

БОРИС КРИГЕР



МЕТОДЫ ПОИСКА
ЭКЗОПЛАНЕТ

<https://>

БОРИС КРИГЕР

МЕТОДЫ ПОИСКА
ЭКЗОПЛАНЕТ



© 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

Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc.

Методы поиска экзопланет

Книга посвящена современным методам поиска экзопланет и подробно описывает ключевые технологии и принципы, позволяющие находить планеты за пределами Солнечной системы. В основе работы лежит анализ различных подходов, от классической астрометрии и метода радиальных скоростей до новейших достижений в области гравитационного микролинзирования и прямого наблюдения планет. Автор уделяет особое внимание сложности обнаружения малых землеподобных миров и значению этих исследований для расширения нашего понимания Вселенной. Описанные методы не только помогают выявлять новые экзопланеты, но и дают возможность изучать их характеристики, включая массу, орбитальные параметры и даже состав атмосфер.

Особенность книги заключается в глубоком анализе физических принципов, лежащих в основе астрономических методов, и их практическом применении в современных исследованиях. Читатель получает представление о том, какие трудности стоят перед астрономами, как совершенствуются технологии наблюдений и какие перспективы открывает развитие инструментов нового поколения. Книга демонстрирует, что поиск экзопланет – это не только технический вызов, но и фундаментальный шаг к осознанию места Земли в бескрайнем космосе.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Глава первая. Зачем искать экзопланеты? | 5 |
| Глава вторая. Астрометрия | 7 |
| Глава третья. Спектроскопия и радиальная скорость (метод Доплера) | 12 |
| Глава четвертая. Гравитационное микролинзирование | 33 |
| Глава пятая. Транзитный метод | 43 |
| Глава шестая. Прямое наблюдение планет | 54 |
| Глава седьмая. Пульсары и метод временных задержек | 63 |
| Глава девятая. Метод тайминга | 80 |
| Глава десятая. Секулярные изменения орбит | 90 |
| Глава одиннадцатая. Искусственный интеллект и статистические методы поиска экзопланет | 97 |
| Глава двенадцатая. Классификация и примеры экзопланет | 103 |
| Библиография | 112 |

ГЛАВА ПЕРВАЯ. ЗАЧЕМ ИСКАТЬ ЭКЗОПЛАНЕТЫ?

Другие звёздные системы недостижимы для человека по ряду причин, главной из которых является колоссальное расстояние. Даже до ближайшей звезды, Проксимы Центавра, свет идёт более четырёх лет, а современным космическим кораблям потребовались бы десятки тысяч лет. Ограничения фундаментальной физики, такие как невозможность превышения скорости света, вкупе с техническими сложностями — энергией, необходимой для разгона аппаратов до хотя бы долей световой скорости, и проблемами их долговечности, — делают такие путешествия пока лишь фантазией. Даже если мы когда-нибудь найдём способ преодолеть эти барьеры, это будут проекты, выходящие за пределы человеческой жизни, требующие принципиально новых технологий, философии и терпения.

И хотя существуют проекты вроде лазерного паруса, например *Breakthrough Starshot*, предполагающего разгон крошечных зондов до 20% скорости света с помощью мощных лазеров, они пока остаются на стадии концепции. Такие технологии сталкиваются с массой нерешённых проблем: от точного наведения лазерного луча на огромных расстояниях до защиты зондов от частиц космической пыли, которые при такой скорости могут их уничтожить. Даже в случае успеха путешествие крошечных зондов к ближайшей звезде займёт десятилетия, а передача данных обратно на Землю — годы. Это показывает, что, хотя идеи и существуют, звёздные системы остаются крайне труднодостижимыми с нашими текущими возможностями.

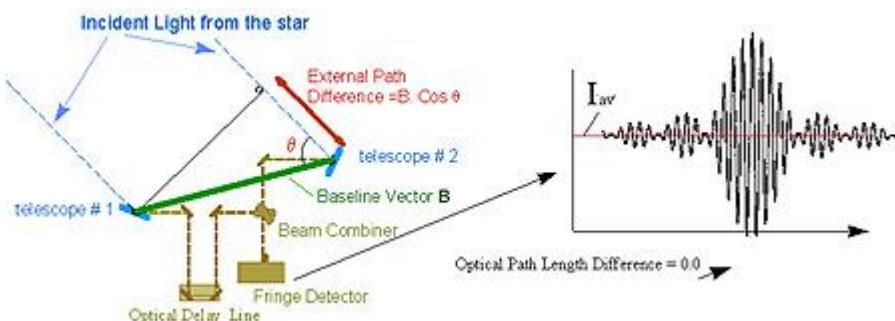
Тогда, зачем искать экзопланеты, если мы всё равно никогда до них не долетим? Этот вопрос звучит логично, но при более глубоком размышлении становится ясно, что исследование экзопланет не ограничивается мечтой о путешествии к ним. В первую очередь, изучение экзопланет открывает перед нами новые горизонты понимания Вселенной. Мы ищем ответы на фундаментальные вопросы: как образуются планеты, чем они отличаются от Земли, могут ли где-то существовать условия для жизни? Даже если человечество никогда не достигнет этих миров, сам факт их существования позволяет нам увидеть нашу планету в более широком контексте и осознать её уникальность. Кроме того, поиск экзопланет — это источник технологических и научных открытий. Методы, созданные для исследования далёких миров, уже сегодня применяются в других областях науки и техники. Наконец, эта деятельность вдохновляет людей. Она питает наше любопытство и напоминание о том, что мы — часть огромной, неизведанной Вселенной. Возможно, дело не в том, чтобы долететь, а в самом стремлении понять и исследовать.

ГЛАВА ВТОРАЯ. АСТРОМЕТРИЯ

Астрометрия, как древнейший метод изучения небесных тел, основана на точных измерениях их положения и движения относительно удалённых, кажущихся неподвижными звёзд. В её основе лежит определение едва заметного смещения светила, вызванного гравитационным воздействием невидимого спутника — планеты, обращающейся вокруг звезды. Эти неуловимые колебания представляют собой едва различимые изменения координат, которые лишь при длительном и детальном наблюдении позволяют выявить присутствие массивного объекта.

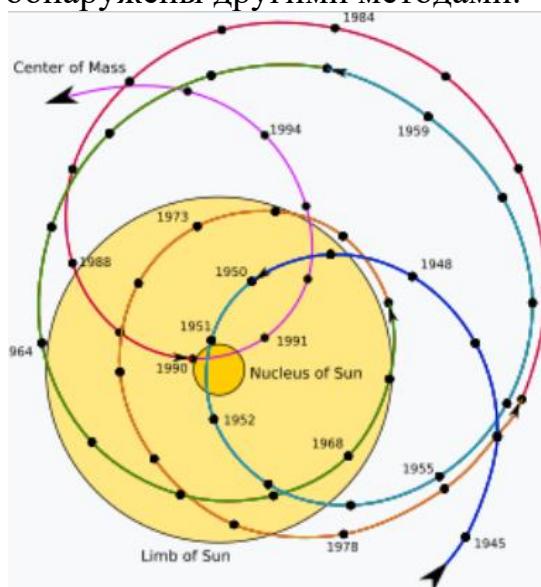
Измерения такого рода требуют предельной точности, поскольку величина отклонения зачастую составляет доли угловых миллисекунд, что делает задачу особенно сложной. Однако благодаря применению современных инструментов удаётся не только подтвердить существование экзопланеты, но и определить её массу, орбитальные характеристики и даже природу гравитационного взаимодействия со звездой-хозяином. Несмотря на неоспоримые преимущества, метод предъявляет исключительные требования к наблюдательной аппаратуре. Для получения достоверных данных необходимо проводить измерения в течение продолжительного времени, фиксируя малейшие изменения, что требует устойчивости к внешним факторам, способным исказить результаты. Тем не менее, при наличии достаточных ресурсов и высокой точности измерений астрометрия остаётся ценным инструментом для исследования экзопланетных систем и формирования представлений о динамике звёздных систем в целом.

Хотя астрометрия теоретически является мощным инструментом для обнаружения экзопланет, на практике её применение долгое время сталкивалось с техническими трудностями. Высокие требования к точности измерений делали этот метод менее эффективным по сравнению с другими, такими как транзитный и доплеровский. Тем не менее, его потенциал всегда оставался значительным, особенно в тех случаях, когда другие способы оказывались недостаточными.



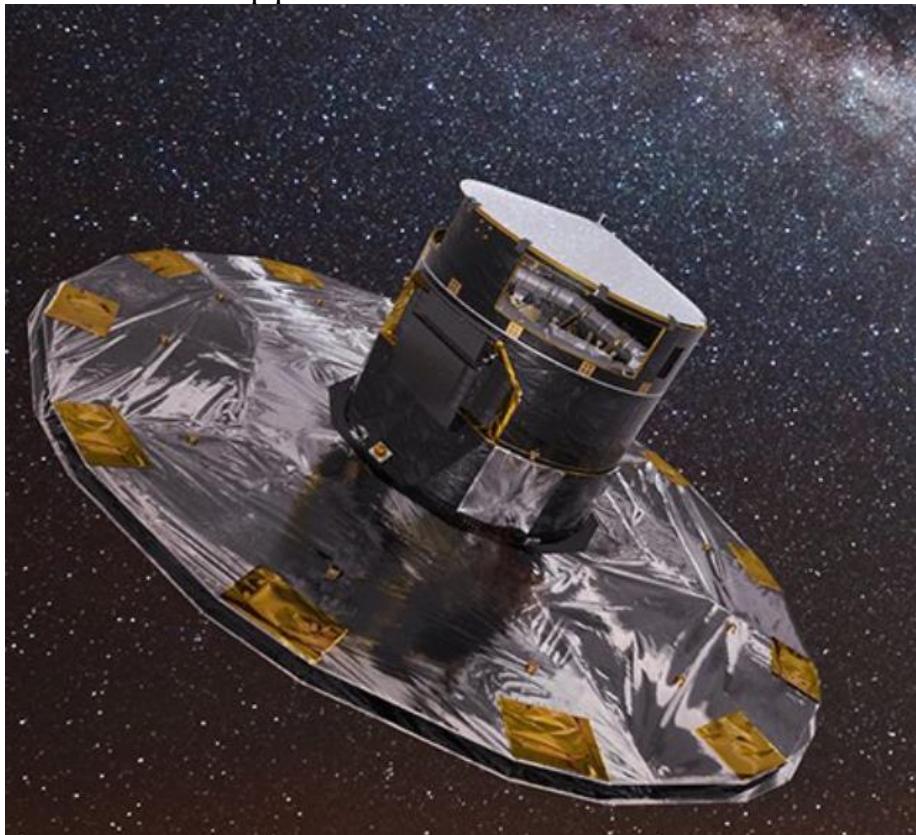
Первый случай, когда астрометрия действительно привела к подтверждённому открытию экзопланеты, связан с миссией *Gaia* — космического телескопа Европейского космического агентства. Этот аппарат, обладая беспрецедентной точностью в определении положений звёзд, позволил собрать данные, на основании которых были сделаны первые надёжные выводы о присутствии массивных планет, оказывающих влияние на движение своих звёзд. Ранее предпринимались попытки обнаружить экзопланеты с помощью астрометрии с использованием наземных обсерваторий, однако эти исследования не давали однозначных результатов.

Одним из наиболее известных случаев стало предполагаемое открытие планеты вокруг звезды VB 10 в 2009 году, основанное на астрометрических измерениях. Однако последующие наблюдения не подтвердили его. Долгое время астрометрия оставалась скорее вспомогательным методом, но с развитием технологий и увеличением точности приборов её значение постепенно возрастает. С запуском современных обсерваторий, обладающих высокой чувствительностью, ожидается, что астрометрия станет одним из ведущих инструментов для определения массы и орбит экзопланет, особенно тех, которые расположены на значительном расстоянии от своей звезды и не могут быть легко обнаружены другими методами.



Астрометрия обладает уникальными преимуществами, которые отличают её от других методов поиска экзопланет. В отличие от доплеровской спектроскопии, которая чувствительна в первую очередь к планетам, обращающимся по орбитам, лежащим в плоскости

наблюдения, астрометрия позволяет обнаруживать объекты, находящиеся на широком диапазоне наклонений орбит. Это делает её особенно ценной для выявления планет, движущихся в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, где доплеровский метод становится неэффективным.



Телескоп *Gaia* (The European Space Agency's (ESA))

Другим важным преимуществом является возможность прямого определения массы планеты. В то время как методы спектроскопии позволяют определить лишь минимально возможную массу из-за неизвестного угла наклона орбиты, астрометрия, фиксируя реальное движение звезды в трёхмерном пространстве, даёт

точное значение этого параметра. Это особенно важно при изучении систем с экзопланетами, так как масса является ключевым фактором в определении их природы — газовый гигант перед астрономами или суперземля.

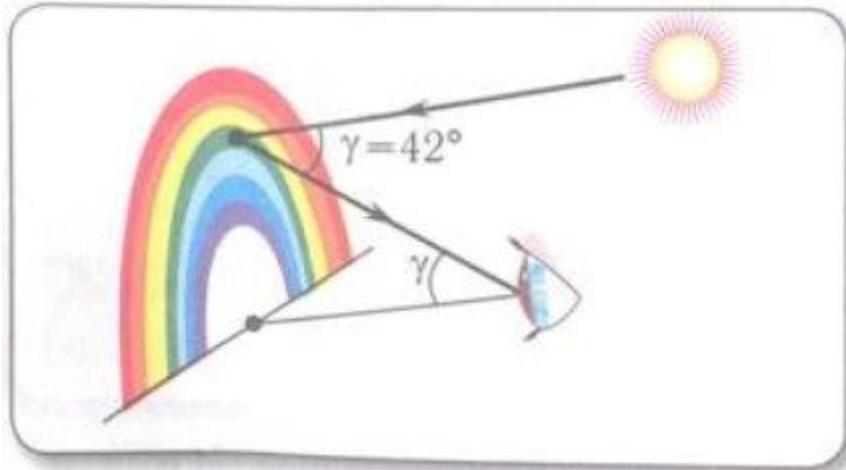
Метод также эффективен для обнаружения планет, находящихся на значительном расстоянии от своих звёзд. В то время как транзитный метод и доплеровская спектроскопия лучше работают для планет с короткими орбитальными периодами, астрометрия позволяет регистрировать планеты, совершающие обращения на протяжении десятков лет. Это открывает возможность изучения аналогов Юпитера и Сатурна в других звёздных системах, что особенно важно для понимания их формирования и эволюции.

Будущее астрометрии тесно связано с развитием технологий высокоточных измерений. Космический телескоп *Gaia*, наблюдающий миллионы звёзд с исключительной точностью, уже собирает данные, которые могут привести к открытию множества экзопланет. В перспективе, с запуском новых миссий, таких как *Nancy Grace Roman Space Telescope*, ожидается дальнейшее увеличение точности астрометрических наблюдений, что позволит не только расширить каталог известных экзопланет, но и глубже понять процессы формирования и динамики планетных систем.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ. СПЕКТРОСКОПИЯ И РАДИАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ (МЕТОД ДОПЛЕРА)

Кто с детства не удивлялся радуге? Её яркая дуга, возникающая на фоне дождевого неба, кажется почти сказочным явлением, хотя на самом деле подчиняется строгим законам оптики. Кажется, будто природа сама рисует её, раскладывая солнечный свет в плавный спектр цветов, и мало кто задумывается, почему и как она появляется.

Секрет радуги кроется в свойстве света изменять направление при прохождении через разные среды. Когда солнечный луч попадает в каплю дождя, он преломляется — меняет свой угол движения. Однако важнее всего то, что свет состоит из множества длин волн, каждая из которых преломляется немного по-своему: красный свет отклоняется меньше, а фиолетовый — сильнее. Это явление называется дисперсией, и именно оно разлагает белый свет на его составляющие цвета.



После первого преломления луч света достигает задней стороны капли, где часть его отражается обратно. Затем, выходя из капли, он преломляется вновь, окончательно разделяясь на цветовую гамму. Миллионы капель в воздухе рассеивают свет таким образом, что до глаз наблюдателя доходят лучи определённого цвета в зависимости от угла их выхода. В результате формируется цветная дуга, в которой всегда можно увидеть знакомый порядок: снаружи располагается красный, затем следуют оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и, наконец, фиолетовый.

Интересно, что радуга существует не в каком-то определённом месте на небе, а зависит от положения наблюдателя. Каждый человек видит свою собственную радугу, ведь она формируется светом, преломлённым в тех каплях, от которых свет попадает именно в его глаза. Центр радуги всегда оказывается напротив Солнца, поэтому увидеть её можно только тогда, когда Солнце находится позади, а перед глазами — дождевые капли.

Иногда появляется вторая, более тусклая радуга, расположенная выше первой. Она образуется, когда свет внутри капли отражается дважды, из-за чего цветовой порядок в ней оказывается обратным: красный оказывается внутри дуги, а фиолетовый — снаружи.

Такое простое, но завораживающее явление показывает, как свет, дождь и геометрия создают удивительные картины в небе, подчиняясь тем же физическим законам, что и спектральный анализ в астрономии. Именно эти принципы, по которым преломляется и расщепляется свет, позже позволили учёным понять природу далёких звёзд, составлять их химические карты

и даже находить экзопланеты, невидимые невооружённому глазу.



Когда Исаак Ньютон впервые пропустил солнечный свет через стеклянную призму, он обнаружил, что белый свет раскладывается в плавный спектр цветов — от красного до фиолетового. Это явление, известное как, упомянутая нами, дисперсия, показало, что свет состоит из множества различных длин волн, каждая из которых воспринимается как определённый цвет. Позже стало ясно, что не только Солнце, но и любые звёзды излучают свет с определённым спектром, а если разложить их излучение, можно увидеть не только сплошные цветные полосы, но и тёмные линии — так называемые спектральные линии. Эти линии соответствуют определённым химическим элементам, находящимся в атмосферах звёзд, и их расположение в спектре строго фиксировано.

Появление спектральных линий связано с взаимодействием света и атомов. На атомном уровне свет представляет собой электромагнитные волны, состоящие из фотонов, а атомы — это ядра, окружённые электронами, которые движутся вокруг них на определённых энергетических уровнях. Каждый атом

имеет строго определённую структуру электронных оболочек, и электроны могут находиться только на чётко установленных уровнях энергии, переходя между ними не плавно, а скачкообразно.

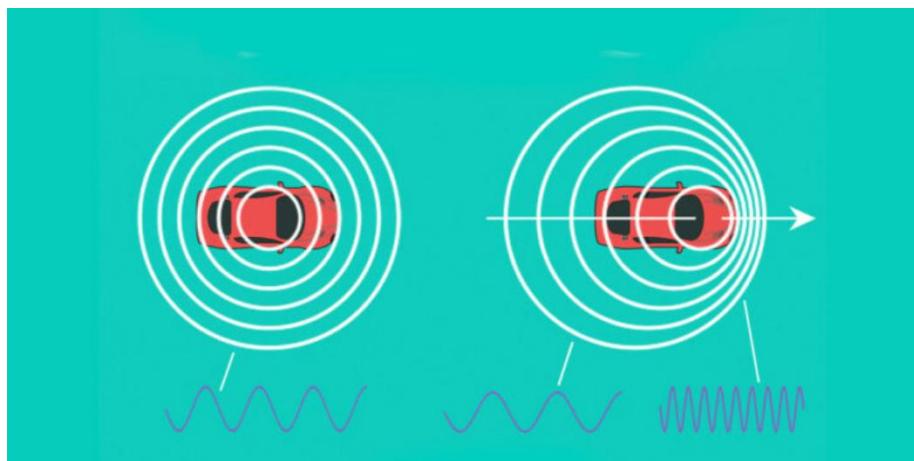
Когда атом поглощает фотон, электрон может перейти на более высокий уровень, но только в том случае, если энергия этого фотона точно соответствует разнице энергий между уровнями. Это означает, что атомы разных элементов поглощают и излучают свет только на строго определённых длинах волн. Если свет проходит через газ, содержащий атомы какого-либо элемента, то фотоны с определёнными энергиями (соответствующими разнице уровней в этих атомах) поглощаются, создавая тёмные линии в спектре — это так называемый спектр поглощения.

Обратный процесс происходит, если атом получает энергию (например, при нагреве) и затем испускает её в виде света. В этом случае электроны, ранее находившиеся на высоких уровнях, возвращаются на более низкие, испуская фотоны с теми же самыми энергиями. Это создаёт спектр излучения, состоящий из ярких линий на тёмном фоне.

Поскольку энергетические уровни в каждом элементе уникальны, спектральные линии служат своеобразным "отпечатком пальца" химического состава вещества. Например, линии водорода всегда появляются в одних и тех же местах спектра, как и линии гелия, натрия или любого другого элемента. Именно благодаря этому анализ спектра звёзд позволяет определить их химический состав, температуру, плотность и даже движение в пространстве.

Однако в середине XIX века стало ясно, что спектр звезды может меняться, если она движется. Причиной этому служит эффект Доплера, впервые описанный в 1842 году австрийским физиком Кристианом Доплером. Он заметил, что если источник волн приближается, то их частота возрастает, а если удаляется — снижается. В повседневной жизни этот эффект можно услышать, например, когда проезжающий мимо автомобиль или поезд издаёт более высокий звук при приближении и более низкий при удалении.

То же самое происходит со световыми волнами. Если звезда движется к наблюдателю, её свет сжимается, частота возрастает, а длины волн смещаются в более коротковолновую, синюю область спектра — это называется синим смещением. Если же звезда удаляется, волны растягиваются, их длина увеличивается, и спектр сдвигается в красную сторону — это красное смещение. Эти сдвиги крайне малы, но их можно измерить, сравнив фактическое положение спектральных линий звезды с их эталонным положением в лабораторных условиях.



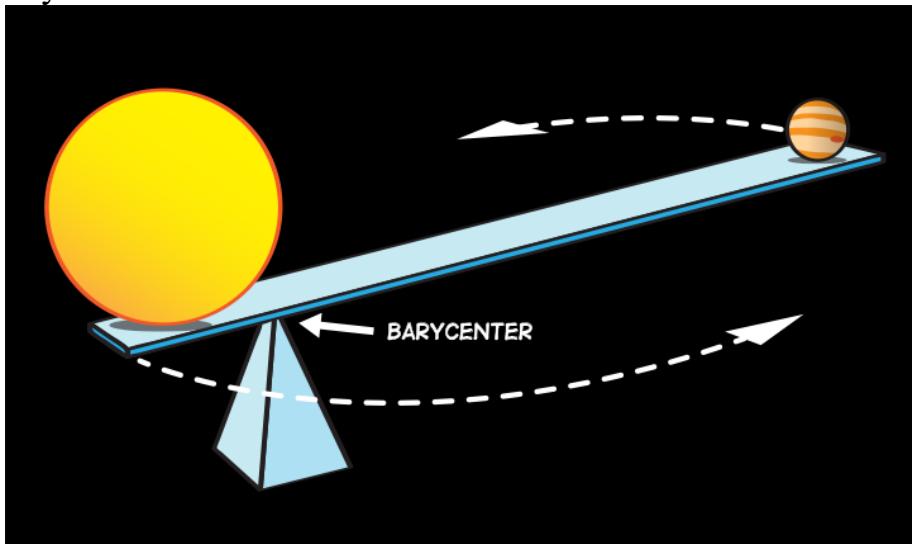
Этот принцип лёг в основу метода радиальных скоростей, позволяющего обнаруживать экзопланеты. Планета, обращающаяся вокруг звезды, своей гравитацией заставляет светило совершать крошечные колебания. Когда звезда немного приближается к наблюдателю, её свет смещается в синюю область спектра, когда удаляется — в красную. Измеряя эти периодические изменения, можно определить массу невидимой планеты, её орбиту и даже возможные характеристики её атмосферы. Этот метод стал одним из самых успешных в поиске экзопланет, особенно массивных, близко расположенных к своим звёздам.

Движение планет вокруг звёзд устроено сложнее, чем кажется на первый взгляд. На самом деле ни одна планета не обращается строго вокруг центра своей звезды — и планета, и звезда движутся вокруг общего центра масс. Этот центр масс — точка, где уравновешены гравитационные силы обоих объектов, и именно вокруг неё происходит вращение.

Если звезда намного массивнее планеты, то этот центр масс оказывается глубоко внутри самой звезды, но не в её геометрическом центре. Например, в случае Земли и Солнца общий центр масс расположен так близко к центру Солнца, что смещение почти незаметно. Однако если планета массивная, например Юпитер, то центр масс уже оказывается ближе к поверхности звезды, и её движение становится более заметным.

Это явление является основой методов астрометрии и радиальных скоростей, применяемых для обнаружения экзопланет. Астрометрия позволяет фиксировать

небольшие колебания звезды относительно окружающих звёздного фона, вызванные её движением вокруг центра масс системы. Метод радиальных скоростей основан на измерении того, как движение звезды к нам и от нас изменяет длину волн её излучения из-за эффекта Доплера. Если звезда периодически смещается, её спектр то сдвигается в красную область, то в синюю, что указывает на наличие невидимого спутника — планеты.



Чем массивнее планета и чем дальше она находится от звезды, тем сильнее сдвигается центр масс от центра звезды, делая её колебания заметнее. Это объясняет, почему первыми экзопланетами, найденными методами радиальных скоростей, стали именно массивные газовые гиганты, расположенные относительно близко к своим звёздам. Маленькие и лёгкие планеты тоже вызывают движение звезды, но оно слабее и сложнее зафиксировать.

Радиальная скорость, или метод Доплера, представляет собой один из наиболее точных способов обнаружения экзопланет, основывающийся на изучении тончайших изменений в спектре звезды. Когда планета, невидимая глазу, притягивает свою звезду, та совершает крошечные колебания, незаметные в оптическом диапазоне, но оставляющие отчетливый след в спектральных линиях. Свет, испускаемый звездой, под воздействием гравитационного притяжения планеты смещается: если звезда движется в сторону наблюдателя, спектр сдвигается в синюю область, если удаляется — в красную. Эти колебания, фиксируемые чувствительными приборами, позволяют не только подтвердить наличие невидимого компаньона, но и определить его ключевые параметры.

Одним из главных достоинств метода становится его способность предоставлять сведения о массе экзопланеты, что делает его важнейшим инструментом в сочетании с другими методами, такими как транзитный. Кроме того, можно установить параметры орбиты, выясняя, насколько сильно планета влияет на движение светила. Однако эффективность данного подхода зависит от нескольких факторов: наилучшие результаты достигаются при изучении массивных планет, обращающихся близко к своей звезде. Именно такие объекты вызывают наибольшие колебания, что упрощает их обнаружение. В то же время маломассивные миры, особенно удаленные от звезды, оказывают гораздо более слабое воздействие, что делает их выявление сложной задачей.

Важно понимать, что малое количество обнаруженных экзопланет, сопоставимых по массе с Землёй, не

означает их редкость во Вселенной. Суть заключается в том, что современные методы, включая радиальную скорость, лучше приспособлены для выявления массивных объектов, способных заметно воздействовать на движение звезды. Гравитационное влияние небольших планет слабее, а значит, спектральные изменения, которые они вызывают, оказываются менее выраженными и сложнее фиксируются приборами.

Подобная закономерность прослеживается и в других методах поиска. Например, транзитный метод, обнаруживающий планеты по падению яркости звезды при их прохождении на фоне её диска, тоже лучше выявляет крупные миры, создающие более ощутимое затмение. Это приводит к естественному смещению в наблюдениях: в первую очередь фиксируются гиганты, в то время как менее массивные объекты остаются вне пределов чувствительности приборов. Однако это не значит, что такие планеты встречаются реже – напротив, многочисленные модели формирования планетных систем указывают на высокую вероятность существования большого количества небольших миров, просто их сложнее заметить с нынешним уровнем технологий.

С развитием астрономии, совершенствованием инструментов и применением новых подходов чувствительность методов постепенно возрастает, позволяя обнаруживать всё более мелкие объекты. Это даёт основания полагать, что в будущем можно будет составить более точную картину распространённости планет разного размера и, возможно, прийти к выводу, что землеподобные миры гораздо многочисленнее, чем предполагалось ранее.

Доплеровский метод, несмотря на его высокую точность в определении массы и орбиты экзопланеты, имеет существенное ограничение, связанное с ориентацией планетной системы относительно наблюдателя. Поскольку метод основан на измерении колебаний звезды вдоль линии визирования — то есть её движения к нам и от нас — наибольшая эффективность достигается, когда орбита планеты ориентирована так, что значительная часть звёздного движения происходит именно в этом направлении. Если же эклиптика системы расположена почти перпендикулярно наблюдателю, то подавляющая часть движения звезды будет происходить в плоскости, которую невозможно зафиксировать с помощью эффекта Доплера, и сигнал станет слабым или вовсе незаметным.

Такое ограничение приводит к тому, что вероятность обнаружения экзопланет данным методом зависит не только от их массы и расстояния до звезды, но и от случайного фактора — угла наклона орбиты относительно Земли. В одних случаях движение светила окажется достаточно выраженным для уверенной регистрации, в других — его влияние будет минимальным, даже если планета действительно существует. Это создаёт систематический эффект отбора, приводя к тому, что данные о распределении экзопланет могут искажаться, поскольку значительная часть планетных систем остаётся вне зоны чувствительности метода.

Компенсировать этот недостаток позволяют другие способы обнаружения, такие как транзитный метод, который эффективен в ситуациях, когда плоскость орбиты проходит через наблюдателя, и гравитационное микролинзирование, не зависящее от ориентации

системы. Однако, несмотря на свои ограничения, метод радиальных скоростей остаётся одним из ключевых инструментов изучения экзопланет, особенно в сочетании с другими подходами, позволяя получать более полную картину планетных систем за пределами Солнечной системы.

Несмотря на то, что многие из распространённых методов обнаружения экзопланет зависят от ориентации орбиты, астрометрия выделяется среди них своей наименьшей зависимостью от угла наклона. Этот подход основан не на спектральных изменениях, а на измерении крошечных колебаний положения звезды на небесной сфере, вызванных гравитационным воздействием планеты. В отличие от метода Доплера, который фиксирует лишь движение вдоль луча зрения, астрометрия позволяет наблюдать движение в плоскости неба, что делает её значительно менее чувствительной к ориентации планетной системы.

Наибольший потенциал астрометрии заключается в том, что она может одинаково эффективно обнаруживать планеты, чьи орбиты имеют широкий диапазон наклонов. Даже если система расположена так, что метод радиальных скоростей даёт слабый сигнал, астрометрическое смещение звезды остаётся измеримым. Это делает данный метод одним из наиболее универсальных, хотя на протяжении долгого времени его точность оставалась недостаточной для регистрации маломассивных объектов. Только с развитием сверхточных измерительных приборов, таких как телескоп *Gaia*, появилась возможность регистрировать подобные отклонения с достаточной точностью.

Перспективность астрометрии особенно заметна при изучении дальних орбитальных систем, где другие методы теряют эффективность. Радиальная скорость лучше выявляет массивные планеты, обращающиеся близко к звезде, транзитный метод требует особой ориентации системы, а гравитационное микролинзирование, хотя и позволяет обнаруживать экзопланеты, не даёт детальной информации об их орбитах. В этом смысле астрометрия представляет собой наиболее универсальный инструмент, особенно в сочетании с другими методами, что делает её развитие одним из важнейших направлений в современной экзопланетологии.

Если бы наблюдения за Солнечной системой велись с расстояния Альфа Центавры с использованием методов астрометрии или радиальных скоростей, обнаружение Земли оказалось бы крайне сложной задачей, хотя Юпитер и другие массивные планеты выдали бы себя намного легче.

Метод радиальных скоростей, применяемый для изучения движения Солнца, испытывал бы серьёзные трудности в выявлении Земли. Дело в том, что наша планета оказывает лишь незначительное гравитационное воздействие на Солнце: скорость движения светила под её влиянием составляет всего около 9 сантиметров в секунду. Современные приборы на Земле уже приближаются к порогу чувствительности, позволяющему фиксировать такие малые колебания, но даже если бы у гипотетических наблюдателей на Альфа Центавре были аналогичные технологии, задача оставалась бы крайне сложной. Для сравнения, Юпитер, будучи в 318 раз массивнее Земли, вызывает колебания

Солнца с амплитудой порядка 12 метров в секунду — на несколько порядков больше, что делает его гораздо более заметным кандидатом.

Астрометрический метод в этом случае оказался бы более перспективным, так как не зависит от ориентации орбиты. Однако здесь тоже возникают серьёзные трудности. Земля вызывает отклонения положения Солнца на небе не более чем на 0,3 микросекунды дуги. Это в сотни раз меньше, чем текущее разрешение миссии Gaia, которая измеряет положения звёзд с точностью около 10 микросекунд дуги. Даже если бы в распоряжении инопланетных астрономов был инструмент на порядок точнее Gaia, Землю всё равно было бы крайне сложно обнаружить.

Таким образом, если бы в системе Альфа Центавры велись поиски экзопланет вокруг Солнца с помощью существующих астрономических методов, первыми были бы замечены Юпитер и, возможно, Сатурн. Земля же осталась бы вне пределов обнаружения до появления инструментов с ещё более высокой чувствительностью, либо до использования других методов, таких как прямое изображение с помощью передовых телескопов.

И это при том, что Альфа Центавра — ближайшая к нам звёздная система. Такой факт подчёркивает, насколько ограничены современные методы в поиске экзопланет земного типа, ведь если даже Землю трудно обнаружить с такого небольшого по космическим меркам расстояния, то насколько сложнее выявлять подобные миры у далёких звёзд. Между тем именно такие планеты представляют наибольший интерес: они потенциально могут обладать условиями, пригодными для жизни, что делает их приоритетной целью исследований.

Однако важно отметить, что, несмотря на нынешние трудности, пока не достигнут физический предел точности во многих методах. Радиальные скорости продолжают совершенствоваться, и уже существуют проекты, направленные на повышение чувствительности до уровня обнаружения колебаний звезды с амплитудой менее 10 сантиметров в секунду, что позволит зарегистрировать землеподобные планеты в зонах обитаемости некоторых ближайших звёзд. Астрометрия, хотя пока и недостаточно точна для выявления маломассивных экзопланет, с будущими инструментами сможет фиксировать ещё более мелкие отклонения в положении звезды.

Другие методы также находятся в стадии активного развития. Прямые наблюдения, которые сегодня позволяют различать лишь гигантские экзопланеты, со временем могут стать достаточно точными, чтобы фиксировать свет от небольших каменистых миров. Развитие космических телескопов с мощными коронографами и звёздными тенями (старшэйдами) даст возможность напрямую изучать атмосферу экзопланет, выявляя в ней биомаркеры.

Современные ограничения — лишь этап в развитии астрономии. Несмотря на то, что на данный момент обнаружение экзопланет, подобных Земле, остаётся чрезвычайно сложной задачей, нет оснований полагать, что это останется нерешаемой проблемой в будущем. По мере совершенствования инструментов и методов открытие множества подобных миров, вероятно, станет лишь вопросом времени.

Для применения метода радиальных скоростей (или метода Доплера) используются высокоточные

спектрографы, способные фиксировать мельчайшие изменения в спектральных линиях звезды. Основной принцип работы заключается в регистрации смещений спектра из-за эффекта Доплера: если звезда движется к наблюдателю, её свет немного сдвигается в синюю область спектра, если удаляется — в красную. Современные приборы достигают невероятной точности, позволяя измерять изменения скорости звезды с точностью до нескольких десятков сантиметров в секунду.

Ключевым элементом системы является высокостабильный спектрограф, установленный на крупном телескопе. Среди наиболее известных инструментов, применяемых для этого метода, можно выделить HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher), установленный на 3,6-метровом телескопе в Чили, ESPRESSO, работающий на Очень Большом Телескопе (VLT), и HIRES на телескопе Кека. Эти устройства анализируют спектр звезды, регистрируя изменения в положении спектральных линий, вызванные движением светила под воздействием гравитации экзопланеты.

Чтобы достичь высокой точности, спектрограф должен быть не только чувствительным, но и предельно стабильным. Для этого применяются системы термостабилизации, удерживающие температуру прибора с точностью до тысячных долей градуса, что предотвращает тепловые расширения, способные искажить измерения. В качестве опорного источника для калибровки часто используется либо иодная ячейка, создающая эталонные линии, либо лазерные гребенки, генерирующие точную и стабильную шкалу частот.

Сам процесс измерений заключается в многократном наблюдении звезды в течение длительного времени. Собираемые спектры анализируются на предмет периодических изменений, которые соответствуют колебаниям звезды под влиянием планеты. Частота и амплитуда этих колебаний позволяют определить массу экзопланеты и её орбитальные характеристики, хотя наклон орбиты остаётся неизвестным, что создаёт неопределённость в точном значении массы.

Благодаря постоянному совершенствованию технологии метод Доплера продолжает оставаться одним из ведущих способов обнаружения экзопланет. Особенно перспективным направлением является дальнейшее повышение точности, что в будущем позволит находить планеты с массами, сопоставимыми с Землёй, даже у относительно далёких звёзд.

При использовании метода радиальных скоростей важно отделить периодические колебания звезды, вызванные присутствием экзопланеты, от её собственного движения в пространстве. Звёзды не стоят на месте: каждая из них движется относительно Солнца с определённой скоростью, причём это движение включает как поступательный компонент (собственное движение), так и возможные дополнительные эффекты, например, колебания, вызванные звёздными компаньонами или внутренними процессами.

Собственное движение звезды включает её пространственную скорость, состоящую из трёх компонентов: радиальной скорости (вдоль луча зрения), поперечной скорости (перпендикулярно лучу зрения) и скорости, обусловленной движением Солнечной

системы. Метод Доплера фиксирует только радиальную составляющую, но при этом требуется учитывать, что звезда может иметь значительную постоянную скорость по отношению к нам, которая не связана с присутствием планет.

Чтобы отделить этот фоновый эффект от слабых изменений, вызванных экзопланетами, вначале определяется средняя радиальная скорость звезды — то есть её движение относительно Солнца без временных изменений. Это делается путём измерения её спектра и сравнения с эталонными спектрами лабораторных источников. Даже если звезда движется к нам или от нас с большой скоростью, это создаёт лишь постоянное смещение всех спектральных линий, но не даёт периодического сигнала, который указывал бы на присутствие планеты.

После устранения постоянного доплеровского смещения начинают искать периодические изменения, соответствующие колебаниям, вызванным орбитальным движением светила под воздействием экзопланеты. Для этого проводят многократные наблюдения в течение недель, месяцев или даже лет, анализируя небольшие вариации радиальной скорости.

Дополнительно учитываются возможные астрономические и инструментальные ошибки. Например, солнечная активность может влиять на измерения, так как пятна и факельные области на поверхности звезды способны изменять форму её спектральных линий, создавая ложные сигналы. Такие эффекты минимизируются с помощью статистического анализа и сравнительных наблюдений за аналогичными звёздами.

Метод радиальных скоростей, основанный на эффекте Доплера, стал одним из первых и наиболее успешных инструментов в поиске экзопланет. С момента своего активного применения в 1990-х годах он позволил открыть сотни миров, многие из которых затем были подтверждены другими методами, такими как транзитный или прямое изображение.

Один из самых знаковых успехов метода — открытие **51 Пегаса b**, первой экзопланеты, обнаруженной у звезды, похожей на Солнце. В 1995 году Мишель Майор и Дидье Кело с помощью высокоточного спектрографа на обсерватории в Южной Франции зафиксировали периодические колебания радиальной скорости звезды 51 Пегаса. Эти изменения указывали на присутствие массивной планеты, совершившей полный оборот вокруг светила всего за 4,2 дня. Это было удивительным открытием, так как планета оказалась "горячим Юпитером" — газовым гигантом, находящимся чрезвычайно близко к своей звезде, что противоречило традиционным представлениям о формировании планетных систем. Позже 51 Пегаса b была подтверждена транзитным методом, что окончательно закрепило статус радиальных скоростей как надёжного инструмента поиска экзопланет.

Другим важным достижением стало открытие планетной системы у **Глизе 581**. Этот красный карлик, расположенный в 20 световых годах от Земли, оказался домом для нескольких экзопланет, среди которых особое внимание привлекла Глизе 581c — один из первых кандидатов на наличие условий, потенциально пригодных для жизни. Хотя позже оценки её обитаемости изменились, само открытие показало, что

радиальный метод способен выявлять не только газовые гиганты, но и более компактные каменистые планеты. Метод также сыграл ключевую роль в изучении системы **HD 209458**, где впервые была подтверждена экзопланета сразу двумя независимыми способами. Сначала колебания звезды, зафиксированные спектрографом, указали на наличие массивного объекта, а затем транзитный метод подтвердил это открытие, когда астрономы заметили регулярные падения яркости звезды при прохождении планеты по её диску. Это позволило не только измерить массу, но и определить размер планеты, впервые предоставив полные характеристики экзопланетного объекта.

Одним из наиболее интересных недавних открытий стало обнаружение **Проксима Центавра b**, экзопланеты, вращающейся вокруг ближайшей к нам звезды. В 2016 году команда астрономов, используя спектрограф HARPS, выявила небольшие, но стабильные изменения радиальной скорости Проксимы Центавры, соответствующие планете с массой, близкой к земной, находящейся в зоне обитаемости. Позже это открытие было подтверждено дополнительными наблюдениями, включая уточнение орбитальных параметров и возможных характеристик атмосферы.

Эти примеры демонстрируют, что метод Доплера остаётся одним из самых надёжных способов поиска экзопланет, особенно в сочетании с другими методами. Он не только позволяет выявлять новые миры, но и помогает уточнять их параметры, что делает его ключевым инструментом в современной экзопланетологии.

Причём метод радиальных скоростей менее чувствителен к расстоянию, чем астрометрия, что делает его особенно ценным инструментом для поиска экзопланет даже у далёких звёзд. В то время как астрометрия требует невероятной точности в измерении микроскопических смещений звезды на небесной сфере, радиальный метод анализирует изменения спектра, которые можно фиксировать даже на значительных дистанциях, если оборудование обладает достаточной чувствительностью.

Основное ограничение астрометрии связано с тем, что угловые отклонения звезды под действием планеты становятся всё меньше с увеличением расстояния. Например, если землеподобная планета вызывает отклонение в положении своей звезды на 0,3 микросекунды дуги, то на расстоянии нескольких десятков световых лет это отклонение становится практически незаметным даже для самых мощных телескопов. Радиальная же скорость не измеряет положение звезды, а фиксирует смещения спектральных линий, которые не зависят от углового размера системы на небе, а лишь от амплитуды движения звезды вдоль луча зрения.

Благодаря этому методу удалось обнаружить экзопланеты у звёзд, находящихся в сотнях световых лет от нас. Например, объекты, найденные в системах 47 Большой Медведицы и Тау Кита, располагаются на расстоянии более 40 световых лет, но их присутствие было уверенно зафиксировано именно по периодическим изменениям спектра звёзд. Даже для относительно далёких объектов, таких как планеты у гигантских звёзд или систем, расположенных в других частях нашей галактики, метод радиальных скоростей

остаётся рабочим инструментом, хотя для поиска планет на ещё больших расстояниях всё же эффективнее другие методы, например, гравитационное микролинзирование.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ГРАВИТАЦИОННОЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ

Основан на одной из самых удивительных идей теории Эйнштейна метод Гравитационного микролинзирования. Считается, что гравитация не просто притягивает объекты, а искривляет само пространство-время. В этой концепции массивные тела, такие как звёзды и планеты, деформируют окружающее пространство, заставляя свет двигаться не по прямой, а по изогнутым траекториям.

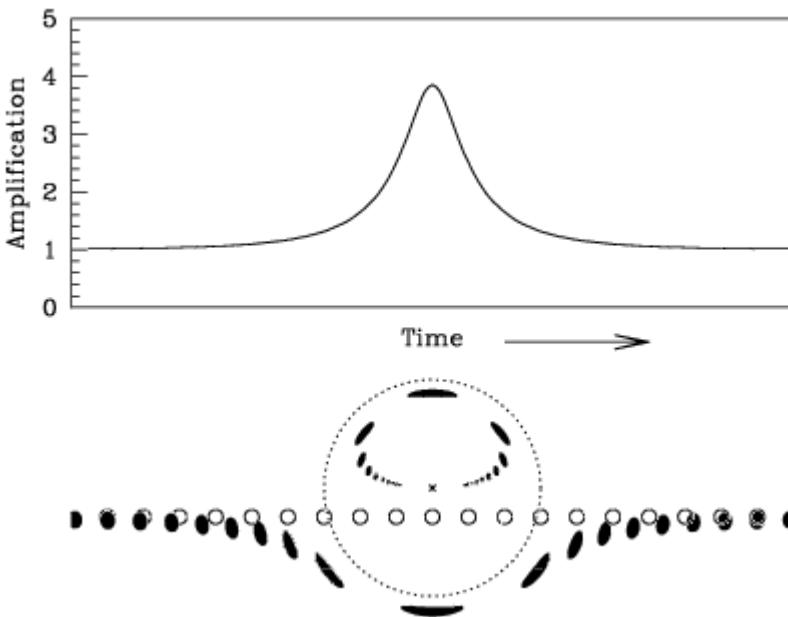
Представим, что свет от далёкой звезды движется по направлению к наблюдателю, но на его пути оказывается другая звезда — та, которая ближе к нам. Если бы пространство было абсолютно плоским, свет прошёл бы мимо этой звезды по прямой линии. Но из-за того, что массивный объект искривляет пространство вокруг себя, световые лучи огибают его, словно вода, текущая вокруг камня в реке.

Когда такое искривление происходит, лучи, которые в обычных условиях разошлись бы в разные стороны, могут собраться и прийти к наблюдателю так, будто они исходят от более яркого источника. Это похоже на эффект увеличительного стекла: линза собирает свет и делает объект более крупным и ярким. Только в случае гравитационного микролинзирования роль линзы выполняет массивное небесное тело.

Если в системе, помимо звезды, присутствует планета, она вносит дополнительные возмущения в кривую блеска. Планета — это небольшая дополнительная «вмятина» в пространстве-времени, которая создаёт второй, более слабый гравитационный эффект. Если свет проходит рядом с ней, можно наблюдать

небольшие скачки яркости, которые указывают на её существование.

Такое явление происходит случайно, когда звезда-линза оказывается на одной линии с далёкой звездой-фоном. Как только они смещаются, эффект исчезает, и наблюдать его снова для той же системы уже невозможно. Именно поэтому гравитационное микролинзирование помогает находить экзопланеты, но не позволяет их детально изучать после обнаружения.



Гравитационное микролинзирование представляет собой метод обнаружения экзопланет, основанный на эффекте искривления света под воздействием гравитационного поля массивных объектов. Когда свет от далёкой звезды проходит мимо массивного тела, будь то другая звезда или планета, он отклоняется, создавая своеобразную линзу, способную временно увеличить яркость удалённого источника. Это явление позволяет

зарегистрировать наличие планеты, даже если она сама остаётся невидимой для обычных методов наблюдения. Основной признак микролинзирования заключается в характерном изменении светимости звезды-фона. Если на пути светового луча оказывается одиночная звезда, её яркость возрастает и затем плавно снижается, формируя симметричную кривую блеска. Однако если в системе присутствует планета, она вносит дополнительные отклонения в эту кривую, создавая дополнительные пики или аномалии в изменении светимости. Эти особенности позволяют учёным определить не только сам факт существования планеты, но и её массу, а также удалённость от главной звезды.

Главным преимуществом метода является возможность обнаруживать планеты, находящиеся на значительных расстояниях от Земли, включая объекты, расположенные в центрах галактик или даже в межгалактическом пространстве. Этот подход не требует наличия яркого источника света от самой планеты или её звезды и способен выявлять небесные тела, которые иначе остались бы скрыты от взора астрономов.

Однако у гравитационного микролинзирования есть и серьёзные ограничения. Природа этого явления делает каждое подобное событие уникальным и невоспроизводимым. Если световой луч прошёл через определённую планетарную систему и создал временное усиление яркости, то повторить наблюдение для той же системы практически невозможно. Это усложняет детальное изучение обнаруженных экзопланет и не позволяет собирать дополнительные данные о них после завершения события. Именно поэтому метод широко используется для статистического анализа и поиска

новых миров, но остаётся малоэффективным для дальнейшего исследования конкретных планетных систем.

В гравитационном микролинзировании псевдопозитивные результаты могут возникать по разным причинам, приводя к ошибочной интерпретации данных. Одной из распространённых причин является естественная вариабельность звёзд. Некоторые звёзды изменяют свою яркость со временем из-за процессов, происходящих внутри них, таких как пульсации или вспышки активности. Если такая звезда случайно изменит свою светимость в тот момент, когда проходит наблюдение, это может быть ошибочно принято за эффект микролинзирования.

Другой возможный источник ложных сигналов связан с влиянием нескольких объектов в одной области неба. В плотных звёздных полях, например в галактическом центре, звёзды могут находиться очень близко друг к другу с точки зрения наблюдателя, и их свет может смешиваться. Если одна из них изменяет яркость по независимым причинам, это может создать ложное впечатление микролинзирования.

Также ошибки могут возникать из-за наличия межзвёздной пыли или облаков газа, которые могут временно рассеивать или усиливать свет от далёких источников. Это особенно актуально для наблюдений в плотных и пыльных областях галактики, где свет далёких звёзд проходит через неоднородную среду.

Технические ошибки при обработке данных тоже могут привести к ложным сигналам. Небольшие колебания в калибровке телескопа, атмосферные возмущения или артефакты детектора могут исказить измерения, создавая эффект, напоминающий микролинзирование.

Наконец, некоторые случаи могут быть связаны не с планетами, а с другими астрономическими объектами, такими как двойные звёздные системы или коричневые карлики. Если невидимый спутник звезды-линзы вызывает похожие возмущения в кривой блеска, его можно по ошибке принять за планету. Именно поэтому подтверждение результатов требует тщательного анализа и, по возможности, независимых наблюдений с разных инструментов.

Гравитационное микролинзирование позволило обнаружить множество экзопланет, включая те, которые сложно выявить другими методами. Этот подход особенно полезен для поиска планет, находящихся далеко от своих звёзд, а также для исследования свободно дрейфующих объектов, не привязанных к конкретной звёздной системе.

Среди наиболее значимых находок можно выделить планеты с массами, сравнимыми с Землёй, находящиеся на орbitах, напоминающих расположение планет в Солнечной системе. Например, были обнаружены системы, в которых планеты располагаются на расстояниях, аналогичных орбитам Юпитера или Сатурна, что подтверждает гипотезу о том, что архитектура других планетных систем может напоминать нашу.

Благодаря микролинзированию удалось выявить несколько случаев существования так называемых "сиротских" планет — объектов, которые не врачаются вокруг звёзд, а свободно перемещаются в космосе. Это стало важным подтверждением теории о том, что во Вселенной могут существовать миллиарды подобных

блуждающих планет, выброшенных из своих систем в ходе динамических взаимодействий.

Метод также позволил обнаружить планеты в крайне удалённых частях Галактики, включая объекты, расположенные ближе к её центру. Это дало возможность исследовать распространённость планет в разных областях звёздного скопления и подтвердить, что планеты формируются не только вблизи Солнца, но и в условиях плотных галактических сред.

Кроме экзопланет, гравитационное микролинзирование дало учёным возможность изучать тёмные объекты, такие как коричневые карлики — небесные тела, находящиеся между планетами и звёздами по своим характеристикам. Было найдено множество таких объектов, что помогло лучше понять механизмы формирования звёзд и планет.

Этот метод также используется для исследования тёмной материи. Хотя он изначально был разработан для поиска планет, его применяют для изучения массивных, но невидимых объектов, таких как чёрные дыры или массивные компактные объекты, которые могут вносить свой вклад в общую массу Галактики.

С помощью метода гравитационного микролинзирования удалось обнаружить множество необычных объектов, среди которых экзопланеты, свободно дрейфующие тела, коричневые карлики и даже кандидаты в чёрные дыры. Одной из первых подтверждённых экзопланет, найденных этим способом, стал газовый гигант, схожий по массе с Юпитером и находящийся на орбите, напоминающей положение крупнейшей планеты Солнечной системы. Впоследствии был выявлен ещё один объект, оказавшийся одной из первых обнаруженных

суперземель. Расположенная на расстоянии около 20 000 световых лет от Земли, эта планета по массе превосходит Землю примерно в пять раз и обращается вокруг своей звезды на широкой орбите.

Дальнейшие исследования привели к открытию ещё одной планеты, обладающей массой, сравнимой с земной, но находящейся у слабой звезды, что подтвердило возможность существования небольших миров даже вокруг тусклых красных карликов. Однако наибольший интерес вызвали объекты, не привязанные к звёздным системам. Так, в 2021 году было объявлено об обнаружении множества свободно дрейфующих планет, включая одну, предположительно обладающую массой Земли и движущуюся в межзвёздном пространстве без привязанности к какой-либо звезде.

Кроме планет, были найдены коричневые карлики — небесные тела, слишком массивные для того, чтобы считаться планетами, но недостаточно тяжёлые для того, чтобы в их недрах начались термоядерные реакции. Один из подобных объектов был выявлен в составе двойной системы, что позволило лучше изучить процессы формирования подобных звёздоподобных тел. Метод микролинзирования оказался полезным и в поисках массивных, невидимых объектов. В 2022 году на основании собранных данных учёные объявили о возможном обнаружении одиночной чёрной дыры, расположенной на расстоянии около 5 000 световых лет. Если этот объект действительно окажется чёрной дырой, он станет первым подтверждённым изолированным представителем своего рода, найденным этим методом. Всё это подтверждает, что гравитационное микролинзирование позволяет не только выявлять планеты за пределами Солнечной системы, но и

проливать свет на природу тёмных и слабо излучающих объектов в Галактике.

Для наблюдений гравитационного микролинзирования используются мощные наземные телескопы, оснащённые чувствительными камерами, способными фиксировать слабые изменения светимости звёзд. Основными инструментами являются телескопы, работающие в оптическом и инфракрасном диапазонах, поскольку именно эти длины волн позволяют наиболее точно отслеживать кривые блеска удалённых объектов. Среди наиболее известных обсерваторий, участвующих в таких исследованиях, можно выделить телескопы проектов OGLE и MOA, расположенные в Чили и Новой Зеландии соответственно. Они проводят регулярные обзорные наблюдения, сканируя густонаселённые звёздами области, такие как галактический центр, где вероятность возникновения эффектов микролинзирования особенно высока.

Принцип работы заключается в том, что телескопы делают последовательные снимки одного и того же участка неба, анализируя изменение яркости звёзд с течением времени. Если происходит событие микролинзирования, свет далёкой звезды начинает усиливаться, достигает максимума, а затем постепенно ослабевает, создавая характерную симметричную кривую. Дополнительные возмущения на этой кривой могут указывать на наличие экзопланеты или другого объекта, внесшего свой вклад в гравитационное поле линзы.

Однако у используемого оборудования есть свои ограничения. Главной проблемой является необходимость постоянного мониторинга обширных

участков неба, поскольку события микролинзирования происходят случайно и предсказать их заранее невозможно. Это требует больших вычислительных ресурсов и автоматизированных алгоритмов обработки данных, которые помогают оперативно выявлять потенциальные события. Кроме того, так как метод основан на регистрации временных изменений, любое атмосферное или техническое вмешательство, например, облачность, механические сбои или несовершенство детекторов, может привести к потере важных данных.

Ещё одной сложностью является ограничение по разрешению. Хотя телескопы способны фиксировать изменения яркости, они не могут напрямую различить отдельные компоненты системы, особенно если линзирующий объект находится очень далеко. Это приводит к неопределённости в оценке массы обнаруженных объектов, так как иногда трудно сказать, является ли гравитационная линза одиночной звездой, двойной системой или даже компактным тёмным объектом, таким как чёрная дыра.

Наконец, одной из главных проблем является то, что событие может произойти в тот момент, когда наблюдения не проводятся в этом участке неба. Если телескопы не смотрят в нужную область в нужное время, событие микролинзирования остаётся незамеченным, и шанс обнаружить экзопланету или другой интересный объект оказывается упущенными. Это особенно актуально, поскольку каждое такое событие уникально и не повторяется для той же системы. Именно поэтому астрономы стараются максимально часто наблюдать регионы с высокой плотностью звёзд,

но даже при этом неизбежно остаются неучтённые случаи.

ГЛАВА ПЯТАЯ. ТРАНЗИТНЫЙ МЕТОД

Кажется, что солнечное затмение случается внезапно, хотя его путь предсказан задолго до того, как тень начнёт скользить по поверхности Земли. День, ещё мгновение назад залитый ослепительным светом, замирает в тревожной тишине. Воздух становится прохладнее, птицы сбиваются с ритма, переставая петь, а на горизонте возникает призрачный отсвет, словно закат окружил всё небо со всех сторон. Затем, когда последний луч исчезает за чёрным кругом Луны, мир погружается в странную, неземную тьму. Из этого мрака вспыхивает солнечная корона — призрачное, серебристое сияние, дрожащее на границе пустоты. Всё вокруг застывает, как будто время замерло, позволяя прикоснуться к вечности.

Но это мимолётное чудо — лишь напоминание о великих небесных ритмах, что правят не только нашей планетой, но и бесчисленными мирами за её пределами. Подобные события происходят и среди далёких звёзд, когда планеты пересекают их светила, оставляя в их блеске едва заметные тени. Именно так, благодаря подобию между земным затмением и движением далёких миров, люди однажды узнали, что Венера, медленно и неумолимо, проходит по диску Солнца, оставляя крошечную, но неоспоримую отметину на его сияющем лице.

Такое зрелище — редкость, случаящаяся дважды за столетие с интервалом в восемь лет, прежде чем на долгие сто с лишним лет Венера вновь исчезает с этого пути. Великие умы прошлого знали цену этим мгновениям. В 1761 году, когда учёные разных стран

готовились к наблюдению транзита, корабли отправлялись в дальние плавания, чтобы зафиксировать точные моменты начала и конца прохождения планеты. Среди них был знаменитый Джеймс Кук, чей маршрут пролегал к далёкому острову Таити, где в тропической тишине он вместе со своей командой всматривался в небосвод, ловя мгновения, которые могли помочь разгадать истинные размеры Солнечной системы.

Наблюдатели следили за Венерой, будто за маленьким чёрным жемчужным зерном, медленно скользящим по огненному диску. Малейшее отклонение, незначительная ошибка могли привести к потере драгоценной информации, и потому каждая секунда была бесценна. Те, кто вглядывался в Солнце через затемнённые стёкла, знали: перед ними не просто небесное явление, но ключ к пониманию Вселенной.

Транзит Венеры, подобно солнечному затмению, заставляет ощутить, насколько хрупки границы времени. Он напоминает о том, что миры движутся в согласии с точными законами, но дают возможность лишь на краткий миг увидеть их взаимодействие. И этот миг — дар, ради которого люди преодолевали океаны, ждали десятилетиями и устремляли взгляд в небо, словно в поисках ответа, спрятанного за светом звезды.

Солнечное затмение — это явление, при котором Луна оказывается между Землёй и Солнцем, на некоторое время полностью или частично закрывая солнечный диск. В моменты полного затмения дневное небо темнеет, звёзды становятся видимыми, а вокруг тёмного силуэта Луны простирает сияющая корона — внешняя атмосфера Солнца, обычно скрытая ослепительным светом звезды. Это редкое зрелище подчиняется

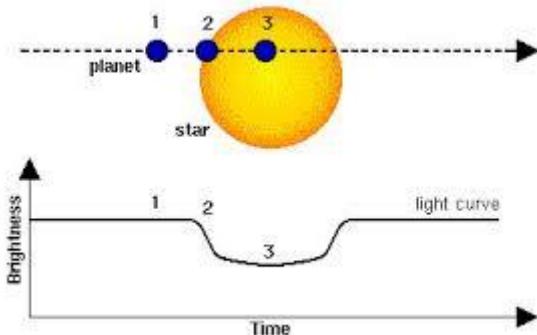
строгим законам небесной механики: поскольку орбита Луны слегка наклонена относительно эклиптики, затмения происходят не при каждом новолунии, а лишь тогда, когда три тела выстраиваются в одну линию.

Подобное явление в масштабах Вселенной является частным случаем более общего астрономического принципа, который лежит в основе транзитного метода обнаружения экзопланет. Так же, как Луна при солнечном затмении блокирует часть света Солнца, далёкие планеты, проходя перед своими звёздами, вызывают кратковременное снижение их яркости. В отличие от затмения, когда диск Луны может полностью закрыть Солнце, экзопланеты, даже самые крупные, обычно затеняют лишь незначительную часть светила. Однако эти изменения достаточно заметны для чувствительных телескопов, фиксирующих малейшие колебания блеска звезды.

Подобно тому, как во время солнечного затмения можно наблюдать корону Солнца, анализируя её спектральный состав, транзитный метод позволяет изучать атмосферу далёких планет. Когда звёздный свет проходит сквозь газовую оболочку экзопланеты, он изменяет свой спектр, позволяя астрономам выявлять химические элементы, присутствующие в атмосфере. Этот принцип делает транзиты не только инструментом для поиска экзопланет, но и методом, с помощью которого можно оценить вероятность наличия на них условий, подходящих для жизни.

Таким образом, земные наблюдатели, затаив дыхание следящие за редкими солнечными затмениями, становятся свидетелями того же процесса, который в масштабах Галактики позволяет раскрывать тайны тысяч далёких миров. Законы света и тени,

проявляющиеся в небесных явлениях, связывают родную планету с бескрайними просторами космоса, где подобные затмения происходят постоянно, пусть и остаются незримыми для глаз, но не для внимательных инструментов науки.



Транзитный метод, основанный на наблюдении незначительного снижения яркости звезды в момент, когда перед её диском проходит планета, стал одним из наиболее эффективных способов поиска экзопланет. Когда небесное тело пересекает линию между звездой и наблюдателем, оно частично закрывает светило, вызывая небольшое, но регулярное падение его блеска. Такие изменения, будучи периодическими, позволяют не только подтвердить существование планеты, но и определить её размеры, астрономический период обращения, а также, при дополнительном спектральном анализе, получить сведения о составе её атмосферы. Благодаря высокой чувствительности современных телескопов, метод транзита стал самым продуктивным среди всех используемых способов обнаружения планет за пределами Солнечной системы. Космические обсерватории, такие как *Kepler* и *TESS*, непрерывно фиксируют мельчайшие отклонения в яркости тысяч звёзд, выявляя новые миры с невиданной ранее

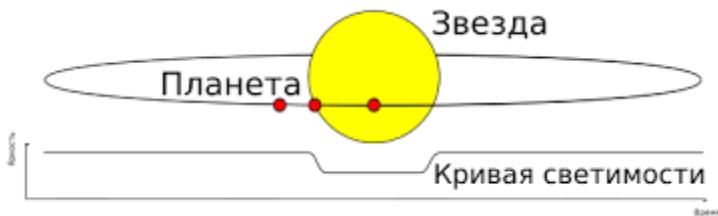
скоростью. Однако его эффективность ограничивается строгими геометрическими условиями: орбита планеты должна быть практически идеально выровнена с линией наблюдения. Даже незначительное отклонение делает невозможным фиксацию транзита, что означает, что значительная часть потенциальных экзопланет остаётся незамеченной.

Несмотря на это, метод транзитов остаётся незаменимым инструментом астрономии. Возможность определения радиуса планеты, её орбитальных характеристик и даже состава атмосферы делают его одним из ключевых в изучении далёких миров. Особенno ценной является возможность спектрального анализа, при котором свет звезды, проходя через атмосферу планеты, изменяется, позволяя выявить присутствие таких газов, как водяной пар, метан, углекислый газ и даже кислород. Эти данные не только уточняют физические свойства планеты, но и открывают путь к поиску потенциально обитаемых миров, где условия могли бы благоприятствовать возникновению жизни.

Было время, когда данные с телескопов выкладывали в открытый доступ, позволяя каждому, кто обладал терпением и внимательностью, стать первооткрывателем новых миров. Огромные массивы информации, полученные космическими обсерваториями вроде *Kepler*, лежали перед исследователями словно несметные сокровища, в которых скрывались далёкие планеты. Любой, кто умел анализировать графики изменения блеска звёзд, мог заметить крошечный провал в их свете — знак того, что

где-то там, за миллионами километров, планета пересекла диск своего солнца.

Но путь к открытию был нелёгким. Не всякое снижение яркости означало транзит. Звезды сами по себе непостоянны: они пульсируют, вспыхивают, их свет колеблется по множеству причин. Отличить настоящую экзопланету от шумов и естественных изменений звёздного блеска — задача сложная, требующая не только внимательности, но и глубокого понимания закономерностей небесных движений. Однако некоторым удавалось это сделать, даже если они не были профессиональными астрономами. Любители, волонтёры, простые энтузиасты, часами изучавшие графики, иногда первыми замечали крошечные колебания, указывающие на присутствие новой планеты.



Теперь, похоже, этот романтический период заканчивается. Искусственный интеллект с его алгоритмами машинного обучения справляется с этой задачей всё лучше и быстрее. Он не устает, не ошибается из-за невнимательности, не пропускает мельчайшие детали. Те закономерности, которые человеку приходилось выявлять вручную, он находит мгновенно, сравнивая тысячи световых кривых и мгновенно отбрасывая ложные срабатывания. Скоро, вероятно, он сможет обнаруживать не только сами транзиты, но и предсказывать их вероятность в тех

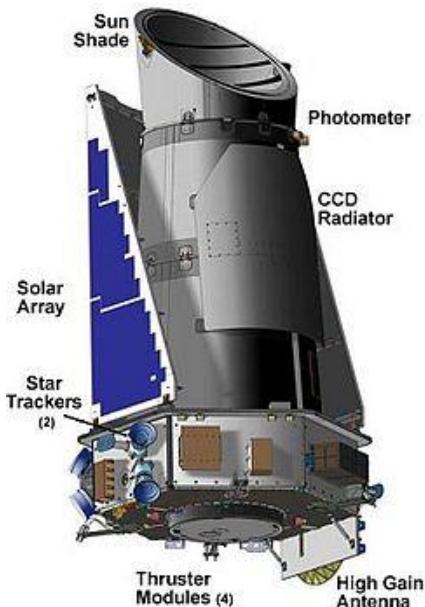
случаях, когда данные слишком шумные для традиционного анализа.

И всё же остаётся что-то чарующее в том времени, когда люди, вооружённые лишь своими глазами и пониманием, искали планеты среди миллионов звёзд. Возможно, они ошибались чаще, чем компьютерные алгоритмы, но каждое найденное ими небесное тело было не просто очередным статистическим результатом, а настоящей, живой победой человеческого разума и любопытства.

За последние десятилетия техника, используемая для поиска экзопланет, прошла путь от первых экспериментальных наземных телескопов до сложнейших космических обсерваторий, оснащённых чувствительными датчиками и искусственным интеллектом. Каждый новый инструмент открывал перед астрономами неизведанные горизонты, позволяя не только обнаруживать далёкие миры, но и исследовать их свойства, состав атмосфер и даже климатические особенности.

Одним из ключевых телескопов, сыгравших решающую роль в открытии тысяч экзопланет, стал *Kepler*. Запущенный в 2009 году, он более десяти лет наблюдал за одним небольшим участком неба в созвездиях Лебедя и Лиры, фиксируя крошечные изменения яркости тысяч звёзд. Именно он доказал, что планеты — не редкость, а скорее правило, и практически каждая звезда может иметь свою систему. Однако со временем у телескопа возникли проблемы с гироскопами, что не позволяло ему точно удерживать направление. Тогда миссию модифицировали, и под названием *K2* аппарат продолжил работать, изучая новые районы неба, хотя и с меньшей точностью.

Следом за ним в 2018 году отправился *TESS* (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), обладая более широким полем зрения и способностью сканировать почти весь небесный свод.



Космический Телескоп Кеплер

В отличие от *Kepler*, который концентрировался на одном небольшом участке, *TESS* исследует звёзды, находящиеся ближе к Земле, делая возможным дальнейшее детальное изучение открытых планет. Благодаря ему были найдены сотни кандидатов, некоторые из которых уже подтверждены как реальные экзопланеты.

Сейчас внимание приковано к следующему поколению обсерваторий. *James Webb Space Telescope*, хотя его основная цель — изучение ранней Вселенной, уже начал

анализ атмосфер экзопланет, исследуя их спектры в инфракрасном диапазоне. Ещё один проект будущего — *PLATO* (*PLAnetary Transits and Oscillations of stars*), запланированный Европейским космическим агентством. В отличие от предыдущих миссий, он будет искать не просто экзопланеты, но планеты земного типа в обитаемых зонах, ориентируясь на долгосрочные наблюдения.

Что касается районов неба, исследования распределялись неравномерно. *Kepler* наблюдал строго определённую область, тогда как *TESS* охватил почти всю небесную сферу, кроме самых полярных регионов. Будущие телескопы вроде *PLATO* будут сканировать более широкие области, но с прицелом на близкие к нам звезды, где можно будет более детально изучить планеты. В дальнейшем ожидается, что внимание сместится к звёздам типа красных карликов, у которых уже были найдены перспективные миры, такие как планеты системы TRAPPIST-1.

Таким образом, каждый новый этап наблюдений приносит всё более точные данные. Если раньше задача состояла в том, чтобы просто доказать существование экзопланет, то теперь речь идёт о поиске мест, где могут быть условия для жизни. И с каждым новым прибором этот поиск становится всё более осмысленным, приближая момент, когда среди звёзд найдётся мир, похожий на наш.

Когда обнаруживается потенциальная экзопланета с помощью транзитного метода, одного снижения яркости звезды недостаточно для уверенности в её существовании. Чтобы исключить ложные срабатывания, вызванные, например, звёздными пятнами, активностью светила или затмением двойной

системы, учёные используют другие методы наблюдений, направленные на подтверждение планеты и более детальное изучение её свойств.

Первым шагом обычно становится метод лучевых скоростей, или доплеровская спектроскопия. Если транзит позволяет определить размер планеты, то измеряя небольшие колебания звезды, вызванные гравитационным воздействием планеты, можно вычислить её массу. Совместив эти данные, получают плотность небесного тела, что даёт представление о его составе: является ли оно каменным, как Земля, или газовым, как Юпитер. Особенно важно это для малых планет, где транзитный сигнал может принадлежать как массивному каменному миру, так и лёгкой мини-Нептуну, окружённому плотной атмосферой.

После подтверждения существования планеты следующим этапом часто становится спектроскопический анализ её атмосферы. Когда планета проходит перед звездой, часть её света проходит через атмосферу планеты, оставляя в спектре характерные линии поглощения. Это позволяет определить, какие газы присутствуют в атмосфере — водяной пар, углекислый газ, метан и другие соединения, которые могут указывать на условия, потенциально пригодные для жизни. Такой метод особенно эффективно работает в инфракрасном диапазоне, где наблюдения проводит телескоп *James Webb*, уже подтвердивший состав атмосфер нескольких экзопланет.

Иногда, если планета достаточно массивная и удалена от своей звезды, астрономы используют метод прямого наблюдения. Это сложная техника, требующая мощных коронографов, чтобы блокировать яркий свет звезды и

разглядеть слабое отражение света от самой планеты. В таких случаях можно не только увидеть объект, но и изучить его спектр, температуру и даже движение облаков в атмосфере.

В редких случаях на помощь приходит метод астрометрии, фиксирующий микроскопические смещения звезды под воздействием планетарной гравитации. Хотя эта техника пока не слишком широко используется для экзопланет, в будущем ожидается её развитие, особенно с запуском новых сверхточных обсерваторий.

Наконец, если звезда расположена таким образом, что её можно наблюдать через микролинзирование, учёные проверяют, не было ли зафиксировано характерного увеличения её яркости при прохождении массивного объекта на фоне. Это помогает дополнительно подтвердить наличие планеты и уточнить её характеристики.

Обнаружение экзопланеты редко опирается на один единственный метод. Лишь сочетание нескольких техник позволяет не только подтвердить её существование, но и получить максимально полную картину — её размеры, массу, плотность, атмосферный состав и даже возможные климатические условия. Чем больше методов используется, тем точнее становится наше понимание далёких миров, что приближает человечество к разгадке вопроса: насколько уникальна Земля в бескрайней Вселенной?

ГЛАВА ШЕСТАЯ. ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПЛАНЕТ

В глубинах космоса, где свет далеких звезд затмевает любые иные объекты, задача выделения слабого свечения планеты становится настоящим вызовом для науки. Современные технологии, однако, позволяют преодолеть это препятствие, используя мощные телескопы, оснащенные системами подавления света звезды. Одним из ключевых инструментов для такого рода исследований является коронограф, способный блокировать ослепительное сияние светила, тем самым позволяя рассмотреть более тусклые объекты, находящиеся в его окрестностях.

Этот метод предоставляет возможность не просто обнаружить планету, но и проанализировать ее спектральные характеристики. Поглощение и излучение света атмосферой позволяют определить химический состав, выявляя присутствие таких газов, как кислород, метан или водяной пар. Эти данные, в свою очередь, становятся важными в поиске потенциально обитаемых миров. Однако данный подход обладает своими ограничениями. Он наиболее эффективен для массивных планет, удаленных на значительное расстояние от родительской звезды. Более компактные и тесно расположенные к светилу объекты остаются практически невидимыми из-за сложности их выделения на фоне яркого излучения.

Несмотря на эти трудности, технологии прямого наблюдения продолжают развиваться. Совершенствование оптических систем, внедрение адаптивной оптики и использование космических телескопов, свободных от атмосферных искажений,

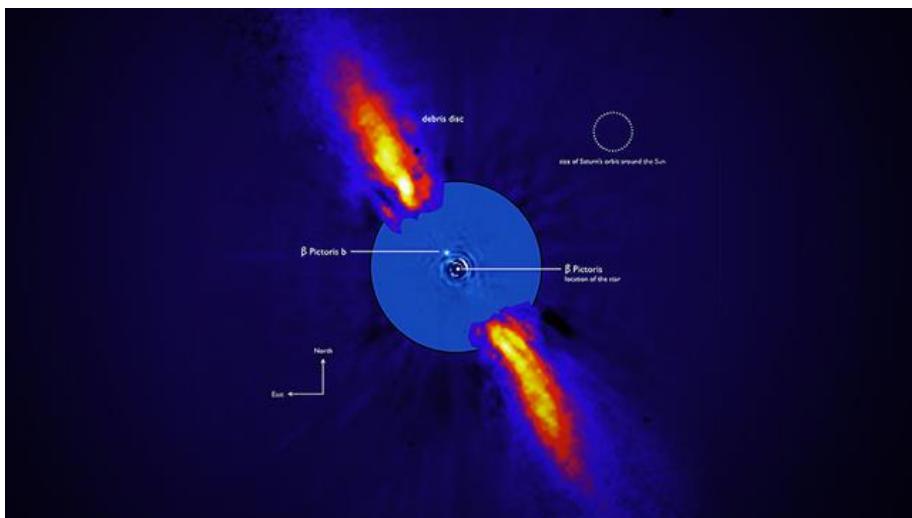
расширяют границы возможного. Уже сейчас ученые могут изучать отдельные экзопланеты, выявляя особенности их атмосферы и даже оценивая температурный режим поверхности. В перспективе развитие этих методов приведет к новым открытиям, позволяя заглянуть в неизведанные уголки Вселенной и, возможно, однажды обнаружить мир, напоминающий Землю.

Среди множества обнаруженных экзопланет лишь немногие удалось увидеть напрямую, поскольку методы прямого наблюдения требуют высокой чувствительности инструментов и применения технологий, позволяющих блокировать ослепительное сияние звезды. Однако прогресс в области астрономии позволил ученым зафиксировать несколько таких объектов, предоставляя бесценные данные о далеких мирах.

Одним из первых примеров стала система HR 8799, расположенная примерно в 129 световых годах от Земли в созвездии Пегаса. Используя телескопы, оснащенные адаптивной оптикой и коронографами, исследователи смогли различить сразу четыре массивных планеты, вращающихся вокруг этой молодой звезды. Эти газовые гиганты, напоминающие увеличенные версии Юпитера, оказались удалены от своей звезды на значительное расстояние, что сделало их удобными объектами для наблюдения. Благодаря спектральному анализу удалось определить состав их атмосфер, включающий водяной пар, метан и, возможно, облачные образования.

Другим ярким примером стал газовый гигант Beta Pictoris b, обращающийся вокруг звезды в созвездии Живописца на расстоянии около 63 световых лет. Этот

объект был обнаружен благодаря мощному телескопу VLT (Very Large Telescope) в Чили. Масса планеты примерно в 13 раз превышает юпитерианскую, а ее атмосфера демонстрирует следы сложных химических соединений. Дополнительные наблюдения позволили зафиксировать орбитальное движение планеты вокруг звезды, что сделало Beta Pictoris b одной из первых экзопланет, чье обращение удалось детально проследить.



Примером еще одного удачного прямого наблюдения стала система 51 Eridani, где был обнаружен газовый гигант 51 Eridani b. Эта планета отличается необычайно молодой возрастной характеристикой – ей всего около 20 миллионов лет, что позволило ученым изучить процессы формирования подобных объектов. Спектральные данные указали на высокое содержание метана в атмосфере, что делает ее похожей на ранний Юпитер в истории нашей Солнечной системы.

Несмотря на сложность прямого наблюдения экзопланет, развитие технологий, таких как телескоп «Джеймс Уэбб» и будущие миссии наподобие «LUVOIR» или «HabEx», позволит значительно расширить список подобных объектов. Улучшенные методы подавления света звезды и более чувствительные инструменты дадут возможность изучать не только гигантские газовые планеты, но и потенциально землеподобные миры, скрывающиеся в глубинах космоса.

Если бы астрономы из гипотетической обсерватории, расположенной в системе Альфы Центавра, попытались провести прямое наблюдение планет Солнечной системы, перед ними встали бы те же сложности, что и при изучении экзопланет с Земли. Расстояние между этими системами составляет около 4,37 светового года, что делает задачу сложной, но не невозможной при наличии достаточно мощных инструментов.

Юпитер и Сатурн, будучи самыми массивными планетами, имели бы наибольшие шансы быть замеченными. Они обладают значительными размерами и отражают достаточно солнечного света, чтобы их можно было выделить даже при сильном свечении звезды. Современные технологии уже позволяют обнаруживать аналогичные объекты на расстояниях в десятки и сотни световых лет, поэтому для гипотетических наблюдателей из Альфы Центавра они стали бы наиболее доступными целями.

Нептун и Уран также могли бы быть различимы, но с большим трудом, поскольку их меньшие размеры и более тусклое свечение усложнили бы задачу. Однако анализ их спектров был бы возможен, позволив

определить состав атмосфер, включая метановые облака, придающие им характерный голубоватый оттенок.

Земля и Венера представили бы наибольший интерес, особенно с точки зрения поиска обитаемых миров. Однако их близость к Солнцу сделала бы их труднодоступными для наблюдений. Свет звезды значительно превосходит их собственное отраженное излучение, и без мощных коронографов или технологий, позволяющих блокировать солнечное сияние, выделить их напрямую было бы крайне сложно. Тем не менее, при достаточном развитии инструментов можно было бы не только обнаружить Землю, но и провести спектральный анализ ее атмосферы, выявив наличие кислорода, озона и других следов жизни.

Меркурий, будучи слишком близко к Солнцу и относительно небольшим, скорее всего, остался бы незамеченным, а Марс, хоть и крупнее, все равно был бы чрезвычайно тусклым объектом. Его отражательная способность (альbedo) ниже, чем у Земли или Венеры, что дополнительно усложнило бы его обнаружение.

Итак, если бы в системе Альфы Центавра существовала цивилизация с уровнем технологий, сравнимым с современным земным или даже несколько более продвинутым, то прямое наблюдение Юпитера и Сатурна было бы вполне возможно. Для изучения Земли и других внутренних планет понадобились бы усовершенствованные телескопы, способные эффективно подавлять свет Солнца. Развитие таких технологий в будущем может позволить проводить аналогичные исследования и с Земли, открывая возможность для детального изучения потенциально обитаемых миров в ближайших звездных системах.

Перспективы значительного улучшения методов прямого наблюдения экзопланет связаны с развитием новых технологий подавления света звезд и совершенствованием телескопических систем. Современные наземные и космические обсерватории уже позволяют фиксировать отдельные массивные планеты, удаленные от своих звезд, но дальнейшие шаги в этом направлении могут привести к принципиальному скачку в возможностях изучения далеких миров.

Одним из наиболее перспективных направлений является совершенствование коронографов, устанавливаемых на телескопах. Эти устройства позволяют блокировать ослепительное свечение звезды, тем самым выделяя слабый свет планеты. Будущие миссии, такие как «HabEx» (Habitable Exoplanet Observatory) и «LUVOIR» (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor), предложат улучшенные коронографы, способные подавлять звездное излучение в миллиарды раз эффективнее, чем современные аналоги. Это позволит рассматривать даже небольшие планеты, расположенные в зоне обитаемости своих звезд.

Еще одним решением может стать использование звездоотсечных экранов (старшайперов) — автономных конструкций, находящихся в космосе отдельно от телескопа и блокирующих свет звезды до того, как он попадет в объектив. Проект «Starshade» представляет собой такую конструкцию в форме гигантского цветка с лепестками, предназначенного для рассеивания света, что обеспечит высокую контрастность изображения экзопланет. Если такая технология будет успешно реализована, ученые смогут получать детальные спектральные данные о атмосферах планет, выявляя

возможные биомаркеры, такие как кислород, метан и озон.

Дополнительные улучшения ожидаются благодаря развитию адаптивной оптики, которая компенсирует искажения, вызванные атмосферой Земли. Современные телескопы, такие как обсерватория «Extremely Large Telescope» (ELT), уже оснащены такими системами, позволяющими значительно повысить четкость изображений. В сочетании с крупными зеркалами диаметром в десятки метров это может существенно повысить способность выявлять даже небольшие планеты вокруг относительно близких звезд.

Космические телескопы следующего поколения, работающие в инфракрасном и оптическом диапазонах, смогут улавливать тепловое излучение планет и проводить более детальный анализ их поверхностных условий. «Джеймс Уэбб», несмотря на то что его основная задача связана с изучением далеких галактик, уже внес вклад в исследование экзопланетных атмосфер, обнаружив следы воды и других соединений. Будущие миссии смогут продвинуться дальше, выявляя даже климатические особенности экзопланет.

Если объединить эти технологии, прямое наблюдение экзопланет может стать не просто способом обнаружения удаленных миров, но и методом их детального изучения. В обозримом будущем появится возможность не только рассмотреть газовые гиганты, но и исследовать потенциально обитаемые планеты, выявляя условия, способные поддерживать жизнь. Это станет важным шагом в поиске внеземных цивилизаций и расширении границ познания Вселенной.

Метод прямого наблюдения экзопланет в большинстве случаев действительно играет роль не основного, а дополнительного инструмента исследования, вступая в работу после того, как объект уже обнаружен другими способами. Первоначальное выявление планет чаше всего осуществляется транзитным методом или методом лучевых скоростей, поскольку они позволяют фиксировать наличие планеты даже без необходимости выделять ее свет среди сияния звезды. Однако прямое наблюдение становится незаменимым, когда речь заходит о детальном изучении уже найденных миров.

После выявления планеты посредством транзита, когда она проходит перед диском своей звезды и вызывает небольшое уменьшение ее яркости, или же методом Доплера, фиксирующим колебания светила под влиянием гравитации планеты, возникает вопрос: какие именно характеристики этот объект имеет? Здесь прямое наблюдение становится мощным инструментом, позволяя не только подтвердить существование планеты, но и проанализировать ее физические и химические свойства.

Наиболее важным аспектом такого исследования является возможность получения спектральных данных. Свет, отраженный или излученный планетой, несет информацию о составе ее атмосферы. Анализируя спектры поглощения, можно определить наличие таких соединений, как водяной пар, метан, углекислый газ, озон — веществ, которые могут указывать на климатические условия и даже потенциальную обитаемость планеты.

Кроме того, прямое наблюдение позволяет фиксировать изменения в яркости планеты с течением времени, что дает представление о ее погодных условиях. В случае

газовых гигантов можно выявить структуры облачного покрова, а для твердых планет — даже предположить наличие континентов и океанов, если технологии достигнут достаточного уровня развития.

Существуют и ограничения. Прямое наблюдение особенно эффективно для массивных планет, удаленных от своей звезды, в то время как небольшие миры, расположенные в зонах обитаемости, остаются трудными целями. Однако развитие телескопов следующего поколения, включая мощные орбитальные обсерватории с коронографами и звездоотсечными экранами, постепенно преодолевает эти барьеры.

Таким образом, прямое наблюдение не заменяет другие методы поиска экзопланет, но становится ключевым этапом их дальнейшего изучения. Благодаря ему открывается возможность не просто фиксировать далекие миры, но и заглядывать в их атмосферы, определяя условия, которые могут быть благоприятными для существования жизни. В перспективе это приведет к созданию детальных каталогов экзопланет, среди которых, возможно, однажды удастся найти настоящую вторую Землю.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ. ПУЛЬСАРЫ И МЕТОД ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК

Наблюдение за мерцающими маяками далёкого космоса давно стало важным инструментом для изучения Вселенной. Среди множества методов, позволяющих обнаруживать экзопланеты, особое место занимает анализ периодичности сигналов от пульсаров — плотных и быстро вращающихся нейтронных звёзд, испускающих узкие пучки излучения. Эти пульсары, подобно гигантским космическим часам, испускают радиосигналы с невероятной регулярностью. Однако малейшие возмущения в их движении вызывают отклонения в ожидаемых интервалах между импульсами, что позволяет судить о наличии невидимых спутников, обращающихся вокруг них.

Метод временных задержек, основанный на измерении изменений в периодах пульсаций, оказался исключительно точным инструментом, позволяющим выявлять даже небольшие планеты. Если массивное тело находится вблизи пульсара, его гравитационное влияние заставляет нейтронную звезду совершать крошечные колебания. Эти колебания, в свою очередь, изменяют время прихода радиосигналов, создавая эффект, который можно проанализировать с высокой степенью точности. Подобная методика уже позволила обнаружить первые в истории человечества подтверждённые экзопланеты, вращающиеся вокруг пульсара PSR B1257+12, что стало знаковым моментом в исследовании планетных систем за пределами Солнечной системы.

Однако, несмотря на свою уникальную точность, этот метод применим лишь в весьма ограниченном числе

случаев. Пульсары встречаются сравнительно редко, а системы, в которых вокруг них обращаются планеты, ещё более редки. Это делает саму возможность обнаружения таких объектов скорее исключением, чем правилом. Тем не менее, метод остаётся ценным инструментом в арсенале астрономов, поскольку позволяет изучать экзопланетные системы, формирующиеся в экстремальных условиях, и даёт важную информацию о процессах, происходящих после катастрофических событий, таких как вспышки сверхновых.

Нейтронные звёзды — одни из самых экзотических объектов во Вселенной, появляющиеся в результате коллапса массивных звёзд. Когда термоядерное горение внутри светила прекращается, а давление излучения уже не может противостоять гравитации, происходит катастрофическое сжатие звёздного ядра. Электроны и протоны при этом объединяются в нейтроны, а оставшаяся оболочка выбрасывается в космос взрывом сверхновой. В результате остаётся крайне плотное и компактное ядро — нейтронная звезда, состоящая преимущественно из нейtronов, удерживаемых вместе благодаря мощному гравитационному притяжению.

Размер нейтронной звезды весьма скромен — её диаметр составляет всего около 20 километров, однако масса при этом может достигать двух или более солнечных. Это делает вещество нейтронных звёзд одним из самых плотных во Вселенной. Один кубический сантиметр такой материи может весить сотни миллионов тонн, а гравитация на поверхности в миллионы раз превышает земную. Внутреннее строение

нейтронной звезды остаётся предметом активных исследований, но предполагается, что её кора состоит из плотных атомных ядер, а глубже располагается супержидкая нейтронная среда. В самом центре могут существовать ещё более экзотические состояния материи, такие как кварковая плазма, в которой нейтроны разрушаются на отдельные кварки.

Некоторые нейтронные звёзды обладают аномально мощными магнитными полями, превышающими земное в квадриллионы раз. Эти объекты называют магнитарами. Их магнитное поле столь интенсивно, что может приводить к сильнейшим всплескам излучения, разрывая собственную кору и выбрасывая колоссальные потоки энергии. Именно такие всплески, наблюдаемые в рентгеновском и гамма-диапазоне, делают магнитары одними из самых мощных источников энергии во Вселенной.

Помимо этого, некоторые нейтронные звёзды испускают узконаправленные потоки вещества и излучения — джеты. Они представляют собой струи плазмы, движущиеся с околосветовыми скоростями вдоль оси вращения звезды. Джеты могут возникать как у одиночных пульсаров, так и у нейтронных звёзд в двойных системах, где они активно аккрецируют вещество от компаньона. Эти потоки высокогенергетичных частиц способны достигать межгалактических масштабов и служат важным элементом в процессах переноса энергии и вещества в космическом пространстве.

Все эти особенности делают нейтронные звёзды объектами пристального изучения, поскольку они позволяют лучше понять поведение материи в экстремальных условиях, недоступных для исследования в земных лабораториях.

Возникновение планетных систем вокруг пульсаров представляется парадоксальным, поскольку сами пульсары являются остатками массивных звёзд, завершивших свой жизненный путь мощным взрывом сверхновой. Этот катастрофический процесс сопровождается колоссальным выбросом вещества и ударными волнами, которые должны бы уничтожить или разметать любую ранее существовавшую планетную систему. Однако, несмотря на разрушительный характер взрыва, известны случаи существования планетных объектов, обращающихся вокруг нейтронных звёзд, что позволяет выделить несколько возможных сценариев их происхождения.

Один из вариантов предполагает, что планеты могли существовать ещё до вспышки сверхновой, однако сумели пережить это событие. Для этого исходная звезда должна была терять массу постепенно, а взрыв – не быть слишком асимметричным, чтобы избежать разрушения всей системы. В таком случае внешние планеты, находившиеся достаточно далеко от звезды предшественницы, могли сохранить свои орбиты или быть лишь незначительно вытолкнутыми. Однако вероятность такого исхода крайне мала, поскольку ударная волна и мощный выброс вещества должны бы разрушить или выбросить большинство планет на расстояния, при которых их дальнейшее гравитационное связывание с пульсаром становилось невозможным.

Гораздо более вероятной представляется гипотеза вторичного формирования планет. В этом случае пылевая и газовая материя, оставшаяся после взрыва, может со временем осесть в диск вокруг пульсара, образуя аналог про-планетного диска, из которого затем формируются новые планеты. Такой процесс напоминает стандартное формирование планетных систем, но происходит уже в экстремальных условиях, среди остаточного вещества сверхновой. В пользу этой идеи говорят наблюдения некоторых пульсарных систем, в которых замечены остатки дисков из газа и пыли, способных стать основой для образования планет. Ещё одна возможность заключается в том, что планеты могли быть захвачены пульсаром после его образования. Если нейтронная звезда образуется в двойной системе и её компаньон теряет массу или разрушается, остающиеся фрагменты могут сформировать новую систему из планетоподобных тел. Кроме того, пульсар, проходя через область, насыщенную остатками звёздного вещества, мог гравитационно захватить блуждающие планеты или диски из пыли и газа, из которых затем сформировались спутники.

Так или иначе, обнаружение планет вокруг пульсаров остаётся одной из самых необычных загадок астрономии, свидетельствуя о том, что планетные системы могут возникать даже в самых экстремальных условиях.

Планеты, обращающиеся вокруг пульсаров, представляют собой одни из самых негостеприимных миров во Вселенной. Они находятся в экстремальных условиях, совершенно несовместимых с известными формами жизни. Главной проблемой является мощное

излучение, исходящее от пульсара. Нейтронные звёзды испускают интенсивные потоки рентгеновского и гамма-излучения, которые пронизывают окружающее пространство, разрушая молекулярные связи и уничтожая любые потенциальные биологические структуры. Даже если бы на такой планете когда-то существовала атмосфера, её быстро бы сдуло мощными потоками частиц, выбрасываемых пульсарным ветром. Кроме радиационного фона, ещё одной проблемой становится нестабильность самой орбитальной среды. Планеты вокруг пульсаров часто испытывают сильные приливные воздействия, а если их орбиты вытянуты, то условия на поверхности изменяются крайне хаотично. Возможны резкие температурные перепады, приводящие к испарению и последующему замерзанию возможных жидкостей. Кроме того, многие из таких планет, вероятно, являются каменистыми или даже обогащёнными тяжёлыми элементами, поскольку вещество, из которого они образуются, представляет собой переработанный материал от взрыва сверхновой. Если даже представить, что какая-то форма жизни смогла бы существовать в подповерхностных океанах, скрытых под толстой корой льда или камня, перед ней всталась бы ещё одна фундаментальная проблема — нехватка энергии. В отличие от планет, вращающихся вокруг обычных звёзд, пульсарные миры не получают стабильного потока тепла и света, который мог бы поддерживать биосферу. В таких условиях единственным возможным источником энергии могли бы быть радиоактивный распад внутри планеты или приливное разогревание за счёт гравитационного взаимодействия с пульсаром. Однако эти механизмы вряд ли могли бы обеспечить достаточное количество

энергии для поддержания сложных биохимических процессов.

Таким образом, перспективы жизни на таких планетах представляются крайне маловероятными. Они остаются интересными объектами для изучения с точки зрения планетарной эволюции, но вряд ли когда-либо смогут стать домом для живых существ, по крайней мере, в том виде, в каком их можно представить на основе известных научных данных.

Существование планетных систем вокруг чёрных дыр долгое время оставалось предметом теоретических рассуждений, поскольку экстремальные условия вблизи этих объектов казались несовместимыми с формированием и стабильным существованием планет. Однако современные исследования показывают, что такие миры вполне могут существовать, хотя и в необычных формах, существенно отличающихся от планетных систем вокруг обычных звёзд.

Один из возможных сценариев предполагает, что планеты могли сохраниться после образования чёрной дыры, если она возникла в результате коллапса массивной звезды, а окружающие объекты пережили катастрофическое событие. В этом случае планеты, находившиеся на достаточно удалённых орbitах, могли избежать разрушения взрывом сверхновой и продолжить движение вокруг нового компактного объекта. Их орбиты, вероятно, испытали бы определённые возмущения из-за резкого изменения массы центрального тела, но при благоприятных условиях такие системы могли бы сохраняться на протяжении миллиардов лет.

Другой сценарий предполагает, что планеты могут образоваться уже после формирования чёрной дыры, если вокруг неё существует аккреционный диск — мощное скопление газа и пыли, вращающееся вокруг чёрной дыры. Если вещество в таком диске достаточно плотное и остаётся стабильным в течение длительного времени, из него могут формироваться планетоподобные тела, напоминающие процесс формирования планетных систем вокруг обычных звёзд. Однако условия в таком диске будут экстремальными: высокие температуры, мощное излучение и приливные силы сделают существование планет крайне специфическим.

Возможен также вариант, при котором чёрная дыра захватывает свободно блуждающие планеты, ранее выброшенные из своих систем. В этом случае они могут сформировать устойчивые орбиты вокруг чёрной дыры, особенно если она находится в двойной системе или окружена массивным скоплением звёзд. Такие планеты, вероятно, будут находиться на достаточно больших расстояниях, чтобы избежать разрушительного приливного воздействия гравитации чёрной дыры.

Что касается условий на таких планетах, они зависят от наличия источника энергии. Если чёрная дыра активно аккрецирует вещество, её окрестности могут быть насыщены рентгеновским и гамма-излучением, которое может нагревать атмосферу планет и создавать условия, отличающиеся от типичных холодных и тёплых миров. В отсутствие аккреционного диска планеты окажутся в полной темноте, и единственным возможным источником тепла останется внутренний разогрев за счёт радиоактивного распада или приливных эффектов.

Хотя такие планеты пока не обнаружены, их существование не противоречит современной астрофизике, а перспективы их поиска в будущем зависят от развития наблюдательных технологий.

Для исследования пульсаров методом временных задержек используется радиоастрономическое оборудование, предназначенное для регистрации регулярных радиосигналов, испускаемых этими нейтронными звёздами. Главным инструментом в таких наблюдениях являются радиотелескопы, обладающие высокой чувствительностью и точностью измерений времени прихода импульсов.

Современные радиотелескопы, такие как обсерватория Аресибо (до её разрушения), телескопы сети Very Large Array (VLA), а также обсерватории Parkes и FAST, играют ключевую роль в мониторинге пульсаров. Эти инструменты позволяют фиксировать слабые сигналы, поступающие с космических расстояний, и измерять малейшие отклонения в их периодичности. Важную роль также играет система обсерваторий, работающих в синхронном режиме, таких как Европейская сеть радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (EVN) и американская VLBA (Very Long Baseline Array), объединяющие несколько телескопов для достижения предельной точности.

Процесс обнаружения экзопланет методом временных задержек заключается в тщательном анализе регулярных пульсаций, испускаемых нейтронной звездой. Поскольку пульсары обладают стабильным ритмом излучения, любые отклонения от ожидаемого времени прихода импульсов могут свидетельствовать о наличии гравитационного воздействия со стороны орбитального

спутника. Если пульсар колеблется под влиянием массивного тела, сигналы приходят с небольшими изменениями фазы, что можно зарегистрировать и интерпретировать как присутствие планеты.

Перспективы этого метода весьма интересны, несмотря на ограниченное количество доступных объектов для исследования. Высокая точность метода временных задержек позволяет обнаруживать даже небольшие планеты, включая объекты, сравнимые по массе с Землёй. Поскольку пульсарные планеты формируются в экстремальных условиях, их изучение может дать уникальную информацию о механизмах образования планетных систем после взрывов сверхновых и о возможных сценариях их эволюции.

Будущее этого метода связано с развитием новых радиотелескопов, таких как Square Kilometre Array (SKA), который будет обладать ещё большей чувствительностью и позволять исследовать пульсарные системы с беспрецедентной точностью. Кроме того, улучшение методов обработки данных и повышение вычислительных мощностей открывают новые возможности для поиска экзопланет даже в сложных и малодоступных системах.

Глава восьмая. Фазовые изменения и отражение света планетами

При наблюдении за далекими мирами особое значение приобретает измерение яркости звезды и отраженного планетой света в момент, когда она достигает максимального удаления от своего светила. Эти фазовые изменения позволяют не только уточнить орбитальные характеристики экзопланеты, но и пролить свет на свойства ее атмосферы и поверхности. Когда планета проходит через такие фазы, количество отраженного ею излучения меняется, что позволяет судить о степени ее отражательной способности — альбедо, а также о наличии и составе возможных облачных структур.

Изучение этих характеристик дает ключ к пониманию химического состава атмосферы, если таковая присутствует. Различные молекулы поглощают и переизлучают свет в разных спектральных диапазонах, создавая характерные спектральные линии, которые можно выделить даже на фоне яркости центральной звезды. Особенно важным оказывается наблюдение в инфракрасном диапазоне, где тепловое излучение позволяет различить различия температур между дневной и ночной сторонами планеты, если она находится в приливном захвате.

Однако такие методы не универсальны и накладывают серьезные ограничения на выбор исследуемых систем. Дело в том, что измерение столь малых изменений яркости требует высокой чувствительности приборов, а потому применимо лишь к сравнительно ярким звездам. В тусклых системах отраженный свет слишком слаб, чтобы его можно было надежно зафиксировать и

проанализировать. Кроме того, важным фактором остается точность измерений: даже при наличии мощных телескопов необходимо учитывать возможные источники шумов и погрешностей, мешающих точному определению характеристик отраженного излучения. Несмотря на эти трудности, данный метод остается одним из наиболее перспективных для изучения экзопланетных атмосфер. В сочетании с другими наблюдательными техниками, такими как транзитный и спектроскопический анализ, он позволяет реконструировать картину мира, находящегося на расстоянии многих световых лет.

За последние годы астрономы добились значительных успехов в изучении экзопланет с помощью метода измерения фазовых изменений их яркости. Один из наиболее ярких примеров – исследование планеты Kepler-7b, горячего газового гиганта, находящегося на небольшом расстоянии от своей звезды. Анализ распределения отраженного света позволил установить, что на ее дневной стороне присутствуют облака, преимущественно концентрирующиеся в одной полусфере. Такое наблюдение стало первым случаем картирования облачного покрова экзопланеты, что раньше считалось практически невозможным.

Еще один значительный прорыв был достигнут в изучении системы HD 189733b. Этот горячий юпитер, вращающийся вокруг звезды в созвездии Лисички, стал одной из первых экзопланет, для которой удалось измерить фазовые кривые в инфракрасном диапазоне. Изучение изменений яркости показало, что ночная сторона планеты значительно холоднее дневной, а само тепловое излучение распределяется неравномерно из-за

мощных ветров, переносящих энергию по атмосфере. Наблюдения, проведенные с помощью космического телескопа *Spitzer*, также позволили выявить признаки силикатных частиц в верхних слоях атмосферы, что свидетельствует о наличии высокотемпературных облаков.

Особое внимание привлекли исследования планеты WASP-43b, еще одного горячего Юпитера, который оказался крайне интересным объектом для изучения фазовых изменений. Детальный анализ теплового излучения показал, что на этой планете отсутствует значительный перенос тепла между дневной и ночной сторонами, что позволило уточнить модели атмосферной динамики подобных миров. Эти данные стали важными для понимания того, как ведут себя газовые гиганты, находящиеся в экстремальных условиях.

Кроме того, наблюдения экзопланеты LTT 9779b с помощью телескопа *CHEOPS* позволили получить одну из самых детализированных фазовых кривых среди всех известных планет. Этот объект оказался особенным – несмотря на близость к своей звезде, он обладает высокой отражательной способностью, что говорит о возможном существовании облачного слоя, способного отражать значительную часть падающего на него света. Эти данные стали важным подтверждением теоретических моделей формирования облаков на сверхгорячих планетах.

Каждое из этих открытий стало шагом вперед в понимании природы экзопланет, расширяя представления о физических процессах, происходящих в их атмосферах. С каждым новым поколением телескопов астрономам удается получать все более

детальные данные, приближая момент, когда станет возможным не только определение состава атмосферы далеких миров, но и поиск потенциальных признаков жизни за пределами Солнечной системы.

Фазовые кривые представляют собой графики, отражающие изменения яркости экзопланеты в зависимости от ее положения на орбите вокруг звезды. Эти изменения происходят из-за того, что разная доля освещенной поверхности планеты становится видимой с Земли по мере ее движения. Аналогичный эффект можно наблюдать на примере Луны, чьи фазы изменяются от новолуния до полнолуния. Однако в случае экзопланет измерения гораздо сложнее, поскольку их свет крайне слаб по сравнению с яркостью звезды.

Для регистрации фазовых кривых используются мощные космические и наземные телескопы, оснащенные высокочувствительными приборами, способными улавливать крохотные изменения в общей светимости системы. Среди наиболее значимых инструментов можно выделить космический телескоп *Spitzer*, который специализировался на инфракрасных наблюдениях и позволял измерять тепловое излучение экзопланет. Телескоп *Hubble* также вносит вклад в эту область, предоставляя данные в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Современные миссии, такие как *CHEOPS*, *TESS* и *JWST*, продолжают исследования, уточняя фазовые кривые с беспрецедентной точностью. Процесс интерпретации фазовых кривых начинается с анализа изменений яркости системы на протяжении полного оборота планеты. Если планета имеет значительное альбедо, то ее фаза будет ярче в момент

максимального удаления от звезды. Если же доминирует тепловое излучение, особенно в инфракрасном диапазоне, можно определить температурные различия между дневной иочной сторонами, а также характер атмосферной циркуляции.

Один из ключевых аспектов анализа фазовых кривых — изучение смещения максимума излучения относительно ожидаемого положения полной фазы. В идеальном случае пик яркости должен совпадать с моментом, когда планета полностью освещена, но если атмосфера переносит тепло на ночную сторону, этот максимум может быть смещен. Такие наблюдения помогают оценивать силу ветров в атмосфере и эффективность перераспределения тепла.

Благодаря анализу фазовых кривых удалось выявить облачные структуры на некоторых экзопланетах, уточнить их альбедо, определить температурные профили и даже сделать выводы о возможных химических соединениях, поглощающих или отражающих свет. Эти данные играют важную роль в моделировании экзопланетных атмосфер и позволяют сделать шаг вперед в изучении миров за пределами Солнечной системы.

Совершенствование метода фазовых кривых зависит от нескольких ключевых направлений: увеличения чувствительности инструментов, расширения наблюдательных диапазонов и более точного моделирования физических процессов, происходящих в атмосферах экзопланет. Современные телескопы уже позволяют регистрировать изменения яркости на уровне тысячных долей процента, но дальнейший прогресс

возможен за счет развития технологий детекторов и методов обработки данных.

Одним из перспективных путей является использование более мощных космических обсерваторий, таких как *James Webb Space Telescope (JWST)*. Его инфракрасные инструменты способны детально анализировать тепловое излучение экзопланет, что особенно важно для изучения энергетического баланса их атмосфер. В будущем планируются миссии, такие как *Nancy Grace Roman Space Telescope*, которые будут обладать высокой чувствительностью к малым колебаниям яркости и позволяют анализировать фазовые изменения с еще большей точностью.

Дополнительные возможности открывает развитие наземных телескопов нового поколения, таких как *Extremely Large Telescope (ELT)* и *Thirty Meter Telescope (TMT)*. Их огромные зеркала позволяют собирать больше света, а передовые адаптивные оптические системы снижают влияние земной атмосферы. Это дает возможность изучать фазовые кривые даже для менее ярких планетных систем, что раньше было практически невозможно.

Другим важным направлением является совершенствование вычислительных моделей, которые позволяют интерпретировать полученные данные. Современные климатические симуляции экзопланетных атмосфер все еще ограничены допущениями, но с развитием вычислительной техники и увеличением объема наблюдательных данных они становятся все точнее. Комбинирование фазовых кривых с другими методами, такими как спектроскопия и поляриметрия, позволит не только определять альбедо и температуру экзопланет, но и делать выводы о составе их атмосфер,

наличии облаков и даже возможных признаках геологической активности.

Перспективы данного метода напрямую связаны с поиском потенциально обитаемых миров. Если удастся с высокой точностью измерять фазовые кривые землеподобных планет в зонах обитаемости, это поможет выявлять характеристики, указывающие на возможность наличия жидкой воды или даже биомаркеров. В сочетании с будущими миссиями, такими как *LUVOIR* или *HabEx*, фазовые кривые могут стать инструментом не только для изучения газовых гигантов, но и для поиска признаков жизни за пределами Солнечной системы.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. МЕТОД ТАЙМИНГА

Метод тайминга представляет собой один из способов исследования космических объектов, основываясь на точном измерении временных отклонений в их движении. Этот подход особенно полезен при изучении двойных звездных систем, планетарных систем и пульсаров, где даже незначительные изменения в периоде обращения могут свидетельствовать о наличии скрытых масс или внешних воздействий.

Применяя данный метод, удается с высокой точностью определять не только параметры орбит, но и массу невидимых объектов, взаимодействующих с наблюдаемым телом. Так, если один из компонентов системы обладает значительной массой, его гравитационное воздействие неизменно сказывается на движении другого объекта, вызывая периодические отклонения в расчетном времени его появления в заданной точке. Подобные временные сдвиги позволяют делать выводы о характере взаимодействий внутри системы, а также выявлять присутствие экзопланет, невидимых спутников или даже гипотетических темных тел.

Несмотря на высокую точность метода, его возможности ограничены. Он наиболее эффективен в системах, где гравитационные взаимодействия проявляются достаточно явно, но теряет свою точность при отсутствии значительных возмущений. Это означает, что для одиночных звезд или систем, где дополнительные тела оказывают незначительное влияние, метод тайминга не дает надежных результатов.

Тем не менее, в случаях, когда динамика движения объекта подвержена регулярным колебаниям, этот метод остается одним из наиболее ценных инструментов для астрономических исследований.

Одним из наиболее известных примеров успешного применения метода тайминга стало открытие экзопланет у пульсара PSR B1257+12. Этот пульсар, расположенный на расстоянии около 2300 световых лет в созвездии Девы, представляет собой нейтронную звезду, вращающуюся с высокой скоростью и испускающую регулярные радиосигналы. Благодаря чрезвычайной точности этих импульсов астрономы смогли зафиксировать малейшие отклонения в их поступлении, что позволило сделать вывод о наличии невидимых объектов, оказывающих гравитационное влияние на пульсар.

Наблюдения, проведенные в начале 1990-х годов, показали, что интервалы между импульсами пульсара меняются по предсказуемому закону, что невозможно объяснить внутренними процессами самой нейтронной звезды. Подобные колебания могли быть вызваны лишь присутствием планет, орбиты которых вносили небольшие, но регулярные изменения в движение пульсара. В результате тщательного анализа ученые смогли определить, что вокруг PSR B1257+12 вращаются как минимум три планеты с массами, сопоставимыми с земной. Это открытие стало первым подтвержденным случаем обнаружения экзопланет за пределами Солнечной системы, а сам метод тайминга продемонстрировал свою исключительную точность и эффективность в выявлении небесных тел, недоступных для наблюдений другими методами.

Такой подход особенно полезен в системах, где традиционные методы, основанные на спектральных наблюдениях или транзитных измерениях, неприменимы. В случае пульсаров регулярность их радиоизлучения служит идеальным инструментом для детектирования малейших возмущений, вызванных гравитационным влиянием спутниковых объектов. Именно благодаря этому удалось не только обнаружить первые экзопланеты, но и определить их массу, орбитальные параметры и даже предположить их состав.

Метод тайминга пульсаров, примененный для обнаружения планет у PSR B1257+12, основан на точном измерении временных отклонений регулярных импульсов, вызванных гравитационным влиянием невидимых спутниковых объектов. Однако существует другой метод, связанный с пульсарами, – метод тайминга задержки Шапиро, который также использует точное измерение времени прихода импульсов, но с иной целью и механизмом работы.

Если классический метод тайминга позволяет выявлять объекты, гравитация которых изменяет движение пульсара в пространстве, то метод Шапиро применяется для определения массы объектов, взаимодействующих с ним. Когда пульсар и его компаньон образуют двойную систему, гравитационное поле второго тела искривляет пространство-время, вызывая дополнительную задержку в поступлении радиосигналов, проходящих через эту область. Измеряя величину этой задержки в разные моменты орбитального движения, астрономы могут точно определить массу компаньона.

Примером успешного использования метода Шапиро стало исследование системы PSR J0737–3039 – двойного пульсара, где оба объекта представляют собой нейтронные звезды. Наблюдая за изменениями времени прихода импульсов от одной звезды, проходящих через гравитационное поле другой, удалось получить независимые измерения их масс с исключительной точностью. Этот метод стал важным инструментом для проверки общей теории относительности, поскольку эффект Шапиро предсказывается уравнениями Эйнштейна и наблюдается в строгом соответствии с расчетами.

Таким образом, метод тайминга пульсаров в его классическом варианте используется для обнаружения экзопланет или невидимых спутниковых объектов, влияющих на движение источника излучения, тогда как метод задержки Шапиро применяется для точного измерения массы компаньонов в двойных системах. Оба подхода основаны на высокой точности регистрации времени прихода импульсов, но различаются механизмами интерпретации наблюдаемых эффектов и типами изучаемых объектов.

Метод временных задержек (также известный как **пульсарный тайминг**) действительно связан с методом тайминга пульсаров, но его точное определение может включать несколько различных эффектов. В зависимости от конкретного механизма изменения времени прихода импульсов, различают несколько его разновидностей.

Если говорить о **классическом методе тайминга пульсаров**, то он основан на измерении изменений в орбитальном движении самого пульсара под влиянием

других тел, например, экзопланет или звездных компаний. Эти изменения проявляются как отклонения в ожидаемом времени прихода радиосигналов, поскольку движение пульсара меняет его положение относительно Земли.

Метод задержки Шапиро, который также относится к таймингу, связан с эффектом гравитационного замедления времени, предсказанным общей теорией относительности. Когда радиосигналы проходят через гравитационное поле массивного тела (например, звезды-компаньона в двойной системе), они испытывают дополнительную временную задержку. Этот метод позволяет определять массы объектов, поскольку величина задержки зависит от кривизны пространства-времени, создаваемой массивным телом.

Еще один вариант – **метод вращательной временной задержки**, который учитывает изменения в собственной скорости вращения пульсара. Если нейтронная звезда испытывает влияние внешних факторов, например, акреции вещества или внутренних перераспределений массы, её вращение может замедляться или ускоряться, что также приведет к небольшим смещениям в регулярности импульсов.

Таким образом, метод временных задержек (пульсарный тайминг) включает в себя несколько механизмов: классические вариации, вызванные орбитальными изменениями, гравитационную задержку Шапиро, а также задержки, связанные с вращательной динамикой самого пульсара. В каждом конкретном случае ключевым фактором остается точнейшее измерение времени прихода импульсов, но интерпретация результатов зависит от природы наблюдаемых отклонений.

Замедление времени – это явление, предсказанное теорией относительности Альберта Эйнштейна, при котором ход времени изменяется в зависимости от скорости движения объекта или силы гравитационного поля, в котором он находится. Это явление проявляется в двух формах: **релятивистское замедление времени**, вызванное высокой скоростью движения, и **гравитационное замедление времени**, связанное с искривлением пространства-времени массивными объектами.

Первый эффект, **релятивистское замедление времени**, описывается специальной теорией относительности. Согласно ей, чем быстрее движется объект относительно наблюдателя, тем медленнее для него идет время. Этот эффект становится значительным только при скоростях, близких к скорости света. Например, если космонавт путешествует на корабле с релятивистской скоростью, для него время течет медленнее, чем для людей, оставшихся на Земле. При возвращении он обнаружит, что на Земле прошло значительно больше времени, чем для него самого – это известный парадокс близнецов.

Второй эффект, **гравитационное замедление времени**, предсказан общей теорией относительности. Согласно ей, вблизи массивных объектов гравитационное поле искривляет пространство-время, заставляя время идти медленнее по сравнению с регионами, где гравитация слабее. Чем сильнее гравитация, тем больше это замедление. Например, если часы поместить вблизи поверхности нейтронной звезды, они будут идти медленнее, чем такие же часы, расположенные вдали от неё. Этот эффект был подтвержден рядом

экспериментов, включая наблюдения за сигналами спутников GPS: поскольку они находятся выше земной поверхности, их часы идут чуть быстрее, чем на Земле, и эту разницу приходится учитывать при расчетах.

Гравитационное замедление времени играет ключевую роль в астрофизике. Вблизи горизонта событий черной дыры этот эффект становится бесконечно сильным – для внешнего наблюдателя объект, падающий в черную дыру, кажется «застывшим» на её горизонте, поскольку его время относительно удаленного наблюдателя останавливается. Этот феномен также важен для космологии и изучения экстремальных гравитационных объектов, таких как пульсары и двойные системы, где измерение временных задержек позволяет тестировать общую теорию относительности и выявлять скрытые массы.

Гравитационное замедление времени в двойной системе можно продемонстрировать на примере системы **PSR J0737–3039**, которая состоит из двух нейтронных звезд. Эта уникальная система представляет собой двойной пульсар, где обе звезды испускают регулярные радиосигналы, позволяя чрезвычайно точно отслеживать их движение и проверять предсказания общей теории относительности.

Когда один из пульсаров (назовем его А) проходит ближе к своему компаньону (пульсару В), его радиосигналы вынуждены проходить через более сильное гравитационное поле. Согласно общей теории относительности, вблизи массивного объекта пространство-время искривляется, и свет (или радиосигнал) замедляется, проходя через эту область. Это означает, что радиосигналы от пульсара А приходят

на Землю с небольшой, но измеримой задержкой в зависимости от его положения на орбите.

Этот эффект и называется **задержкой Шапиро**. В системе PSR J0737–3039 удалось зафиксировать именно этот феномен: когда один пульсар проходит за другим с точки зрения земного наблюдателя, его сигналы задерживаются из-за гравитационного замедления времени, вызванного полем его компаньона. Анализируя эти временные задержки, астрономы смогли не только подтвердить предсказания общей теории относительности, но и точно измерить массы обоих объектов.

Кроме того, поскольку пульсары движутся по эллиптическим орбитам, скорость их перемещения также меняется, а значит, и их собственное время течет по-разному в зависимости от их положения в гравитационном поле системы. Это явление известно как **релятивистское замедление времени**, и оно также наблюдается в этой системе. Когда пульсар находится ближе к своему компаньону и движется быстрее, его внутренние процессы (включая вращение) протекают медленнее с точки зрения внешнего наблюдателя.

Таким образом, двойной пульсар PSR J0737–3039 является естественной лабораторией для изучения замедления времени. Этот эффект позволяет проверять фундаментальные принципы физики, измерять массы нейтронных звезд и уточнять модели гравитационного взаимодействия в экстремальных условиях.

Гравитационное замедление времени и метод тайминга пульсаров играют ключевую роль в поиске экзопланет, особенно тех, которые обращаются вокруг пульсаров. В этом процессе используется сверхточное измерение

времени прихода импульсов, позволяющее выявлять малейшие отклонения, вызванные гравитационным воздействием невидимых объектов, в том числе планет. Когда у пульсара есть массивный компаньон (звезда или нейтронная звезда), его гравитационное поле влияет на распространение радиосигналов, вызывая **задержку Шапиро** – дополнительное запаздывание импульсов из-за гравитационного искривления пространства-времени. Если в системе присутствует планета, она тоже вносит небольшие, но измеримые изменения в движение пульсара, что приводит к вариациям в времени прихода импульсов. Эти вариации позволяют определить не только наличие планеты, но и её массу и параметры орбиты.

Ярким примером такого метода стало открытие планет у пульсара **PSR B1257+12**. Исследуя его радиосигналы, астрономы заметили периодические отклонения в их времени прихода. Эти вариации нельзя было объяснить внутренними процессами самого пульсара или его возможным компаньоном. Однако они соответствовали модели гравитационного воздействия нескольких небольших объектов – планет, обращающихся вокруг пульсара. Более того, с помощью этих данных удалось не только подтвердить их существование, но и рассчитать их массы, орбиты и даже предположить состав.

Дополнительное подтверждение существования планет может давать эффект **релятивистского замедления времени**. Если пульсар движется в системе с планетами, его скорость изменяется из-за гравитационного притяжения этих объектов. Приближаясь к массивному телу, пульсар разгоняется, а при удалении замедляется. Эти изменения скорости приводят к релятивистским

эффектам, влияющим на его внутренние процессы, включая вращение и испускание импульсов. В результате астрономы могут наблюдать изменения в частоте сигналов, которые дают дополнительную информацию о присутствии невидимых объектов.

Таким образом, гравитационное замедление времени в сочетании с методом тайминга позволяет не только обнаруживать экзопланеты, но и изучать их характеристики с высокой точностью. Этот метод особенно эффективен в системах, где традиционные способы поиска, такие как транзитный метод или метод радиальных скоростей, неприменимы из-за природы источника излучения.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ. СЕКУЛЯРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТ

Долговременные изменения орбитальных параметров в многопланетных системах представляют собой сложный процесс, обусловленный гравитационными взаимодействиями между телами. Незначительные на первый взгляд возмущения, вызванные присутствием экзопланеты, способны на протяжении миллионов или даже миллиардов лет накапливаться, приводя к значительным преобразованиям в структуре системы. Динамическая эволюция орбит под воздействием таких факторов изучается методами численного моделирования и аналитического анализа, позволяя предсказывать будущие конфигурации планет и оценивать их устойчивость.

Влияние экзопланеты на орбиты других тел проявляется в различных аспектах: изменения формы орбит, прецессия перицентров, дрейф долготы восходящего узла, а также резонансные эффекты, способные значительно усилить или, наоборот, стабилизировать эволюцию системы. В случаях, когда планетная система включает несколько массивных объектов, взаимодействие между ними приводит к сложной картине секулярных изменений, в которой периоды обращения оказываются связанными целочисленными отношениями, что приводит к эффектам орбитального резонанса.

При рассмотрении долговременной динамики орбит необходимо учитывать влияние приливных эффектов, релятивистских поправок, а также возможного воздействия внешних звездных объектов, проходящих вблизи системы. Эти факторы могут оказывать

значительное влияние на орбитальную архитектуру, вызывая как постепенные изменения, так и резкие перестройки конфигурации системы. В частности, в многопланетных системах с тесным расположением тел даже небольшие изменения параметров могут накапливаться, приводя к хаотической эволюции, в результате чего одна или несколько планет могут быть выброшены из системы.

Для изучения подобных процессов применяются методы секулярной теории возмущений, позволяющие исследовать эволюцию орбитальных параметров на больших временных масштабах без учета краткосрочных вариаций. Такие методы основаны на усреднении движения планет за длительные промежутки времени, что позволяет выделить наиболее значимые долгосрочные эффекты и предсказать характер их воздействия на структуру системы. Кроме того, численное моделирование орбитальных движений, выполняемое с высокой точностью, дает возможность учитывать нелинейные эффекты, возникающие при сложных взаимодействиях множества тел.

Важным аспектом анализа является исследование границ устойчивости системы. В некоторых случаях взаимодействие планет может приводить к возникновению устойчивых конфигураций, где небольшие возмущения не вызывают разрушения системы, а лишь приводят к циклическим изменениям орбитальных элементов. В других ситуациях, напротив, система оказывается вблизи границы хаотического поведения, где малейшее изменение параметров приводит к непредсказуемым последствиям, включая выброс планет из системы или их столкновение.

Изучение секулярных изменений орбит в многопланетных системах требует комплексного подхода, включающего аналитические методы, численное моделирование и учет множества дополнительных факторов, способных повлиять на динамику системы.

Одним из наиболее ярких примеров успешного применения анализа секулярных изменений орбит стало исследование динамической эволюции системы планет вокруг звезды HD 80606. Эта звезда, расположенная примерно в 190 световых годах от Земли, обладает одной из самых эксцентричных известных экзопланет — HD 80606b. Долгое время изучение этой системы вызывало интерес, поскольку параметры орбиты планеты свидетельствовали о мощных гравитационных взаимодействиях в прошлом, что требовало детального анализа её эволюции.

Благодаря методам секулярной теории возмущений и численного моделирования удалось восстановить вероятную историю формирования этой системы. Было показано, что высокая эксцентриситет орбиты HD 80606b может быть следствием так называемого эффекта Козай-Лидова, который возникает при наличии третьего массивного объекта, оказывающего периодическое влияние на орбиту планеты. В данном случае таким объектом выступает вторая компонента звезды HD 80606, являющаяся частью двойной системы с HD 80607. Численные модели показали, что в прошлом орбита планеты могла быть почти круговой, но под действием гравитационного воздействия удалённого компаньона её наклон и эксцентриситет изменялись в течение миллионов лет.

Этот результат подтвердил одну из гипотез формирования горячих Юпитеров — массивных экзопланет, находящихся на близких орбитах к своим звёздам. Согласно данной модели, первоначально такие планеты формируются на значительных расстояниях, но под влиянием резонансных или секулярных эффектов их орбиты со временем становятся высокоэксцентричными, а затем приливные взаимодействия постепенно переводят их на более тесные и округлённые орбиты. В случае HD 80606b этот процесс ещё не завершён, и её орбита остаётся сильно вытянутой, что делает эту систему уникальной для изучения динамической эволюции экзопланет.

Подобные методы анализа успешно применялись и в других случаях, включая изучение планетной системы вокруг звезды Kepler-56, где было выявлено значительное наклонение орбит двух экзопланет, вызванное воздействием удалённого третьего тела. Секулярные возмущения позволили объяснить необычное поведение планет в этой системе и спрогнозировать дальнейшую эволюцию их орбит.

Таким образом, анализ секулярных изменений орбит не только помогает понять динамику конкретных систем, но и играет ключевую роль в исследовании механизмов формирования и эволюции планетных систем в целом.

В данном контексте термин **"секулярный"** (от латинского «век», «эпоха») означает **долговременный, постепенный, накапливающийся со временем**. В астрономии и небесной механике он применяется для описания изменений орбитальных параметров, которые происходят на очень больших временных масштабах — от тысяч до миллионов и миллиардов лет.

Секулярные изменения отличаются от кратковременных вариаций, вызванных, например, периодическими гравитационными возмущениями со стороны других тел в системе. Если периодические изменения проявляются как регулярные колебания орбитальных элементов, то секулярные изменения представляют собой **монотонные или квазимонотонные** тенденции, которые со временем могут накапливаться и приводить к значительным перестройкам орбитальной архитектуры системы.

Примеры секулярных эффектов включают:

- **Медленное изменение эксцентриситета орбиты**, которое может быть вызвано взаимодействием с другими планетами или приливными силами.
- **Прецессия орбитальных элементов** (изменение долготы перигея, наклона орбиты), которая происходит под воздействием массивных соседних объектов.
- **Эффект Козаи-Лидова**, при котором наклон и эксцентриситет орбиты планеты изменяются в долгосрочной перспективе из-за гравитационного влияния далёкого третьего тела.

Таким образом, секулярные изменения представляют собой фундаментальные процессы, определяющие эволюцию планетных систем и их долгосрочную стабильность.

Наблюдение секулярных изменений орбит представляет собой сложную задачу, поскольку они происходят на протяжении тысяч, миллионов и даже миллиардов лет. Однако современные методы астрономических исследований позволяют фиксировать эти процессы несколькими способами.

Один из ключевых методов основан на **долговременных астрометрических измерениях**. Например, если экзопланета или звезда подвержена секулярным возмущениям, её положение и скорость будут меняться предсказуемым образом. Наблюдая такие объекты на протяжении десятилетий, можно выявить тенденции в изменении орбитальных элементов. Особенно эффективно это работает для близких звёздных систем, где современные телескопы, такие как *Gaia* Европейского космического агентства, могут фиксировать даже малые изменения в их движении.

Другой важный метод — **анализ изменений параметров орбит экзопланет**, обнаруженных с помощью транзитного метода или метода доплеровской спектроскопии. Например, если экзопланета проходит перед диском своей звезды, астрономы могут измерять изменения времени транзитов с высокой точностью. Если наблюдаются небольшие, но систематические отклонения от ожидаемых значений (эффект TTV — *Transit Timing Variations*), это может свидетельствовать о секулярных возмущениях, вызванных присутствием других планет или взаимодействиями внутри системы. Спектроскопические наблюдения дают ещё один инструмент — измеряя радиальные скорости звёзд с высокой точностью, можно обнаружить небольшие долгосрочные изменения в движении звезды, указывающие на медленное перераспределение масс и эволюцию орбит её планет. Например, в системе 55 Рака были зафиксированы признаки долгосрочных изменений в параметрах орбит её экзопланет, что стало одним из подтверждений наличия дополнительных тел в системе.

Кроме того, численное моделирование играет важную роль в предсказании и проверке секулярных эффектов. Современные компьютеры позволяют создавать детализированные модели эволюции планетных систем на миллионы лет вперёд, а затем сравнивать их с реальными наблюдениями. Если вычисления предсказывают, что определённые секулярные изменения должны проявиться в виде дрейфа параметров орбит, а наблюдения это подтверждают, то можно с высокой долей уверенности говорить о наличии долгосрочных гравитационных эффектов.

Хотя секулярные изменения происходят на временных масштабах, превышающих продолжительность человеческой жизни, современные методы астрономии позволяют зафиксировать их начальные этапы, предсказать дальнейшее развитие и использовать эти данные для более глубокого понимания эволюции планетных систем.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ЭКЗОПЛАНЕТ

Современные методы поиска экзопланет всё чаще опираются на искусственный интеллект и статистические алгоритмы, позволяя извлекать из огромных массивов астрономических данных едва заметные следы далёких миров. Использование машинного обучения и передовых аналитических инструментов значительно расширяет границы возможного, превращая хаотичный поток информации, полученный с телескопов, в стройную систему взаимосвязанных закономерностей.

Анализируя кривые блеска звёзд, алгоритмы способны выявлять закономерные падения яркости, характерные для транзитных событий, когда планета проходит перед своей звездой. Если традиционные методы зачастую ограничены человеческими возможностями обработки данных, то вычислительные модели могут находить даже самые незначительные изменения, которые ускользнули от внимания исследователей. Искусственный интеллект не только ускоряет процесс обнаружения, но и позволяет пересматривать архивные данные, открывая планеты, которые ранее остались незамеченными.

Развитие этих технологий привело к тому, что тысячи записей, хранящихся в архивах, обрели новую ценность. Старые наблюдения, некогда считавшиеся беспersпективными, теперь заново анализируются с применением нейросетей, выявляющих закономерности, недоступные для традиционных методов. Машинное обучение позволяет не только определять вероятность

существования экзопланеты, но и классифицировать объекты, разделяя истинные сигналы от шумов и артефактов измерений.

Особую значимость имеют алгоритмы, работающие в связке со статистическими методами, позволяя с высокой степенью достоверности предсказывать наличие планет даже в тех случаях, когда сигнал кажется слишком слабым или прерывистым. Статистическая обработка данных помогает находить долгосрочные тенденции, исключать случайные колебания и учитывать возможные ошибки измерений, создавая надёжную систему проверки обнаруженных кандидатов.

Современные астрономические миссии всё чаще включают искусственный интеллект в свою рабочую структуру, превращая его в неотъемлемый инструмент анализа. Космические телескопы, такие как Kepler и TESS, уже собрали колоссальные объёмы данных, требующих автоматизированной обработки. Без таких технологий многие из этих данных остались бы нераскрытыми, а тысячи возможных миров так и не были бы обнаружены.

Ярким примером успешного применения искусственного интеллекта в поиске экзопланет стало открытие системы Kepler-90, в которой насчитывается восемь планет — столько же, сколько и в Солнечной системе. Это открытие стало возможным благодаря алгоритмам машинного обучения, разработанным специалистами Google в сотрудничестве с NASA. Анализируя архивные данные, собранные телескопом Kepler, нейросеть смогла выявить слабый сигнал транзита, ускользнувший от традиционных методов

обработки. Планета Kepler-90i, вращающаяся вокруг своей звезды на расстоянии значительно меньшем, чем Меркурий от Солнца, оказалась горячим каменистым миром, существование которого удалось подтвердить только благодаря передовым алгоритмам.

Другим значимым успехом стало обнаружение экзопланеты Kepler-80g, также найденной с помощью искусственного интеллекта. В этом случае нейросеть позволила идентифицировать новую планету в уже известной многопланетной системе, тем самым расширяя представления о её структуре. Подобные открытия демонстрируют не только эффективность алгоритмов, но и их способность находить сигналы, остававшиеся незамеченными при первоначальном анализе.

Не менее впечатляющим примером стало открытие экзопланеты K2-138, впервые найденной не профессиональными астрономами, а добровольцами, работающими с проектом Exoplanet Explorers. Однако окончательное подтверждение её существования стало возможным благодаря статистическим методам и алгоритмам машинного обучения, сумевшим выделить периодичность сигналов и подтвердить их планетарную природу. Эта система оказалась особенно примечательной, поскольку её планеты находятся в орбитальном резонансе, что делает её ценной для изучения динамики многопланетных систем.

Искусственный интеллект также сыграл важную роль в обнаружении потенциальных экзопланет в данных, собранных телескопом TESS. Один из примеров — TOI-178, планетная система, в которой несколько планет движутся в сложном гравитационном взаимодействии. Анализируя колебания яркости звезды, алгоритмы

смогли не только подтвердить существование этих планет, но и выявить их орбитальные резонансы, предоставляя важную информацию о процессах формирования и эволюции таких систем.

Эти примеры наглядно демонстрируют, насколько искусственный интеллект и статистические методы изменили процесс поиска экзопланет. Они не только ускоряют обработку данных, но и позволяют открывать новые миры, которые иначе могли бы остаться неизвестными. В ближайшем будущем, с увеличением объёмов наблюдений, роль таких технологий будет становиться ещё более значимой, открывая всё больше далёких миров в бескрайнем космосе.

Будущее поиска экзопланет с использованием искусственного интеллекта и статистических методов обещает значительные прорывы, которые расширят горизонты астрономии и дадут ответы на фундаментальные вопросы о происхождении планетных систем и возможности существования жизни за пределами Земли. С каждым годом объёмы данных, получаемых с космических телескопов, увеличиваются, что делает автоматизированные методы обработки информации не просто желательными, а необходимыми. Одна из наиболее перспективных областей — это дальнейшее совершенствование алгоритмов машинного обучения, позволяющее не только находить экзопланеты, но и анализировать их состав, атмосферу и динамику движения. Уже сейчас искусственный интеллект способен обрабатывать световые кривые звёзд, выявляя малейшие изменения их яркости, но в будущем такие алгоритмы смогут глубже анализировать спектры планетных атмосфер, помогая определять

наличие воды, кислорода, метана и других ключевых соединений, которые могут указывать на возможное существование жизни.

Другим направлением развития становится интеграция искусственного интеллекта с наблюдениями в реальном времени. Современные телескопы, такие как James Webb и предстоящая миссия Nancy Grace Roman, обладают высокой чувствительностью и способны фиксировать огромные объёмы информации. Искусственный интеллект может помочь не только в обработке этих данных, но и в оперативном принятии решений, например, направляя телескопы на наиболее перспективные цели, тем самым повышая эффективность наблюдений.

Особое значение имеет автоматизированный анализ архивных данных. Благодаря новым методам обработки можно пересмотреть огромные массивы информации, накопленные за десятилетия, что может привести к неожиданным открытиям. Многие экзопланеты, возможно, уже были зафиксированы телескопами в прошлом, но из-за ограниченности вычислительных мощностей и недостаточной точности анализа остались незамеченными.

Перспективы расширяются и в сторону поиска экзопланет с помощью новых инструментов, таких как гравитационное микролинзирование и астрометрия, которые требуют сложных статистических методов. Искусственный интеллект может помочь анализировать мельчайшие отклонения в движении звёзд, вызванные присутствием невидимых планет, открывая миры, которые иначе были бы недоступны для наблюдений.

Кроме того, в будущем ожидается использование самообучающихся систем, способных адаптироваться к

новым данным и улучшать свои алгоритмы по мере накопления опыта. Это позволит не просто выявлять новые экзопланеты, но и строить более точные модели формирования планетных систем, что важно для понимания эволюции Вселенной.

В конечном итоге, искусственный интеллект не только ускорит процесс поиска экзопланет, но и изменит сам подход к исследованию космоса, сделав его более точным, масштабируемым и глубоко аналитическим. Вполне возможно, что именно благодаря этим технологиям человечество однажды обнаружит миры, обладающие условиями для жизни, тем самым приблизившись к разгадке одной из главных загадок науки — существуют ли обитаемые планеты за пределами Земли.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТ

Развитие астрономии позволило заглянуть за пределы Солнечной системы, открывая бесчисленные миры, каждый из которых обладает своими уникальными характеристиками. В процессе изучения экзопланет возникла необходимость в их классификации, что привело к созданию различных систем, основанных на физических параметрах, составе, условиях обитаемости и способах обнаружения.

Одним из ключевых параметров является размер и масса планеты. Так, выделяются газовые гиганты, схожие с Юпитером или Сатурном, но часто превосходящие их в размерах. К ним относятся так называемые "горячие юпитеры" — массивные планеты, обращающиеся на малых расстояниях от своих звезд и подвергающиеся интенсивному нагреву. В условиях столь близкой орбиты атмосфера таких миров может испаряться, создавая хвосты из газа, похожие на кометные. Напротив, ледяные гиганты, подобные Нептуну или Урану, отличаются высокой концентрацией водорода, гелия и летучих соединений, таких как вода, аммиак и метан.

Помимо крупных планет, выделяются так называемые суперземли — миры, обладающие массой, превышающей земную, но не достигающие параметров газовых гигантов. Они могут иметь плотную каменистую поверхность или даже густую атмосферу, способную удерживать тепло и создавать условия, близкие к обитаемым. Еще одной интересной категорией стали мини-нептуны — промежуточные

объекты, сочетающие свойства каменистых и газовых планет.

Состав экзопланет также играет ключевую роль в классификации. Каменистые миры, подобные Земле, Венере или Марсу, обладают плотной поверхностью, в то время как газовые и ледяные планеты формируют атмосферу из легких элементов. Существуют теории о водных мирах, полностью покрытых океанами, простирающимися на тысячи километров в глубину. В таких условиях возможно развитие уникальных форм жизни, адаптированных к высокому давлению и отсутствию суши.

Другой важной характеристикой является положение экзопланеты относительно своей звезды. Так, в так называемой зоне обитаемости находятся миры, где температура позволяет существовать жидкой воде – необходимому компоненту для жизни в ее земном понимании. Однако обнаружены планеты, вращающиеся вокруг красных карликов, чье излучение нестабильно и может подвергать поверхность резким изменениям условий, включая вспышки радиации и сильные магнитные бури. В то же время газовые гиганты могут иметь крупные спутники, на которых условия ближе к земным.

Методы обнаружения экзопланет сыграли решающую роль в расширении знаний о других мирах. Транзитный метод, применяемый такими миссиями, как *Kepler* и *TESS*, позволил выявить тысячи планет благодаря фиксации периодических изменений яркости звезд при прохождении планеты перед их диском. Гравитационный метод доплеровского сдвига выявил массивные миры, влияющие на движение своих звезд. Современные технологии, включая космический

телескоп *James Webb*, открывают новые возможности для изучения атмосфер экзопланет, позволяя анализировать их состав и определять наличие возможных биомаркеров.

Каждое новое открытие подтверждает бесконечное разнообразие планетных систем во Вселенной, поднимая все больше вопросов о возможных условиях жизни за пределами Земли.

Поиск второй Земли остается одной из главных задач современной астрономии, однако история изучения Венеры служит напоминанием о том, насколько легко можно ошибиться в оценке условий на удаленной планете. Еще в первой половине XX века ученые предполагали, что под плотной облачной завесой Венеры скрываются тропические джунгли или даже океаны. Однако первые космические миссии показали, что этот мир представляет собой раскаленную пустыню с атмосферой, состоящей почти полностью из углекислого газа, а температура на поверхности способна расплавить свинец. Этот опыт наглядно демонстрирует, насколько опасно полагаться на ограниченные данные при оценке потенциально обитаемых планет.

Современные технологии позволяют проводить более детальный анализ удаленных миров, но риск ошибочных выводов остается. Например, даже если экзопланета расположена в зоне обитаемости, это еще не означает, что на ней действительно существуют условия, пригодные для жизни. Одним из главных инструментов для оценки атмосферы удаленных миров стал метод спектроскопии, применяемый, в частности, космическим телескопом *James Webb*. Он позволяет

анализировать химический состав атмосферы, выявлять наличие воды, кислорода, метана и других возможных биомаркеров. Однако даже при наличии кислорода нельзя с уверенностью утверждать, что он был произведен живыми организмами — геологическая активность или фотохимические процессы также могут приводить к его появлению.

Дополнительную сложность создает фактор плотности и состава поверхности. Планета может обладать землеподобной атмосферой, но при этом ее поверхность окажется покрытой токсичными океанами или гигантскими пустынями с экстремальными перепадами температур. Еще одной потенциальной проблемой становится динамика атмосферы: если на Земле климат регулируется за счет циркуляции воздуха и океанов, то на планетах, вращающихся вокруг красных карликов, возможен захват приливными силами, из-за чего одна сторона постоянно повернута к звезде, а другая остается во мраке. В таких условиях возможны сильнейшие ураганы, а температурные контрасты сделают значительную часть поверхности непригодной для жизни.

Чтобы избежать повторения ошибки с Венерой, необходим комплексный подход к анализу экзопланет. Перспективным направлением становится изучение свойств их звезд. Например, если родительская звезда склонна к частым вспышкам, как это характерно для многих красных карликов, вероятность обитаемости планеты снижается. Напротив, наличие магнитного поля, защищающего атмосферу от солнечного ветра, может говорить о стабильности условий на протяжении миллиардов лет.

Технологии, позволяющие более точно определять пригодность планет для жизни, продолжают развиваться. В будущем ключевую роль могут сыграть космические обсерватории нового поколения, такие как *Habitable Worlds Observatory*, способные детально изучать отдельные экзопланеты и даже делать их изображения. Однако даже самые точные наблюдения не дадут полной уверенности в обитаемости мира, пока туда не будет отправлена миссия.

Вопрос заключается в том, как именно следует исследовать такие планеты. Современные технологии не позволяют отправить зонд даже к ближайшей из известных потенциально обитаемых экзопланет, например, Проксиме b, находящейся в четырех световых годах от Земли. Однако разрабатываются проекты межзвездных аппаратов, таких как *Breakthrough Starshot*, предполагающий отправку нанозондов, способных достичь системы Альфа Центавра за несколько десятков лет. Если такие миссии удастся реализовать, человечество впервые получит возможность непосредственно исследовать другие миры, исключая ошибки, подобные тем, что были допущены в прошлом.

Помимо системы Альфа Центавра, где наиболее изученной экзопланетой остается Проксима b, во Вселенной обнаружено немало других миров, которые могут претендовать на звание «второй Земли». Среди них есть как близкие к нам объекты, доступные для будущих исследований, так и более далекие, но не менее интересные кандидаты, представляющие особую ценность с точки зрения возможной обитаемости.

Одним из наиболее перспективных направлений поиска стал район созвездия Льва, где располагается система LHS 1140. В ее составе обнаружена суперземля LHS 1140 b, вращающаяся вокруг красного карлика на таком расстоянии, которое позволяет предположить наличие жидкой воды на поверхности. В отличие от многих других планет, расположенных у красных карликов, эта экзопланета, судя по расчетам, могла сохранить атмосферу благодаря своей высокой массе и плотности. Возможно, ее атмосфера богата азотом, что делает ее особенно интересной для дальнейшего изучения.

Еще одним важным кандидатом остается система Траппист-1, где сразу семь экзопланет расположены в компактной зоне вокруг своей звезды. Три из них — Траппист-1e, Траппист-1f и Траппист-1g — находятся в так называемой зоне обитаемости, где гипотетически возможны условия, близкие к земным. Однако их материнская звезда — крайне активный красный карлик, регулярно испускающий мощные вспышки, способные разрушать атмосферу планет. Тем не менее, если у этих миров есть сильное магнитное поле или плотный слой облаков, они могли бы защитить поверхность от губительного воздействия радиации.

Интересной кандидатурой считается также Teegarden b — экзопланета, обнаруженная у звезды Тигардена, одной из ближайших к Солнцу. Ее масса сравнима с земной, а орбита лежит в пределах зоны обитаемости. Хотя сама звезда очень тусклая, это обстоятельство может работать в пользу планеты, обеспечивая ей стабильные условия на миллиарды лет без разрушительных вспышек.

Не менее примечательна система Kepler-442, расположенная в 1200 световых годах от Земли. Планета

Kepler-442b обладает массой, близкой к земной, а ее звезда — оранжевый карлик, который, в отличие от красных карликов, гораздо менее активен. Это делает Kepler-442b одним из наиболее вероятных кандидатов на существование стабильного климата и условий, пригодных для жизни.

Глизе 667 Сс, находящаяся в системе тройной звезды Глизе 667, также привлекла внимание ученых. Она представляет собой суперземлю, обращающуюся вокруг красного карлика. Хотя ранее предполагалось, что она получает достаточное количество энергии для поддержания жидкой воды, более поздние исследования поставили под сомнение ее стабильность, поскольку близость к звезде может приводить к перегреву и испарению атмосферы.

Еще один многообещающий объект — K2-18b, расположенный в 124 световых годах от Земли. Недавние исследования показали, что в ее атмосфере присутствует водяной пар, а условия могут быть умеренными, хотя планета по размеру больше Земли и ближе к категории мини-нептунов. Если она обладает плотным облачным покровом, ее климат может напоминать условия на Земле, хотя плотная атмосфера может создавать парниковый эффект, делающий поверхность слишком горячей.

Каждая из этих планет остается лишь кандидатом, поскольку имеющихся данных пока недостаточно, чтобы делать однозначные выводы. Дальнейшие исследования, особенно с помощью телескопа *James Webb* и будущих миссий, помогут детальнее изучить их атмосферу, химический состав и возможное наличие биомаркеров. Однако, даже если среди этих миров найдется настоящий аналог Земли, пока еще нет

технологий, способных отправить туда исследовательскую миссию, что оставляет вопрос о возможности колонизации или поиске жизни открытым.

Поиск экзопланет действительно связан с огромными трудностями, и чем глубже ученые погружаются в эту область, тем сложнее становится процесс анализа и интерпретации данных. Вопреки распространенному в популярной прессе упрощенному представлению, согласно которому обнаруженные миры кажутся уже почти изученными, на самом деле любые выводы строятся на косвенных доказательствах. Разглядеть даже самую близкую экзопланету напрямую — задача, которую удается решить лишь в редких случаях, и даже тогда полученное изображение остается размытым пятном.

Основной объем информации поступает из спектроскопического анализа, транзитного метода и гравитационных наблюдений. Они позволяют судить о наличии атмосферы, примерном химическом составе, плотности и орбитальных характеристиках, но пока еще невозможно с полной уверенностью сказать, насколько условия на этих планетах действительно благоприятны для жизни. Даже если измерения указывают на наличие воды, это не гарантирует, что поверхность планеты не покрыта токсичными океанами с экстремальными давлениями, в которых привычная для нас жизнь попросту невозможна.

Что касается отправки автоматических миссий, то здесь проблема упирается в законы физики. Даже если представить себе гипотетический корабль, движущийся со скоростью света, он все равно будет добираться до ближайшей из потенциально обитаемых планет годами.

Реальные скорости, которых можно достичь с помощью современных технологий, в миллионы раз меньше, что делает полеты к экзопланетам делом не просто долгосрочным, а практически невозможным на нынешнем этапе развития науки.

Однако история технологий полна неожиданных прорывов, которые никто не мог предсказать. В начале XX века космические полеты считались фантастикой, а уже спустя несколько десятилетий человек ступил на Луну. Еще в 1990-х годах существование экзопланет было лишь гипотезой, а сегодня обнаружены тысячи таких миров, многие из которых обладают признаками, потенциально подходящими для жизни. Это говорит о том, что границы возможного постоянно расширяются, и, возможно, в будущем появятся способы, позволяющие либо быстрее добираться до удаленных планет, либо исследовать их на принципиально новом уровне, не требуя отправки физических аппаратов. Будущее поисков экзопланет остается захватывающим именно потому, что никто не знает, какие открытия ждут впереди. Возможно, будут изобретены новые методы обнаружения, способные с высокой точностью определять не только состав атмосферы, но и наличие биологических процессов. Или появятся технологии, позволяющие использовать квантовую телепортацию информации, сокращая время передачи данных между звездами. Пока такие идеи остаются лишь теорией, но то же самое можно было сказать и о многом другом, что сейчас кажется обыденным. Поэтому прекращать поиски бессмысленно – любое новое открытие может стать шагом к пониманию того, насколько уникальна Земля или, напротив, насколько распространена жизнь во Вселенной.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Dumusque, X., Boisse, I., & Santos, N. C. (2017). Stellar activity and its impact on planet detection. *Astronomy & Astrophysics*, 598, A133.
2. Feroz, F., & Hobson, M. P. (2014). Bayesian model comparison and parameter estimation in exoplanet research. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(2), 1618–1628.
3. Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. (2014). emcee: The MCMC hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925), 306–312.
4. Osborn, H. P., Armstrong, D. J., Pollacco, D., & Brown, D. J. (2020). Rapid machine-learning classification of TESS planet candidates with neural networks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(4), 5179–5195.
5. Shallue, C. J., & Vanderburg, A. (2018). Identifying exoplanets with deep learning: A five-planet resonant chain around Kepler-80 and an eighth planet around Kepler-90. *The Astronomical Journal*, 155(2), 94.
6. Cumming, A., Butler, R. P., Marcy, G. W., Vogt, S. S., Wright, J. T., & Fischer, D. A. (2008). The Keck Planet Search: Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 120(867), 531–554.
7. Fulton, B. J., Petigura, E. A., Howard, A. W., Isaacson, H., Marcy, G. W., Cargile, P. A., Hebb, L., Weiss, L. M., Johnson, J. A., Morton, T. D., Winn, J. N., Rogers, L. A., Sinukoff, E., & Hirsch, L. A. (2017). The California-Kepler Survey. III. A Gap in

- the Radius Distribution of Small Planets. *The Astronomical Journal*, 154(3), 109.
- 8. Howard, A. W., Marcy, G. W., Bryson, S. T., Jenkins, J. M., Rowe, J. F., Batalha, N. M., Borucki, W. J., Koch, D. G., Dunham, E. W., Gautier, T. N., Van Cleve, J., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Torres, G., Brown, T. M., Gilliland, R. L., Buchhave, L. A., Caldwell, D. A., Christensen-Dalsgaard, J., ... & Dupree, A. K. (2012). Planet Occurrence within 0.25 AU of Solar-type Stars from Kepler. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 201(2), 15.
 - 9. Lovis, C., Pepe, F., Bouchy, F., Ségransan, D., Mayor, M., Udry, S., Benz, W., Bertaux, J. L., Mordasini, C., Queloz, D., & Santos, N. C. (2017). The ESPRESSO instrument: an Echelle spectrograph for rocky exoplanets and stable spectroscopic observations. *Astronomy & Astrophysics*, 599, A16.
 - 10. Perryman, M. (2018). *The Exoplanet Handbook* (2nd ed.). Cambridge University Press.
 - 11. Petigura, E. A., Howard, A. W., & Marcy, G. W. (2013). Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(48), 19273–19278.
 - 12. Ranalli, P., Kouzuma, S., & Miyaji, T. (2018). Astrometry and exoplanets in the Gaia era: a Bayesian approach to detection and parameter recovery. *Astronomy & Astrophysics*, 614, A30.
 - 13. Seager, S., Kasdin, N. J., & Lisman, D. (2021). The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) Mission Concept Study Final Report. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 7(1), 011002.

14. Traub, W. A., & Oppenheimer, B. R. (2010). Direct Imaging of Exoplanets. In S. Seager (Ed.), *Exoplanets* (pp. 111–156). University of Arizona Press.
15. Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. (2015). The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 409–447.
16. Batalha, N. M. (2014). Exploring exoplanet populations with NASA’s Kepler Mission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35), 12647–12654.
17. Cumming, A., Butler, R. P., Marcy, G. W., Vogt, S. S., Wright, J. T., & Fischer, D. A. (2008). The Keck Planet Search: Detectability and the minimum mass and orbital period distribution of extrasolar planets. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 120(867), 531–554.
18. Dressing, C. D., & Charbonneau, D. (2015). The occurrence of potentially habitable planets orbiting M dwarfs estimated from Kepler data. *The Astrophysical Journal*, 807(1), 45.
19. Fulton, B. J., Petigura, E. A., Howard, A. W., Weiss, L. M., Winn, J. N., Morton, T. D., & Sinukoff, E. (2017). The California-Kepler survey. III. A gap in the radius distribution of small planets. *The Astronomical Journal*, 154(3), 109.
20. Gaudi, B. S. (2021). The demographics of exoplanets. *Nature Astronomy*, 5(10), 1012–1023.
21. Howard, A. W., Marcy, G. W., Bryson, S. T., Jenkins, J. M., Rowe, J. F., Batalha, N. M., ... & Koch, D. G. (2012). Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 201(2), 15.

22. Kipping, D. M. (2013). The transiting planet sampling bias. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434(3), L51–L55.
23. Petigura, E. A., Howard, A. W., & Marcy, G. W. (2013). Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(48), 19273–19278.
24. Perryman, M. (2018). *The Exoplanet Handbook* (2nd ed.). Cambridge University Press.
25. Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. (2015). The occurrence and architecture of exoplanetary systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53(1), 409–447.
26. Casertano, S., Lattanzi, M. G., Sozzetti, A., Spagna, A., Jancart, S., Morbidelli, R., ... & Pannunzio, R. (2008). Double-blind test program for astrometric planet detection with Gaia. *Astronomy & Astrophysics*, 482(2), 699–729.
27. Kiefer, F., Lecavelier des Etangs, A., & Augereau, J. C. (2019). GASTON: Gaia astrometric orbits of non-transiting planets. *Astronomy & Astrophysics*, 631, A125.
28. Lindegren, L. (2010). Gaia and the astrometry of giant planets. In S. A. Klioner, P. K. Seidelmann, & M. H. Soffel (Eds.), *Relativity in Fundamental Astronomy: Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis* (pp. 296–297). Cambridge University Press.
29. Perryman, M. (2018). *The Exoplanet Handbook* (2nd ed.). Cambridge University Press.
30. Perryman, M., Hartman, J., Bakos, G. Á., & Lindegren, L. (2014). Astrometric exoplanet detection with Gaia. *The Astrophysical Journal*, 797(1), 14.

31. Ranalli, P., Hobbs, D., & Lindegren, L. (2018). Astrometry and exoplanets in the Gaia era: A Bayesian approach to detection and parameter recovery. *Astronomy & Astrophysics*, 614, A30.
32. Sozzetti, A. (2010). Astrometry and exoplanets: The Gaia era and beyond. *EAS Publications Series*, 42, 55–62.
33. Sozzetti, A. (2014). Gaia and the astrometry of giant planets. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 36, 103–110.
34. Sozzetti, A., Giacobbe, P., Lattanzi, M. G., Micela, G., & Morbidelli, R. (2010). Astrometric detection of giant planets around nearby M dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(1), 497–507.
35. Sozzetti, A., Lattanzi, M. G., & Casertano, S. (2005). Astrometric methods and instrumentation to detect and characterize extrasolar planets: A review. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 24(1), 1–28.
36. Dawson, R. I., & Johnson, J. A. (2018). Origins of hot Jupiters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1), 175–221.
37. Mayor, M., & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355–359.
38. Seager, S. (2013). Exoplanet habitability. *Science*, 340(6132), 577–581.
39. Robertson, P. et al. (2014). Stellar activity masquerading as planets. *Science*, 345(6195), 440–444.
40. Kriger, B. (2025). Artificial intelligence and statistical methods in exoplanet detection: How machine

learning and advanced statistics are revolutionizing exoplanet discovery. Global Science News.

41. Kriger, B. (2025). Planets around pulsars and black holes: The strangest worlds in the universe—The survival and formation of planets in extreme environments. Global Science News.
42. Kriger, B. (2025). The challenge of detecting Earth-like exoplanets: Limitations and future prospects—Why finding another Earth is harder than we think and how we might succeed. Global Science News.
43. Kriger, B. (2025). Selection bias in exoplanet detection: Why Earth-like planets are hard to find—Technological limitations and observational bias in modern exoplanet surveys. Global Science News.
44. Kriger, B. (2025). Astrometry: The underrated powerhouse of exoplanet detection—Why astrometry might be the key to discovering hidden worlds. Global Science News.
45. Kriger, B. (2025). The illusion of exoplanet discovery: Are we just making it up?—Billions spent, no interstellar travel, and endless claims—What's the point? Global Science News.

