших высотах или в сухих регионах.

Кроме того, обработка сигнала включает корректировку атмосферных эффектов с использованием моделей. Влияние атмосферы (включая её плотность, влажность и температуру) учитывается для повышения точности измерений. Также применяются фазовые фильтры, устраняющие шумы от атмосферы и других источников помех.

Создание мощного радиосигнала, его приём и обработка требуют сочетания передовых технологий и инженерных решений. Использование мощных передатчиков, чувствительных приёмников, оптимальных частот и методов коррекции атмосферных влияний позволяет эффективно применять радарные системы для исследования объектов в Солнечной системе. Это делает радиолокацию одним из самых надёжных методов изучения ближнего космоса.

Антенны, используемые для астрономических радаров, могут также применяться для коммуникации с межпланетными зондами. Многие крупные радиотелескопы и радарные установки являются универсальными инструментами, способными как передавать, так и принимать радиосигналы. Однако, несмотря на эту совместимость, использование одной и той же антенны для астрономии и связи с зондами требует учёта особенностей каждой из задач.

Коммуникация с космическими аппаратами обычно осуществляется через сети глубокого космоса, такие как Deep Space Network (DSN) НАСА, в которую входят крупные антенны диаметром 34 и 70 метров, расположенные в трёх точках Земли: в Калифорнии, Испании и Австралии. Эти антенны могут отслеживать сигналы даже от аппаратов, находящихся на расстоянии

миллиардов километров, таких как «Вояджер-1» или миссию на Плутон «Новые горизонты». Благодаря высокочувствительным приёмникам и возможности передачи мощных сигналов, они обеспечивают двустороннюю связь с межпланетными зондами.

Крупные астрономические антенны, например, бывший радиотелескоп Аресибо или российские РТ-70, тоже способны выполнять функции коммуникационных станций. Эти антенны могут принимать слабые сигналы от зондов и передавать команды или данные на большие расстояния. Например, антенна РТ-70 в Евпатории использовалась для связи с космическими аппаратами, включая марсианские миссии.

Однако есть ключевые различия между задачами астрономических наблюдений и коммуникации с зондами. Приём и анализ астрономических сигналов требуют максимальной чувствительности и минимальных помех, поскольку сигналы от звёзд, галактик или пульсаров чрезвычайно слабы. Для связи с зондами требуется передача мощных радиосигналов, что может привести к износу оборудования, созданию помех и необходимости точной калибровки антенны.

Также для связи с космическими аппаратами часто используются узкие частотные диапазоны, выделенные для космической связи (например, S-диапазон или X-диапазон), тогда как для астрономических наблюдений необходимы более широкие диапазоны, включающие миллиметровые и субмиллиметровые волны.

Несмотря на эти различия, многоцелевые антенны успешно работают и в астрономии, и в космической связи. Например, радиообсерватория Голдстоун, входящая в DSN, используется как для слежения за

космическими аппаратами, так и для радарного картирования планет и астероидов. Таким образом, одни и те же антенны могут эффективно применяться для обоих направлений, если обеспечивается соответствующая настройка и управление.

Итак, радарные измерения применяются для изучения объектов Солнечной системы, включая планеты, но их эффективность зависит от расстояния до цели и характеристик отражённого сигнала. До Марса радарные измерения вполне осуществимы и давно применяются, тогда как для Юпитера и более удалённых объектов возможности метода ограничены.

Марс находится на расстоянии от 55 до 401 миллионов километров от Земли, в зависимости от положения планет на орбитах. На таких дистанциях радарные сигналы остаются достаточно сильными для обнаружения после отражения от поверхности Марса. Радарные измерения до Марса активно использовались для уточнения его орбиты, изучения поверхности и планирования миссий, таких как «Викинг», «Марс Эксплорейшн Ровер» и других. Например, с помощью радиолокации удалось определить физические размеры и параметры движения Марса с высокой точностью.

Для Юпитера, находящегося на расстоянии от 588 до 968 миллионов километров от Земли, радарные измерения сталкиваются с серьёзными трудностями. На таких расстояниях мощность отражённого сигнала уменьшается настолько, что его становится чрезвычайно сложно зафиксировать. Тем не менее, некоторые эксперименты с радиолокацией Юпитера проводились. Например, мощные радары, такие как обсерватория

Аресибо (до её повреждения), использовались для изучения системы Юпитера, включая его крупные спутники, такие как Ганимед и Европа. Отражение от этих спутников позволяет получать некоторую информацию, но точность и разрешение этих данных значительно ниже, чем для ближних планет.

Для более далёких объектов радарные измерения становятся практически невозможными. Мощность сигнала и чувствительность приёмника ограничивают область применения этого метода пределами, приближающимися к орбите Юпитера или Сатурна. Для изучения дальних планет и объектов в Солнечной системе и за её пределами применяются космические аппараты, фотометрия, спектроскопия и другие сложные методы, каждый из которых даёт уникальную информацию о свойствах удалённых небесных тел. Космические аппараты играют ключевую роль, так как они позволяют проводить прямые измерения, которые невозможно выполнить с Земли. Такие миссии, как «Вояджеры», «Кассини», «Новые горизонты» и «Юнона», отправляются к целям, чтобы исследовать их с использованием разнообразных инструментов. Эти аппараты оборудованы камерами для получения изображений, спектрометрами для анализа химического состава, магнитометрами для изучения магнитных полей, а также радарами и другими датчиками. Например, миссия «Кассини» предоставила детальные данные о кольцах Сатурна, его спутниках и атмосфере, а «Новые горизонты» стали первым аппаратом, который исследовал Плутон и пояс Койпера. Космические аппараты используют гравитационные манёвры для достижения целей и оснащены радиосистемами, обеспечивающими связь на огромных расстояниях.

Фотометрия является одним из важнейших методов дистанционного исследования, измеряя количество света, излучаемого или отражённого объектами. Анализ интенсивности света помогает изучать поверхностные свойства планет и их спутников, определять их вращение, изучать орбитальные характеристики. Например, регулярные изменения яркости объекта могут указывать на наличие кольцевых систем или атмосферы. Кроме того, фотометрия позволяет обнаруживать экзопланеты через метод транзитов: при прохождении планеты перед своей звездой её светимость уменьшается, что фиксируется приборами.

Спектроскопия дополняет фотометрию, позволяя изучать химический состав, температуру и физические условия на объектах. Этот метод основан на анализе спектра света, излучаемого или отражённого телом. Например, спектроскопия может выявить присутствие воды, метана, аммиака или углекислого газа в атмосфере планеты, определить скорость её вращения или движение через эффект Доплера. Этот подход стал основой для изучения атмосферы Юпитера и его спутников, а также для исследования далеких экзопланет.

Современные методы включают также гравитационное микролинзирование, при котором свет от удалённых звёзд искажается под влиянием гравитации проходящих мимо объектов, что помогает обнаруживать экзопланеты или тёмные объекты. Радионаблюдения используются для исследования магнитных полей, плазменных процессов и активности далёких планет. Лазерная альтиметрия, применяемая на аппаратах, таких как «Марс Глобал Сёрвейор», позволяет измерять высоты

рельефа планетарных поверхностей.

Эти методы работают в комплексе, дополняя друг друга. Космические аппараты дают точные данные из первых рук, спектроскопия и фотометрия анализируют удалённые объекты на основе их излучения, а радионаблюдения раскрывают тонкие физические процессы. Вместе они помогают раскрывать свойства планет, их эволюцию, возможное наличие жизни и место в общей картине космоса.

Однако радарные измерения до Марса осуществимы и используются с высокой точностью, а для Юпитера их применение ограничено техническими сложностями, хотя отдельные эксперименты дают ценные результаты.

Следует отметить, что радарные измерения до Солнца невозможны из-за природы самого светила. Основная причина в том, что поверхность Солнца представляет собой плазму, а не твёрдую или плотную поверхность, способную эффективно отражать радиоволны. Радиосигналы, направленные к Солнцу, будут поглощаться или рассеиваться в горячей ионизированной среде его атмосферы, прежде чем смогут вернуться обратно к приёмнику.

Кроме того, Солнце испускает интенсивное электромагнитное излучение, включая радиоволны, которое создаёт значительные помехи для радарных сигналов. Это делает невозможным различение отражённого радиосигнала от фона солнечного излучения. Таким образом, даже если бы радиосигнал мог отражаться от Солнца, его регистрация была бы чрезвычайно затруднена.

Однако расстояние до Солнца известно с высокой



точностью благодаря другим методам.

Расстояние до Солнца, известное как астрономическая единица было определено с использованием радарных измерений планет, таких как Венера или Марс, и законов небесной механики. Этот процесс основан на точных измерениях времени прохождения радиосигналов до ближайшей планеты и обратно, а также на использовании геометрии орбит планет. Вначале радиосигнал направляется к Венере или Марсу, когда планета находится в позиции наименьшего расстояния до Земли, называемой нижним соединением для Венеры или противостоянием для Марса. Сигнал, достигая планеты, отражается от её поверхности и возвращается на Землю. Зная скорость распространения радиоволн, равную скорости света, и измеряя время, которое сигнал затрачивает на прохождение этого пути, можно рассчитать точное расстояние между Землёй и данной планетой.

Далее для определения расстояния до Солнца используется соотношение орбитальных расстояний планет, определяемое законами Кеплера. Эти законы показывают, что расстояния планет от Солнца пропорциональны квадратам их орбитальных периодов. Например, для Венеры известно, что её среднее расстояние до Солнца составляет 0,72 а.е., если расстояние Земли до Солнца принять за единицу. Это соотношение позволяет связать расстояние Земли и Венеры до Солнца через известную геометрию их орбит. Когда радиосигнал фиксирует расстояние между Землёй и Венерой в километрах, эта информация используется для масштабирования всей системы. Например, если измеренное расстояние до Венеры составляет 41

миллион километров в момент, когда планеты практически выстроены в одну линию с Солнцем, то расчётная пропорция между расстояниями позволяет установить, что одна астрономическая единица равна 149,6 миллиона километров.

Этот метод работает, потому что законы небесной механики точно описывают движение планет, а радиосигналы дают абсолютные значения в километрах. Соединяя относительные орбитальные расстояния с результатами радарных измерений, учёные смогли определить астрономическую единицу с высокой точностью. Этот подход исключает необходимость непосредственного измерения расстояния до Солнца, используя радарные данные о планетах и геометрию их орбит, что позволило уточнить значение астрономической единицы как 149,597,870.7 километров.

Расстояние от Венеры до Солнца, как и расстояния других планет, стало известно благодаря применению законов Кеплера и уточнению их с помощью наблюдений и геометрических расчётов. Основу для этого положил третий закон Кеплера, который устанавливает математическую связь между периодами обращения планет вокруг Солнца и их средними расстояниями от него. Закон гласит, что квадраты орбитальных периодов планет пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца.

Сначала были известны относительные орбитальные размеры планет, то есть их расстояния друг от друга и от Солнца в условных единицах, где расстояние Земли до Солнца принималось за единицу (1 а.е.). Эти соотношения вычислялись на основе многолетних

наблюдений за движением планет на фоне звёздного неба. Например, орбитальный период Венеры составляет примерно 224,7 земных суток, а Земли — 365,25 суток. Из соотношения этих периодов можно вычислить, что среднее расстояние Венеры до Солнца равно примерно 0,72 от среднего расстояния Земли до Солнца, то есть 0,72 а.е.

Однако, чтобы перевести эти относительные расстояния в абсолютные значения, необходимо было знать хотя бы одно точное расстояние в километрах. Такой "масштаб" был установлен с помощью радарных измерений. Например, расстояние между Землёй и Венерой в момент их сближения (нижнего соединения) было измерено радиолокационным методом. Зная точное расстояние в километрах до Венеры, и учитывая её относительное расстояние до Солнца (0,72 а.е.), стало возможным вычислить абсолютное расстояние от Земли до Солнца. Таким образом, радарные измерения позволили определить масштаб всей Солнечной системы.

На основе этого метода удалось уточнить, что среднее расстояние от Венеры до Солнца составляет примерно 108 миллионов километров. Эти данные стали основой для построения точной модели Солнечной системы и калибровки всех последующих астрономических измерений.

Кроме того, для изучения Солнца используются специальные солнечные космические обсерватории, такие как Parker Solar Probe, которые не только измеряют расстояния, но и анализируют свойства солнечной атмосферы и её магнитных полей. Таким образом, хотя

прямые радарные измерения до Солнца невозможны, современные технологии позволяют получать детальную информацию о нашем светиле с помощью других методов.

Радарные измерения сыграли огромную роль в изучении Солнечной системы, позволив уточнить расстояния до Луны, планет и других объектов, создать точные карты их поверхностей и определить их физические характеристики. Этот метод остаётся важным инструментом астрономии, обеспечивая фундаментальные данные для планирования космических миссий и построения моделей движения небесных тел.

Такие измерения требуют наличия мощных передающих и приёмных устройств, способных фиксировать малейшие изменения времени прохождения сигнала. Например, для определения расстояния до Венеры радиосигнал направляют на её поверхность в момент наибольшего сближения с Землёй. Время, за которое сигнал достигает планеты и возвращается обратно, используется для расчёта расстояния с учётом скорости распространения радиоволн, которая равна скорости света.

Этот метод имеет ряд преимуществ, таких как высокая точность и независимость от атмосферных условий, которые могут влиять на видимый свет. Однако радарные измерения ограничены расстояниями, на которых радиосигнал остаётся достаточно сильным для фиксации. Таким образом, их применение возможно

только внутри Солнечной системы. Тем не менее, эти данные служат важной основой для дальнейших исследований, помогая уточнить орбиты планет и улучшить понимание динамики нашей звёздной системы.

### ГЛАВА ТРЕТЬЯ. ПАРАЛЛАКС: МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ

Метод параллакса является одним из самых фундаментальных и надёжных способов измерения расстояний до звёзд, находящихся сравнительно близко к Земле. Этот метод основан на геометрической триангуляции, используя наблюдение кажущегося смещения звезды относительно удалённого фона других небесных объектов, когда Земля перемещается по своей орбите вокруг Солнца.

Ключевая идея параллакса заключается в том, что звезда, находящаяся на ближнем расстоянии, будет казаться немного сдвинутой относительно далёких звёзд, если смотреть на неё из разных точек земной орбиты, например, с противоположных сторон её эллипса. Угол смещения звезды, который называют параллактическим углом, измеряется на основе разницы положений звезды в течение полугода. Половина этого угла, определённая в секундах дуги, и расстояние между двумя точками наблюдения, равное диаметру земной орбиты, используются для расчёта расстояния до звезды с помощью тригонометрии.

Расстояния, вычисляемые этим методом, обычно выражаются в парсеках. Один парсек определяется как расстояние до объекта, у которого параллактический угол составляет одну угловую секунду. Это эквивалентно примерно 3,26 светового года. Однако метод параллакса эффективен только для объектов, находящихся на сравнительно малых расстояниях, обычно в пределах нескольких тысяч световых лет. Для более удалённых звёзд угол смещения становится

настолько мал, что его измерение требует крайне высокой точности инструментов.

Современные телескопы, такие как орбитальный телескоп "Гайя", позволяют значительно увеличить точность измерений, продлевая возможности параллакса на расстояния, ранее недоступные. Таким образом, параллакс остаётся важным инструментом для калибровки других методов определения космических расстояний, формируя основу для понимания структуры нашей Галактики.

Метод тригонометрического параллакса является одним из самых старейших и фундаментальных способов измерения расстояний до звёзд, основанным на геометрическом принципе триангуляции. История его открытия и развития тесно связана с попытками человечества впервые количественно оценить масштабы звёздного неба. Этот метод остаётся важным инструментом в современной астрономии, особенно для объектов, находящихся относительно близко к Земле.

Аристарх Самосский в III веке до нашей эры предположил, что если Земля вращается вокруг Солнца, то ближайшие звёзды должны проявлять эффект смещения относительно удалённого фона звёзд. Однако отсутствие видимого параллакса в древности интерпретировалось как доказательство того, что звёзды находятся на бесконечном расстоянии, или как опровержение гелиоцентрической модели.

Отсутствие видимого параллакса в древности объясняется огромными расстояниями до звёзд и ограниченными возможностями инструментов,

доступных для наблюдений того времени. Параллакс — это кажущееся смещение ближнего объекта относительно более удалённого фона, которое происходит при наблюдении из двух разных точек. Для звёзд это смещение чрезвычайно мало из-за их колоссальной удалённости от Земли. Даже ближайшая к нам звезда Проксима Центавра, наблюдаемая в Южном Полушарии, имеет параллактический угол всего около 0,76 угловой секунды, что значительно меньше минимального углового разрешения человеческого глаза. В древности наблюдения велись, насколько известно, в основном только в Северном Полушарии, и невооружённым глазом, и любые угловые смещения были слишком малы, чтобы их можно было заметить.

Огромные расстояния до звёзд делали их кажущимися неподвижными на фоне более удалённых звёзд. В то же время астрономы не имели телескопов и точных угломерных инструментов, которые могли бы зафиксировать малейшие изменения их положения. Даже в эпоху раннего телескопа в XVII веке наблюдения оставались недостаточно точными, чтобы регистрировать малые углы параллакса. Более того, в древности существовало представление о неподвижном звёздном небе, где звёзды считались прикреплёнными к так называемой небесной сфере. Такое понимание усиливало убеждение, что звёзды находятся на неизменном расстоянии от Земли, и делало попытки обнаружить параллакс неактуальными. Гелиоцентрическая теория Аристарха Самосского, которая предполагала движение Земли и Солнца, не получила широкой поддержки, а отсутствие видимого параллакса интерпретировалось как доказательство неподвижности Земли.



Даже для ближайших звёзд параллакс остаётся чрезвычайно малым. Угловые смещения уменьшаются с увеличением расстояния до объекта. Например, для звезды, находящейся на расстоянии десяти световых лет, параллакс составляет всего 0,1 угловой секунды. В эпоху, когда даже секунды дуги были трудно измеримы, такие величины были вне досягаемости науки. Это укрепляло геоцентрическую модель Вселенной, в которой звёзды рассматривались как бесконечно удалённые точки света. Только с изобретением высокоточных инструментов в XIX веке параллакс звёзд удалось надёжно зафиксировать. Фридрих Бессель в 1838 году измерил параллакс звезды 61 Лебедя, что стало первым прямым доказательством огромных расстояний до звёзд и подтвердило правильность гелиоцентрической модели.

Аристарх Самосский, древнегреческий астроном и математик, около III века до нашей эры провёл один из первых известных научных экспериментов, пытаясь измерить расстояние до Солнца и Луны. Он использовал геометрический подход и наблюдения фаз Луны, чтобы оценить пропорции расстояний между Землёй, Луной и Солнцем. Несмотря на то, что его метод имел значительные ошибки из-за отсутствия точных инструментов, сам подход стал важным шагом в развитии астрономии.

Аристарх исходил из предположения, что в момент первой или последней четверти Луны, когда половина её диска освещена, Солнце, Луна и Земля образуют прямоугольный треугольник. В этом треугольнике Земля находится в одной из вершин прямого угла, Луна на

вершине угла, где свет от Солнца освещает её, а Солнце — в дальней вершине.

Основной идеей эксперимента было измерение угла между линией, соединяющей Землю и Луну, и линией, соединяющей Землю и Солнце. Этот угол, который Аристарх пытался измерить, позволял определить соотношение расстояний от Земли до Луны и от Земли до Солнца. Если бы угол измерен точно, можно было бы применить тригонометрию для вычисления пропорции между этими расстояниями.

В своих расчётах Аристарх пришёл к выводу, что Солнце находится примерно в 19 раз дальше от Земли, чем Луна. Однако реальное соотношение расстояний составляет около 400. Ошибка возникла из-за того, что угловые измерения в древности проводились невооружённым глазом, и минимальные неточности приводили к значительным отклонениям в результатах. Кроме того, Аристарх считал, что Луна и Солнце имеют одинаковый видимый размер на небе, что добавляло ещё одну предпосылку, искажающую результаты.

Несмотря на ошибки, работа Аристарха была революционной. Он первым попытался применить геометрические принципы для измерения космических расстояний, что стало основой для более поздних, более точных исследований. Его идеи вдохновили следующих астрономов и математиков, таких как Гиппарх и Птолемей, а также сформировали базу для дальнейшего развития тригонометрии и астрономии.

Только в XVII веке, после открытия телескопа, измерения параллакса стали возможны.

Физическая сущность метода заключается в наблюдении углового смещения звезды относительно более удалённого фона звёзд при наблюдении из разных точек земной орбиты. Поскольку Земля движется вокруг Солнца, наблюдения звезды через шесть месяцев позволяют зафиксировать её положение с противоположных сторон орбиты. Разница в угловом положении звезды называется параллактическим углом. Половина этого угла используется для расчётов, так как создаётся равнобедренный треугольник, где основание известно (диаметр земной орбиты), а угол измерен. Используя законы геометрии, вычисляется расстояние до звезды.

Этот метод эффективен для измерения расстояний до звёзд, находящихся в пределах нескольких тысяч световых лет. Результаты обычно выражаются в парсеках — единице измерения, равной расстоянию до объекта, параллактический угол которого составляет одну угловую секунду -- единицу измерения плоского угла, которая используется для описания очень малых углов, часто встречающихся в астрономии, геодезии и других точных науках. Она равна одной шестидесятой части угловой минуты, которая, в свою очередь, составляет одну шестидесятую градуса. Чтобы представить, насколько мала угловая секунда, можно использовать следующий пример. Если провести две линии, расходящиеся под углом в одну угловую секунду, то на расстоянии одного километра между ними окажется всего около 1 см. Для сравнения, видимый диаметр Луны или Солнца на небе составляет примерно 30 угловых минут, или 1800 угловых секунд.

В астрономии угловая секунда часто используется для

измерения параллаксов, расстояний между двойными звёздами, видимых размеров объектов или угловых скоростей. Например, если говорят, что звезда имеет параллакс в одну угловую секунду, это означает, что она находится на расстоянии одного парсека, что эквивалентно примерно 3,26 светового года.

Однако метод имеет существенные ограничения. С ростом расстояния параллактический угол становится всё меньше, и его измерение требует высокой точности приборов. Для большинства звёзд угол слишком мал, чтобы его можно было надёжно зафиксировать с Земли. Атмосфера Земли также вносит погрешности в наблюдения, искажая свет звёзд. Эти проблемы частично решены благодаря запуску космических телескопов, таких как *Gaia*, которые проводят измерения из космоса, где отсутствуют атмосферные искажения.

Метод тригонометрического параллакса остаётся основой для построения космической лестницы расстояний. Он калибрует другие методы, такие как использование цефеид и сверхновых звёзд, и помогает уточнять масштаб Галактики и её ближайших окрестностей. Несмотря на ограничения, параллакс остаётся одним из самых надёжных методов измерения космических расстояний.

## **ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ЦЕФЕИДЫ - СТАНДАРТНЫЕ СВЕЧИ ВСЕЛЕННОЙ**

Метод «стандартных свечей» стал важнейшим инструментом в измерении расстояний в астрономии, особенно для объектов, находящихся за пределами прямого применения параллакса. Среди таких «свечей» ключевую роль играют цефеиды — звёзды с переменной яркостью, которые обладают уникальным свойством: их период пульсаций напрямую связан с абсолютной светимостью, количеством энергии, которое звезда излучает в единицу времени. Если говорить проще, это "яркость" звезды, но не та, которую видно с Земли, а та, которой она обладает на самом деле, независимо от расстояния до неё.

Например, яркая звезда, которая кажется тусклой, может быть на самом деле очень мощной, но находиться далеко. Абсолютная светимость помогает сравнить звёзды так, как если бы все они находились на одном и том же расстоянии от нас — стандартно, в 10 парсеках (примерно 32,6 световых года).

Абсолютная светимость измеряется в сравнении с Солнцем. Если у звезды светимость 5, это значит, что она излучает в 5 раз больше энергии, чем наше Солнце. Таким образом, это "истинная мощность" звезды, её способность излучать энергию в космос.

Цефеиды периодически расширяются и сжимаются, что приводит к изменениям их яркости, наблюдаемым с Земли. Было установлено, что чем дольше период

пульсации цефеиды, тем больше её средняя светимость. Эта зависимость, известная как «закон Ливитт», была открыта астрономом Генриеттой Ливитт в начале XX века и стала основой для оценки расстояний. Зная период пульсации цефеиды, можно определить её абсолютную светимость, а сравнив её с видимой яркостью, измеренной с Земли, рассчитать расстояние до звезды.

Цефеиды используются для измерения расстояний до галактик, в которых они находятся, поскольку они достаточно яркие, чтобы быть видимыми на расстояниях в миллионы световых лет. Такие измерения являются основой для построения так называемой шкалы космических расстояний. Например, именно с помощью цефеид Эдвин Хаббл в 1920-х годах доказал, что туманность Андромеды является отдельной галактикой, значительно удалённой от Млечного Пути, тем самым расширив представление о размерах Вселенной.

Современные технологии, включая использование орбитальных телескопов, таких как "Хаббл", позволяют ещё точнее измерять свойства цефеид и уточнять их роль в космологии. Эти звёзды служат важнейшим мостом между методами, применимыми в пределах нашей Галактики, и теми, что используются для изучения более далёких уголков Вселенной.

Название Цефеиды связано с первой обнаруженной звездой этого типа,  $\delta$  Цефея, находящейся в созвездии

Цефей. Именно в честь этой звезды был назван весь класс, что подчёркивает важность её открытия для астрономии.

Созвездие Цефей связано с древнегреческой мифологией и входит в группу созвездий, которые отражают знаменитую легенду о Персее, Андромеде и морском чудовище. Цефей, в честь которого оно названо, был мифологическим царём Эфиопии, отцом Андромеды и мужем Кассиопеи. Его имя и роль в истории сделали его символом одного из ключевых персонажей этой легенды.

Согласно мифу, Кассиопея хвасталась, что она и её дочь Андромеда красивее морских нимф, что вызвало гнев бога морей Посейдона. В наказание морское чудовище стало разрушать их земли. Чтобы умиловить богов, Цефей и Кассиопея согласились принести свою дочь в жертву, приковав её к скале. Однако её спас герой Персей, убивший чудовище и женившийся на Андромеде.

Созвездие Цефей расположено в северном полушарии неба, рядом с созвездиями Кассиопеи и Андромеды, что символически связывает их на звёздной карте. Оно хорошо видно в северных широтах круглый год благодаря своей близости к Полярной звезде, но особенно заметно осенью. Его форма напоминает дом или треугольник с "крышей", что делает его относительно простым для нахождения на небе.

Очевидным образом, связь созвездия Цефей с мифологией подчёркивает культурное и астрономическое наследие, объединяя истории

древности с современными звёздными наблюдениями.

История  $\delta$  Цефея уходит в конец XVIII века, когда английский астроном Джон Гудрайк заметил, что её яркость меняется с определённой регулярностью. Такое открытие стало началом изучения явления переменных звёзд, для которых характерны изменения радиуса и температуры в ходе пульсаций. Эти процессы вызывают периодические колебания светимости, а их точность позволяет астрономам рассматривать такие звёзды как своеобразные "космические маяки".

Созвездие Цефей, где была обнаружена  $\delta$  Цефея, представляет собой область северного полушария неба.

После открытия  $\delta$  Цефея астрономы начали обнаруживать звёзды с аналогичными свойствами, что позволило выделить их в отдельный класс — цефеиды. Основной отличительной чертой таких звёзд стала зависимость между периодом их пульсации и светимостью. Эта связь, известная как "зависимость период — светимость", позволяет вычислять абсолютную яркость звезды, а затем определять расстояние до неё.

Хотя  $\delta$  Цефея стала отправной точкой в изучении этого феномена, другие цефеиды, например, Полярная звезда, оказались более известными благодаря своей яркости и роли в культурной истории человечества. Несмотря на это, название  $\delta$  Цефея навсегда осталось символом открытия и научного прогресса, напоминая об эпохе, когда изучение неба стало основой для понимания устройства Вселенной.

Цефеиды сегодня остаются незаменимым инструментом для астрономов, играя ключевую роль в исследовании



галактик и измерении космических расстояний. Их уникальные характеристики продолжают вдохновлять учёных на новые открытия, связывая прошлое и будущее астрономии.

Цефеиды, массивные звёзды на стадии гигантов, представляют собой ключ к пониманию физики звёздной эволюции и масштабов Вселенной. Их масса тесно связана с выдающейся светимостью, что объясняется энергией, производимой в ядре через термоядерный синтез. Чем массивнее звезда, тем большее количество энергии выделяется в её недрах, а это, в свою очередь, приводит к большей светимости. Этот принцип лежит в основе закономерностей, связывающих физические параметры звезды с её поведением.

Пульсации цефеид обусловлены так называемым "клапанным эффектом", который возникает благодаря частично ионизированному гелию в их внешних слоях. Когда гелий нагревается, его непрозрачность увеличивается, задерживая световую энергию. Это приводит к увеличению давления, которое заставляет слои звезды расширяться. В процессе охлаждения гелий становится менее ионизированным, слои становятся прозрачнее, давление падает, и звезда начинает сжиматься. Подобные циклы повторяются регулярно, определяя характерный период пульсации звезды.

Этот период тесно связан с радиусом и светимостью звезды. Чем больше размер и яркость, тем дольше длится цикл. У массивных звёзд больше радиус, что требует больше времени для прохождения звуковой волны через их структуру. Взаимосвязь "период — светимость" выражается в том, что более яркие и крупные звёзды пульсируют медленнее. Этот принцип имеет глубокие

физические основания: большая площадь поверхности звезды означает большее количество излучаемой энергии, а больший размер обуславливает медленный ритм изменений.

Универсальность этой зависимости объясняется сходством структур и процессов, протекающих в цефеидах. Эти звёзды проходят через схожие этапы эволюции, имеют близкий химический состав и механизмы пульсации. Это делает зависимость "период — светимость" стабильной и пригодной для применения к разным цефеидам, что открывает возможности для её использования в астрономии.

Пульсации цефеид, столь характерные для их зрелой фазы, исчезают с возрастом вследствие постепенных изменений в их внутренней структуре и термодинамических процессах. Это явление тесно связано с эволюционным циклом звезды, где каждая стадия диктует определённые физические параметры и динамику.

На начальных этапах жизни цефеиды её пульсации вызваны взаимодействием термоядерных реакций в ядре и эффектом Капы, обусловленным изменением непрозрачности внешних слоёв. Однако со временем запасы гелия в ядре исчерпываются, и в массивных звёздах начинают доминировать реакции синтеза углерода, кислорода и более тяжёлых элементов. Эти изменения в ядре приводят к стабилизации внешних слоёв, поскольку их реакция на давление и температуру становится менее ярко выраженной.

Когда звезда стареет, её внешние слои расширяются и

охлаждаются, постепенно покидая температурный диапазон, необходимый для возникновения эффекта Капы.

Когда звезда стареет, её внешние слои расширяются и охлаждаются, постепенно покидая температурный диапазон, необходимый для возникновения эффекта Капы,

явления, при котором увеличение непрозрачности в слоях звезды из-за ионизации гелия задерживает излучение, создаёт давление и вызывает пульсации. Назван по греческой букве "каппа", обозначающей коэффициент поглощения, то есть, непрозрачность.

Это охлаждение приводит к утрате способности поддерживать регулярные циклы расширения и сжатия, делая пульсации всё менее выраженными. Одновременно звезда начинает превращаться в красный гигант, теряя свою прежнюю структуру. Внешние слои становятся всё более разреженными и неспособными к поддержанию упорядоченных процессов, в результате чего пульсации либо хаотизируются, либо вовсе исчезают.

На поздних стадиях жизни цефеида сбрасывает внешние оболочки, образуя планетарную туманность. От звезды остаётся лишь её ядро, которое, не имея больше расширяющихся и сжимающихся слоёв, становится стабильным белым карликом. К этому моменту энергия перераспределяется равномерно, гравитационные и радиационные силы приходят в баланс, что окончательно завершает пульсационную активность.

Прекращение пульсаций — естественный результат звёздной эволюции, отражающий процесс угасания активности и перехода звезды в новые стадии. Эта последовательность событий неизбежна, и каждая из её фаз оставляет уникальный след в окружающем пространстве, будь то свет пульсирующей звезды, туманность из сброшенных слоёв или стабильное сияние белого карлика.

Солнце никогда не станет цефеидой, поскольку его масса недостаточна для прохождения таких этапов звёздной эволюции, которые характерны для этого класса звёзд. Цефеиды образуются из массивных звёзд, масса которых значительно превышает солнечную, составляя от 4 до 20 её масс. Такие звёзды обладают необходимыми условиями для возникновения пульсаций, тогда как Солнце, со своей сравнительно скромной массой, эволюционирует по совершенно иному сценарию.

Будущее Солнца будет определяться его средней массой, что исключает появление процессов, вызывающих эффект Капы — ключевой механизм, запускающий пульсации в цефеидах. Этот эффект обусловлен изменением непрозрачности и ионизации в слоях массивных звёзд с высокой светимостью. У Солнца, даже на стадии красного гиганта, энергия, выделяемая в ядре, и давление излучения будут недостаточны для появления регулярных и мощных пульсаций, подобных цефеидным.

Вместо этого Солнце пройдёт через несколько характерных для звёзд его массы этапов. Через примерно пять миллиардов лет оно начнёт расширяться, переходя в фазу красного гиганта. Его внешний радиус увеличится

настолько, что орбиты ближайших планет, включая Землю, окажутся внутри звезды. В этом состоянии Солнце будет использовать остатки гелия для термоядерного синтеза, пока топливо окончательно не иссякнет. Затем оно сбросит свои внешние слои, образуя планетарную туманность — красивую, но недолговечную оболочку из раскалённого газа. После этого останется лишь плотное ядро, состоящее из углерода и кислорода, которое превратится в белый карлик. Это состояние станет окончательной фазой существования Солнца.

В отличие от цефеид, которые пульсируют в результате сложных внутренних процессов и демонстрируют яркие изменения светимости за сравнительно короткие промежутки времени, Солнце будет изменяться постепенно. Его светимость и размеры возрастут, когда оно достигнет стадии красного гиганта, но без характерных для цефеид резких вспышек или регулярных колебаний.

Эти различия подчёркивают уникальность эволюции каждой звезды, зависящей от её массы. Массивные звёзды, такие как цефеиды, играют важную роль в космологии, помогая измерять расстояния до галактик. Солнце, напротив, продолжает демонстрировать пример более спокойного жизненного цикла, характерного для звёзд, составляющих основу нашей Галактики.

Если представить, что Солнце начало пульсировать, подобно цефеидам, то такая перемена привнесла бы в Солнечную систему разрушительные изменения. Эта гипотетическая трансформация изменила бы привычную картину неба, превратив стабильное светило в

устрашающее и непредсказуемое явление.

Солнце, которое циклически меняет свою яркость, вносило бы хаос в привычный дневной цикл. Когда звезда разгорается, её светимость возрастает, делая дневное небо ослепительно ярким, как если бы полуденный свет усилился многократно. В такие моменты жара накрывала бы Землю, высушивая почву, вызывая мощное испарение воды и заставляя экосистемы искать пути спасения от перегрева. Однако в фазе затухания, когда Солнце теряло бы свою яркость, небо становилось бы неестественно серым, температура резко падала, и на планете воцарялся бы холод, сопоставимый с внезапным приходом полярной ночи.

Сами размеры Солнца на небосклоне также изменялись бы. Во время фаз расширения его диск увеличивался бы, возможно, заполняя заметную часть неба, создавая жутковатое ощущение близости гигантского светила. В момент сжатия Солнце становилось бы меньше, его контуры уменьшались, что добавляло бы драматизма в восприятие таких перемен. Цветовые вариации усиливали бы эффект: переход от красноватых, почти багровых оттенков до жёлто-белых напоминал бы о природе процесса, где температура фотосферы играет ключевую роль.

Климатические изменения на Земле оказались бы катастрофическими. Пульсации Солнца вызвали бы экстремальные скачки температуры, что привело бы к формированию мощных ураганов, торнадо и других аномальных погодных явлений. Земля могла бы подвергнуться разрушительным ледниковым и жарким периодам, сменяющим друг друга в такт с солнечным дыханием. Такие условия сделали бы выживание

растительности невозможным, поскольку растения не успевали бы адаптироваться к столь резким сменам света и тепла. Животные, зависящие от стабильного солнечного цикла, также столкнулись бы с угрозой исчезновения.

Ночное небо, которое всегда считалось символом покоя, оказалось бы изменено до неузнаваемости. Отражение пульсирующего света на Луне придавало бы ей загадочный и тревожный облик. Её яркость менялась бы с каждым циклом, заставляя тени танцевать в непредсказуемом ритме. Фазы Луны и даже длина ночи могли бы смещаться, добавляя ещё больше хаоса.

Люди, оказавшись свидетелями такого феномена, наверняка испытывали бы чувство беспомощности и страха. Солнце, которое некогда было символом жизни и стабильности, превратилось бы в знак переменчивости и угрозы. Этот вид "дышащего" светила, по-видимому, навсегда остался бы в памяти как напоминание о хрупкости существования в масштабах космоса.

Цефеиды проходят свою пульсирующую фазу в течение весьма ограниченного промежутка времени, который, хотя и кажется значительным по человеческим меркам, составляет лишь небольшую долю их общего жизненного цикла. Это яркое и динамичное состояние, связанное с особенностями их эволюции, подчёркивает мимолётность этого этапа в сравнении с длительными процессами, происходящими в жизни звёзд.

Массивные звёзды, из которых формируются цефеиды, проводят большую часть своей жизни на главной

последовательности, где их ядра стабильно преобразуют водород в гелий. Эта фаза, благодаря балансу между гравитацией и давлением излучения, продолжается миллионы лет. Однако, по мере исчерпания водорода, внутреннее равновесие нарушается. Звезда начинает расширяться, её внешний вид и структура меняются, и она вступает в фазу гиганта, где условия становятся благоприятными для появления пульсаций.

Ключевым механизмом, обеспечивающим пульсации цефеид, является ионизация гелия во внешних слоях звезды. В этих зонах происходит попеременное сжатие и расширение, вызванное изменениями прозрачности и давления. Эти процессы возникают лишь в определённом диапазоне температур и плотностей, что ограничивает пульсирующую фазу временными рамками. Период пребывания звезды в полосе неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга-Рассела зависит от её массы и стадии внутреннего термоядерного горения. Для более массивных цефеид пульсации длятся лишь несколько сотен тысяч лет, а для менее массивных — до нескольких миллионов.

Однако пульсации — это всего лишь промежуточный этап между сжиганием водорода и исчерпанием гелия. После завершения этой фазы звезда либо сбрасывает свои внешние слои, оставляя после себя белый карлик, либо, если её масса достаточно велика, взрывается как сверхновая, превращаясь в нейтронную звезду или чёрную дыру. Таким образом, пульсирующая стадия — это переходное состояние, отражающее процессы перестройки структуры звезды и изменений её термодинамических характеристик.

Мимолётность пульсаций в масштабе жизни звезды



подчёркивает их исключительную значимость. Цефеиды играют важную роль в астрономии благодаря своей зависимости "период — светимость", что делает их ценным инструментом для измерения космических расстояний. Их относительная редкость и кратковременность существования усиливают впечатление, что эти звёзды — это своего рода маяки, мелькающие на фоне неспешного течения звёздной эволюции и многомиллиардной истории Вселенной.

RS Puppis, звезда с самым длинным зарегистрированным периодом пульсации среди классических цефеид, демонстрирует удивительную мощь звёздной динамики. Её цикл пульсации, продолжающийся около 41,4 дня, является ярким примером того, как физические процессы внутри массивных звёзд определяют их уникальные свойства. Этот период, столь продолжительный в сравнении с другими цефеидами, обусловлен её большой массой, светимостью и значительным радиусом, достигающим около 200 солнечных.

Пульсации RS Puppis, как и всех цефеид, вызваны эффектом Каппа — механизмом, при котором изменения прозрачности внешних слоёв звезды провоцируют циклическое расширение и сжатие. Во время фазы расширения звезда охлаждается, а её светимость уменьшается, тогда как в фазе сжатия происходит нагрев и увеличение яркости. Эти процессы протекают в ритме, соответствующем характеристикам звезды, и для RS Puppis ритм замедленный, так как её массивность и размеры требуют большего времени для завершения одного цикла.

Особый интерес к этой звезде связан не только с её длительным периодом, но и с окружением. RS Puppis погружена в отражающую туманность, что позволяет наблюдать световые эхо её пульсаций. Этот эффект даёт астрономам возможность не только восхищаться зрелищем, но и с высокой точностью определять расстояние до звезды — около 6500 световых лет. Таким образом, RS Puppis является не только ярким представителем своего класса, но и важным инструментом для измерений в астрономии.

В то же время эффект Каппа, на котором основаны пульсации цефеид, является ключом к пониманию природы этих звёзд. Ионизация гелия во внешних слоях звезды приводит к изменению коэффициента поглощения излучения, что запускает циклические процессы. Для RS Puppis, с её массой и температурой, этот механизм работает особенно ярко, создавая мощные и длительные пульсации.

Вопрос о возможном существовании цефеид с ещё более длинным периодом остаётся открытым. Хотя RS Puppis является эталоном для своего класса, звёзды других типов могут демонстрировать более продолжительные циклы. Например, долгопериодические переменные, такие как мириды, имеют значительно большие периоды, но они отличаются по физическим свойствам и не относятся к цефеидам. RS Puppis остаётся одной из самых впечатляющих переменных звёзд, сочетая красоту, силу и научное значение.

Процесс ионизации гелия, лежащий в основе пульсаций цефеид, становится ключевым фактором в создании их характерного циклического поведения. Когда атомы

гелия теряют электроны под воздействием высоких температур, их взаимодействие с излучением существенно изменяется, что приводит к важным последствиям для динамики внешних слоёв звезды.

Ионизированный гелий, например  $\text{He} + \text{He}^+ + \text{He}^{++}$ , представляет собой атом, который утратил один из своих электронов, становясь более "активным" в поглощении и рассеянии излучения. Это связано с процессами свободно-свободного и свободно-связанного поглощения, при которых энергия фотонов преобразуется в тепло. Эти механизмы приводят к тому, что внешние слои звезды становятся менее прозрачными. Такое состояние возникает при определённых температурах, в частности, около 30,000 кельвинов, когда зона частичной ионизации достигает своего максимума. Именно в этой зоне коэффициент поглощения резко возрастает, создавая эффект "ловушки" для энергии.

Когда излучение задерживается во внешних слоях звезды, энергия начинает накапливаться, приводя к повышению давления и температуры. Под воздействием этих сил внешние слои начинают расширяться. Расширение, в свою очередь, вызывает охлаждение этих областей, что способствует обратному процессу — рекомбинации гелия, то есть восстановлению его электронов. При этом прозрачность вещества увеличивается, излучение высвобождается, и давление падает. Эти изменения создают чередование фаз расширения и сжатия, определяющих пульсации звезды.

Механизм пульсаций, зависящий от ионизации гелия, действует только в определённых условиях, таких как температура, химический состав и светимость звезды.

Для цефеид этот процесс становится особенно значимым, поскольку именно он обеспечивает устойчивость их циклов. Задержка излучения и изменение давления во внешних слоях звезды приводят к тому, что светимость звезды изменяется с чёткой периодичностью, связанной с её внутренними физическими параметрами.

Таким образом, ионизация гелия играет роль своего рода "клапана", регулирующего энергетические потоки и задающего ритм звёздным пульсациям. Этот процесс, кажущийся на первый взгляд сложным, является фундаментальным для понимания природы переменных звёзд и их эволюции. Именно благодаря ему цефеиды становятся уникальными маяками в космическом пространстве, указывая путь к далёким галактикам и расширяя горизонты знаний о Вселенной.

Исследования, посвящённые процессам ионизации, непрозрачности и взаимодействия излучения с веществом, основываются на сочетании лабораторных экспериментов, теоретического анализа и компьютерного моделирования. Несмотря на невозможность полного воспроизведения звёздных условий на Земле из-за их экстремальности, современные технологии позволяют детально изучать ключевые аспекты этих явлений.

Ионизация, лежащая в основе эффекта Каппа, активно исследуется в высокотемпературных плазмах. Лазерные и микроволновые установки позволяют создавать условия, при которых газы нагреваются до температур, достаточных для перехода атомов в ионизированное состояние. Эксперименты подтверждают теоретические

модели, такие как уравнения Сааха, которые описывают равновесие между ионизированными и нейтральными атомами при заданных температурах и давлениях. Эти исследования обеспечивают понимание того, как ионизированный гелий ведёт себя в условиях, сходных со звёздными внешними слоями.

Изучение непрозрачности, или способности вещества поглощать и рассеивать излучение, проводится с использованием спектрометров и мощных источников света, таких как рентгеновские лазеры. Эти эксперименты помогают измерить коэффициенты поглощения для различных элементов и их ионизированных форм, что играет ключевую роль в моделировании звёздной атмосферы. Например, взаимодействие фотонов с ионами и свободными электронами в плазме воспроизводит процессы, происходящие в пульсирующих звёздах.

В институтах высоких энергий проводятся эксперименты, приближенные к звёздным условиям. Огромные лазерные установки, такие как Laser MegaJoule или Национальный комплекс зажигания (NIF), создают высокотемпературную плазму, где исследуются физические процессы, сходные с теми, что происходят в недрах звёзд. Эти эксперименты позволяют уточнять физические модели, которые затем используются в астрономии.

Компьютерное моделирование играет решающую роль в изучении процессов, связанных с эффектом Каппа. Программные коды рассчитывают коэффициенты непрозрачности, основанные на фундаментальных законах физики и результатах лабораторных измерений. Эти данные интегрируются в модели пульсаций звёзд,

что позволяет предсказать периоды и амплитуды изменений светимости. Сравнение с наблюдениями звёзд, такими как цефеиды, показывает высокую степень соответствия между теорией и реальностью.

Астрономические наблюдения остаются финальным подтверждением точности этих исследований. Телескопы, такие как Hubble и James Webb, фиксируют изменения светимости и температуры звёзд, подтверждая механизмы, связанные с эффектом Каппа. Более того, наблюдения пульсаций цефеид демонстрируют удивительную точность предсказаний, сделанных на основе теоретических моделей.

Эти методы совместно создают комплексную картину процессов, лежащих в основе пульсаций звёзд. Лабораторные эксперименты, теоретические расчёты и наблюдения с телескопов сливаются воедино, формируя наше понимание явлений, которые невозможно увидеть напрямую, но которые продолжают вдохновлять на новые открытия в астрофизике.

## **ГЛАВА ПЯТАЯ. СВЕРХНОВЫЕ ТИПА Ia и ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ДАЛЁКИХ ГАЛАКТИК**

Так называемые, сверхновые звёзды типа Ia представляют собой уникальные космические явления, возникающие в тесных двойных системах, где одна из звезд — белый карлик. Эти звезды, уже исчерпавшие свое топливо и завершившие активную фазу ядерного синтеза, состоят в основном из углерода и кислорода. Однако их спокойствие нарушается, когда вторая звезда — чаще всего более массивный компаньон, находящийся на стадии гиганта или даже основной последовательности, — сближаясь или расширяясь, позволяет перетекать свою материю на белый карлик.

Постепенно белый карлик накапливает массу, приближаясь к пределу Чандрасекара, который составляет около 1,4 массы Солнца. Достигнув этого критического значения, структура звезды становится нестабильной, и давление, удерживающее её от дальнейшего коллапса, перестает справляться. В этот момент начинается термоядерная реакция, охватывающая звезду практически мгновенно. Взрыв происходит с невероятной яркостью, которая затмевает свет целой галактики на короткий промежуток времени.

Сверхновые типа Ia имеют особое значение для астрономов, так как их светимость считается стандартной свечой во Вселенной. Это связано с тем, что такие взрывы всегда происходят при схожих условиях, что позволяет с высокой точностью оценивать расстояния до удалённых объектов. Их спектральные характеристики и кривые блеска изучаются с целью понять процессы, происходящие в момент

колоссального выброса энергии.

Остатки белого карлика, разлетающиеся после взрыва, обогащают межзвёздную среду тяжелыми элементами, такими как железо и никель. Эти элементы становятся строительным материалом для новых звёзд и планет, внося вклад в химическое разнообразие космоса.

Причина, по которой термоядерное слияние в белом карлике происходит одномоментно, а не возобновляет его свечение в качестве звезды, кроется в особенностях физики вырожденного состояния вещества, в котором находятся белые карлики.

В белом карлике вещество находится в состоянии вырожденного газа. Вырожденный газ - это крайне плотная материя, где давление создаётся не тепловыми процессами, как в обычных звёздах, а квантовыми эффектами. Давление вырождения возникает из-за принципа Паули, запрещающего двум фермионам (например, электронам) занимать одно и то же квантовое состояние. Именно это давление поддерживает белый карлик от коллапса под действием гравитации. Однако это давление имеет свои ограничения, и именно их преодоление при больших массах объекта ведёт к формированию нейтронной звезды или чёрной дыры.

Давление вырождения электронов способно сопротивляться гравитации, пока масса белого карлика не превышает предела Чандрасекара (около 1,4 массы Солнца). При достижении или превышении этого порога сила гравитации становится настолько большой, что электроны сталкиваются с протонами, образуя нейтроны



через процесс обратного бета-распада. На этом этапе белый карлик утрачивает свою устойчивость, так как давление вырождения электронов больше не способно компенсировать гравитационное сжатие.

В результате коллапса ядро звезды превращается в нейтронную звезду, где давление вырождения уже создаётся не электронами, а нейтронами. Принцип Паули продолжает действовать, теперь предотвращая нейтроны от занятия одного и того же квантового состояния. Однако и это давление имеет свой предел. Если масса коллапсирующего ядра превышает предел Толмана–Оппенгеймера–Волкова (порядка 2-3 масс Солнца, в зависимости от модели), даже давление вырождения нейтронов не может остановить дальнейший коллапс.

Когда масса становится слишком великой, гравитация доминирует над всеми известными силами сопротивления. Нейтроны сжимаются до такой степени, что их состояния уже не различимы, и материя перестаёт существовать в привычной форме. Это приводит к образованию чёрной дыры — объекта, в котором гравитация настолько сильна, что никакая сила, даже квантовая, не способна противостоять коллапсу.

Очевидным образом, принцип Паули ограничивает плотность материи на определённом уровне, но с ростом массы наступает момент, когда гравитация подавляет все виды вырожденного давления. Это и становится причиной формирования чёрной дыры.

Итак, когда белый карлик начинает аккумулировать материю от звезды-компаньона, его масса растёт. В какой-то момент температура и плотность в ядре достигают порога, достаточного для начала

термоядерных реакций, таких как слияние углерода и кислорода. Однако в вырожденном веществе процесс нагревания от начавшейся реакции ведёт к катастрофическим последствиям. В обычной звезде нагрев приводит к расширению внешних слоёв, что, в свою очередь, снижает плотность и температуру, тем самым стабилизируя ядерные реакции. Но в вырожденной материи увеличение температуры не приводит к расширению, так как давление вырождения практически не зависит от температуры. Это создает ситуацию, в которой реакция развивается как цепная лавина: локальный рост температуры ускоряет слияние, что ещё больше нагревает вещество.

В результате вместо медленного и стабильного горения, как в звёздах, происходит мгновенное воспламенение всего вещества белого карлика. Вся масса, накопленная к этому моменту, за считанные секунды вовлекается в термоядерные реакции, освобождая колоссальное количество энергии. Это приводит к взрыву, разрушающему звезду, а не просто к возобновлению её свечения.

Иными словами, белый карлик не может восстановить устойчивое состояние звезды из-за того, что процесс в нём носит разрушительный характер, а вырожденное состояние материи исключает механизмы саморегуляции, характерные для обычных звёзд.

Белый карлик накапливает вещество от звезды-компаньона через процесс, называемый аккрецией. В двойной системе, если одна из звезд — белый карлик, а другая находится на стадии гиганта или главной последовательности, внешние слои компаньона могут

выйти за предел его гравитационного удержания. Это происходит, когда компаньон расширяется, заполняя свою полость Роша — область, в пределах которой его гравитация удерживает вещество. Материя начинает перетекать с поверхности звезды-компаньона на белый карлик, формируя аккреционный диск.

По мере накопления материи масса белого карлика увеличивается, и его плотность и температура постепенно растут. Когда масса достигает примерно 1,4 массы Солнца, известной как предел Чандрасекара, белый карлик становится нестабильным, что приводит либо к термоядерному взрыву (сверхновая типа Ia), либо к коллапсу в нейтронную звезду.

История открытия предела Чандрасекара тесно связана с именем выдающегося индийского астрофизика Субраманьяна Чандрасекара. В 1930 году, будучи молодым студентом, он рассматривал вопрос о конечных стадиях эволюции звёзд. Используя законы квантовой механики и специальной теории относительности, Чандрасекар изучил состояние вырожденного газа электронов, который обеспечивает устойчивость белого карлика. Он обнаружил, что давление вырождения способно противостоять гравитационному коллапсу только до определённой массы.

Этот предел, названный в его честь, равен примерно 1,4 массы Солнца и определяется тем, что при достижении этой массы энергия гравитационного сжатия превышает сопротивление вырожденного газа. Тогда звезда неизбежно коллапсирует, так как электроны не могут больше поддерживать её структуру.

Открытие Чандрасекара не сразу нашло признание.

Некоторые ведущие учёные того времени, такие как Артур Эддингтон, критиковали его выводы. Однако дальнейшие исследования подтвердили правоту молодого учёного, и его работа стала основой для понимания эволюции звёзд. За свой вклад в астрофизику Чандрасекар был удостоен Нобелевской премии в 1983 году, а его исследования о конечных стадиях звёздного существования до сих пор остаются важным этапом в изучении космоса.

Сверхновые типа Ia считаются одними из самых предсказуемых источников света во Вселенной. Их максимальная светимость, хотя и может слегка варьироваться, достаточно стабильна, чтобы использовать их как стандартные свечи для измерения космических расстояний. Однако это утверждение имеет нюансы, и история их изучения показывает, что предположение о постоянной яркости оказалось не таким однозначным, как предполагалось изначально.

Наиболее существенный прогресс в понимании предсказуемой яркости произошел благодаря открытию корреляции между кривой блеска (тем, как светимость меняется со временем) и максимальной светимостью. Это зависимость, известная как "закон Филипса", открытая в 1993 году. Согласно этому закону, более медленно угасающие сверхновые имеют большую максимальную яркость, а более быстро угасающие — меньшую. Используя эту корреляцию, астрономы могут калибровать яркость сверхновой, делая измерения расстояний гораздо более точными.

Современные наблюдения показывают, что погрешность в определении расстояний с использованием сверхновых

типа Ia составляет около 7 %. Это невероятно точный результат для космологических масштабов. Однако даже такие малые расхождения требуют постоянной работы по улучшению моделей и учёта факторов, таких как межзвёздная пыль, различия в химическом составе взрыва и среда вокруг звезды.

Понимание того, что яркость сверхновых типа Ia может изменяться с течением времени, привело к более глубокому анализу их свойств. В ранней Вселенной химический состав звёзд был иным — они содержали меньше тяжёлых элементов (металличности). Это могло влиять на процесс аккреции и конечные характеристики взрыва. Также тип звезды-компаньона в двойной системе может варьироваться: это может быть либо красный гигант, либо другой белый карлик. Такие вариации могут приводить к отличиям в энерговыделении и, следовательно, яркости.

На ранних этапах наблюдений считалось, что сверхновые типа Ia всегда абсолютно идентичны, но более поздние данные показали, что их свойства могут слегка меняться в зависимости от условий образования. Тем не менее, выявление этих изменений позволило уточнить корреляции, такие как зависимость от металличности или других факторов.

Сверхновые типа Ia кардинально отличаются от других типов сверхновых по механизму взрыва. В то время как сверхновые типа II и другие типы связаны с коллапсом массивных звёзд, приводящим к образованию нейтронной звезды или чёрной дыры, тип Ia происходит из термоядерного взрыва белого карлика.

Сверхновые типа Ia обладают рядом важных отличий, выделяющих их среди других типов взрывов звёзд. Они происходят в белых карликах, уже полностью исчерпавших свой водородный запас, поэтому их спектры не содержат линий водорода, что резко контрастирует с характеристиками сверхновых типа II. Эти взрывы демонстрируют предсказуемую светимость, так как термоядерный процесс в белом карлике, достигшем предела Чандрасекара, протекает сходным образом, обеспечивая стабильные показатели яркости. В отличие от этого, сверхновые типа II зависят от массы, химического состава и других особенностей исходной звезды, из-за чего их светимость варьируется значительно сильнее. Ещё одним ключевым отличием является состав выброшенного вещества: сверхновые типа Ia обогащают космос тяжёлыми элементами, такими как железо и никель, которые формируются в результате термоядерных реакций, тогда как сверхновые типа II выбрасывают преимущественно более лёгкие элементы, такие как кислород и углерод.

Если бы предсказуемость яркости сверхновых типа Ia оказалась сильно нарушенной, это поставило бы под сомнение всю шкалу расстояний, используемую для измерения расширения Вселенной. Однако, благодаря учёту множества факторов и калибровке моделей, астрономы с высокой точностью измеряют расстояния до галактик. Использование других методов, таких как красное смещение и наблюдение за другими стандартными свечами, позволяет перепроверить эти измерения.

Калибровка яркости сверхновых типа Ia представляет собой важный этап в использовании этих объектов как

стандартных свечей для измерения расстояний во Вселенной. Основная идея заключается в учёте зависимости максимальной светимости от скорости угасания их блеска, что позволяет привести наблюдаемые различия к единой шкале.

Сверхновые типа Ia обладают уникальной характеристикой: их кривые блеска, то есть изменение светимости с течением времени, показывают связь между яркостью и временем затухания. Чем медленнее сверхновая угасает, тем больше энергии было выделено в процессе взрыва, а значит, её максимальная яркость выше. Это ключевое соотношение, известное как "соотношение ширина-пик" (или закон Филипса), позволяет с высокой точностью скорректировать светимость сверхновых.

Процесс калибровки начинается с тщательных наблюдений кривой блеска сверхновой. Наиболее яркий момент взрыва используется как опорная точка, после чего отслеживается, насколько быстро светимость снижается. Для этого измеряют время, за которое блеск падает, например, на одну или несколько звёздных величин, или анализируют более сложные характеристики кривой.

Затем эта информация используется для вычисления абсолютной светимости, то есть истинного количества энергии, выделенной сверхновой, с учётом поправок. Уже после этого измеренные значения сравниваются с наблюдаемой светимостью, что позволяет определить расстояние до объекта.

Калибровка яркости также учитывает влияние межзвёздной пыли, которая может поглощать часть света и изменять видимую яркость. Для этого астрономы

изучают спектры сверхновой и оценивают степень поглощения света на определённых длинах волн, что позволяет внести дополнительные поправки.

Система, основанная на этих принципах, настолько точна, что сверхновые типа Ia сыграли ключевую роль в открытии ускоренного расширения Вселенной и существования тёмной энергии. Несмотря на значительные успехи, исследователи продолжают улучшать модели, чтобы учитывать различия в химическом составе звёзд-предшественниц и условиях окружающей среды, что может оказывать небольшое, но значимое влияние на светимость.

Измерение расстояний с использованием сверхновых типа Ia опирается на фундаментальный принцип астрономии: связь между видимой звездной величиной объекта и его абсолютной светимостью. Видимая яркость, наблюдаемая с Земли, отражает количество света, достигающего нас через космическое пространство, тогда как абсолютная светимость — это внутренняя характеристика объекта, не зависящая от расстояния. Разница между этими величинами позволяет вычислить расстояние по закону обратных квадратов.

Для сверхновых типа Ia абсолютная светимость определяется с высокой точностью благодаря их свойству быть стандартными свечами. Когда такие сверхновые вспыхивают, их яркость можно сравнить с предсказанной, что делает возможным оценить расстояние до их галактик с небольшой погрешностью. Это позволило использовать их в качестве космологических маркеров на масштабах, охватывающих миллиарды световых лет.



Этот метод стал основой для открытия ускоренного расширения Вселенной. Наблюдения сверхновых в удалённых галактиках, проведённые в 1998 году двумя независимыми научными группами (Supernova Cosmology Project и High-Z Supernova Search Team), показали, что удалённые сверхновые имеют меньшую видимую яркость, чем ожидалось. Этот результат свидетельствовал о том, что Вселенная расширяется быстрее, чем предполагалось ранее, что привело к открытию тёмной энергии — загадочного компонента, составляющего около 70% массы-энергии Вселенной и оказывающего антигравитационное воздействие.

Сверхновые типа Ia обладают рядом преимуществ, делающих их незаменимыми в космологии. Во-первых, их высокая светимость позволяет наблюдать эти объекты на огромных расстояниях, что делает возможным изучение далёкого прошлого Вселенной. Во-вторых, их стандартность обусловлена схожими условиями взрывов: термоядерное сгорание белых карликов близ предела Чандрасекара приводит к довольно одинаковым характеристикам светимости. Универсальность проявляется в том, что такие события происходят в самых разных галактиках, независимо от их возраста или состава.

Однако астрономы продолжают совершенствовать методы и модели, чтобы уточнить измерения. Исследуются возможные отклонения от стандартности, например, влияние химического состава звезды-компаньона, окружающей среды или эволюции звёздного населения в ранней Вселенной. Также разрабатываются более сложные корреляции, учитывающие мелкие особенности кривых блеска и

спектров сверхновых.

Эти исследования углубляют понимание природы сверхновых типа Ia и расширяют их применение в изучении структуры, масштаба и эволюции Вселенной. Таким образом, сверхновые остаются одним из ключевых инструментов, благодаря которым люди способны "измерять" космос и раскрывать его величественные тайны.

## **ГЛАВА ШЕСТАЯ. КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ ДОПЛЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ МАСШТАБОВ ВСЕЛЕННОЙ**

Метод красного смещения, основанный на эффекте Доплера, является ключевым инструментом для измерения расстояний до удалённых галактик и понимания масштабов Вселенной. Когда свет отдалённого объекта проходит через пространство, расширяющееся из-за космического расширения, длина его волн увеличивается, что приводит к смещению спектра света в красную часть. Этот феномен, называемый красным смещением, позволяет оценить скорость удаления объекта от наблюдателя.

Свет — это электромагнитная волна, которая распространяется в пространстве и несёт энергию. Он состоит из множества разных длин волн, каждая из которых соответствует определённому цвету. Когда свет проходит через призму, как впервые показал Исаак Ньютон, он разлагается на спектр — последовательность цветов от красного до фиолетового. Этот процесс, называемый дисперсией, происходит из-за того, что разные длины волн отклоняются под разными углами при прохождении через прозрачные среды.

Открытие спектра света принадлежит Ньютону. В 1666 году он пропустил солнечный свет через стеклянную призму и увидел, как белый свет разложился на семь цветов радуги. Это открыло дорогу к пониманию того, что свет состоит из множества длин волн, каждая из которых характеризуется своей энергией.

Длины волн в спектре света измеряются в нанометрах. Красный свет имеет самые длинные волны, около 700 нанометров, тогда как фиолетовый — самые короткие,

около 400 нанометров. Когда свет попадает на вещество, атомы в этом веществе могут поглощать определённые длины волн. Электроны в атомах переходят на более высокий энергетический уровень, поглощая свет, а затем возвращаются обратно, испуская энергию. Однако испускаемый свет часто рассеивается в разные стороны, из-за чего линии в спектре поглощения выглядят тёмными, а линии в спектре излучения — яркими.

Эффект Доплера был открыт австрийским физиком Кристианом Доплером в 1842 году. Он заметил, что частота волны меняется в зависимости от движения источника относительно наблюдателя. Например, звук сирены автомобиля становится выше, когда он приближается, и ниже, когда отдаляется. Этот же эффект применяется к свету: если объект удаляется, его свет смещается в сторону красного конца спектра (красное смещение), а если приближается — в сторону синего (синее смещение). Открытие Доплера сыграло ключевую роль в астрономии, позволив изучать движение звёзд и галактик.

Эдвин Хаббл в 1929 году обнаружил, что скорость удаления галактик пропорциональна их расстоянию от Земли.

Иными словами, чем дальше находится объект, тем быстрее он удаляется. Скорость определяется как произведение расстояния до объекта на постоянную Хаббла — величину, описывающую скорость расширения Вселенной.

Постоянная Хаббла характеризует скорость расширения Вселенной и имеет ключевое значение для космологии.

Для определения красного смещения астрономы анализируют спектры света галактик, фиксируя смещение характерных линий, связанных с излучением определённых химических элементов. Чем сильнее смещение, тем выше скорость удаления галактики, что, в свою очередь, связано с её расстоянием.

Метод красного смещения применим для объектов, находящихся на огромных расстояниях, достигающих миллиардов световых лет. Он стал основой для изучения крупномасштабной структуры Вселенной и подтверждения теории Большого взрыва. Красное смещение также позволило открыть важные космологические явления, такие как ускоренное расширение Вселенной, объясняемое существованием тёмной энергии.

Метод красного смещения начинает играть ключевую роль для определения расстояний, начиная с масштабов, где эффект расширения Вселенной становится доминирующим. Это примерно от 100 миллионов световых лет (порядка 30 мегапарсек) и далее.

На меньших расстояниях, таких как внутри нашей Галактики или ближайших галактик (до примерно 10-30 миллионов световых лет), основным способом определения расстояний остаются методы, не зависящие от космологического красного смещения. Это, например, параллакс, стандартные свечи (такие как цефеиды) и поверхностная яркость объектов.

Причина в том, что на относительно малых масштабах движение объектов определяется в большей степени локальными эффектами, такими как гравитационные

взаимодействия с соседними галактиками. На этих расстояниях вклад космологического расширения становится незначительным по сравнению с собственными движениями объектов.

С ростом расстояния, когда локальные скорости становятся пренебрежимо малыми по сравнению с космологическим расширением, метод красного смещения становится основным инструментом. На расстояниях в сотни миллионов или миллиарды световых лет красное смещение напрямую связано с расширением пространства, что делает его надёжным и универсальным способом измерения космологических расстояний.

Метод красного смещения был подтверждён независимыми наблюдениями с использованием сверхновых типа Ia и цефеид, которые являются стандартными свечами для измерения расстояний. Сверхновые типа Ia обладают предсказуемой светимостью, что позволяет определять расстояния до далёких галактик. Наблюдения этих объектов подтвердили, что их видимая яркость меняется в полном соответствии с красным смещением, вызванным расширением Вселенной. Эти данные не только доказали правильность метода красного смещения, но и сыграли ключевую роль в открытии ускоренного расширения Вселенной и тёмной энергии. Цефеиды, представляющие собой переменные звёзды, имеют надёжную связь между периодом изменения их яркости и абсолютной светимостью. Они используются для измерения расстояний в пределах нескольких десятков миллионов световых лет. Совместные наблюдения цефеид и сверхновых позволяют калибровать

светимость сверхновых и создавать "лестницу расстояний" — метод, соединяющий разные шкалы измерений. Такое сочетание подтвердило, что измеренные расстояния и значения красного смещения согласуются между собой. На больших расстояниях, где применение цефеид становится невозможным, метод красного смещения остаётся основным инструментом. Наблюдения демонстрируют высокую согласованность между всеми этими методами, что укрепляет уверенность в правильности использования красного смещения для измерения космологических расстояний.

Современные наблюдательные программы и инструменты, такие как телескопы "Джеймс Уэбб" и "Европейский сверхбольшой телескоп", позволяют измерять красное смещение с ещё большей точностью. Это способствует не только уточнению постоянной Хаббла, но и углублённому пониманию эволюции космических структур и фундаментальных свойств нашего мира.

Сомнения в том, что смещение спектра связано именно с эффектом Доплера и удалением источников света, были устранены благодаря сочетанию теоретических моделей, наблюдений и анализа альтернативных гипотез. Основным подтверждением доплеровской природы красного смещения стало открытие линейной зависимости между величиной смещения и расстоянием до галактик, известной как закон Хаббла. Этот факт согласуется с ожиданиями от расширяющейся Вселенной, где более удалённые объекты движутся быстрее. Альтернативные гипотезы, такие как "старение света" или комптоновское рассеяние, не могут объяснить

такую закономерность: они предсказывают либо несистематические, либо нелинейные эффекты, которые не наблюдаются.

Теория относительности также играет ключевую роль в подтверждении того, что красное смещение вызвано расширением пространства. Свет, излучённый в прошлом, растягивается вместе с самим пространством, что увеличивает длину волны, сохраняя пропорцию с расстоянием. Дополнительно, спектры галактик содержат характерные линии поглощения, связанные с определёнными химическими элементами. Эти линии сохраняют свои относительные положения при смещении, что доказывает, что смещение связано с движением источников, а не с изменениями в природе света.

Альтернативные объяснения, такие как гравитационное красное смещение, были рассмотрены, но они не подходят для большинства наблюдений. Гравитационное смещение спектра связано с изменениями времени вблизи массивных объектов, но его величина зависит от локальных условий, а не от расстояния. Расчёты показывают, что гравитационное смещение не может объяснить наблюдаемую величину и масштаб эффекта в космологии. Гипотеза старения света, предполагавшая, что свет теряет энергию на пути, была отвергнута из-за отсутствия физического механизма, который мог бы объяснить подобный процесс, и потому, что она не предсказывает наблюдаемые закономерности, такие как закон Хаббла или сохранение характеристик спектров.

Эффект Комптона, при котором фотоны рассеиваются на электронах, также был исключён, так как он приводит к



размытию спектральных линий, чего не наблюдается в реальности. Наблюдаемые линии спектров остаются чёткими и смещёнными целиком, что подтверждает, что причина смещения — движение источников, а не взаимодействие света с частицами на пути.

Для проверки предположений о том, что течение времени или физические законы в ранней Вселенной могли отличаться от современных, проводятся наблюдения далеких объектов, таких как квазары, и анализируется спектр их света. Эти наблюдения показывают, что основные физические константы, такие как скорость света или параметры взаимодействий, остаются неизменными даже на самых больших расстояниях и временах. Совокупность всех этих факторов убедительно доказывает, что наблюдаемое смещение спектра связано с эффектом Доплера и расширением пространства.

Наблюдения красного смещения и закон Хаббла сыграли ключевую роль в определении возраста Вселенной, поскольку они позволили установить её скорость расширения и экстраполировать это движение назад во времени к моменту, когда всё вещество было сосредоточено в одной точке — моменту Большого взрыва.

Закон Хаббла, устанавливающий связь между скоростью удаления галактик и их расстоянием, дал учёным возможность измерить скорость расширения пространства. Постоянная Хаббла, являющаяся коэффициентом пропорциональности в этом законе, характеризует скорость увеличения расстояния между объектами во Вселенной. Зная эту величину, можно рассчитать, сколько времени понадобилось для

достижения текущего размера Вселенной.

Если представить, что расширение происходило равномерно на протяжении всего времени, то возраст Вселенной можно оценить как обратную величину постоянной Хаббла. Этот простой расчёт предполагает линейное расширение и даёт приблизительное значение возраста. Однако дальнейшие исследования показали, что скорость расширения Вселенной изменялась со временем из-за влияния гравитации и тёмной энергии. На ранних стадиях гравитация замедляла расширение, но в последние несколько миллиардов лет тёмная энергия вызвала его ускорение.

Для уточнения возраста Вселенной учёные использовали модели космологической эволюции, учитывающие параметры, такие как плотность материи, тёмной энергии и излучения. Эти данные были дополнены измерениями реликтового излучения — слабого микроволнового излучения, оставшегося от Большого взрыва, которое содержит информацию о состоянии Вселенной в возрасте около 380 тысяч лет. Совмещение наблюдений реликтового излучения, данных о красном смещении и других космологических параметров позволило уточнить возраст Вселенной.

В результате этих исследований было установлено, что возраст Вселенной составляет примерно 13,8 миллиарда лет. Эта величина подтверждена независимыми методами, такими как анализ звёздных скоплений и галактик, а также моделированием процессов звёздообразования. Таким образом, наблюдения за красным смещением и закон Хаббла стали фундаментом для понимания временной шкалы Вселенной и её эволюции.

Наблюдения полностью сформированных галактик в ранней Вселенной, сделанные телескопом Джеймса Уэбба, поставили перед учёными множество вопросов, но не опровергли возраст Вселенной, который оценивается в 13,8 миллиарда лет. Эти данные указывают на необходимость пересмотра моделей формирования и эволюции галактик, а не на ошибку в определении временной шкалы космологии.

Возраст Вселенной определяется на основе фундаментальных физических процессов, таких как расширение пространства, наблюдаемое через соотношение скорости удаления галактик и их расстояния, и свойства реликтового излучения — слабого фонового света, оставшегося от Большого взрыва. Эти параметры измеряются с высокой точностью и не зависят от того, как быстро образуются галактики. Текущая оценка возраста была получена с использованием данных о реликтовом излучении, крупномасштабной структуре Вселенной и смещении спектра света от удалённых галактик в сторону более длинных волн.

Обнаружение зрелых галактик, существующих спустя менее чем полмиллиарда лет после Большого взрыва, вызывает вопросы о том, насколько хорошо современные модели объясняют процессы образования первых звёзд и структур. Традиционные модели предполагают, что после Большого взрыва Вселенная прошла несколько этапов: сначала наступили "тёмные века", когда звёзды и галактики ещё не сформировались, затем появились первые звёзды, и лишь спустя несколько сотен миллионов лет началось формирование галактик. Однако телескоп Джеймса Уэбба обнаружил

объекты, которые выглядят как зрелые галактики, уже имеющие значительное количество звёзд, крупные размеры и сложные структуры. Это ставит под сомнение стандартное представление о том, сколько времени нужно для формирования таких систем.

Одним из возможных объяснений может быть то, что звёзды начали формироваться гораздо раньше или этот процесс происходил быстрее, чем предполагалось. Это может быть связано с особыми условиями в ранней Вселенной, такими как высокая плотность материи или наличие крупных звёзд первого поколения, которые выделяли огромное количество энергии и стимулировали дальнейшее звёздообразование. Также возможно, что учёным недостаёт знаний о некоторых физических процессах, которые могли ускорить образование структур.

Ещё одной причиной может быть сокращение продолжительности так называемых тёмных веков, то есть периода между Большим взрывом и началом образования первых звёзд. Если этот промежуток оказался короче, чем считалось, галактики могли начать формироваться раньше. В то же время учёные уверены, что ошибки в измерении расстояний или других параметров маловероятны, так как методы спектрального анализа, используемые телескопом Джеймса Уэбба, отличаются высокой точностью.

Несмотря на эти открытия, возраст Вселенной остаётся неизменным, так как он определяется глобальными космологическими наблюдениями, которые надёжно указывают на временной масштаб в 13,8 миллиарда лет. Однако обнаружение ранних зрелых галактик требует пересмотра моделей начальной эволюции звёзд и

галактик, что стимулирует дальнейшие исследования. Это не ставит под сомнение возраст Вселенной, а лишь указывает на необходимость уточнения понимания процессов, происходивших на ранних этапах её существования.

Роджер Пенроуз и ряд других учёных действительно высказывали мнение о необходимости пересмотра некоторых фундаментальных аспектов космологии, включая возраст Вселенной. В частности, обнаружение полностью сформированных галактик на ранних этапах её эволюции с помощью телескопа Джеймса Уэбба поставило под сомнение стандартные представления о скорости формирования галактик и возможных временных рамках этих процессов. Пенроуз, в контексте своей теории конформной циклической космологии, предлагает, что текущий возраст может быть лишь частью более широкой временной структуры, включающей предыдущие эоны. Эти данные требуют как минимум пересмотра базовых параметров расширения и возможного изменения моделей формирования структуры, что может косвенно затронуть оценку возраста.

Поговорим о  $Z$  смещении, также называемом красным смещением, представляющем собой явление, при котором спектр излучения астрономических объектов изменяется, смещаясь в сторону увеличения длин волн, то есть к красной части спектра. Этот эффект служит ключевым свидетельством космологических процессов, таких как расширение пространства-времени.

Главной причиной, объясняющей красное смещение, является расширение Вселенной. Пространство, охватывающее галактики и свет, распространяющийся от них, постепенно растягивается. Это приводит к

удлинению электромагнитных волн, излучаемых удалёнными объектами. Чем дальше находится объект, тем большее растяжение претерпевает его излучение, что позволяет астрономам оценивать расстояния до космических тел и скорость их удаления. Такое явление тесно связано с общей теорией относительности, описывающей динамику расширяющейся Вселенной.

Красное смещение имеет фундаментальное значение в космологии, поскольку оно служит основой для определения масштабов космоса, изучения его структуры и эволюции. Оно также подтверждает гипотезу о Большом взрыве, поскольку позволяет измерять темп расширения Вселенной, известный как постоянная Хаббла. Благодаря анализу этого эффекта открываются тайны времён, когда формировались первые галактики и звёзды, а также их движения, запечатлённые в излучении.

Обозначение  $z$  было выбрано в качестве удобной безразмерной величины, которая наглядно отражает соотношение изменения длины волны излучения относительно её исходного значения. В рамках научного подхода  $z$  характеризует степень растяжения электромагнитного излучения, что делает этот параметр универсальным для анализа данных, связанных с космологическими масштабами. Кроме того, введение безразмерного параметра позволяет легко вычислять расстояния до объектов и их скорость удаления, что особенно важно в астрофизических расчётах.

История появления концепции красного смещения уходит корнями в первые десятилетия XX века, когда астрономы начали изучать спектры удалённых небесных объектов.

Выбор буквы  $z$  для обозначения красного смещения имеет исторические и практические причины, хотя конкретное происхождение этого символа не задокументировано. В научной практике выбор символов часто определяется удобством и традицией. Знак  $Z$  оказался удачным обозначением, поскольку ранее не был широко использован в астрофизике для других ключевых параметров.

Кроме того, буква  $z$  уже имела традицию использования в математике и физике как переменная, обозначающая третье измерение, глубину или удалённость, что интуитивно ассоциируется с растяжением пространства или расстоянием в космосе. В случае с красным смещением,  $z$  отражает не только физическую удалённость объекта, но и масштаб растяжения волн — идея, которая напрямую связана с глубиной времён и пространства.

Выбор буквы  $z$  мог быть также обусловлен её расположением в конце латинского алфавита, что символически подчеркивает крайние границы наблюдаемой Вселенной или значительное удаление объектов. В научной нотации она стала удобным обозначением из-за краткости и универсальности, позволяя использовать её в формулах, таблицах и графиках без лишних уточнений.

Предполагается, что систематизация и популяризация термина  $z$  произошли благодаря работам таких учёных, как Джордж Гамов, Герман Бонди и другие теоретики, занимавшиеся развитием моделей расширяющейся Вселенной. Именно в этот период, начиная с 1940 годов, в научных публикациях стал появляться параметр  $z$ , используемый для выражения сдвига длины волны.

Целое значение  $z$  в контексте красного смещения показывает, насколько увеличилась длина волны излучения по сравнению с тем, какой она была в момент испускания. Это можно представить как кратное увеличение длины волны, которое прямо связано с тем, насколько сильно растянулось пространство между источником света и наблюдателем.

Если значение  $z$  равно единице, это значит, что длина волны удвоилась. Например, свет, который изначально был в видимом диапазоне, сдвинулся в область инфракрасного излучения, удлинившись в два раза. При  $z$ , равном двум, длина волны становится втрое больше её первоначального значения. Это означает, что излучение, испущенное миллиарды лет назад, стало настолько растянутым, что теперь его можно наблюдать в значительно более длинноволновом диапазоне. Если  $z$  равно трём, то длина волны увеличилась в четыре раза, и это указывает на ещё более глубокое прошлое и более удалённые объекты.

Такое кратное увеличение длины волны связано с расширением пространства Вселенной. Чем больше значение  $z$ , тем дальше находится источник света и тем раньше был испущен этот свет. Высокие значения  $z$ , такие как десять или больше, рассказывают о времени, когда Вселенная была очень молодой, всего несколько сотен миллионов лет от начала своего существования. Свет от таких объектов, испущенный в далёком прошлом, успел преодолеть огромные расстояния, но при этом подвергся значительному растяжению вместе с самим пространством. Это даёт возможность астрономам заглянуть в самые ранние эпохи космоса и исследовать первые галактики, звёзды и их формирование.



Удобно и символично, что при очень больших значениях  $z$ , таких как тринадцать, время, прошедшее с момента испускания света, оказывается близким к возрасту самой Вселенной, равняющемуся, как считается около тринадцати миллиардам световых лет.

Когда речь идёт об объектах с  $z$ , равным тринадцати, их свет был испущен всего через несколько сотен миллионов лет после начала существования Вселенной. Этот свет преодолел огромные расстояния, почти равные возрасту космоса, чтобы достичь нас. Таким образом, значение  $z$  становится удобной шкалой времени, позволяющей нам представить, насколько древние объекты мы видим.

На таких больших значениях красного смещения наблюдаемые объекты находятся в эпоху ранней Вселенной, когда формировались первые звёзды и галактики. Излучение, которое доходит до нас, рассказывает о тех далёких временах, позволяя изучать, как зарождалась структура космоса.

Связь между большими значениями  $z$  и возрастом Вселенной особенно важна для астрономии, поскольку она помогает нам понимать не только расстояния, но и временные масштабы. Это словно окно в прошлое, где каждое значение красного смещения даёт представление о том, что происходило в те далёкие эпохи.

Соотношение между  $z$  и расстоянием в световых годах не является строго линейным, так как оно зависит от множества факторов, включая скорость расширения Вселенной, плотность материи и энергии в космосе. Тем не менее, можно дать общее представление, чтобы понять, как значения  $z$  связаны с расстоянием.

При низких значениях  $z$ , например, около нуля целых одной десятой, расстояния обычно измеряются в десятках или сотнях миллионов световых лет. Это соответствует галактикам в нашей локальной группе или ближайших соседей в космосе.

Если значение  $z$  приближается к единице, речь идёт о галактиках, которые находятся на расстоянии нескольких миллиардов световых лет. Свет от них начал своё путешествие, когда Вселенная была значительно моложе, чем сейчас, и расстояния между объектами были меньшими.

Когда  $z$  достигает примерно пяти, это указывает на расстояния в десятки миллиардов световых лет. Свет от таких объектов начал свой путь в далёком прошлом, когда формировались первые звёзды и галактики. Эти эпохи связаны с моментами, когда Вселенная находилась в одном из ранних этапов своего существования.

При ещё более высоких значениях  $z$ , например, десять и больше, мы говорим о космических объектах, которые находятся на краю наблюдаемой Вселенной. Свет от таких источников путешествовал к нам более тринадцати миллиардов лет, приближаясь к самому моменту формирования первых структур в космосе. Современные инструменты, такие как телескоп Джеймса Уэбба, позволяют регистрировать объекты с такими значениями, открывая окно в самую раннюю историю Вселенной.

Максимально возможное наблюдаемое значение  $z$  связано с самыми ранними моментами существования Вселенной, которые мы можем зафиксировать с помощью света. Современные телескопы, такие как телескоп Джеймса Уэбба, позволяют изучать объекты с

$z$ , превышающим тринадцать. Это означает, что свет от этих объектов начал своё путешествие через космос спустя всего несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва. Такие значения представляют собой крайние границы наблюдаемой Вселенной, где свет уже настолько растянут, что становится крайне слабым и уходит в область инфракрасного диапазона.

Однако есть ещё более далёкие следы прошлого — это реликтовое излучение, или космическое микроволновое фоновое излучение. Оно связано с эпохой, когда Вселенная была настолько горячей и плотной, что свет не мог свободно перемещаться через пространство. Только через 380 тысяч лет после Большого взрыва, в момент, называемый рекомбинацией, плазма остыла, образовав первые нейтральные атомы. Это позволило свету начать своё свободное путешествие, которое мы можем зафиксировать сегодня.

Реликтовое излучение имеет значение  $z$ , равное примерно тысяче ста. Такой огромный скачок объясняется тем, что этот свет пришёл из времени, когда Вселенная была в тысячах раз меньше, чем сейчас, а её структура была совершенно иной. Свет от реликтового излучения растянут до микроволнового диапазона, поскольку с момента его испускания пространство Вселенной растянулось в тысячи раз. Этот огромный промежуток между  $z$  реликтового излучения и  $z$  самых ранних галактик связан с тем, что после рекомбинации прошло сотни миллионов лет, прежде чем начали формироваться первые звёзды и галактики, которые могли испускать видимый свет.

Реликтовое излучение — это своеобразная граница наших наблюдений, которая позволяет заглянуть в тот момент, когда Вселенная стала прозрачной. Оно даёт

информацию о самых ранних этапах её существования, предшествующих любым звёздам, галактикам или другим крупным структурам.

Значение  $z$ , или красное смещение, для конкретного объекта фиксируется в момент его наблюдения и не изменяется со временем, поскольку оно отражает состояние Вселенной на пути света от источника к наблюдателю. Это связано с тем, что  $z$  описывает уже завершённый процесс растяжения длины волны света в момент его прихода к нам. Когда свет достигает наблюдателя, его длина волны уже растянута до степени, соответствующей текущему состоянию расширения Вселенной.

Если бы тот же самый свет наблюдался спустя миллионы или миллиарды лет, его значение  $z$  оставалось бы неизменным, потому что процесс растяжения завершился. Однако при наблюдении нового излучения от того же объекта, испущенного позже, значение  $z$  могло бы быть другим, так как за это время Вселенная продолжила расширяться. Но это уже было бы связано с новым излучением, а не с исходным светом.

Кроме того, значение  $z$  связано с расстоянием до объекта и временем, когда был испущен свет. Для объектов, которые сейчас удаляются от нас, их свет всегда фиксирует степень растяжения на момент прибытия. Например, свет от далёкой галактики, испущенный миллиарды лет назад, уже претерпел растяжение на пути к нам. То есть  $z$  для этого конкретного света больше не изменится.

Важно понимать, что красное смещение отражает не текущее состояние объекта, а состояние Вселенной, когда излучение проходило через неё. Если бы мы могли наблюдать свежий свет от того же объекта в далёком

будущем, его  $z$  могло бы быть больше из-за дальнейшего расширения пространства, но это будет уже другое излучение. Таким образом, текущее значение  $z$  для одного и того же света является постоянным, потому что оно зафиксировано моментом его достижения наблюдателя.

Надо сказать, что космическое микроволновое фоновое излучение действительно постепенно растягивается вместе с расширением Вселенной, что означает, что его длины волн продолжают увеличиваться. В далёком будущем, по мере того как Вселенная будет расширяться всё сильнее, это излучение действительно сдвинется из микроволнового диапазона в радио-диапазон. Таким образом, со временем оно станет радиоизлучением.

Этот процесс неизбежен, поскольку длина волны излучения растягивается в соответствии с ростом масштаба Вселенной. В момент рекомбинации, когда это излучение впервые стало свободным, оно находилось в видимом и инфракрасном диапазоне. С тех пор, в течение 13,8 миллиарда лет, оно растянулось настолько, что сегодня мы регистрируем его как микроволновое излучение с температурой около 2,7 Кельвина. В будущем, когда возраст Вселенной увеличится ещё больше, эта температура будет продолжать снижаться, а длина волн — увеличиваться, сдвигаясь в область радио. Через триллионы лет космическое микроволновое фоновое излучение станет настолько холодным и растянутым, что его будет практически невозможно обнаружить даже с помощью самых чувствительных инструментов. Этот процесс отражает необратимость расширения Вселенной, которая с каждым моментом всё больше удаляет её части друг от друга и растягивает свет, который мы можем наблюдать.

Итак, микроволновое излучение действительно станет радиоизлучением, если рассматривать длительные временные масштабы. Однако этот процесс занимает невероятно много времени, и излучение становится всё слабее, что делает его изучение в таком состоянии крайне сложным.

Когда значение  $z$  равно нулю, это означает, что источник света находится в состоянии покоя относительно наблюдателя, и никакого сдвига в спектре его излучения не наблюдается. Это соответствует ситуации, когда расстояние между объектом и наблюдателем остаётся неизменным в масштабе космологического времени.

Если же значение  $z$  становится отрицательным, это указывает на так называемое **синее смещение**, при котором длины волн излучения сокращаются, сдвигаясь в сторону более коротких волн спектра. Такое явление происходит, когда объект приближается к наблюдателю. В контексте астрономии это редкое явление, так как расширение Вселенной приводит к тому, что большинство объектов удаляются. Однако в локальном масштабе, где гравитационные взаимодействия между галактиками преобладают над эффектами космологического расширения, синее смещение становится возможным.

Примером объекта с отрицательным значением  $z$  является галактика Андромеды (M31), которая приближается к Млечному Пути. Это движение вызвано гравитационным притяжением между галактиками в пределах нашей Локальной группы. Свет Андромеды демонстрирует синее смещение, что означает, что в будущем, через несколько миллиардов лет, Млечный

Путь и Андромеда могут столкнуться и объединиться в одну крупную галактику.

Такие примеры подчёркивают, что значение  $z$  может не только отражать расширение Вселенной, но и давать информацию о локальной динамике космических объектов, где гравитация временно берёт верх над глобальным растяжением пространства.

Для галактики Андромеды (M31) значение  $z$  отрицательное и составляет приблизительно **-0.001001**. Это соответствует скорости её приближения к Млечному Пути, которая составляет около **110 км/с**.

Это отрицательное значение  $z$  говорит о том, что длины волн излучения, приходящего от Андромеды, уменьшаются, сдвигаясь в синюю область спектра. Этот эффект происходит из-за гравитационного притяжения между Млечным Путём и Андромедой, которые являются крупнейшими галактиками в Локальной группе.

Такое синее смещение указывает на их неизбежное столкновение, которое, по расчетам, произойдёт через примерно **4–5 миллиардов лет**. Несмотря на приближение, столкновение будет мягким из-за огромных расстояний между звёздами внутри галактик, а результатом станет формирование новой, эллиптической или линзовидной галактики.

Очевидным образом,  $z$ -смещение — не просто показатель расстояния или скорости, но и окно в прошлое, через которое можно изучать динамику расширения Вселенной, её состав, эволюцию структуры и даже природу самых первых объектов, появившихся спустя всего несколько сотен миллионов лет после

Большого взрыва. Это одна из фундаментальных величин, которая соединяет наблюдаемую картину космоса с теоретическими моделями его происхождения и развития.



## **ГЛАВА СЕДЬМАЯ. КОСМИЧЕСКАЯ ЛЕСТНИЦА РАССТОЯНИЙ**

Космическая лестница расстояний представляет собой последовательность методов, которые взаимосвязаны и позволяют измерять расстояния в космосе от ближайших объектов до самых удалённых галактик. Эта система необходима из-за того, что на разных масштабах применимы различные техники, каждая из которых имеет свои ограничения и точность. Каждое звено этой лестницы опирается на результаты предыдущего, создавая надёжную основу для построения шкалы расстояний во Вселенной.

Первым уровнем являются радарные измерения внутри Солнечной системы. Эти данные обеспечивают точное знание расстояний между Землёй и другими планетами, которые затем используются для определения масштаба орбит и расстояний в астрономических единицах. Этот уровень служит базисом для следующих методов.

На втором этапе используется тригонометрический параллакс, который позволяет измерять расстояния до близких звёзд в пределах нескольких тысяч световых лет. Этот метод основывается на изменении углового положения звезды относительно удалённого фона при наблюдении с противоположных точек земной орбиты. Полученные данные калибруются с учётом точных измерений внутри Солнечной системы.

Третий уровень связан с использованием «стандартных свечей», таких как цефеиды. Их яркость и периодичность позволяют измерять расстояния до звёздных скоплений и галактик, находящихся за пределами действия параллакса. Эти измерения

калибруются на основе данных о ближних цефеидах, расстояния до которых определены параллактическим методом.

На ещё более масштабных расстояниях применяются сверхновые типа Ia, чья предсказуемая светимость позволяет оценивать расстояния до галактик на сотни миллионов и миллиарды световых лет. Эти измерения также калибруются с использованием результатов наблюдений за цефеидами в тех же галактиках.

Самый верхний уровень лестницы основан на красном смещении и законе Хаббла. Этот метод позволяет измерять расстояния до объектов на огромных космологических масштабах, включая удалённые галактики и квазары. Красное смещение калибруется с использованием данных о сверхновых и других стандартных свечах.

Космическая лестница расстояний представляет собой сложную, но необходимую структуру, где каждый метод опирается на предыдущий, повышая надёжность и точность измерений. Эта последовательность позволяет учёным изучать Вселенную на всех её масштабах, от ближайших звёзд до границ видимой реальности.

Современные инструменты значительно расширили возможности измерения расстояний в космосе, обеспечивая беспрецедентную точность и охват. Среди них ключевую роль играют геодезические спутники и космические телескопы, каждый из которых специализируется на своих задачах в изучении как ближнего космоса, так и дальних уголков Вселенной.

Геодезические спутники, такие как миссии LAGEOS или

GRACE, используются для уточнения расстояний внутри Солнечной системы. Эти аппараты, оснащённые высокоточными лазерными отражателями, позволяют измерять расстояния между спутником и наземными обсерваториями с точностью до миллиметра. Такие данные необходимы для построения сверхточных орбит планет, расчёта гравитационных взаимодействий и определения масштаба астрономической единицы. Информация, собранная с помощью геодезических спутников, формирует базовый уровень космической лестницы расстояний, который служит основой для последующих методов.

Космические телескопы, такие как Hubble и Gaia, открыли новые горизонты в астрономии, предоставив данные с высокой точностью и разрешением. Телескоп Hubble, находясь за пределами земной атмосферы, способен наблюдать слабые и удалённые объекты, измеряя их спектры, светимость и красное смещение. Он стал ключевым инструментом для изучения стандартных свечей, таких как цефеиды и сверхновые типа Ia, а также для уточнения значения постоянной Хаббла, определяющей скорость расширения Вселенной.

Космическая обсерватория Gaia сосредоточена на задачах, связанных с тригонометрическим параллаксом. Она измеряет точные положения, движения и расстояния до более чем миллиарда звёзд в нашей Галактике. Это позволяет с невиданной ранее точностью калибровать методы измерения расстояний, включая цефеиды и другие стандартные свечи. Gaia также способствует построению трёхмерной карты Млечного Пути, давая представление о его структуре и динамике.

Сочетание данных от геодезических спутников и

космических телескопов создало надёжную основу для исследований на всех уровнях космической лестницы расстояний. Эти инструменты обеспечивают высокую точность измерений, позволяя изучать как ближайшие звёзды, так и далёкие галактики, формируя единую и непрерывную картину космического пространства.

Измерение расстояний во Вселенной сопряжено с рядом ограничений и источников ошибок, которые становятся всё более значительными с увеличением удалённости объектов. Эти погрешности обусловлены как техническими факторами, так и фундаментальными ограничениями методов, а также зависимостью от моделей, основанных на предположениях.

Одной из основных проблем является нарастающая неопределённость измерений по мере увеличения расстояния. Методы, такие как параллакс, становятся практически неприменимыми для далёких объектов из-за слишком малого углового смещения. Даже высокоточные инструменты, такие как телескоп Gaia, не способны зафиксировать такие крошечные углы на расстояниях, превышающих несколько тысяч световых лет. Аналогично, для сверхновых типа Ia и цефеид, видимая яркость на больших расстояниях снижается до уровня, на котором её становится трудно измерить с точностью, достаточной для надёжных расчётов.

Ещё одним источником ошибок являются предположения, заложенные в моделях светимости звёзд и галактик. Например, метод стандартных свечей зависит от того, что светимость цефеид и сверхновых типа Ia считается одинаковой для всех объектов одного класса. Однако различные физические факторы, такие

как химический состав звезды, её возраст и окружающая среда, могут приводить к отклонениям от стандартной модели. Если эти вариации не учтены, итоговые оценки расстояний могут оказаться неверными.

Дополнительные сложности вносят межзвёздная и межгалактическая пыль, которая поглощает и рассеивает свет, искажающий наблюдаемую яркость объектов. Даже при учёте этого явления с помощью моделей, основанных на цвете и спектре света, ошибки всё же неизбежны. На самых больших масштабах ещё более серьёзные проблемы создаёт предположение, что Вселенная однородна и изотропна. Отклонения от этого принципа могут искажать расчёты, основанные на законе Хаббла и красном смещении.

Наконец, любые инструменты, от радаров до космических телескопов, имеют свои ограничения точности. Даже незначительные погрешности в измерении видимой яркости, спектра или углового положения звезды могут привести к ошибкам, которые многократно увеличиваются на дальних расстояниях.

Несмотря на эти ограничения, развитие технологий и совершенствование моделей постепенно уменьшают ошибки. Новые поколения телескопов, более глубокое понимание физических процессов и улучшенные методы анализа позволяют учёным уточнять результаты, расширяя горизонты изучения космоса.

Измерение расстояний в космосе играет ключевую роль в раскрытии фундаментальных свойств Вселенной, её структуры, размеров и возраста. Эти данные не только уточняют наше представление о пространственных

масштабах, но и проливают свет на динамические процессы, формирующие её эволюцию.

Одной из важнейших задач является определение размеров Вселенной. Благодаря измерениям расстояний до галактик, звёздных скоплений и других космических объектов удалось выяснить, что Вселенная имеет масштаб, превышающий всё, что когда-либо представляли учёные. Знание точных расстояний позволяет понять, как далеко расположены границы наблюдаемой Вселенной, что в свою очередь связано с её возрастом и историей расширения.

Изучение расстояний также помогает построить трёхмерную карту Вселенной, раскрывая её крупномасштабную структуру. Это включает распределение галактик, кластеров и пустот, которые формируют гигантскую паутину из материи. Такие исследования позволяют глубже понять процессы формирования галактик, звёзд и других космических объектов, а также взаимосвязь между гравитацией и материей на самых больших масштабах.

Ещё более значимо измерение скорости расширения Вселенной, связанное с определением постоянной Хаббла. Эти данные являются основой для исследования космологических моделей, включая теорию Большого взрыва. Определение изменений скорости расширения во времени позволяет выяснить, как менялась динамика Вселенной с момента её зарождения.

Изучение ускоренного расширения, открытого благодаря сверхновым типа Ia, привело к открытию тёмной энергии — загадочной силы, которая, по-видимому, ответственна за это явление. Измерения красного смещения и яркости удалённых объектов

помогают изучать свойства этой энергии, определять её влияние на эволюцию Вселенной и искать связь с другими аспектами физики.

Очевидным образом, измерение космических расстояний представляет собой краеугольный камень современной астрономии и космологии. Оно позволяет объединить наблюдательные данные с теоретическими моделями, создавая целостное понимание устройства и эволюции Вселенной.

## **ГЛАВА ВОСЬМАЯ. РЕАЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ДЕЛ С ИЗМЕРЕНИЯМИ РАССТОЯНИЙ ВО ВСЕЛЕННОЙ**

Наша книга создаёт слишком радужное впечатление о положении дел с измерениями расстояний во Вселенной. Давайте в последней главе обсудим реальные проблемы, с которыми сталкиваются астрономы.

Определение расстояния до многих дальних астероидов представляет собой сложную задачу, поскольку точность таких измерений сильно зависит от множества факторов. Большинство этих объектов находятся на огромных расстояниях от Земли, часто вне пределов орбит крупных планет, что затрудняет наблюдения. Свет, отражённый от астероидов, бывает крайне слабым, а их траектории сложно предсказать из-за воздействия гравитации различных небесных тел, а также из-за возможных неконтролируемых факторов, таких как воздействие солнечного ветра или выбросы вещества с поверхности. Всё это приводит к тому, что даже самые продвинутые инструменты фиксируют положение таких тел с заметной погрешностью.

Кроме того, наблюдения за астероидами, находящимися за пределами орбиты Юпитера или в поясе Койпера, зачастую основаны на оценках, полученных через методы косвенного анализа, такие как измерение яркости, а затем вычисление расстояния на основе предположений о размере и альбедо объекта.

Альбедо выражается в виде числа от нуля до единицы или в процентах:

Ноль означает, что объект полностью поглощает свет,



как, например, чёрная поверхность.

Единица означает, что объект полностью отражает свет, как, например, свежесвыпавший снег. -.

На Пример: Земля имеет среднее альбедо около нуля целых и трёх десятых, то есть она отражает примерно тридцать процентов падающего солнечного света.

Однако даже минимальные отклонения в этих оценках могут привести к существенным ошибкам. Например, определение расстояния на основе видимой яркости требует точного знания характеристик поверхности объекта, а эти данные нередко отсутствуют.

Однако даже минимальные отклонения в этих оценках могут привести к существенным ошибкам. Например, определение расстояния на основе видимой яркости требует точного знания характеристик поверхности объекта, а эти данные нередко отсутствуют.

Множество комет, находящихся в поясе Оорта, остаётся практически загадкой, поскольку эти объекты ещё менее доступны для наблюдений. Они находятся на таких огромных расстояниях, что даже передовые телескопы не способны фиксировать их непосредственно. Большая часть данных о кометах в этом регионе основывается на теоретических моделях, описывающих облако Оорта, сформированное остатками вещества Солнечной системы. Предположения о массе объектов в этом поясе вытекают из расчётов общей массы облака и плотности распределения тел, но фактические измерения невозможны, поскольку сами кометы слишком малы и удалены, чтобы их можно было обнаружить в оптическом диапазоне.

Кроме того, даже если отдельные кометы из облака

Оорта оказываются выброшенными в направлении внутренней части Солнечной системы, мы наблюдаем лишь те, что приближаются к Солнцу и становятся активными. Однако таких примеров крайне мало по сравнению с предполагаемым числом тел, оставшихся на своих орбитах. Это дополнительно усложняет попытки оценить их суммарную массу. Исходя из всего этого, современная астрономия сталкивается с ограничениями как в точности определений, так и в объёме доступных данных, что делает многие оценки весьма приблизительными и теоретическими.

Определение расстояния до звёзд — задача, требующая высокой точности и сложных методов наблюдения, однако даже в современных условиях этот процесс сопровождается значительными трудностями и ошибками. Основной метод, используемый для измерения расстояний до близлежащих звёзд, — параллакс, основанный на измерении видимого смещения звезды относительно удалённого фона при наблюдении её с разных точек земной орбиты. Однако этот метод эффективно работает лишь для сравнительно близких объектов, так как с увеличением расстояния угловое смещение становится крайне малым и выходит за пределы точности даже самых мощных телескопов.

Для более удалённых звёзд приходится использовать косвенные методы, такие как спектроскопическая параллаксия или использование стандартных свечей, например, цефеид или сверхновых типа Ia. Эти подходы основываются на предположениях о характеристиках звёзд, таких как их абсолютная светимость или соотношение между массой и светимостью. Однако

любые неточности в понимании этих характеристик могут привести к значительным погрешностям. Например, если звезда имеет необычный химический состав или отклоняется от типичных моделей звёздной эволюции, это искажает итоговые расчёты.

Особенно трудно определить расстояния до звёзд, расположенных за пределами нашей галактики или на её периферии. Межзвёздная пыль и газ часто искажают свет от таких звёзд, что приводит к дополнительным неопределённостям. Затухание света из-за межзвёздного поглощения требует корректировок, которые также зависят от модели распределения пыли, а такие модели зачастую далеки от совершенства.

Данные, полученные с использованием спутников, таких как "Гайя", значительно улучшили точность измерений, однако даже они имеют свои ограничения. Ошибки возрастают для объектов, находящихся на значительных расстояниях, особенно если свет звезды слаб или она окружена плотной средой. Кроме того, динамика звёздных систем, например двойных звёзд, может вносить дополнительные искажения в наблюдаемые данные, поскольку движения таких объектов накладываются на измерения и требуют тщательной деконволюции.

Деконволюция представляет собой математический процесс, направленный на восстановление сигнала или изображения, которое было искажено под воздействием различных факторов. Эти искажения могут быть вызваны размытием, шумами, оптическими аберрациями или особенностями среды, через которую проходит сигнал. Суть деконволюции заключается в том, чтобы вернуть исходный вид сигнала, используя

информацию о том, каким образом произошло его искажение. Основой этого метода служит уравнение свёртки, описывающее, как первоначальный сигнал преобразовался в искажённый. Деконволюция же выполняет обратный процесс, восстанавливая исходное состояние данных.

Метод широко применяется в разных областях. В астрономии деконволюция используется для улучшения качества изображений, полученных телескопами. Она позволяет устранять размытие, вызванное атмосферными турбуленциями, движением телескопа или ограничениями оптической системы, что особенно важно при изучении далёких звёзд и галактик. В обработке изображений этот метод помогает восстановить чёткость фотографий, размытых из-за движения камеры, несовершенства линз или низкого разрешения. В медицинской визуализации, например при анализе данных МРТ или КТ, деконволюция даёт возможность получить более детализированные изображения тканей и органов. В акустике её применяют для восстановления звуков, которые были искажены шумами или реверберацией. В спектроскопии метод служит для анализа спектров, разделяя перекрывающиеся линии или уточняя формы спектральных пиков.

Для достижения этих целей деконволюция использует разнообразные математические подходы. Среди них классическая деконволюция, которая опирается на функцию размытия, или регуляризация, добавляющая ограничения для предотвращения усиления шумов. Часто применяется анализ в частотной области с использованием преобразования Фурье, а также

итерационные алгоритмы, такие как метод Ричардсона–Люси, популярный в астрономии. Основная сложность деконволюции заключается в том, что процесс восстановления может усиливать шум, поэтому важно найти баланс между улучшением качества и минимизацией появления артефактов.

Определенным образом, каждое измерение расстояния связано с множеством допущений, из-за чего точность снижается с увеличением дистанции. Расстояния до звёздных систем в отдалённых уголках галактики или за её пределами остаются в основном оценочными, а ошибки в таких измерениях могут достигать десятков и даже сотен процентов.

Определение точных расстояний до звёзд является сложной задачей, особенно для объектов, находящихся на значительных расстояниях от Земли. Точность измерений может значительно варьироваться в зависимости от используемых методов и характеристик самих звёзд.

Для близких звёзд, расположенных в пределах нескольких сотен световых лет, метод годичного параллакса позволяет достичь высокой точности измерений. Однако по мере увеличения расстояния параллактический угол становится настолько малым, что его измерение сопряжено с существенными трудностями. В таких случаях точность определения расстояния может снижаться, и погрешность может достигать 30–50%.

Для более удалённых звёзд астрономы применяют косвенные методы, такие как использование стандартных свечей, к которым относятся цефеиды и сверхновые типа Ia. Эти методы основаны на

предположениях о светимости звёзд и могут быть подвержены значительным ошибкам, особенно если наблюдаемые объекты имеют аномальные характеристики или находятся в областях с высоким уровнем межзвёздного поглощения.

Таким образом, для звёзд, находящихся на расстояниях в тысячи и десятки тысяч световых лет, точность измерений может варьироваться в пределах 30–50%, что обусловлено ограничениями текущих методов и технологий наблюдения.

Денеб, являющийся звездой класса сверхгигантов, расположен на значительном удалении от Земли. Оценки его расстояния варьируются от полутора до двух с половиной тысяч световых лет в зависимости от метода, что соответствует погрешности порядка сорока процентов. Подобные трудности возникают и при определении расстояния до Миры, переменной звезды с огромным диапазоном яркости. Точные оценки её удалённости колеблются между тремястами и четырьмястами световыми годами, что приводит к ошибке около тридцати процентов.

Бетельгейзе, красный сверхгигант в созвездии Ориона, находится на расстоянии от пятисот пятидесяти до семисот световых лет. Разброс в оценках достигает тридцати процентов, что связано с её изменчивостью и сложностью точного определения параметров. Антарес, ещё один красный сверхгигант, расположенный в созвездии Скорпиона, демонстрирует схожую проблему. Его удалённость оценивается между пятистами пятьюдесятью и шестьюстами пятьюдесятью световыми годами, причём погрешность измерений составляет

около двадцати-тридцати процентов.

Звезда R Лебедя, известная своей изменчивостью, особенно сложна для точного измерения расстояний. Её удалённость предполагается с погрешностью порядка пятидесяти процентов, что является ярким примером ограничений современных методов астрономических наблюдений. Такие звёзды, как Денеб, Мира, Бетельгейзе, Антарес и R Лебедя, демонстрируют, насколько сложно точно определить расстояние, когда изменчивость яркости и особенности межзвёздной среды оказывают влияние на результаты.

Множество звёзд в нашей галактике остаётся не только неопределённым с точки зрения их точного расположения, но и вовсе неназванным или малоизученным. Наблюдения, которые ведутся с Земли и космических телескопов, охватывают лишь малую часть звёздного населения Млечного Пути. Даже среди объектов, попавших в каталоги, точные данные о расстоянии, массе и светимости имеются лишь для небольшого числа звёзд, особенно если они расположены в плотных звёздных скоплениях или на окраинах галактики.

Звёзды, находящиеся в областях с густой межзвёздной пылью или облаками газа, часто скрыты от прямых наблюдений. Даже инфракрасные телескопы, способные проникать сквозь такие препятствия, не всегда дают достаточно точную информацию, чтобы определить ключевые характеристики этих объектов. Многие из них остаются просто точками света без подробных данных о спектре, типе или удалённости.

В отдалённых уголках Млечного Пути, таких как галактический гало или плотные скопления вблизи центра галактики, звёзды находятся настолько близко друг к другу на небесной сфере, что их трудно различить индивидуально. Это приводит к тому, что их положение и характеристики остаются неизвестными. Ещё более сложная ситуация с объектами в соседних карликовых галактиках, таких как Большое и Малое Магеллановы Облака. Там неизвестное число звёзд даже не включено в существующие каталоги из-за их слабой светимости или удалённости.

Значительным образом, всё звёздное богатство Вселенной, доступное нашим наблюдениям, остаётся лишь малой частью. Бесчисленное множество звёзд ещё предстоит открыть, изучить и хотя бы приблизительно определить их местоположение в пространстве.

Галактики, как и звёзды, представляют собой огромное множество объектов, о большинстве из которых современная наука имеет лишь поверхностное представление. Многие из них остаются не только безымянными, но и вовсе неопределёнными в точном смысле, поскольку данные о их расстоянии, массе и структуре нередко ограничены. Основные методы определения расстояний до галактик, такие как использование цефеид или сверхновых типа Ia, применимы далеко не всегда.

Цефеиды, являющиеся переменными звёздами с предсказуемыми периодами и светимостью, действительно служат надёжными "стандартными свечами" для определения расстояний. Однако такие звёзды характерны не для всех галактик. Например, в



карликовых или маломассивных галактиках их может быть крайне мало или они могут вовсе отсутствовать, что делает невозможным применение этого метода.

Сверхновые типа Ia, обладающие практически одинаковой пиковой светимостью, представляют собой ещё один важный инструмент в космологии. Однако они являются редкими событиями. Даже в крупных галактиках взрывы сверхновых происходят нечасто, а в небольших системах они могут вообще никогда не фиксироваться за весь период наблюдений. Это существенно ограничивает применение данного метода для определения расстояний.

Дополнительно усложняет задачу тот факт, что многие галактики, особенно в отдалённых частях Вселенной, слишком тусклые, чтобы их звёздные население можно было исследовать индивидуально. Они наблюдаются как неясные пятна света, без возможности выделить отдельные звёзды. Это характерно для галактик в ранних стадиях эволюции или в крайне удалённых областях, где их свет значительно ослаблен расширением Вселенной и межгалактическим поглощением.

Для таких галактик расстояния определяются косвенно, с использованием эмпирических соотношений, таких как связь между скоростью вращения галактики и её светимостью (соотношение Талли–Фишера) или зависимости между светимостью и дисперсией скоростей в эллиптических галактиках. Эти методы, хотя и полезны, всё же обладают значительными ограничениями и погрешностями, особенно если галактика обладает необычной структурой или химическим составом.

Таким образом, множество галактик, наблюдаемых и

скрытых, остаётся за пределами точных измерений. Их характеристики остаются гипотетическими, а понимание их эволюции и свойств зависит от ограниченных данных и общих моделей.

Вероятность открытия новых способов измерения расстояний во Вселенной достаточно велика, особенно с развитием технологий и более глубоким пониманием физики. В будущем могут быть предложены следующие перспективные методы:

Использование гравитационных волн. С появлением детекторов гравитационных волн, таких как LIGO и Virgo, а также их будущих более чувствительных аналогов, становится возможным измерять расстояния до источников таких волн. Например, двойные системы нейтронных звёзд или чёрных дыр при слиянии создают гравитационные волны, которые позволяют определить абсолютную светимость источника, а значит, и расстояние до него. Этот метод уже показал свою эффективность в ряде случаев и имеет потенциал для применения в масштабах всей Вселенной.

Точные измерения нейтринного потока. Источники нейтрино, такие как взрывы сверхновых или активные ядра галактик, могут стать основой для нового метода определения расстояний. Нейтрино взаимодействуют с материей крайне слабо, что позволяет им путешествовать через пространство практически без потерь энергии. Анализ интенсивности и спектра нейтрино может дать прямую информацию о расстоянии до их источника.

Интерферометрия в рентгеновском и гамма-диапазонах.

Современная радио- и оптическая интерферометрия позволила добиться высокой точности в определении угловых размеров объектов, но в будущем появятся интерферометры, работающие в рентгеновском и гамма-диапазонах. Это откроет новые возможности для измерения расстояний до активных галактик, квазаров и других ярких источников, недоступных в других диапазонах.

Изучение пульсаций звёзд с высокой точностью. Уже сейчас известны переменные звёзды, такие как цефеиды, но более детальное исследование механизмов пульсации других типов звёзд, например, белых карликов или нейтронных звёзд, может привести к созданию новых стандартных свечей. Их светимость и изменения могут оказаться предсказуемыми, что позволит уточнять расстояния до галактик, где такие звёзды обнаружены.

Квантовые методы и лазеры. Разработка квантовой оптики и применение мощных лазеров для космических измерений могут позволить точное определение расстояний между космическими объектами. Например, будущие проекты по лазерной связи с межзвёздными зондами могут использовать эту технологию для непосредственного измерения дистанций до удалённых объектов.

Волновая оптика гравитационных линз. Гравитационные линзы уже используются для изучения удалённых объектов, но их дальнейшее исследование с учётом интерференционных эффектов и более точных моделей линзирования может позволить извлечь дополнительную информацию о расстояниях до галактик за линзами.

Прямое наблюдение эффектов расширения Вселенной.

Текущие методы измерения Хаббловского потока основаны на статистике, но в будущем, с появлением более точных приборов, станет возможно наблюдать изменения в спектрах объектов, связанные с их движением из-за расширения пространства. Этот подход даст возможность уточнять расстояния напрямую, без использования промежуточных стандартных свечей.

Каждый из этих методов потребует новых технологий и улучшения теоретической базы, но их разработка открывает огромные перспективы для астрономии и понимания структуры Вселенной.

Действительно, нынешняя ситуация с определением космических расстояний далека от идеала, и если перенести такие масштабы ошибок на повседневную жизнь, это показало бы всю уязвимость нашей методологии. Представить, что вместо точного расстояния от Лондона до Нью-Йорка указывалось бы значение с погрешностью в пятьдесят процентов, значит осознать, насколько неудобным и малоэффективным был бы такой подход. Вместо чёткого числа, например пяти с половиной тысяч километров, информация могла бы варьироваться между тремя и восемью тысячами километров, что полностью разрушило бы планы по организации транспортировки, путешествий или логистики.

Именно такие проблемы наблюдаются при работе с данными о космических расстояниях. В отсутствие универсальных и надёжных методов измерения, учёные вынуждены использовать приближённые оценки, основанные на теоретических моделях или ограниченных наблюдениях. Когда речь идёт о звёздах и

галактиках, находящихся на расстояниях в сотни тысяч или миллионы световых лет, даже небольшие погрешности в исходных параметрах приводят к значительным отклонениям в конечных вычислениях. В результате возникает ситуация, в которой вместо уверенности в точности данных приходится работать с диапазонами и вероятностными значениями.

Такая неопределённость серьёзно осложняет научные исследования. Например, попытки оценить масштабы и возраст Вселенной, распределение материи или взаимодействие галактик зависят от точности расстояний. Ошибки в этих расчётах могут существенно повлиять на понимание фундаментальных законов космологии. Астрофизика, построенная на несовершенных данных, напоминает карту мира, нарисованную в эпоху Великих географических открытий: контуры есть, но детали остаются размытыми и недостоверными.

И хотя современная астрономия находится на пороге значительных открытий, сегодня мир звёздных расстояний всё ещё наполнен неопределённостью. Ситуация требует терпения и постоянного улучшения методов наблюдения, чтобы однажды преодолеть этот "пятидесятипроцентный барьер" и достичь уровня точности, сравнимого с привычным для наземных измерений.

Человек всегда стремился к познанию, и звёзды становились проводниками в этом путешествии. Тем не менее, столь амбициозные попытки измерить Вселенную отражают не только научное могущество, но и наши ограничения. Ошибки, неопределённости и теоретические допущения создают зыбкую основу, на

которой стоит современная космология. Каждое открытие требует от исследователей огромной осторожности и постоянного совершенствования инструментов и методов. И всё же, несмотря на трудности, человечество движется вперёд, строя всё более точные карты бескрайнего космоса. Возможно, в будущем новые технологии и глубокое понимание физических процессов помогут нам преодолеть этот барьер, открывая невиданные горизонты.

Так, как древние мореплаватели чертили карты неизведанных морей, мы рисуем контуры космоса, вглядываясь в его глубины. И пусть путь долг и полон преград, звёзды продолжают светить, освещая дорогу для тех, кто ищет. В этом стремлении — красота человеческой мысли, её дерзновенность и сила.

## References

1. Riess, A. G., et al. (2019). Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal*, 876(1), 85.
2. Gaia Collaboration. (2018). Gaia Data Release 2: Summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 616, A1.
3. Phillips, M. M. (1993). The absolute magnitudes of Type Ia supernovae. *The Astrophysical Journal Letters*, 413, L105-L108.
4. Kriger, B. (2024). Challenges and innovations in measuring distances to celestial objects: From asteroids to distant galaxies. *Global Science News*.
5. Freedman, W. L., & Madore, B. F. (2010). The Hubble constant. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48(1), 673–710.
6. Peebles, P. J. E., & Ratra, B. (2003). The cosmological constant and dark energy. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 559–606.
7. Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., & Biermann, M. (2021). Gaia early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 649, A1.
8. Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., ... & Zonca, A. (2020). Planck 2018 results: Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.

9. Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3), 168–173.
10. Linde, A. (2007). Inflationary cosmology. *Reports on Progress in Physics*, 70(6), 947–1003.
11. Freedman, W. L. (2021). Measurements of the Hubble constant: Tensions in perspective. *The Astrophysical Journal*, 919(1), 16.
12. Bailer-Jones, C. A. L. (2021). Methods for Measuring Distances in Astronomy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 441-480.
13. Riess, A. G., et al. (2022). Refining the Hubble Constant with Cepheid Variables. *The Astrophysical Journal*, 934, 1-12.
14. Tully, R. B., & Fisher, J. R. (1977). A New Method for Determining Extragalactic Distances. *Astronomy and Astrophysics*, 54, 661-673.
15. Abbott, B. P., et al. (2017). Gravitational Waves and the Hubble Constant. *Physical Review Letters*, 119(16), 161101.
16. Leavitt, H. S. (1912). Periods and Luminosities of Cepheid Variables. *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1-3.
17. Beckwith, S. V. W., & Sargent, A. I. (1993). Dust and Gas in the Universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31, 475-523.
18. Lucy, L. B. (1974). An Iterative Technique for the Rectification of Observed Spectra. *The Astronomical Journal*, 79, 745-754.



19. Weinberg, S. (1972). Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity. Wiley.