

Научно-исследовательская работа

Астрономия

## **ЗВЕЗДЫ С АНОМАЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ**

***Выполнила:***

***Ляпина Дарья Леонидовна***

*учащаяся 11 класса*

*МАУДО «ДПШ им. Н.К.Крупской», Россия, г. Челябинск*

***Папулова Наталика Владимировна***

*научный руководитель*

*МАУДО «ДПШ им. Н.К.Крупской», Россия, г. Челябинск*

## **Введение**

Люди с самого начала своего существования обращали свой взор к небу и задавались множеством вопросов. Со временем на некоторые из них были найдены ответы, однако не всегда они являлись верными. Одним из таких ошибочных суждений являлась неподвижность звезд относительно друг друга. И в этой работе мы хотим подробно рассмотреть, как же все-таки ученые обнаружили наличие собственного движения звезд, какие бывают скорости у звезд и от чего они зависят. А ведь по скорости движения звезд мы можем судить о структуре нашей Галактики. Исследование звезд с аномальной кинематикой очень актуально.

В 2019 году была сделана фотография сверхмассивной черной дыры (СМЧД) в центре галактики М87. Но в нашей галактике Млечный Путь фотографию ядра мы пока что никак не сможем сделать.

**Цель** настоящего исследования – рассмотрение движения высокоскоростных звезд как определителей структуры Галактики.

**Объект исследования** – особенности движения звезд.

**Предмет исследования** – звезды с аномальной кинематикой.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. изучить историю обнаружения собственного движения звезд;
2. разобрать причины разности скоростей звезд;
3. рассмотреть классификацию звезд с аномальной кинематикой;
4. отследить по программе «Стеллариум» траектории движения высокоскоростных звезд за период нескольких тысячелетий;
5. рассчитать скорости высокоскоростных звезд с использованием минимальных данных.

Для достижения цели работы были использованы следующие **методы**: наблюдение, измерение, сравнение, сбор и анализ информации, беседа с учеными.

**Гипотеза**: зная минимальные данные о звезде (склонение, прямое восхождение, параллакс), можно рассчитать ее скорость.

## Обнаружение у звезд собственного движения

Галилей, опираясь на собственные наблюдения звезд Млечного Пути, впервые высказал мысль о том, что звезды по размерам подобны Солнцу, а различия в их блеске связаны с разным их удалением от Земли. Но по-прежнему они казались неподвижны. Лишь королевский астроном Гринвичской обсерватории Эдмон Галлей [6], сравнивая положения звезд из каталога Птолемея с данными, полученными его современниками, обнаружил, что для трех ярких звезд Северного полушария – Арктура, Сириуса и Альдебарана – остаются, за вычетом всех поправок, разности в положениях. В 1718 г. Э. Галлей сделал однозначный вывод о том, что звезды имеют собственное движение.

За следующие полвека собственные движения были измерены всего у 4 звезд. Но даже эти малочисленные измерения очень пригодились английскому астроному Вильяму Гершелю [5], который сообразил, что движение Солнца должно «отражаться» на видимых смещениях звезд, и нашел точку, куда направлено движение Солнца, - положение апекса вблизи звезды  $\lambda$  Her.

С изобретением фотографии во второй половине XIX в. положение дел в астрометрии качественно улучшилось: определение собственных движений и относительных параллаксов звезд стало массовым. Данные по собственным движениям впервые позволили оценить тангенциальную (вдоль траектории движения) компоненту скорости звезды. Очень скоро стало возможным не только фотографирование звездного неба, Луны и Солнца, но и спектров звезд, из которых можно извлечь информацию о радиальной компоненте скорости. Эта методика стала развиваться благодаря важному эффекту, открытому в 1842 г. австрийским математиком, физиком Христианом Доплером и состоявшему в том, что смещение частоты (длины) волны, излучаемой движущимся источником, зависит от лучевой скорости его движения.

С 1888 г. все обсерватории мира включились в программу систематических измерений скоростей звезд. Анализ собственных движений объектов и их пространственных скоростей позволил развивать качественно новые методы изучения строения нашей Галактики, описание которой до сих пор велось путем

арифметического подсчета звезд внутри площадок, на которые разбивалась небесная сфера. Так, например, голландский астроном Якобус Каптейн обнаружил, что распределение собственных движений различных звезд не является случайным, а, наоборот, имеет хорошо выделенную структуру в виде двух звездных потоков, движущихся почти в противоположных направлениях. Выявленная асимметрия в движении звезд получила название «двух потоков» и нашло свое объяснение в 1926 г. благодаря модели дифференциального вращения Галактики (каждая галактическая подсистема вращается со своей скоростью), идею которого предложил шведский астроном Бертиль Линдблад, а наблюдательное обоснование придумал нидерландский астроном Ян Оорт [7]. Линдблад ввел две подсистемы в Галактике: медленно вращающуюся сферическую подсистему с шаровыми скоплениями и плоскую быстро вращающуюся подсистему, названную диском (куда входит Солнце, звезды в окрестности Солнца, рассеянные скопления). Ян Оорт постарался организовать наблюдения так, чтобы в результате их анализа явно проявилось бы вращение галактики. Определяя лучевые скорости звезд в двух противоположных направлениях от Солнца вдоль плоскости Галактики, на примере O–B-звезд и цефеид Оорт показал, что зависимость лучевой скорости от расстояния имеет вид двойной волны. Воспроизведение волны неоспоримо доказало, что Галактика вращается!

Дальнейшее изучение различий звезд по их кинематическим свойствам и особенностям распределения в пространстве привело немецкого астрофизика Вальтера Бааде [8] к открытию различных населений нашей Галактики, звезды которых отличаются возрастом и химическим составом. К середине XX в. благодаря ряду теоретических работ С. Чандрасекара, В. Амбарцумяна и других ученых был создан «кинематический портрет» Галактики, но некоторые звезды «упорно не встраивались» в общую картину движения. Это послужило толчком к введению термина звезды с аномальной кинематикой; их природа оказалась много богаче, чем предполагалось сначала, что и потребовало отдельной классификации [4].

## Движение звезд в Галактике

Дисковые спиральные галактики, такие как Млечный путь, устроены особенно сложно. У галактики есть ярко выраженный сфероидальный компонент – гало, и есть плоский диск. Пространственное распределение звезд неоднородно, и, значит, они движутся по-разному. Формы компонентов галактики и формы орбит звезд отражают процесс формирования галактики как целого [3].

Звезды в гало движутся по сильно вытянутым орбитам, то отдаляясь от центра галактики, то приближаясь к нему. Скорости движения звезд достигают 200-300 километров в секунду. Такие скорости в галактиках обычны и связаны с их большими массами, что позволяет им двигаться очень быстро.

Несмотря на то, что скорости велики и орбиты вытянуты, галактическое гало не вращается. Орбиты ориентированы хаотически, и если одна звезда вращается по часовой стрелке, то обязательно найдется другая, которая вращается против часовой. Суммарный угловой момент будет близок к нулю.

В отличие от галактического гало звезды диска движутся в плоской среде, синхронно, по почти круговым орбитам (Рисунок А.1). Их скорость также составляет около 200-300 километров в секунду. Движение звезд в диске галактики упорядочено. Отклонения от средней скорости для звезд галактических дисков не очень велики – порядка десятков километров в секунду.

В галактике есть объекты, которые движутся с гораздо более высокими скоростями. В ее центре расположена сверхмассивная черная дыра массой более четырех миллионов солнечных масс. Звезды движутся вокруг черной дыры по эллиптическим орбитам (Рисунок А.2) со скоростями, достигающими 5 тысяч километров в секунду. Получив данные о размерах орбит и скорости, была вычислена масса черной дыры – тяготеющего тела, которое обеспечивает эти скорости.

В галактике много звезд, движущихся с высокими скоростями. В окрестности Солнца предельная скорость звезд составляет около 500 километров в секунду. Более быстро движущиеся звезды за короткое по астрономическим меркам время

– за сотни миллионов лет – покинут галактику. Поэтому такая скорость для нашей галактики является второй космической.

Пространственная скорость звезды имеет три компонента. Один из них – движение звезды по лучу зрения – называется лучевой скоростью. Она замеряется по эффекту Доплера с помощью спектрографов (замеряется смещение линий относительно покоящегося объекта). Самые лучшие спектрографы позволяют измерять скорость с точностью до метров в секунду.

Два других компонента скорости представляют собой скорость поперек луча зрения. Они измеряются по видимому смещению звезды на небесной сфере, которое очень невелико. Изменения конфигурации известных созвездий можно заметить только через десятки тысяч лет. Поэтому измерить их – сложная задача. Раньше она решалась путем фотографирования одной и той же области неба на протяжении десятилетий.

Зная скорость движения звезд по орбитам, можно оценить массу любой галактики. Измеряя скорость вращения на разных расстояниях от центра галактики, мы можем восстановить распределение массы. В далеких галактиках мы можем проследить подобные кривые вращения до расстояния в сотню тысяч световых лет. В нашей галактике это сложнее, потому что мы не можем посмотреть на нее со стороны.

В некоторых далеких галактиках масса, которая необходима, чтобы поддерживать скорость вращения на уровне 200-300 километров в секунду, впятеро, вдесятеро больше массы светящегося вещества. Отсюда астрономы делают вывод о существовании невидимого вещества, которое проявляет себя только через тяготение. Это темная материя – одна из загадок современной астрономии и физики [2].

Помимо того, что звезды меняют скорость в процессе движения по своим сложным орбитам, они могут менять ее при взаимных сближениях. Лобовое столкновение звезд совершенно невероятно. Если уменьшить Солнце до размера в один сантиметр, ближайшая звезда в этих масштабах будет находиться от него на расстоянии порядка 150-200 километров. Столкнуться таким двум шарикам

нелегко. Тем не менее, они могут, пройдя на определенном расстоянии друг от друга, изменить свои скорости.

Механизм сближения звезд – двигатель динамической эволюции звездных скоплений и галактики в целом. При таких сближениях одна звезда получает энергию, а другая – теряет. И в звездной системе всегда находятся звезды, которые приобретают скорости больше второй космической и покидают звездную систему. В результате масса звездной системы уменьшается, и она меняет свою структуру.

Это очень мощный двигатель эволюции. Рассеянные звездные скопления из-за этого механизма распадаются в течение 300-500 миллионов лет. Их время жизни очень мало по сравнению с возрастом нашей галактики. Область астрономии под названием «динамика звездных систем» описывает эти процессы и оценивает дальнейшую судьбу звездных систем.

Наблюдения на крупных телескопах позволяют найти шлейфы от распадающихся скоплений. Звезды, вылетающие из звездных скоплений, долгое время движутся по орбите вслед за скоплением. Обнаружив шлейфы по их форме и скоростям звезд, мы можем восстановить распределение масс в галактиках. Это стало возможным в 2000-х годах. Астрофизики опубликовали целый ряд работ по форме гравитационного потенциала нашей галактики.

В настоящее время в мире имеется несколько проектов по измерению скоростей звезд. Примерно для 800 тысяч звезд уже измерены лучевые скорости. Лучевые скорости совместно с пространственным распределением звезд дают нам представление о том, как возникала наша галактика, как она эволюционировала и почему сейчас мы видим ее такой, какая она есть [9].

### **Классификация звезд с аномальной кинематикой**

Исторически объектами первого класса оказались «высокоскоростные звезды»: самые первые кандидаты в эту группу были обнаружены на рубеже XVIII-XIX вв. – звезда Лакайля 9352, звезды 61 Лебедя, Грумбридж 1830, Каптейна (VZ Живописца, HD33793) и Барнарда. Они получили поэтическое название «летающие» и оказались маломассивными звездами малых спектральных

типов, движущимися с пространственными скоростями 60 – 300 км/с, что в несколько раз превосходит пекулярные скорости диска (~20-30 км/с). Такие звезды, населяющие медленно вращающуюся подсистему (гало), пересекают галактический диск перпендикулярно его плоскости (как бы «падают» из гало в диск) и создают наблюдательный эффект мнимого быстрого движения – по сравнению с окружающими нас звездами действительно быстровращающегося диска.

Второй класс звезд с аномальной кинематикой был выделен в 1960-е гг. и по предложению голландского физика и астронома А. Блаау назван «убегающими». В отличие от звезд первой группы, они участвуют в обратном движении – «убегают» из диска в гало. Как правило, это молодые ранних спектральных типов массивные звезды, с пространственными скоростями до 100-300 км/ч. Их природа, по-видимому, связана с двумя разными сценариями: в первом рассматривается динамический выброс одной или нескольких звезд, обусловленный столкновениями в молодых рассеянных скоплениях, а также в звездных O – B-ассоциациях диска. Во втором сценарии, предложенном в 1957 г. американским астрономом Фрицем Цвикки, рассматривается распад тесной двойной системы вследствие взрыва сверхновой, в результате которого могла родиться убегающая звезда. Сегодня этот сценарий имеет многочисленные наблюдательные подтверждения в виде головных ударных волн сжатого вещества межзвездной среды, которые и вызываются убегающими звездами, получившими импульс при взрыве своего компаньона. Важно отметить, что и высокоскоростные, и убегающие звезды – объекты, связанные с нашей Галактикой; их полная энергия (гравитационная плюс кинетическая) строго отрицательна, то есть такие звезды не покидают пределов Галактики (Рисунок А.3).

Третий класс звезд с аномальной кинематикой был выделен в 2008 г. Р. Напивацким и М. Силвой в результате анализа статистической диаграммы, построенной для 96 известных убегающих звезд. Диаграмма представляет собой распределение звезд в зависимости от их массы и скорости, рассчитанной в



момент выброса. Точка выброса звезды находилась путем реконструкции траектории звезды, то есть интегрированием «назад во времени» уравнений движения. Таким образом, было выявлено 10 систем, скорости которых в реконструированной «точке выброса» составили 350-500 км/с, что превосходит галактическую «скорость освобождения» в точке их наблюдения. Объекты получили название «быстро убегаящих» звезд, поскольку реконструкция направления их выброса указывала на верхние слои диска, делая их родственными убегаящим звездам; а также потому, что скорость их выброса больше второй космической.

Если звезды первых трех классов были сначала открыты (а потом теоретически осмыслены и интерпретированы), то объекты четвертого класса были сначала предсказаны. В 1988 г. в журнале «Nature» была опубликована статья Джека Хиллза из Лос-Аламосской национальной лаборатории, в которой рассматривался тривиальный сценарий, построенный на принципе перераспределения момента импульса в классической постановке задачи трех тел, который приводил к рождению нетривиальных объектов, получивших название «сверхскоростные звезды». Приставка «сверх» отражала новый, ранее не известный уровень кинетической аномальности пространственного движения звезды, достигавшей около 4000 км/с по сравнению с пекулярными скоростями звезд диска (20-30 км/с).

Правда, в классической задаче трех тел рассматривался один неклассический объект – СМЧД [1]. Разгадке такого объекта были посвящены численные расчеты Дж. Хиллза. Тесная двойная система (ТДС), состоящая из пары звезд, случайно попавшая в окрестность СМЧД, может быть «разорвана» приливными силами; тогда один из ее компонентов стал бы спутником СМЧД, а другой (из-за перераспределения импульса) мог быть «выброшен» из галактического центра с высокой скоростью. Расчеты Дж. Хиллза, учитывающие варьирование пространственной ориентации трех тел, расстояние в звездной паре и прицельный параметр, показали, что существует ненулевая вероятность выброса звезды как сверхскоростной – то есть со скоростью, превышающей вторую космическую

скорость для галактического центра – 750 км/с. Обнаружение сверхскоростных звезд можно было бы рассматривать как одно из убедительных свидетельств в пользу существования СМЧД в нашей Галактике [1].

Проект Европейской Южной Обсерватории в Ла Силлья с использованием нового 4-м технологического телескопа (позже – на VLT) начался в 1989 г., а с помощью 10-м телескопа «Кеск» на Гавайях – в 1992 г. Открытие центральных звезд галактики внутри области размером в 1” (отсюда и название S-звезды «arcSecond») могло бы также послужить свидетельством существования СМЧД. Результаты не заставили себя долго ждать: в 2002 г. для нескольких S-звезд были собраны и обработаны цифровые изображения высокого разрешения, полученные с использованием специальных возможностей адаптивной оптики в ближнем инфракрасном диапазоне.

Изучение траектории движения S-звезд позволило оценить их орбитальные параметры, восстановить трехмерную структуру звездных орбит и (в дополнение к спектральным данным) собрать информацию о гравитационном потенциале, в котором они движутся как пробные частицы. Гравитационный потенциал, оцененный в двух независимых проектах, указывал на массу невидимого центрального тела, вокруг которого движутся S-звезды, порядка  $4,5 \times 10^6 M_{\odot}$  [1]. Что, как ни СМЧД, может «претендовать» на такую массу, заключенную в крохотном объеме, и при этом оставаться невидимой? После 2002 г. число S-звезд с хорошо определенными орбитами возросло до 28; в настоящее время продолжается мониторинг еще более 100 S-звезд.

В процессе спектрального изучения S-звезд возникла новая проблема – парадокс молодости галактического центра: поскольку здесь оказались массивные звезды (3-4  $M_{\odot}$ ) ранних спектральных классов (B0-B8). В 2005 г. появилось сообщение об открытии американским астрономом Уорреном Брауном и его коллегами первой сверхскоростной звезды SDSS J090745.0+024507. Эта звезда спектрального типа B9 была обнаружена на удалении (71 кпк) от галактического центра; лучевая скорость ее движения относительно центра составляла 709 км/с. Она найдена на далекой галактической периферии, где вторая космическая

скорость оценивается в 200-250 км/с. Таким образом, сверхскоростные звезды – это больше не связанные с галактикой объекты; их полная энергия положительна.

К настоящему времени открыты два десятка сверхскоростных звезд. Благодаря высокоточным спектроскопическим методам сегодня известно, что сверхскоростные звезды – это быстрые ротаторы; скорость их осевого вращения может достигать 300 км/с, что косвенно указывает на их эволюционный статус – звезд Главной последовательности. Анализ звездных атмосфер дает возможность оценить температуры и ускорение свободного падения на их поверхности, что, в свою очередь, позволяет перейти к оценке спектрального класса (B0-B8), а также светимости звезды и выполнить оценку расстояния до нее. Затем, используя теоретические эволюционные модели, можно вычислить массы и радиусы сверхскоростных звезд ( $\sim 3-4 M_{\odot}$ ).

Удивительно совпадение статистики сверхскоростных звезд и S-звезд, а также сходство их спектральных характеристик и масс. (Они могли бы быть компонентами некогда одной и той же родительской двойной системы). Действительно – откуда взялись молодые массивные звезды на окраине Галактики, типичное население которой представляют старые шаровые скопления?

Главная трудность в наблюдении сверхскоростных звезд – их удаленность, что создает проблему в прямом измерении их собственного движения. А основная проблема в изучении сверхскоростных звезд – это прямые измерения их собственных движений. Для более чем половины всех известных сегодня сверхскоростных звезд невозможно измерить собственное движение наземными средствами.

За 12 лет непрерывного изучения сверхскоростных звезд были смоделированы десятки всевозможных сценариев, объясняющих их рождение. Наибольший кинетический ресурс достигался в сценариях «с участием черных дыр», массы которых варьировались в широком диапазоне – от звездных до миллиардов солнечных. Но в первом варианте требовалась плотная «заселенность» галактического центра, тогда как современные наблюдения

показывают, что галактический центр внутри области радиусом 1 мпк (0,00326 св. лет) пуст. Во втором варианте возникало «ограничение» на массу СМЧД. Казалось бы – чем больше масса СМЧД, тем дальше от нее проходит граница приливного радиуса, обозначающая то безопасное расстояние, на котором звезда, избегая разрушений, может получить максимальное ускорение при выбросе. Но у черной дыры есть собственный размер, который с ростом массы СМЧД начинает превосходить размеры приливного радиуса: в таких обстоятельствах звезда просто будет «проглочена» СМЧД.

Так что сценарий Дж. Хиллза для объяснения феномена сверхскоростных звезд оказался самым реалистичным. В его рамках уже получены ответы на интригующие вопросы: какова максимально возможная скорость выброса звезды, способны ли «широкие» звездные пары (расстояние между ними в сотни раз превосходит их размеры) рождать сверхскоростные звезды; при каком минимально возможном сближении с черной дырой звезда выживает, избегая приливного разрушения?

Ответы на эти вопросы получили, выйдя за рамки «задачи трех тел». Звезды рассматривались как структурированные объекты, состоящие из большого числа элементов. Такой подход известен как «задача N-тел», в рамках которой была оценена вероятность рождения сверхскоростной звезды: одной за 700 тыс. лет. В нашей Галактике таких звезд чуть больше сотни, поскольку через каждые 100 млн лет сверхскоростные достигают границы Галактики и устремляются дальше, в межгалактическое пространство (Рисунок А.4).

Поиск альтернативных сценариев, объясняющих происхождение сверхскоростных звезд, привел к заключению о возможном существовании звезд с релятивистскими скоростями. Вероятность рождения звезды с релятивистской скоростью непостижимо мала, возможно, несколько звезд за всю историю Вселенной. Это далеко не окончательные выводы, ведь мы еще много не знаем: возможно, есть и другие механизмы, генерирующие рождение релятивистских звезд, которые мы еще просто не учли [4].

## Практическая часть

Можем ли мы вообще самостоятельно отследить звезды с аномальной кинематикой без специального оборудования и лично убедиться в их существовании? Да, и в этом нам помогла программа Stellarium, в которой мы отследили изменение положения нескольких высокоскоростных звезд со временем. На данный момент времени на звездной карте в этой программе было зафиксировано положение звезд Грумбридж 1830, Каптейна и Барнарда. Была поставлена цель - отследить траекторию их перемещения за 20000 лет на фоне остальных звезд. Положения звезд мы отмечали на карте с шагом в 4000 лет (как наиболее заметные).

Грумбридж 1830 была впервые зарегистрирована в каталоге британского астронома Стивена Грумбриджа, опубликованном в 1838 году, поэтому она носит его имя. В 1842 году Фридрих Аргеландер вычислил собственное движение звезды: оно оказалось чрезвычайно большим. Быстрее её в нашей Галактике движутся только звезда Барнарда и звезда Каптейна. Ее собственное движение - 4 угловые секунды в год. Нами было просчитано, что с таким движением за 4000 лет звезда пройдет примерно 4 угловых градуса. За 20000 лет это будет соответствовать следующему перемещению на звездной карте: сдвиг от нынешнего положения около созвездия Большая Медведица к созвездию Волосы Вероники. (Рисунок Б.1)

Звезда Каптейна была открыта в 1897 году Якобусом Каптейном, в честь которого и получила своё название. Ее собственное движение - 6,5 угловых секунд в год, соответственно за 4000 лет она пройдет 7 угловых градусов. За 20000 лет это будет соответствовать следующему перемещению на звездной карте: сдвиг от нынешнего положения, близкого к созвездию Резец в сторону созвездия Живописец. (Рисунок Б.2)

Звезда Барнарда - одиночная звезда в созвездии Змееносца. Она была открыта в 1916 году Э. Э. Барнардом и названа в его честь. Ее собственное движение - 10 угловых секунд в год, соответственно за 4000 лет она пройдет 11 угловых градусов. За 20000 лет это будет соответствовать следующему

перемещению на звездной карте: сдвиг от нынешнего положения в созвездии Змееносец к созвездию Геркулес. (Рисунок Б.3)

Для сравнения возьмем перемещение звезды  $\mu$  Геркулеса: за 4000 лет она пройдет всего 0,06 угловых градуса.

Визуально мы смогли доказать существование высокоскоростных звезд, но сможем ли мы это подтвердить более точными математическими расчетами? Да, и нам снова поможет программа Stellarium. Взяв оттуда минимальные данные (склонение, прямое восхождение и параллакс), мы смогли рассчитать скорости наших трех высокоскоростных звезд (Приложение В). Более того, при помощи этого алгоритма можно рассчитать скорость любой звезды. Для вывода этого алгоритма нам потребовались знания экваториальной системы координат, знания в геометрии и умения в арифметике. Основная сложность заключилась именно в арифметических расчетах, так как все числа были нецелыми. Приходилось работать с миллиардными и триллионными долями часа и градуса. Естественно, местами мы округляли, что создавало погрешность. В целом, результаты соответствовали нашим ожиданиям. Мы получили следующие скорости:  $\vartheta$  звезды Барнарда — 89.083 км/с,  $\vartheta$  звезды Каптейна — 163.79 км/с,  $\vartheta$  Грумбридж 1830 — 369.73 км/с.

### **Заключение**

Мы смогли подробно изучить историю обнаружения собственного движения у звезд, разобрались в причинах разности скоростей и рассмотрели классификацию звезд с аномальной кинематикой. Также нам удалось провести свое небольшое исследование, результаты которого наглядно подтвердили существование высокоскоростных звезд.

Стало понятно, что вид звездного неба не постоянен и есть различия между тем, что мы видим сейчас, тем, что видели наши предки и тем, что увидят наши потомки. Но как бы не менялось небо, есть вещь, которая остается неизменной — стремление людей к знаниям. Кто знает, быть может, через столетие или даже меньше наше представление о Вселенной кардинально изменится. Главное, никогда не сдаваться и продолжать исследования, ведь как говорил Стивен

Хокинг: «...Лучше стремиться к полному пониманию, чем отчаяться в человеческом разуме».

### Список литературы

1. Kormendy J., Richstone D. Inward Bound - The Search for Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei // Annual Review of Astronomy and Astrophysics 33(1):581-624.
2. Баушев А. Методы поиска темной материи [электронный ресурс]. – URL: <https://postnauka.ru/video/77948>
3. Вселенная в инфографике / Б.Г. Пшеничнер, О. В. Абрамова. – Москва: Издательство АСТ, 2016. – 208 с. : ил. – (Все знания мира в инфографике).
4. Дремова Г. Н. От «неподвижности» до сверхскоростей / Г. Н. Дремова // Физика Космоса : труды 46-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 янв.-3 февр. 2017 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — С. 50-65.
5. Еремеева А.И. Вильям Гершель (к 270-летию со дня рождения) [текст] / А. И. Еремеева // Земля и Вселенная. – 2008. - № 6. – С. 40.
6. Еремеева А. И. Эдмунд Галлей [текст] / А. И. Еремеева // Земля и Вселенная. – 1982. - № 4. – С. 46.
7. Оорт Ян Структура и эволюция галактической системы [текст] / Ян Оорт // Земля и Вселенная. – 1965. - № 2. – С. 14.
8. Псковский Ю. П. Вальтер Бааде (к 75-летию со дня рождения) [текст] / Ю. П. Псковский // Земля и - № 1 – С. 60.
9. Расторгуев А. Движение звезд в Галактике [электронный ресурс]. – URL: <https://postnauka.ru/video/36218>

## Приложение А

Рисунок А.1 Движение звезд в Галактике

1. Звезда, которая всегда в диске
2. Звезда высоко в гало
3. Звезда гало, проходящая сквозь диск
4. Убегающая звезда
5. Гиперскоростная звезда

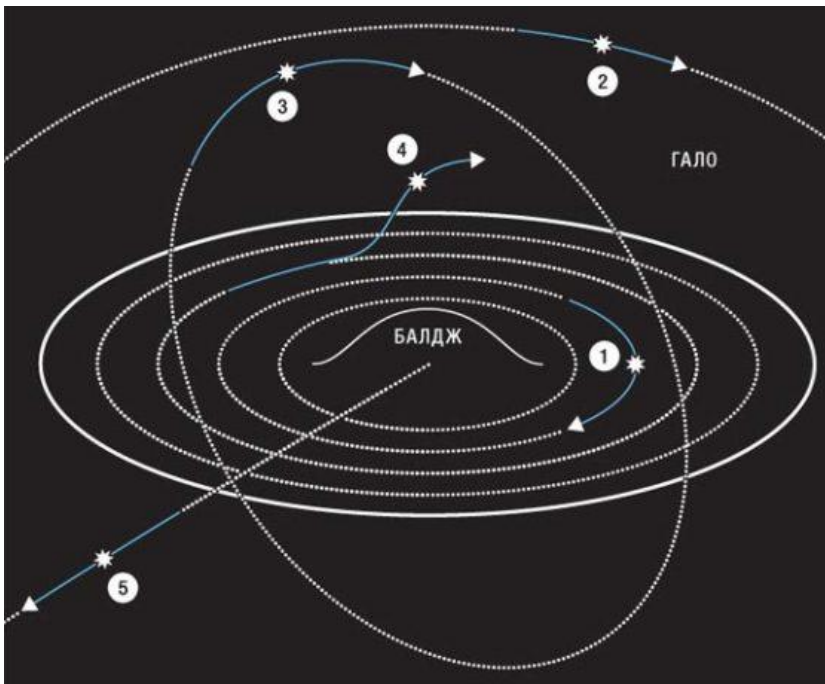


Рисунок А.2 Траектории звезд вблизи СМЧД

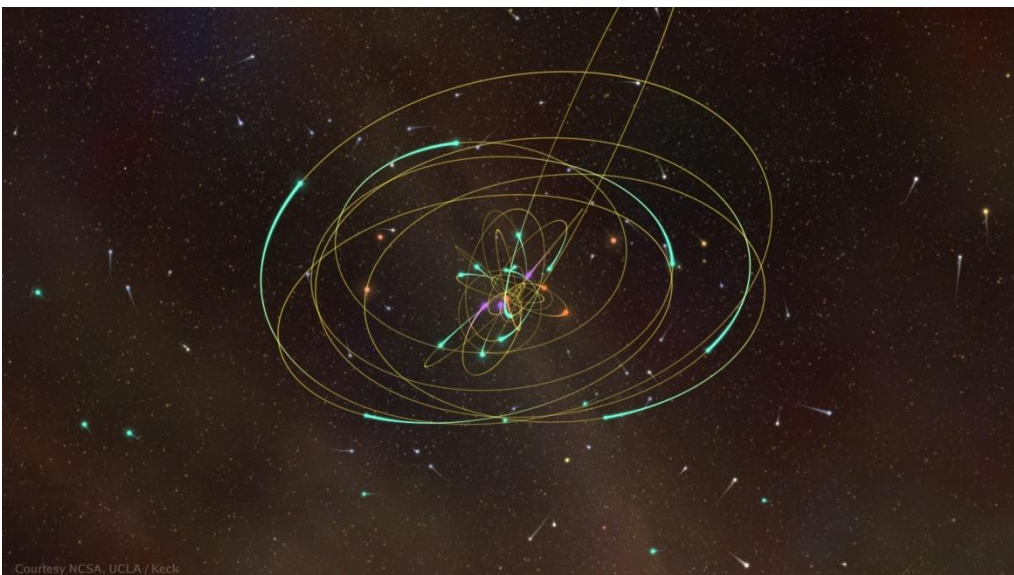




Рисунок А.3 Убегающие звезды

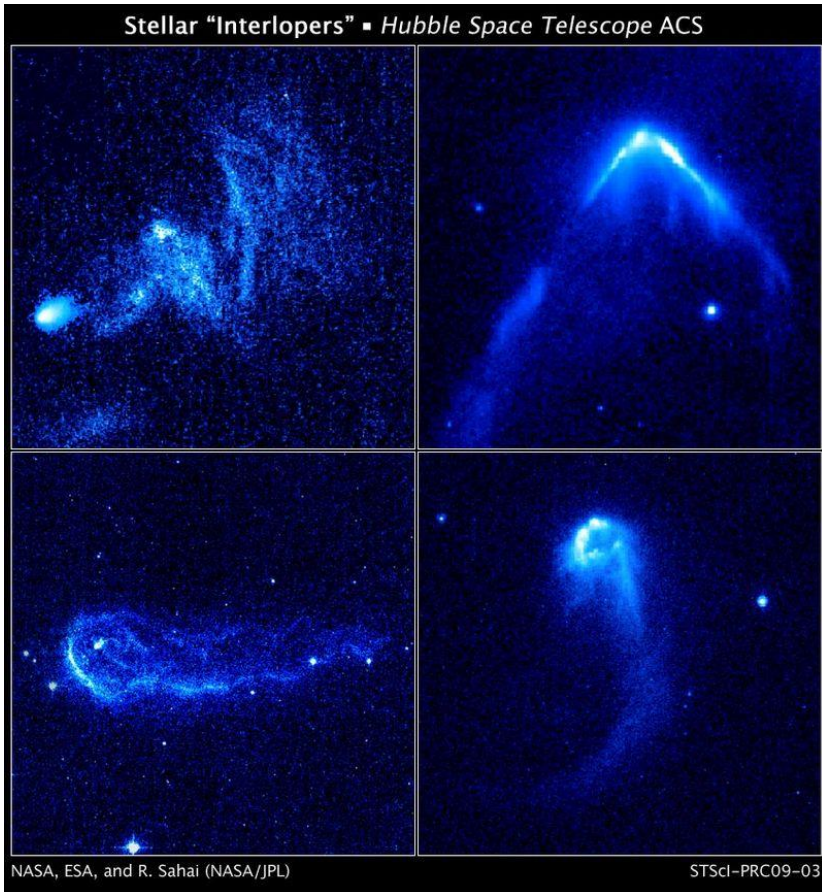
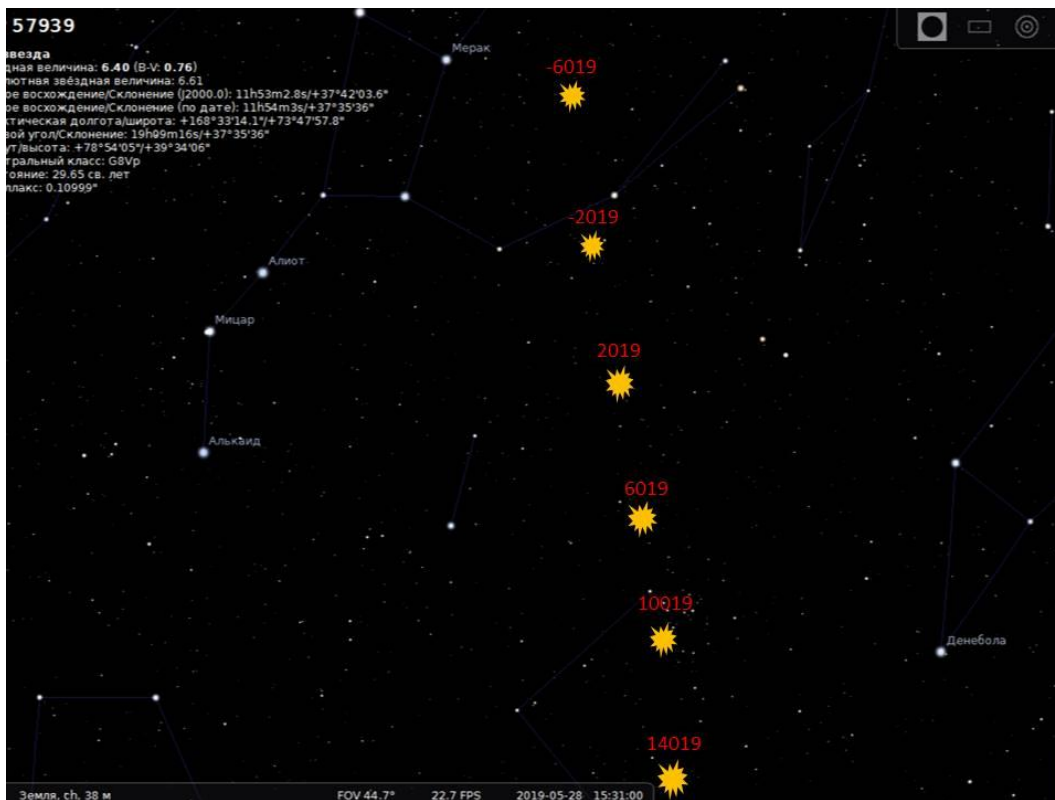


Рисунок А.4 Сверхскоростные звезды, покидающие Галактику

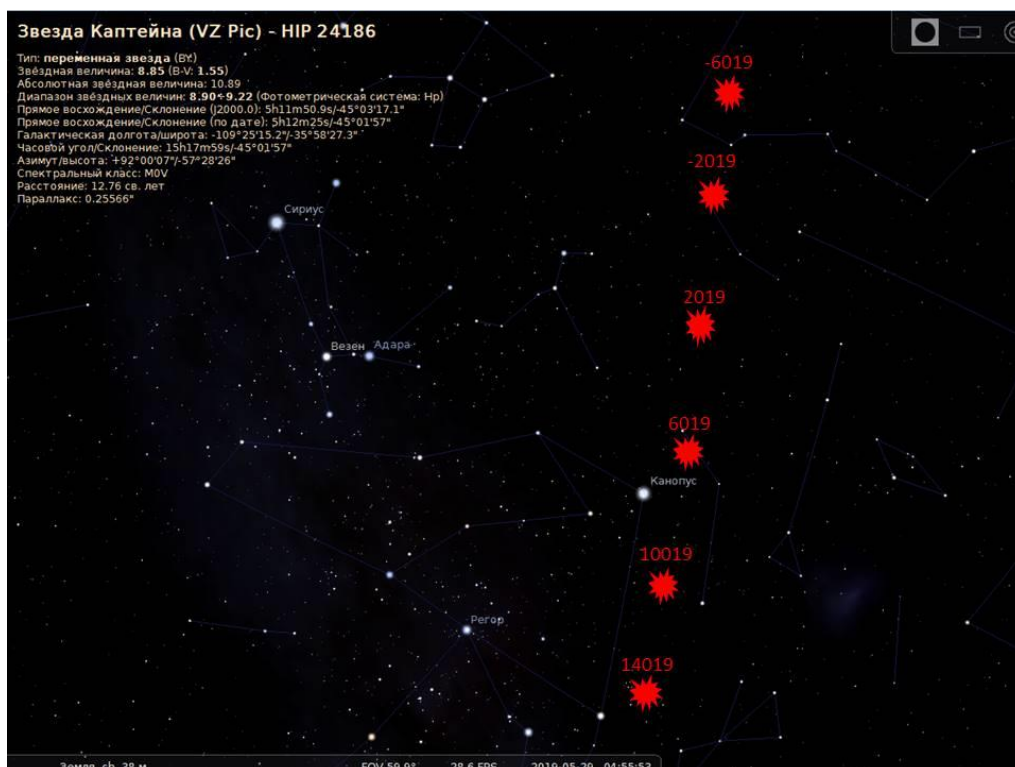


## Приложение Б (Практическая часть 1)

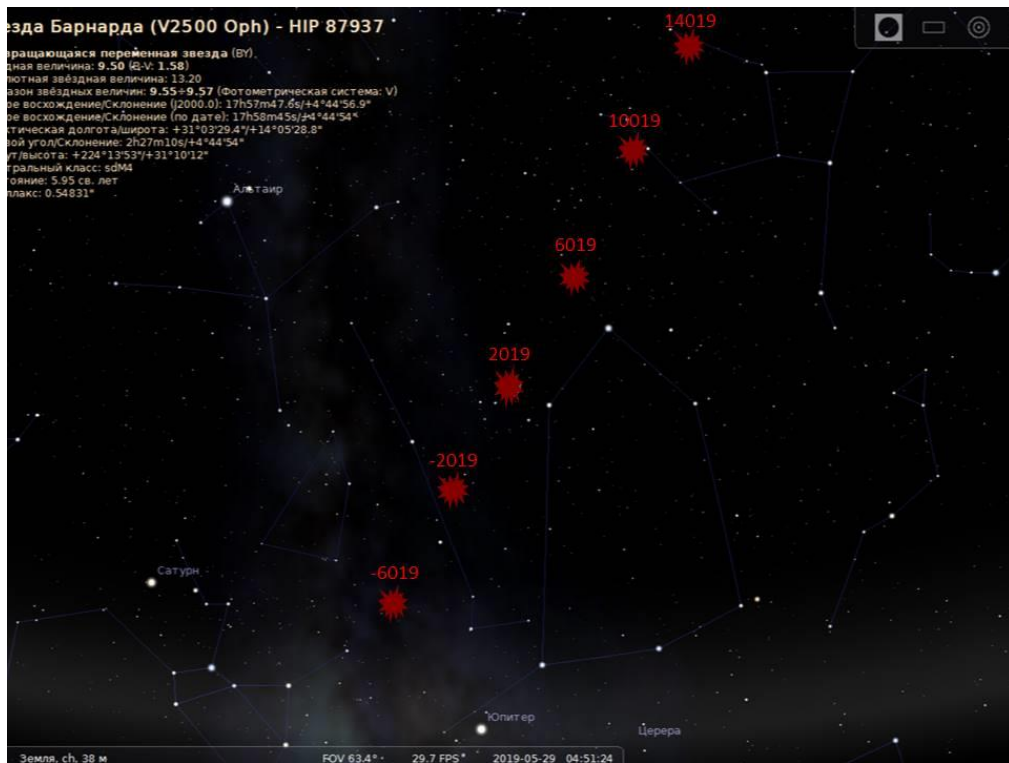
### Рисунок Б.1 Перемещение звезды Грумбридж 1830



### Рисунок Б.2 Перемещение звезды Каптейна



### Рисунок Б.3 Перемещение звезды Барнарда



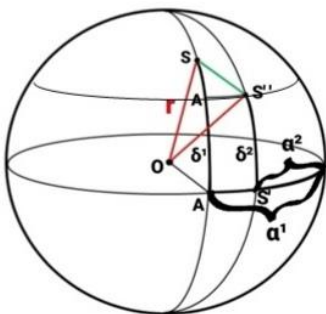
### Приложение В (Практическая часть 2)

Подробный алгоритм расчета скорости с использованием минимальных данных (прямое восхождение, склонение и параллакс) для звезды Барнарда:

Возьмем данные для нынешней даты ( $t_1$ ) и для 1000 лет назад ( $t_2$ ).

$$t_1: \alpha_1 = 17^h 57^m 47.53^s = 17.963^h \text{ и } \delta_1 = 4^\circ 45' 0'' = 4.75^\circ$$

$$t_2: \alpha_2 = 17^h 58^m 36.23^s = 17.9767^h \text{ и } \delta_2 = 1^\circ 53' 55.3'' = 1.898^\circ$$



Рассмотрим  $\Delta ASS''$ :

$$\text{Дуга } SA = |\delta_1 - \delta_2| = |4.75^\circ - 1.898^\circ| = 2.852^\circ$$

$$\text{Дуга } AS' = |\alpha_1 - \alpha_2| = |17.963^h - 17.9767^h| = 0.0137^h$$

Дуга SA — это компонент собственного движения вдоль круга склонения  $\mu_\delta$ .

Дуга AS' — компонент — “ — вдоль круга экватора.

Для перевода часов градусы  $24^h \rightarrow 360^\circ$ , нужно дугу AS' \*15, тогда  $\mu_\alpha^{\text{ЭКВ}} = 0.0157^h * 15 = 0.2055^\circ$

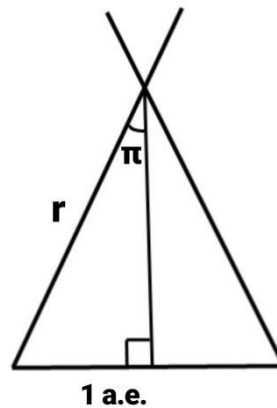
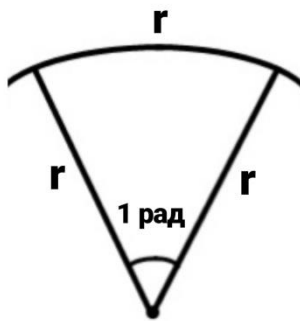
AS'' лежит на малом круге, приподнятом относительно экватора на  $\cos \delta$ , тогда  $\mu_\alpha = \mu_\alpha^{\text{ЭКВ}} * \cos \delta = 0.20538$

$$\text{Найдем } SS'' = \sqrt{|AS|^2} + \sqrt{|AS''|^2} = \sqrt{\mu_\alpha^2} + \sqrt{\mu_\delta^2} = 2.8593^\circ = \mu$$

Известен параллакс звезды Барнарда: 0.54831''

$$\frac{1 \text{ а.е.}}{r} = \sin \pi = \pi_{\text{рад}}$$

1 рад охватывает дугу длиной в радиус в градусной мере



$$2\pi r \rightarrow 360^\circ$$

$$r \rightarrow x^\circ$$

$$x = \frac{r * 360^\circ}{2\pi r} = \frac{180^\circ}{\pi} = 57.295^\circ \text{ (1 рад.)}$$

$$1 \text{ рад} = 206265'' \Rightarrow 1'' = \frac{1}{206265} \text{ рад}$$

$$\frac{1 \text{ а.е.}}{r} = 0.54831'' * \frac{1}{206265} \text{ рад}$$

$$r = \frac{1 \text{ а.е.} * 206265}{0.54831} = 1.824 \text{ пк}$$

Из  $\Delta OSS''$  угол  $SOS'' = \mu$

$$\text{Найдем дугу } SS'' = r * \sin \mu = r * \mu (\text{рад}) = \frac{r * \mu''}{206265} = \frac{1.824 \text{ пк} * 2.8593^\circ * 3600}{206265} = 0.091 \text{ пк}$$

$$\text{Дуга } SS'' = 2.809 * 10^{12} \text{ км}$$

$$\vartheta_\mu = \frac{S'' S''}{T} = \frac{2809 * 10^{12}}{1000 \text{ лет} * 24 * 3600 * 365} = 89.083 \text{ км/с}$$

Используем этот же алгоритм для расчета скорости звезды Каптейна, только более кратко:

$$t_1: \alpha_1 = 5^h 11^m 51.21^s = 5.1975^h \text{ и } \delta_1 = -45^\circ 03' 20.8'' = -45.05394^\circ$$

$$t_2: \alpha_2 = 5^h 3^m 16.45^s = 5.0545694^h \text{ и } \delta_2 = -43^\circ 10' 5.4'' = -43.168^\circ$$

$$\mu_\delta = |\delta_1 - \delta_2| = 1.885939^\circ$$

$$\mu_\alpha^h = |\alpha_1 - \alpha_2| = 0.143^h$$

$$\mu_\alpha^\circ = 15 * \mu_\alpha^h = 2.145^\circ$$

$$\mu_\alpha = \mu_\alpha^\circ * \cos \delta_2 = 1.5644^\circ$$

$$\mu = 2.4503667^\circ$$

$$\pi = 0.25566''$$

$$\pi_{\text{рад}} = \frac{0.25566}{206265}$$

$$r = \frac{1 \text{ a.e.}}{\pi_{\text{рад}}} = 3.9137 \text{ пк}$$

$$L_\mu = r * \sin \mu = \frac{r * \mu''}{206265} = 0.1673 \text{ пк}$$

$$\vartheta_\mu = \frac{L_\mu * 3.086 * 10^{13}}{1000 \text{ лет} * 3600 * 24 * 365} = 163.79 \text{ км/с}$$

Запишем вычисления еще более кратко на примере Грумбридж 1830:

$$t_1: \alpha_1 = 11.884138556^h \text{ и } \delta_1 = 37.700277778^\circ$$

$$t_2: \alpha_2 = 11.7856941^h \text{ и } \delta_2 = 39.2869441^\circ$$

$$\mu_\delta = 1.586666332^\circ$$

$$\mu_\alpha = 1.4766667^\circ$$

$$\mu = 2.380585^\circ$$

$$r = 9.09524 \text{ пк}$$

$$L_{\mu} = 0.377898 \text{ ПК}$$

$$\vartheta_{\mu} = 369.73 \text{ км/с}$$