Федеральное государственное бюджетное учреждение

«ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РАН»

На правах рукописи

Постникова Екатерина Сергеевна

Эволюция формы рассеянных звездных скоплений по данным Гайя

Специальность «Астрофизика»

Выпускная (диссертационная) работа

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук
Верещагин Сергей Викторвич

Научный консультант:
канд. физ.-мат. наук
Чупина Наталия Викторовна

Москва – 2020

Содержание

Введение ... 4
Глава 1. Источники данных ... 13
1.1. Специализированные каталоги звездных скоплений ... 13
1.2. Собственные списки звезд скоплений ... 17
Глава 2. Начальная стадия распада ассоциаций, появление звездных потоков ... 19
2.1. Молодое рассеянное скопление IC 2391 и одноименный поток (40-50 млн. лет) ... 19
2.1.1. Данные наблюдений ... 20
2.1.2. Отбор звезд из Gaia DR2 ... 25
3. Распределения звезд в пространстве, аппроксимация формы ... 27
2.1.4. Положение в пространстве скоростей ... 30
2.1.5. Оценка положений мест образования ... 31
2.1.6. Определение апекса ... 32
2.1.7. Скопление – поток - ассоциация ... 34
2.1.8. Заключение ... 35
2.2. Скопление Плеяды (115 миллионов лет) ... 37
2.2.1. Кинематика и физические параметры ... 37
2.2.1.1. Обзор данных ... 37
2.2.1.2. Выборка звезд ... 38
2.2.1.3. Кинематический анализ РЗС Плеяды ... 42
2.2.1.4. Пространственная форма Плеяд ... 48
2.2.2. Приливные шлейфы ... 51
2.2.2.1. Отбор данных ... 51
2.2.2.2. Метод ... 52
2.2.2.3. Отбор по пространственным скоростям ... 53
2.2.2.4. Обсуждение и выводы ... 57
Глава 3. Поздние стадии эволюции звездных систем (от 600 млн. лет) ... 59
3.1. Кинематика и физические параметры скопления Гиады (625±50 млн. лет) ... 59
3.1.1 Обзор и использованные данные ... 59
3.1.2 Определение положения апекса ... 60
3.1.3. Структура скопления в пространстве ... 62
3.2. Звездный поток Большой Медведицы (600 млн. лет) ... 65
3.2.1. Природа потока БМ ... 65
3.2.2 Пространственно-кинематическая неоднородность ... 66
Глава 4. Сценарий эволюции ОВ-ассоциаций и звездных скоплений от образования до распада, характеристика выбранных объектов и их место в сценарии ... 84
4.1. Место выбранных объектов в эволюционном сценарии ... 84
4.2. О природе потоков ... 85
4.3. Спутники галактик ... 89

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ 90
Список литературы 92
Приложение 1. Формирование звездных скоплений. Особенности появления парных скоплений 103
П.1.1. Особенности появления парных звездных скоплений 104
П.1.2.Пара Cr 135 и UBC 7 108
П.1.3. Определение параметров 109
П.1.4.Гипотезы образования 115
Приложение 2. История создания современных катлогов Hipparcos, TGAS, Gaia DR2 116
Приложение 3 121
Таблица 3.3. Список звезд Гиад 123
Приложение 4. Использованные методы исследований 124
П.4.1. Введение. Особенности метода AD-диаграмм 124
П 4.1.1. Метод AD-диаграмм 125
П4.1.2. Эллипсы ошибок для метода AD-диаграмм 127
П4.2. Классический метод сходящейся точки 128
П4.3. Метод сходящейся точки по преобразованиям ван Лювен 2009 129

Введение

Актуальность темы. Рассеянные звездные скопления (РЗС) – гравитационно-связанные звездные системы, в которые входит от нескольких сотен до нескольких тысяч звезд. Они являются отличным инструментом для анализа звездообразования и эволюции Галактики. По различным оценкам (см., например, [154], [200]), считается, что в нашей Галактике приблизительно 10^5 рассеянных звездных скоплений. Накопление знаний о скоплениях сформировало картину разнообразия их видов: от рыхлых конгломератов из нескольких десятков звезд, таких как NGC 3680 до густонаселенных (например, M 11), среди которых есть и достаточно старые, типа скопления M 67. Некоторые рассеянные скопления имеют нехарактерную для диска металличность, и расположены не в диске, как, например, NGC 2851. Границы классификаций шаровых и рассеянных скоплений перекрываются между собой, а значит, существуют скопления «переходного» типа, которые можно отнести по разным критериям и к тому и к другому классу, что ставит интересные задачи для понимания природы их формирования и эволюции.

В данной работе мы рассмотрели ряд звездных скоплений, потоков и ассоциаций. Перед нами стояла задача определить их пространственно-кинематические параметры, в частности, пространственную форму. Полученные данные мы сопоставили со схемой распада и эволюции в [219] Мы предположили, что полученные параметры позволят: 1) дать теории конкретные детали из наблюдений, и, с другой стороны, - 2) проверить наблюдениями выдвинутые положения рассмотренного сценария.

До опубликования данных КА Гайя (до “эпохи Гайя”) было детально изучено приблизительно 4000 скоплений (MWSC[110], WEBDA[203]). По мере выхода версий каталогов Гайя (URL: https://gea.esac.esa.int/archive/) появились новые данные о звездах, в том числе, слабых. Обнаружено как множество звезд – кандидатов в состав скоплений, так и ранее неизвестных скоплений [15]. Это позволило увеличить число каталогизированных скоплений приблизительно до 10 тыс.

Обнаружение кардинально меняющих форму скоплений шлейфов оценкам (см., например, [165], [134]), пролило свет на их сложную и загадочную природу. Последовало лавинообразное нарастание числа публикаций о рассеянных звездных скоплениях (РЗС). Так, подобное устройство обнаружено у многих РЗС [124].

Сценарий эволюции ОВ-ассоциаций [191], [219] послужил теоретической основой нашей работы. Он позволил рассматривать выбранные объекты в последовательности эволюционных стадий, характеризующимися соответствующими параметрами, включая их пространственную форму.

Выбор объектов исследования. Мы рассмотрели РЗС, явно и неявно связанные с потоками и звездными ассоциациями, а также знаменитый поток (или ассоциацию?) Большая Медведица. Разнообразие объектов позволяет понять возможные связи в последовательности эволюционных изменений звездных скоплений. В Таблице 1.1 приводятся названия этих скоплений, тип и возраст. В Таблице 1.1 видим, что рассмотрены объекты на широком интервале возрастов, что позволяет проанализировать по единой методике эволюцию их пространственной формы.

Таблица 1.1. Скопления, выбранные для изучения

Название	тип	возраст, млн.лет
Cr 135	РЗС	50
UBC 7	РЗС	50
IC 2391	РЗС+поток+ассоциация Аргус?	80–250
Плеяды	РЗС+поток	115
Гиады	РЗС+поток Геркулеса?	625
Collinder 285	поток с остатками РЗС	600

Некоторые комментарии к Таблице 1.1

Скопление Гиады и поток звезд наблюдаются давно, имеют сходную кинематику, но различный химический состав и возраст (см. работу [78], где сделан вывод о резонансной природе потока, представляющего собой смесь малометалличных звезд поля и звезд, потерянных скоплением). Если возраст

Гиад 625 млн. лет [152], то возраст потока значительно больше (до 1 млрд. лет), что свидетельствует об их различных стадиях эволюции и вполне вероятно, случайной встрече.

Collinder 285 интересен не только тем, что это звездный поток свободный от скоплений, но и тем, что 1) кинематически неоднороден и 2) полезен при изучении экзопланет, так имеет надежные оценки возраста. Этот поток является звездной ассоциацией. Кинематическая неоднороднось или звездные группы – это не что иное, как потоки, образованные распавшимися скоплениями.

Поток IC 2391 включает 60 – 63 звёзд южного неба. Сформировались поток и скопление, вероятно, одновременно и продолжают двигаться в пространстве в направлении созвездия Зайца (Lepus). Вполне возможно, что рядом в пространстве со скоплением IC 2391 (Caldwell 85) как и у Гиад расположены звезды с возрастами существенно (почти на порядок) отличающимися от возрастов скоплений. Возникает вопрос о происхождении близких к ним по кинематике, но отличных по возрасту потоков. Поскольку в диске пространственные движения по преимуществу круговые, то такие совпадения кинематики скоплений и потоков имеют случайный характер

Цель и структура работы. Для выбранных рассеянных звёздных скоплений, потоков и ассоциаций по данным наблюдений изучить их параметры и детали, особо выделяя характеристики пространственной структуры. Последняя наиболее подвержена заметным изменениям в ходе эволюции. Наша задача на конкретных примерах понять наблюдаемые характеристики объектов, присущие различным стадиям эволюции скоплений и ассоциаций [219]. Важно также понять степень применимости простой модели эволюции скоплений и ассоциаций в Галактике. Выбирались наиболее надежные и точные астрометрические данные о звездах.

Для отбора звезд применены многочисленные фильтры, что позволило создать уникальные списки звезд, входящих в состав рассмотренных скоплений и потоков. Таким образом, задача состоит в определении по данным наблюдений места скопления в эволюционном процессе и использование

полученных результатов в качестве проверчных для эволюционного сценария распада звездных систем.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Включает описание данных и способы их получения, а также примененных методов исследования. Исследование скоплений проводилось по схеме: отбор необходимых данных наблюдений (уточнение опубликованных списков или собственный отбор членов скопления по данным Gaia и других каталогов), определение кинематических параметров (положение апекса, расстояние от Солнца, пространственная скорость и т.п.). Выявление особенностей и изучение: кинематические параметры, пространственная форма и структура, движение в галактическом диске.

Единству изложенного материала способствует общая схема, или сценарий эволюции скоплений и ассоциаций, позволяющий упорядочить выбранные объекты по их свойствам на разных стадиях эволюции. Особенности движения в диске определяют эффекты, связанные со сближениями скоплений как между собой, так и с отдельными звездами, в том числе Солнечной системой.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Составлен авторский список звезд, входящих в состав скопления IC 2391. Определены физические характеристики скопления: дисперсия скоростей, пространственные размеры, а также параметры скопления: расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость. Получены характеристики приливных шлейфов, согласующиеся со сценарием эволюции РЗС и OB-ассоциаций, принятым в данной диссертации. Моделированием орбит звезд прослежены их положения в момент образования. Совпадение мест образования звезд скопления и потока представляет собой важное обоснование генетической связи скопления IC 2391 и одноименного потока.

2. По данным каталогов GAIA DR1 и RAVE DR5 получены физические характеристики скопления Плеяды: дисперсия скоростей, пространственные размеры, и параметры скопления: расстояние от Солнца, положение апекса,

пространственная скорость. По данным каталога GAIA DR2, используя расширенный поиск по параллаксам, собственным движениям, фотометрии и лучевым скоростям, составлен собственный каталог звезд – членов скопления Плеяды. По этому списку показано наличие приливных шлейфов, согласующееся с результатами других авторов.

3. По данным Gaia DR1 определены параметры скопления Гиады: дисперсия скоростей, пространственные размеры, расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость. Впервые показана эллиптичность пространственной формы скопления с большой осью ориентированной вдоль её галактической орбиты. Такая вытянутость согласуется с принятым в данной работе сценарием эволюции РЗС и ОВ-ассоциаций и указывает на наличие приливных шлейфов, позже обнаруженных многими авторами по данным Gaia DR2.

4. Автором выполнен собственный отбор звезд, входящих в состав потока Collinder 285 (поток Большой Ммедведицы) по данным Gaia DR1. Использована цепочка фильтров по пространственным координатам и скоростям, данным фотометрии и индексам содержания химических элементов (Fe, Mg, Al и т.д). Подтверждена кинематическая неоднородность потока БМ, состоящего из ряда групп звезд. Проведена ревизия и дополнение их состава. Предложена трактовка природы потока, как распадающейся звездной ассоциации.

Научная новизна:

1. Получены наблюдаемые параметры, включая детали пространственной и кинематической структуры, которые использованы для уточнения соответствующих ступеней эволюции скоплений и ассоциаций.

2. Используя новейшие наблюдательные данные определены параметры звездных скоплений, на основе которых сделаны выводы о последовательности эволюционных стадий скоплений, потоков и ассоциаций.

3. Разработана последовательность критериев, позволившая уточнить списки звезд скоплений наряду с созданием собственных каталогов.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертации результаты важны для понимания эволюции звездных скоплений и ассоциаций как одного из важнейших населений Галактики.

Личный вклад автора. Автор принимала активное участие в постановке задачи, подборе и обработке наблюдательных данных, проведении численных расчетов, моделировании, а также в обсуждении полученных материалов, их подготовке к публикации. Списки звезд-членов скопления созданы автором самостоятельно. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований с соавторами в статьях.

Достоверность представленных результатов. Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением проверенных методов и обоснованным выбором объектов исследования, данных наблюдений и методов обработки, прошедших апробацию. Сравнением с опубликованными результатами других авторов.

Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

1. С.В. Верещагин, Е.С. Постникова. Накопление новых знаний о внутреннем устройстве рассеянных звездных скоплений на основе интенсивного использования данных. XIX Международная конференция «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» DAMDID/RCDL’2017, г. Москва, Россия, 10–13 октября 2017 года.

2. Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Скопления в каталоге MWSC II движущиеся к полюсам Галактики. Международная конференция. «Современная звездная астрономия – 2017», г. Екатеринбург, Россия, 14-16 июня 2017г.

3. S. V. Vereshchagin N. V. Chupina E. S. Postnikova. What will lead the astrometry data accuracy breakthrough in the study of star clusters? XX International

Conference “Data Analytics and Management in Data Intensive Domains” (DAMDID/RCDL’2018), Moscow, Russia, October 9-12, 2018.

4. Е.С. Постникова, Н.В. Чупина, С.В. Верещагин. Субструктуры в некоторых рассеянных звездных скоплениях. Конференция «Звезды и спутники», посвященная 100-летию со дня рождения проф. А. Г. Масевич, г. Москва, Россия, 15-16 октября 2018 г.

5. Е.С. Постникова, Н.В. Чупина, С.В. Верещагин. Параметры 19 расеянных звездных скоплений по данным каталога GAIA DR2. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2018», г. Москва, Россия, 22 - 26 октября 2018 г.

6. Е.С. Постникова, С.В. Верещагин, Н.В. Чупина. Пространственно-кинематические свойства потока IC 2391 по данным GAIA. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2018», г. Москва, Россия, 22 - 26 октября 2018 г.

8. E. S. Postnikova. Binary open cluster Collinder 135 and UBC7. BASIS Foundation Summer School 2019 «Evolution of galaxies and stars», г. Сочи, Россия, 15-27 июля 2019 г.

9. E. S. Postnikova. The search for candidates for double open clusters in the Galaxy. 6-th Gamow International Conference in Odessa «New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow», Odessa, Ukraine, August 11–18, 2019

10. Постникова Е.С. Исследование рассеянного звездного скопления Плеяды по данным GDR2. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия -2019», п. Нижний Архыз, Россия, 7-11 октября 2019 г.

11. Постникова Е.С Приливные образования в области звездного скопления Плеяды. XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, Odessa, Ukraine, August 10 – 16, 2020.

Публикации по теме диссертации:

1. С.В. Верещагин, Е.С. Постникова. Накопление новых знаний о внутреннем устройстве рассеянных звездных скоплений на основе интенсивного использования данных. Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: сборник научных трудов XIX Международной конференции DAMDID/RCDL'2017 (10–13октября 2017года, г.Москва, МГУ, Россия) / Под ред. Л.А.Калиниченко, Я.Манолопулос, Н.А.Скворцова, В.А.Сухомлина. – Москва: ФИЦ ИУ РАН, 2017.

2. Elsanhoury, W. H.; Postnikova, E. S.; Chupina, N. V.; Vereshchagin, S. V.; Sariya, Devesh P.; Yadav, R. K. S.; Jiang, Ing-Guey The Pleiades apex and its kinematical structure Astrophysics and Space Science, Volume 363, Issue 3, article id. 58, 13 pp, 2018.

3. С.В. Верещагин, Н.В. Чупина, Е.С. Постникова. Кинематические группы в короне потока Большой Медведицы по данным ИСЗ Gaia. Астрономический журнал, 2018, том 95, № 8, с. 530–541.

4. Sergei V. Vereshchagin, Ekaterina S. Postnikova Aggregation of Knowledge on Star Cluster Structure and Kinematics in «Data Analytics and Management in Data Intensive Domains», pp. 113-127, 2018.

5. Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В. Параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR1. Сб. трудов конференции "Звезды и спутники", посвященной 100-летию со дня рождения А.Г.Масевич, Ред. Б.М.Шустов, Д.З.Вибе, Москва, Янус-К 2018, стр.235-240.

6. Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В. Изучение кинематики звезд в скоплении Гиады методом AD-диаграмм. В Сб. трудов конференции "Звезды и спутники", посвященной 100-летию со дня рождения А.Г.Масевич, Ред. Б.М.Шустов, Д.З.Вибе, Москва, Янус-К 2018, стр.228-234.

7. S.V. Vereshchagin N.V. Chupina E.S. Postnikova. What will lead the astrometry data accuracy breakthrough in the study of star clusters? Proceedings of the XX International Conference "Data Analytics and Management in Data Intensive

Domains” (DAMDID/RCDL’2018), Moscow, Russia, October 9-12, 2018 eds. L.A. Kalinichenko e. al. Москва, 2018

8. Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Каталог звезд скопления IC 2391. Научные труды Института астрономии РАН. 2019. Т.3. С. 336-341.

9. E. S. Postnikova, W. H. Elsanhoury, Devesh P. Sariya, N. V. Chupina, S. V. Vereshchagin, Ing-Guey Jiang. The kinematical and space structures of IC 2391 open cluster and moving group with Gaia-DR2. RAA, Vol 20, No 2 (2020).

Глава 1. Источники данных

1.1. Специализированные каталоги звездных скоплений

Каталоги MWSC (Milky Way Global Survey of Star Clusters) созданы на основе каталога PPMXL [162], который содержит координаты и собственные движения в Международной эталонной системе небесных координат (ICRS) и фотометрию низкой точности из USNO-B1.0 [139] для примерно 900 миллионов объектов вплоть до $V \approx 20^m$. Эти данные были соединены с точной фотометрией в полосах J, H, Ks из каталога 2MASS [178] для примерно 400 миллионов объектов, в результате чего был получен собственный каталог, названный 2MAst (расшифровывается как 2MASS с астрометрическими данными) включающий около 471 миллион звезд. Около 399 миллионов звезд полученного каталога содержит координаты и собственные движения PPMXL, а также фотометрию ближнего инфракрасного диапазона (NIR) и флаги 2MASS. Для остальных звезд доступны только данные 2MASS.

Список из 3784 записей (рассеянные и шаровые скопления, кандидаты в скопления, ассоциации и движущиеся группы), на котором основывается каталог с исходными параметрами скоплений был взят из литературы ([14], [26], [56], [63], [80], [81], [96], [103], [104] и [136]). К этим данным была присоединена информация о лучевых скоростях скоплений, большая часть из которой (670 записей) была взята из [106] и [56]. В дополнение были использованы измерения RV из [3], [22], [43], [105], [177]), что в совокупности дало значения лучевых скоростей для 953 скоплений.

Далее кандидаты из списка скоплений проходили идентификацию по каталогу 2MAst с определением членства звезд скопления, включающем вероятность по нескольким параметрам: фотометрическая, пространственная и кинематическая. Для установления членства и получения параметров скопления применялся автоматизированный конвейер. Дополнительно на каждом этапе применялся ручной контроль результатов, чтобы точность их определения была как можно выше и исключалась возможность сбоя. Из

установленных наиболее вероятных звезд-членов выводились параметры скопления (координаты центров и радиусы скоплений) и кинематика скопления (средние собственные движения, а иногда и лучевые скорости). Для большинства скоплений в каталоге определен угловой радиус ядра, центральной части и самого скопления, а так же приливный радиус (rt) и радиус ядра по Кингу (rc). Приливные параметры были получены путем подстановки трехпараметрических профилей Кинга[111] к наблюдаемым распределениям плотности объектов.

Для определения расстояния, покраснения и возраста применялись наборы теоретических изохрон. Изохроны взяты с веб-сервера Padova CMD 2.23[147] для фотометрической системы 2MASS (и металличности Z = 0,019), расчет которых основан на моделях [133]. Однако, в целях лучшего согласования нижней части начальной главной последовательности ZAMS с наблюдениями в области поздних K-M-звезд, изохроны Padova были соединены с вычислениями группы Пизы (см.в [110]) с учетом последних моделей Allard[1] атмосфер М-карликов. Часть звезд, не вставших еще на главную последовательность (preMS-звезды) была интерполирована из треков, основанных на модели, описанной в [176]. Полученные log g, log $L/L_{\odot}$ и T_{eff} затем были преобразованы в фотометрическую JHK-систему. В итоге яркая часть ZAMS (звезды, более ранних типов чем класс K) представлена изохроной Padova для возраста t = 0,001 млн.лет, тогда как для более слабая ее часть - изохроной Пизы для preMS-звезд для возраста t = 650 млн. лет и содержанием химических элементов (Y, Z) = (0,28, 0,016). Последнее обеспечивает лучшее согласие с наблюдениями М-карликов в Гиадах [163].

Каталог MWSC II полон приблизительно до расстояния 1.8 кпк, хотя не исключено, что в этом объеме Галактики еще существуют неоткрытые скопления. По сравнению с изначальными разрозненными параметрами скоплений из литературы, база данных скоплений имеет хорошее согласие

[1] http://perso.ens-lyon.fr/france.allard/

пространственных и кинематических данных, и является достаточно однородной. Небольшие, но систематические ошибки могут присутствовать при определении возраста.

Данные о металличности объектов не выводились, а были взяты из литературы ([43] и [56]; для шаровых скоплений из Harris [96]). Сейчас к MWSC активно подключаются данные GAIA [24].

Каталог Cantat-Gaudin et al, 2018 "Gaia DR2 open clusters in the Milky Way" включает 1229 скоплений нашей Галактики, в том числе 60 рассеянных скоплений, обнаруженных в процессе составления каталога и 2 шаровых скопления, которые ранее считались рассеянными.

Для каждого скопления представлен список его членов, включая вероятность членства для каждой звезды, параметры звезд из Gaia DR2, средние астрометрические параметры скопления (собственные движения, параллаксы, координаты и ошибки величин).

Каталог содержит несколько определений расстояний до скопления, подробное описание см. в [27], в том числе с учетом локальной систематической ошибки параллаксов Gaia DR2 в ±0.1мсд [122]

Приведены галактические барицентрические координаты X, Y, Z и расстояние скопления от центра Галактики (расстояние до Солнца принято как 8.34 кпк), радиус скопления, содержащий 50% членов скопления - r50 (в градусах).

Изначально был составлен исходный список из 3328 известных скоплений и кандидатов в скопления из каталогов [56], [80], [110], [164], [171] и [172]. Из выбранного перечня позже были исключены поток Большой Медведицы и скопления Гиады и Волосы Вероники из-за большой площади, занимаемой ими на небе. Некоторые другие скопления, которые имеют большую разреженность звезд, так же могли быть не идентифицированы как звездные группы применяемым при составлении алгоритмом. Скопления, которые накладываются друг на друга на небе (например, пары NGC 7245/King 9 или NGC 2451A / NGC 2451B) разделены не автоматически, а в ручном режиме.

Для выбора звезд, входящих в состав скоплений, применялся код программа UPMASK [114], использующий древовидный алгоритм кластеризации.

Процесс работы UPMASK не контролируется и не основывается на физическом предположении о существовании звездных скоплений, за исключением того факта, что выбираемые звезды-члены должны иметь общие свойства в трехмерном астрометрическом пространстве ($\mu\alpha$, $\mu\delta$, ϖ) и быть более плотно распределенными по небу, чем случайное распределение.

Радиус, выбираемый вокруг центра скопления для отождествления его членов, не является критическим для кода UPMASK, даже если радиус будет в 2 раза больше истинного размера скопления. Однако, скопление может быть не найдено, если оно само по себе очень компактно – состоит только из небольшого плотного ядра.

При отборе членов скопления были наложены ограничения на диапазон величин параллаксов членов скопления (±0.3 мсд от среднего значения) и собственных движений (±2 мсд/год от средних значений), что позволяло отсеять большинство звезд, на самом деле не принадлежащих выбранной звездной группе.

Для наиболее близких звездных скоплений собственные движения никак не ограничивались, по той причине, что у близких объектов оно может превышать выбранные грубые границы 2 мсд/год.

Для удаленных скоплений (более 900 пк) или скоплений с очень небольшими собственными движениями, членами считались звезды с отклонением до 0.5 мсд/год от среднего.

При отборе членов не применялись фотометрические критерии, не брались во внимание лучевые скорости звезд. Авторы каталога не ставили своей целью получение возрастов скоплений и использовали из литературы.

Расстояния, полученные в каталоге, находят неплохое согласие с расстояниями для нескольких сотен объектов из MWSC, но все же чаще оказываются гораздо более удаленными, что может быть результатом того, что в

MWSC использовался метод фотометричских расстояний, который может иметь смещенные оценки из-за не столь точной фотометрии, чем имеющаяся сейчас в Gaia и возможного загрязнения выборки звездами поля.

В обзор не попали шаровые скопления из [110] и [96] и многие «инфракрасные скопления», ранее обнаруженные по данным 2MASS, так как предел наблюдения в полосе G не дотягивает до J-диапазона 2MASS.

В конечном итоге были отождествлены менее половины от первоначального списка скоплений. На это могли повлиять такие факторы, как малое превышение плотности звезд скопления над звездами поля, малое отличие собственных движений звезд скопления от собственных движений звезд фона, а также большие ошибки астрометрических данных, высокая степень межзвездного поглощения.

1.2. Собственные списки звезд скоплений

В большинстве случаев опубликованные списки нуждаются в дополнительных уточнениях, как по содержанию, так и по числу звезд. Часто авторы обрезают свои выборки по какой-либо придельной звездной величине из-за ненадежности определения параметров. Обычно есть проблемы отсутствия самых слабых звезд, и, таким образом, выборка становиться максимально точной по параметрам, но неполной по числу звезд.

Некоторые выборки обладают малым количеством ограничений и являются слишком обширными для конкретной задачи. Не всегда даны параметры вероятностей выборки по тому или иному критерию, часто существует ограниченный набор данных, сделанный по устаревшим каталогам. Естественно, что пересмотр членов по новым данным может привести к иным результатам.

Для решения наших задач исходный список в ходе выполнения корректируется по причине получения новой информации о звездах.

Таким образом, мы делали следующее:

1) Дополнение опубликованных выборок. Наши каталоги составлены путем новых обоснований включения (или исключения) звезд в состав скопления. Наши выборки звезд оптимизированы под задачу, для которой она использована. Например, для Плеяд пришлось проводить собственный анализ звезд с учетом замечаний от доктора Флора Ван Лювена.

2) Выбор из конкретного каталога. Для потока Большой Медведицы нами отобраны звезды по новым данным из каталога Gaia DR1 (были из Hipparcos), что привело к новому отождествлению слабых звезд. Мы дополнили сведения о слабых звездах потока, обнаруженным впервые по данным КА Gaia.

3) Создание нового списка звезд путем применения последовательных фильтров (критериев отбора). Мы применили отбор звезд по классической схеме: по параллаксам, собственным движениям и диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Для IC 2391 проводили фильтрацию из GDR2. Следует отметить, что выборка звезд IC 2391 из Cantat-Gaudin et al [27], нами не использована, так как она искусственно ограничивалась по параллаксам и собственным движениям критериями, практически одинаковыми для всех скоплений. Кроме того, в каталоге [27] не производился отбор по фотометрическим критериям и лучевым скоростям. Мы провели сравнение нашей выборки IC 2391 со списками членов скопления, отобранными [27] и [84] (по данным Gaia DR1). Получено общее согласие, различия в деталях обсуждаются в соответствующем разделе.

Глава 2. Начальная стадия распада ассоциаций, появление звездных потоков

2.1. Молодое рассеянное скопление IC 2391 и одноименный поток (40-50 млн. лет)

Звездное скопление IC 2391 (MWSC 1529, Cl VDBH 42, omi Vel Cluster, C 0838-528, Escorial 31) - это близкая молодая группа звезд, имеющая низкую величину покраснения, E (B-V) = 0.01 [158], что делает его удобным для изучения.

Гелиоцентрическое расстояние IC 2391 определялось в разных публикациях: Efremov et al.[64] вывели модуль расстояния (m-M) = 5,84 основываясь на Hipparcos[74], Robichon et al. [160] получили расстояние 146^{+48}_{-45} пк, опираясь на данные Hipparcos для 11 звезд, в работе Dodd [60] оценено расстояние до скопления как 147 ± 5,5 пк.

Возраст скопления колеблется в пределах 40 млн лет – определен в [152] по положению звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. В работе [12] был оценен возраст в 50 млн. лет из-за избытка лития в атмосферах звезд.

Собственное движение скопления по данным каталога Tycho-2 [98] вычислено Loktin et al [125] как ($\mu\alpha \cos\delta$, $\mu\delta$ = -25.05 ± 0.34, 22.65 ± 0.28 мсд/год), в то время как Dodd [60] дал среднее собственное движение = -25.04 ± 1.53 и 23,19 ± 1,23 мсд/год. В каталоге [56] определено значение -24,97 ± 0,30 и 22,70 ± 0,30 мсд/год. Как видно, все эти значения достаточно однородны и согласуются в пределах погрешностей.

Лучевая скорость IC 2391 составляет 12,487 ± 3,533 км/с по данным [43] и около 14,49 ± 0,14 км/с согласно [56].

Расположенное на расстоянии ~165 пк от Солнца [110], рассеянное звёздное скопление IC 2391 (MWSC 1529) удобно для исследования. Его видимые размеры (в цвете V) составляют 60.00' × 60.00'. Приблизительно в одном направлении со скоплением движутся звёзды потока IC 2391. Этот поток исследовал Эгген [66], назвав его сверхскоплением. Эгген включил в состав потока, как само скопление, так и несколько десятков звезд со сходными

векторами пространственной скорости. Позднее, Монтес [140] составил свой список звёзд потока. Оба списка частично пересекаются. Звёзды потока занимают обширную область неба, будучи разбросаны практически по всей северной полусфере. Данные Gaia DR2 [24], обладая беспрецедентно высокой точностью, позволяют обратиться к вопросу о достоверности совместного происхождения и возможной пространственно-кинематической связи рассматриваемых потока и скопления.

В данной работе мы использовали список звезд скопления из [27],[84] и [140], а также сделали свой список, применяя необходимые критерии к выбору из [6]. Аппроксимация пространственной формы рассматриваемых группировок эллипсами позволила уточнить направление вытянутости потока в диске. В рамках ряда предположений определены места образования потока и скопления.

2.1.1. Данные наблюдений

Для некоторых иллюстраций использованы данные Gaia DR1, выборка и многие оценки сделаны по Gaia DR2.

Список звезд скопления по наиболее современным данным (Gaia DR2) представлен в каталоге [27] и содержит 224 вероятных члена IC 2391, из которых 39 звезд имеют информацию о лучевой скорости. Этот список из 39 звезд и был использован для анализа кинематики скопления IC 2391. Параметры звезд, используемые для определения характеристик скопления, перечислены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Данные для 39 звезд скопления IC2391. Данные взяты из [27]. Апекс звезды и расстояние получены в наших расчетах.

GDR2	RA J2015.5, град	DEC J2015.5, град	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	A, град	D, град	d, пк
5317423293481147264	131.89258	-54.48348	6.55±0.02	-25.28±0.05	23.66±0.04	12.86±2.16	91.38	-1.04	151.65
5317884439832479872	130.75151	-53.90202	6.38±0.03	-23.29±0.06	22.85±0.06	16.48±4.82	94.29	-6.48	155.07
5317887321743547264	130.57572	-53.90217	6.64±0.04	-24.63±0.06	23.31±0.06	16.12±0.68	93.1	-6.34	148.84
5317906155187202176	130.34457	-53.63577	6.53±0.02	-24.91±0.04	23.20±0.05	16.51±1.32	92.58	-6.38	152
5318059532750974720	129.84384	-53.91815	6.48±0.05	-24.45±0.10	23.44±0.11	16.94±0.94	92.95	-6.86	151.61
5318069604459639552	129.10085	-54.01815	6.47±0.02	-23.69±0.04	23.38±0.05	14.11±2.21	91.02	-2.74	153.43

GDR2	RA J2015.5, град	DEC J2015.5, град	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	A, град	D, град	d, пк
5318077507199948672	129.46469	-53.76262	6.68±0.02	-24.73±0.04	23.76±0.04	14.86±0.80	91.36	-4.04	148.63
5318093243960659456	130.20441	-53.62916	6.71±0.02	-24.04±0.04	23.80±0.04	13.55±0.61	91.99	-1.96	147.95
5318097916884923520	130.07602	-53.50790	6.60±0.02	-23.75±0.04	22.46±0.04	14.52±2.49	91.78	-4.32	150.34
5318150349846655488	128.93185	-53.35554	6.34±0.28	-24.26±0.53	23.51±0.50	17.61±7.77	92.55	-6.79	141.98
5318162238316886528	129.74460	-53.32008	6.60±0.02	-24.90±0.04	23.00±0.04	16.87±11.83	92.27	-7.11	150.2
5318170828251553792	129.31320	-53.33834	6.58±0.01	-24.02±0.03	23.07±0.03	9.66±12.47	87.13	4.84	151.29
5318176875565072768	129.22895	-53.14275	6.71±0.02	-23.96±0.05	23.78±0.04	16.20±1.52	93.07	-5.74	147.95
5318185667356683392	129.48414	-52.95143	6.66±0.03	-23.73±0.05	23.74±0.05	11.05±5.75	89.51	2.94	148.52
5318186221414047104	129.59528	-52.94657	6.66±0.02	-25.24±0.05	24.23±0.04	15.43±0.71	91.67	-3.76	148.91
5318229274167094656	131.56346	-53.75616	6.65±0.03	-24.66±0.05	22.92±0.04	16.00±0.83	93.73	-6.46	149
5318267653995965568	131.04233	-53.72592	6.68±0.03	-25.05±0.05	23.87±0.05	12.63±1.28	90.96	-0.33	148.43
5318296275658773888	131.44960	-53.43063	6.71±0.03	-26.09±0.05	23.48±0.05	15.83±8.73	92.44	-5.54	147.7
5318328676892604800	131.36203	-52.86715	6.65±0.02	-25.58±0.05	23.42±0.04	11.48±1.97	89.35	1.93	149.08
5318474941990522368	130.35768	-53.37808	6.65±0.03	-25.04±0.05	25.06±0.04	20.72±11.17	96.58	-10.53	149.08
5318504426950057728	130.49085	-52.87044	6.58±0.03	-25.73±0.05	22.70±0.05	17.12±2.11	92.07	-7.22	150.46
5318521671232021632	131.10882	-52.70888	6.58±0.03	-24.87±0.05	23.38±0.04	13.84±2.47	91.66	-1.62	150.78
5318532189619619328	130.98653	-52.68479	6.68±0.09	-22.95±0.16	22.84±0.14	14.84±3.70	94.33	-4.13	145.82
5318536999982933248	130.82442	-52.60302	6.52±0.03	-24.65±0.05	22.76±0.05	14.15±1.45	91.32	-2.43	151.65
5318541982138813824	129.99375	-53.05061	6.61±0.04	-25.30±0.07	24.69±0.07	17.24±0.83	93.48	-5.86	149.03
5318545521198976000	129.97087	-52.96569	6.56±0.02	-24.35±0.04	23.90±0.04	16.85±1.66	93.65	-5.87	151.25
5318546139674245888	129.92918	-52.96414	6.64±0.03	-25.44±0.05	22.48±0.05	16.78±2.79	91.52	-7.25	149.37
5318546822567826944	130.06753	-52.94134	6.54±0.03	-23.22±0.04	23.23±0.04	7.14±5.52	86.58	10.31	151.57
5318549678727766656	130.29139	-52.90283	6.58±0.03	-25.68±0.05	22.85±0.06	11.52±13.4	87.63	1.57	150.76
5318565656005527936	129.76157	-52.71059	6.50±0.02	-23.71±0.05	23.82±0.05	11.82±3.91	90.27	2.36	152.49
5318567958108066944	130.00665	-52.70338	6.64±0.03	-24.57±0.06	23.38±0.05	15.65±0.49	92.38	-4.63	149.21
5318647466543875584	131.91069	-52.26934	6.95±0.09	-25.41±0.16	24.42±0.18	16.68±2.97	95.37	-5.9	139.45
5321176205843037440	128.55421	-52.97214	6.70±0.02	-24.41±0.04	24.29±0.04	15.12±1.26	91.44	-3.43	148.14
5321188953307253760	129.35248	-52.90294	6.54±0.02	-23.94±0.05	22.51±0.05	15.50±4.71	91.55	-5.11	151.52
5321275295028390912	128.57546	-52.26594	6.44±0.02	-23.47±0.04	23.07±0.04	14.90±0.59	91.11	-2.8	153.8
5321280728169745536	128.75480	-52.23363	6.83±0.02	-24.52±0.04	24.36±0.04	17.26±2.55	93.34	-6.39	145.36
5321517672922567040	127.18998	-52.09067	6.42±0.02	-23.03±0.04	23.05±0.04	12.65±1.79	88.45	1	154.6
5321600445535344000	129.65022	-52.11067	6.63±0.03	-24.97±0.05	23.59±0.04	11.74±6.47	88.62	2.3	149.66
5321723109802924416	130.91001	-51.50794	6.54±0.05	-25.61±0.06	23.41±0.06	16.05±1.57	92.33	-3.85	150.41
5321723109802924416	130.91001	-51.50794	6.54±0.05	-25.61±0.06	23.41±0.06	16.05±1.57	92.33	-3.85	150.41

Расстояния до звезд скопления вычислялись по параллаксам, измеренным в Gaia DR2 следующим образом: для каждого значения ϖ с ошибкой σϖ построено нормальное распределение N(ϖ, σϖ^2), в рамках которого генерировалось N случайных значений ϖ_i. Эти искусственно смоделированные значения параллакса переведены в расстояние по формуле $1/\varpi_i$, где ϖ_i задается

в секундах дуги. Распределение полученных расстояний уже не является гауссовым, а имеет несимметричный вид, а максимум смещен в сторону больших расстояний. Полученное распределение аппроксимируется кривой методом наименьших квадратов. Значение аргумента, дающее максимум этой кривой (максимальная плотность вероятности), принимается как наиболее вероятное значение расстояния.

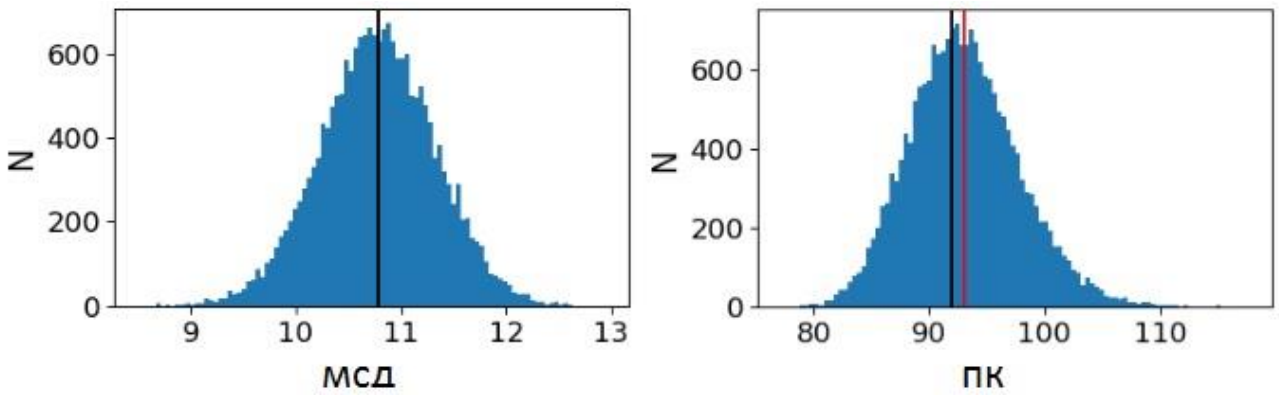

Рис.2.1. Левая панель: черной линией максимум значения параллакса при гауссовом распределении выборки. Правая панель: максимум значения расстояния отмеченчерной линией, красной линией отмечено значение 1/ ϖ, которое являлось максимуальным на левой панели.

Список звезд потока был взят из Mermilliod et al.[140] и дан в таблице 2.2 с добавлением астрометрических данных (параллаксы и собственных движения) из GDR2, которые определены для большинства звезд. Для двух звезд (HIP 11072 и HIP 62686) астрометрические данные были взяты из публикации ван Лювена (2007), так как не были найдены в GDR2. Таблица 2.1 и Таблица 2.2 составлены в несколько разном формате: в Таблице 2.1 первый столбец содержит номер GDR2, а первые два столбца в Таблице 2.2 - номера Hipparcos (HIP) и GDR2. Далее, таблицы содержат параллаксы (ϖ), компоненты собственного движения (μα, μδ), лучевые скорости (Vr) и ошибки этих значений. Лучевые скорости в таблице 2.2 взяты из различных источников, которые указаны в столбце «ссылки». Для Таблицы 2.1 все значения лучевой скорости взяты из [27].

Таблица 2.2. Данные для звездного потока из [140] в сравнении с другими источниками данных, для получения наиболее релевантных астрометрических параметров и лучевой скорости. Позиции апекса, указанные в таблице, определены в этой статье. В этой таблице 57 записей. Значения параллаксов (ϖ) и собственных движений с их ошибками взяты из GDR2. Для звезд, которые отсутствуют в GDR2 (HIP 11072 и HIP 62686), значения и ошибки ϖ и собственных движений взяты из [84]. Пары звезд, отмеченные звездочкой (*) рядом с номером HIP, считаются возможными двойными звездами. Столбец "Ref." содержит ссылки, откуда были взяты значения Vr и σVr: a - [24], b - [89], c - [207], d - [190], e - [77] и f - [204].

HIP	GDR2	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	Ref	A, град	D, град	d,пк
4979	2538159890494125184	16.95±0.07	122.91±0.15	-40.36±0.07	5.60±2.90	b	96.27	-17.73	58.44
6869	2593154747696080640	19.39±0.06	112.68±0.11	-33.45±0.12	8.61±0.16	a	91.00	-10.16	51.19
10175∗	77161217776670208	23.32±0.06	113.92±0.11	-72.09±0.10	25.09±0.21	a	72.47	-12.91	42.64
10175∗	77161222072044288	23.26±0.05	111.01±0.09	-73.34±0.09	22.60±20	c	74.31	-15.07	42.78
11072	–	45.53±0.82	196.61±0.81	-4.98±0.58	16.70±0.10	d	89.28	-15.85	21.07
12326∗	4741722617241539456	17.04±0.16	64.82±0.29	54.02±0.28	13.63±1.20	a	81.44	-3.85	57.43
12326∗	4741722823399969536	17.28±0.03	74.68±0.05	48.74±0.05	16.45±0.24	a	84.56	-9.9	57.66
12926	1145754724617168 64	39.60±0.06	237.61±0.09	-149.01±0.09	14.01±0.15	a	95.98	-15.98	25.17
13081	1148326207437358 08	43.41±0.04	279.96±0.08	-119.15±0.06	10.21±0.21	a	105.89	-11.52	22.99
14150	1153114580580614 40	47.16±0.06	233.12±0.12	-168.44±0.12	10.09±0.13	a	100.29	-20.3	21.15
14954	3265335443260522112	44.37±0.20	193.25±0.32	-69.29±0.31	19.62±0.15	a	94.88	-15.39	22.31
15058∗	3266941481859767680	13.79±0.13	80.89±0.18	-9.32±0.22	–	a	–	–	71
15058∗	3266941486151475456	14.98±0.23	72.09±0.3	-15.07±0.39	28.30±0.20	b	87.33	-6.90	64.42
22449	3288921720024442496	124.35±0.39	462.1±0.75	12.13±0.57	22.54±3.76	a	110.75	6.40	7.98
23200	3231945508509506176	40.98±0.03	39.23±0.06	-95.05±0.04	18.08±0.63	a	88.74	-28.8	24.36
25119	3234412606443085824	50.39±0.11	64.45±0.32	-180.09±0.24	36.3±0.24	a	89.96	-22.15	19.74
29241	2912022740481002752	17.68±0.03	-28.65±0.04	45.06±0.05	26.98±0.19	a	77.91	-1.46	56.31
33690	5479222240596469632	54.47±0.02	-162.07±0.05	264.64±0.04	22.04±0.19	a	80.38	-13.75	18.34
40774	3089675232224086784	44.66±0.04	-164.23±0.07	-53.49±0.05	27.35±0.17	a	92.44	-8.80	22.34
42253∗	666296182348971776	25.45±0.04	-110.14±0.07	-102.81±0.04	23.13±0.56	a	93.78	-13.46	39.15
42253∗	666296212412465024	25.54±0.04	-108.78±0.07	-102.91±0.05	19.3±0.29	a	90.61	-17.07	39.00
47193	1144716265940854016	3.72±0.29	-16.79±0.61	-17.61±0.5	-6.98±0.10	e	98.90	-18.87	265.11
50371	5253347574048995584	4.34±0.39	-23.92±0.63	6.73±0.63	8.06±1.15	a	85.82	-7.18	225.37
50660	749024502373761664	20.64±0.08	-152.52±0.09	-58.66±0.08	2.88±0.40	a	80.59	-15.14	48.04
51931	3750851328223270400	31.36±0.07	-163.87±0.09	22.62±0.09	18.79±0.18	a	106.70	-2.15	31.74
52468	5254185333222868352	3.40±0.25	-14.7±0.43	2.28±0.41	9.10±0.30	b	90.33	-16.32	292.08
57198	4004885655800704896	3.94±0.07	-22.86±0.09	-7.49±0.08	5.14±0.28	a	102.86	-12.05	253.84
59280	1536064958579187840	39.82±0.06	-314.2±0.05	-51.00±0.07	-2.61±0.12	a	95.36	-9.57	25.03
60831	1541667932396172800	21.95±0.04	-182.13±0.04	-4.69±0.05	-2.21±0.18	a	95.77	-3.31	45.37

HIP	GDR2	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	Ref	A, град	D, град	d,пк
60832	1541667932396172416	21.94±0.04	-180.39±0.05	0.44±0.06	-1.91±0.19	a	94.92	-1.88	45.38
62686	–	26.13±3.38	-135.82±3.6	-27.22±5.02	-2.90±0.40	b	100.39	-12.89	27.23
62758	3958028490314315008	25.81±0.04	-141.07±0.06	-37.86±0.04	-4.24±0.23	a	101.08	-17.35	38.59
66252	3630092241022731136	48.73±0.06	-286.58±0.11	-91.87±0.08	-23.16±0.16	a	72.71	-8.44	20.46
67412	3658911226765436032	22.94±0.06	-136.86±0.09	-44.06±0.07	-13.44±0.25	a	91.41	-15.52	43.33
68076	1671816367861537408	21.75±0.03	-138.54±0.06	54.51±0.05	-15.12±0.14	a	89.90	-15.00	45.84
69713	1511727333122255744	34.30±0.18	-149.63±0.27	88.89±0.30	-18.4±2.70	b	78.48	-12.79	28.80
74045	1701849283160198400	33.76±0.15	-127.83±0.31	165.69±0.30	-8.72±0.77	f	83.02	-5.46	29.33
77152	1224551770875466496	20.67±0.05	-88.05±0.06	37.70±0.07	-20.50±0.35	a	98.64	-4.14	48.14
77749	4403292246725472384	24.59±0.04	-115.09±0.07	10.81±0.07	-24.90±0.14	a	99.94	5.00	40.52
84827	5811053234948685312	25.43±0.09	-47.08±0.13	-199.34±0.18	-3.30±0.20	a	93.73	-14.47	39.00
85360	5976271757721062528	21.94±0.07	-26.13±0.12	-109.38±0.09	-16.03±0.27	a	93.76	-22.43	45.28
89005	2260109892505203328	31.78±0.03	-26.17±0.06	194.87±0.06	-13.88±0.36	a	99.42	-5.16	31.40
90004	4153637759337630720	24.03±0.06	-23.1±0.09	-68.3±0.09	-25.52±0.14	a	104.78	-15.71	41.39
93096	6711686642605457408	13.53±0.04	24.3±0.06	-72.81±0.06	-12.82±0.40	a	87.04	-17.56	73.41
99803∗	6468703708258513024	15.51±0.06	35.37±0.08	-98.19±0.07	-17.19±0.40	a	106.35	-3.07	63.93
99803∗	6468703712555652096	15.45±0.05	37.07±0.08	-93.29±0.06	-19.67±0.44	a	105.59	1.39	64.26
101262	1863898674120773760	37.13±0.03	141.86±0.05	16.81±0.06	-26.72±0.17	a	90.15	-23.83	26.88
104225	2270771375724754816	31.00±0.03	108.41±0.05	66.26±0.05	-12.72±0.17	a	86.75	-21.23	32.20
105232	1846882224145757056	25.45±0.06	133.59±0.11	9.56±0.11	-16.92±0.26	a	82.42	-11.25	39.08
109110	2621051110038749440	27.45±0.05	176.76±0.09	-43.74±0.09	-11.31±0.63	a	82.93	-11.15	36.27
109612	6508969718149502976	20.45±0.03	114.74±0.06	-65.22±0.06	-9.78±0.35	a	97.15	-1.19	48.72
112909	1889703525209960960	66.42±0.07	523.78±0.10	-48.49±0.12	-2.78±0.55	a	73.81	-6.72	15.02
113556	2663025241307454848	4.53±0.06	39.39±0.08	-6.67±0.08	-16.28±0.78	a	95.69	-10.81	220.90
114236	6393744472971218048	17.80±0.04	103.61±0.05	-63.04±0.05	3.56±0.18	a	103.06	-19.12	55.92
115288	2818000408811106688	15.61±0.18	73.65±0.37	20.25±0.22	-19.00±4.40	b	121.99	0.46	62.40
116384	2646280705713202816	48.03±0.08	339.80±0.09	28.52±0.07	-10.44±0.52	a	101.16	4.10	20.74
117410	2420563960807395072	35.47±0.90	234.22±1.45	23.16±1.30	-9.88±0.95	a	103.04	9.14	26.58

В таблицах также представлены индивидуальные апексы звезд (A, D) и гелиоцентрические расстояния (d). Montes et al. [140] определил список из 53 звезд для потока, связанного с IC 2391. Но для некоторых звезд из этого списка с одинаковыми номерами HIP имеется по 2 записи в каталоге GDR2, что, вероятно, указывает на их возможную двойственность (звезды имеют примерно одинаковые астрометрические параметры). В итоге вместо 53 звезд в таблице 2.2 содержится 57 звезд. О том, что звезда HIP 99803 двойная, было известно ранее, в то время как предположение о двойственности звезд HIP 10175, HIP 12326, HIP 15058, HIP 42253 ранее не высказывалось. Благодаря лучшей чувствительности и угловому разрешению данные Gaia точнее данных

Hipparcos и более многочислены. Это означает, что в областях, где HIP обнаружил одну звезду, Gaia может обнаружить несколько звезд. Несмотря на предположение о двойственности этих звезд, мы не стали исключать их из нашего списка.

Для звезды с HIP 15058 нет данных о лучевых скоростях, поэтому она была исключена из списка, в результате чего для определения апекса потока использовалось 56 звезд.

2.1.2. Отбор звезд из Gaia DR2

Мы создали собственную выборку звезд скопления, применяя ряд фильтров, описанных ниже. Наша выборка звезд может несколько отличаться от каталога [27] вследствие применения разных методов. Мы сравниваем полученные результаты со списками звезд скопления из [27] и [84]. Выборка производилась из каталога Gaia DR2 [24]. Результат представлен в таблице 2.3 (см. Приложение 3).

Фильтр 1: выбор звезд в области скопления. Использовались координаты центра: $\alpha = 130.^\circ065$, $\delta = -53.^\circ028$ из [110]. Разницей эпох по сравнению с Gaia DR2 мы пренебрегли ввиду незначительности разницы в координатах (несколько угловых секунд). Радиус выборки (5°) взят исходя из пространственных размеров скопления приблизительно 10 пк. Дополнительно для уменьшения шума выборка ограничивалась в пределах 3 – 8 мсд по параллаксу. Выбрано 11954 звезды.

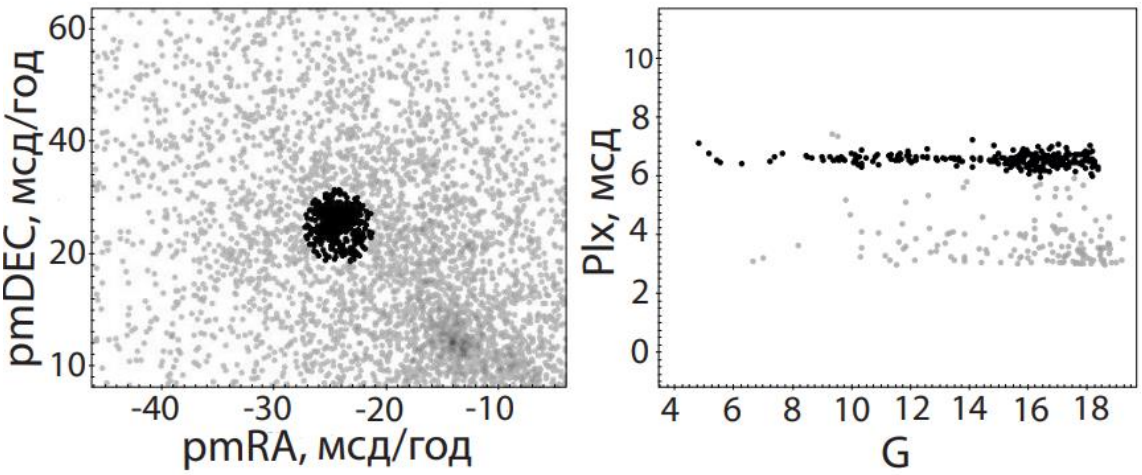

Рис. 2.2. Левая панель: диаграмма собственных движений. Черные точки (n = 404) – потенциальные члены скопления, серые точки — звезды фона. Сгущение в правом нижнем углу, возможно, часть Местного потока (будет рассмотрено в отдельной работе). Правая панель: диаграмма «параллакс – звездная величина G». Черные точки – потенциальные члены скопления, серые – звезды поля.

Фильтр 2: отбор по диаграмме собственных движений (рис. 2.2, левая панель). На рис. 2.2 нами определен геометрический центр сгущения $\mu\alpha = 24.3$, $\mu\delta = -22.4$ мсд/год. Граница бралась эллиптической формы (исходя из формы распределения на рис. 2.1) с осями 2.3 по $\mu\alpha$ и 2.4 по $\mu\delta$, проводилась, в среднем, исходя из выравнивания звездной плотности с фоном. Это ограничивает дисперсию пекулярных скоростей до 1.8 км/с, что можно считать реалистичным.

Фильтр 3: Отобранные по собственным движениям 404 звезды на рис. 2.2 (правая панель) представлены на плоскости «параллакс – звездная величина G». Звезды скопления выделяются, образуя вытянутое сгущение примерно на одном расстоянии от Солнца, но с разной звездной величиной. Мы взяли границы по параллаксу от 4.50 мсд до 5.94 мсд, четко выделяющиеся для звезд скопления. В нашем распоряжении осталось 258 звезд.

Фильтр 4: подбор изохроны нужного возраста по распределению звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (Г-Р). Отобранные звезды на рис. 2.3 нанесены на диаграмму «цвет (BP–RP) – абсолютная звездная величина (M_G)».

Отобраны звезды по степени близости к изохроне данного возраста. По рис. 2.3 выбрано 148 звезд. Таким образом, возраст можно принять равным log t = 7.75 ± 0.25.

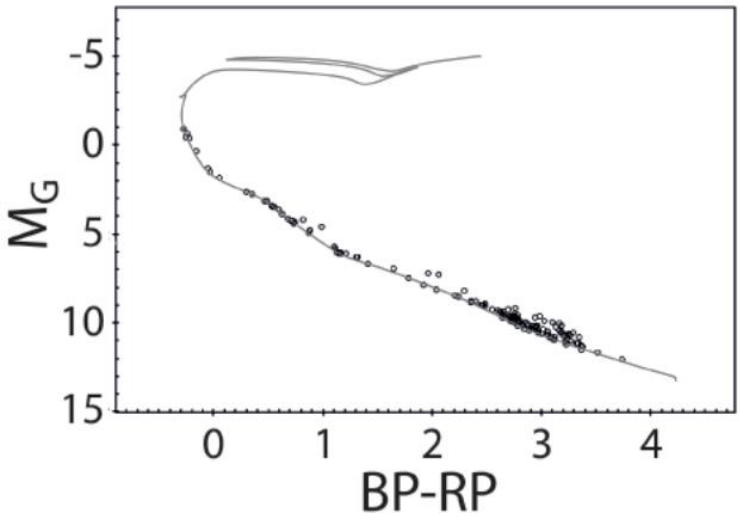

Рис. 2.3. Диаграмма Г-Р для звезд, прошедших четыре фильтра (n = 148). Показаны точки нашего списка и изохрона из [147] для lg t = 7.75.

В Приложении приведен полученный каталог. В колонках таблицы содержатся номер по Gaia DR2, экваториальные координаты на J2015.5, параллакс, расстояние от Солнца, пространственные прямоугольные координаты, компоненты собственных движений, лучевые скорости, звездная величина G и показатель цвета BP–RP, абсолютная звездная величина, координаты индивидуальных апексов звезд, компоненты пространственных скоростей, флажки присутствия (+) звезды в каталогах [27] и [84]. Расстояния для звезд получены нами способом, который описан в 2.1.1.

3. Распределения звезд в пространстве, аппроксимация формы

Кривые на рисунке 2.4 показывают контуры с одинаковой звездной плотностью. Оценка плотности была сделана применением Гауссовых ядер [169] с использованием пакета scipy python [100] для построения графика изо-плотности.

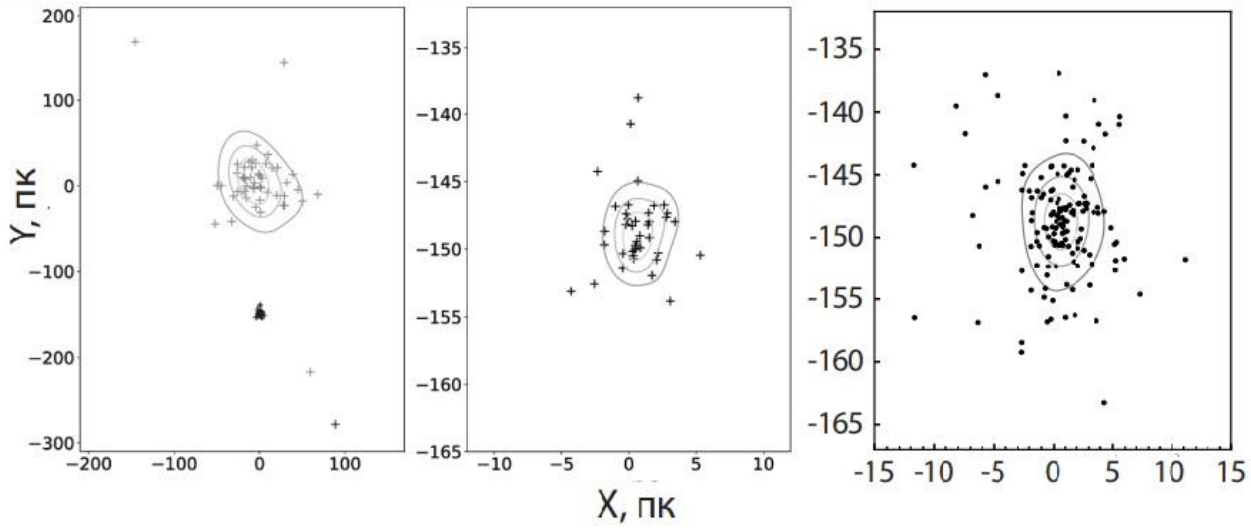

Рис.2.4. Распределение звезд скопления (черные крестики) и потока (серые крестики) в XY-плоскости Галактики. Левая панель – распределение плотности для потока (Табл.2.2), середина – для звезд скопления (Табл.2.1), правая панель – для звезд скопления нашей выборки.

На периферии, как потока, так и скопления звезд настолько мало, что плотность звезд можно считать практически фоновой. Как видно на рисунке 2.4 (левая панель), звезды потока занимают область, растянутую примерно вдоль оси OY под небольшим углом, не превышающим 40 градусов. Здесь ось OY направлена по вращению Галактики. Причиной такой ориентации является процесс, приводящий к распаду скоплений (и ассоциаций, содержащих несколько скоплений) с их постепенным растяжением (из-за дифференциального вращения) вдоль вращения диска Галактики. Этот процесс ведет к постепенному превращению скоплений в звездные потоки, и далее к преобразованию в упорядоченные кольцевые структуры, растянутые вокруг центра Галактики [150], [201]. Интересно, что подобное распределение звездных потоков наблюдается в других галактиках [151]. Тот факт, что звезды потока разбросаны по обширной области неба, приводит к значительной неопределенности в их выборе, делая распределение звезд потока гораздо более рассеянным, чем звезды скопления на рисунке 2.4.

Само скопление IC 2391 и его пространственные контуры, представленное группой звезд (из Таблицы 2.1) на Рисунке 2.4 (средняя панель) так же демонстрирует картину с растяжением вдоль направления OY. Наша выборка звезд (правая панель), хоть и имеет большее количество звезд, но соханяет направление растяжения с выборкой звезд скопления для [27].

Поскольку количество звезд в используемой здесь выборки невелико, структура не определяется в мелких деталях. Если скопление (по данным [27]) выглядит более кучно (см. рис.2.5), а также имеет более узкий диапазон скоростей, то поток гораздо более рыхлое образование - как видно на снимке неба – он занимает обширную площадь относительно наблюдения с Земли.

На рисунке 2.5 показано трехмерное распределение звезд рассматриваемого скопления (по данным [27]) и потока, откуда видно, что звезды скопления и потока расположены раздельно друг от друга в пространстве.

Так же на рисунке 2.5, где показана трехмерная структура скопления и потока, видно, что они оба не являются сферически симметричными структурами в галактическом пространстве. В целом все это согласуется с теоретическими представлениями о приливных силах Галактики.

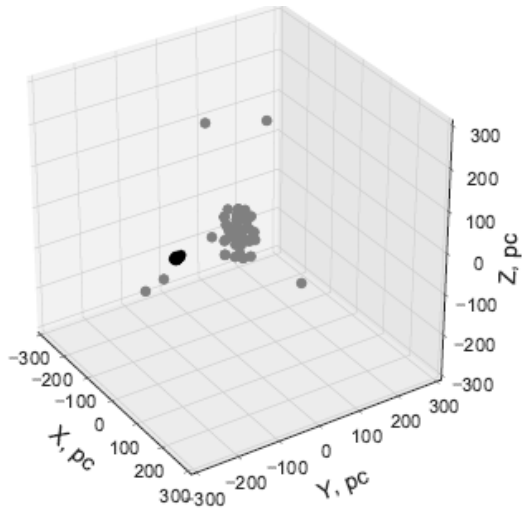

Рис.2.5. Положение в пространстве потока и скопления IC 2391(по данным [27]). Черными точками обозначены звезды скоплния, серыми – потока.

2.1.4. Положение в пространстве скоростей

Чтобы вычислить компоненты пространственной скорости U, V и W, мы использовали преобразование, описанное в [123], где было опредлено положение галактической плоскости по данным 2MASS[178] и определена оптимальная галактическая система координат, где в качестве центра Галактики приняты ICRS координаты компактного радиоисточника Стрельца A^* [123]. Значения компонентов пространственной скорости вычисляются как:

$$U = -0.0518807421Vx - 0.8722226427Vy - 0.4863497200Vz,$$
$$V = +0.4846922369Vx - 0.4477920852Vy + 0.7513692061Vz,$$
$$W = -0.8731447899Vx - 0.1967483417Vy + 0.4459913295Vz$$

где Vx, Vy, Vz – компоненты пространственной скорости в прямоугольной гелиоцентрической системе координат:

$$Vx = -4.74r_i\mu\alpha \cos\delta \sin\alpha - 4.74r_i\mu\delta \sin\delta \cos\alpha + Vr \cos\delta \cos\alpha,$$
$$Vy = +4.74r_i\mu\alpha \cos\delta \cos\alpha - 4.74r_i\mu\delta \sin\delta \sin\alpha + Vr \cos\delta \sin\alpha,$$
$$Vz = +4.74r_i\mu\delta \cos\delta + Vr \sin\delta$$

На рисунке 2.6 показаны компоненты (U, V, W) пространственных скоростей звезд скопления и звезд потока, для вычисления которых данные были взяты из таблиц 2.1 и 2.2. Как видно на рисунке 2.6, компоненты пространственных скоростей всех звезд не сильно отличаются друг от друга. Таким образом, можно сделать вывод, что и скопление, и поток имеют схожую кинематику.

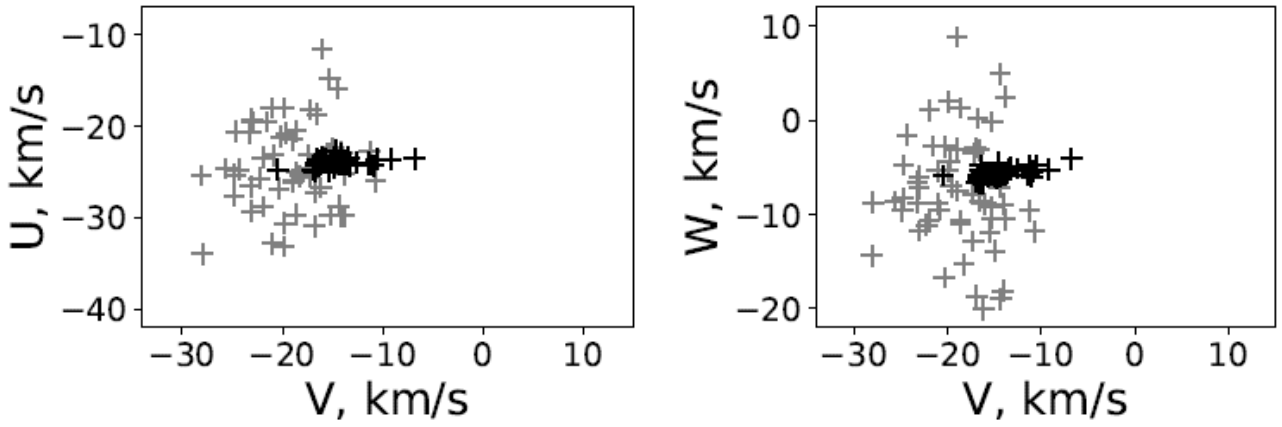

Рис 2.6. Сравнение пространственных скоростей звезд скопления и потока. Значение скоростей дано в км/с. Звезды скопления представлены черными крестиками, звезды потока – серыми.

В пространстве скоростей скопление и поток лежат очень близко, в трехмерном же пространстве картина несколько иная. Звезды самого потока достаточно обширно распределены по небу, и можно сказать, что скопление попадает в область, очерчиваемую членами потока, хотя центры концентрации звезд и потока лежат на расстоянии сотни парсек друг от друга.

2.1.5. Оценка положений мест образования

Где в Галактике образовались поток и скопление? С помощью интегрирования орбит назад во времени было рассчитано положение звезд скопления и потока приблизительно в момент их формирования, определенное путем расчетов орбит назад во времени, вплоть до 70 миллионов лет назад во времени (с учетом неопределённости оценки возраста).

Возраст потока может составлять до 250 млн. лет (по оценкам Эггена [66]), что уже могло привести к определенным изменениям в его структуре. Однако, с возрастом потока вопрос остается открытым. Эгген писал, что поток содержит звезды двух возрастов – 80 и 250 млн. лет [66], а по более новым данным Montes et al.[140] поток и скопление ровесники, и их возраст составляет 35 млн лет.

Для расчета орбит была использована программа Galpy [19]. Аналогичные расчеты, выполненные с использованием другого метода, выполнены в [35], [108]. Гравитационные взаимодействия среди звезд не учитывались. Объекты рассматривались как пробные точки в потенциале Галактики. Для скопления не было учтено влияние иррегулярных сил (дисперсия пекулярных скоростей звезд, пренебрежимо мала по сравнению с пространственной скоростью). Кроме того, в расчетах не учитывалось влияние спиральных рукавов. По рис. 2.6, можно заключить, что места рождения звезд скопления и потока находятся в одной и той же области диска.

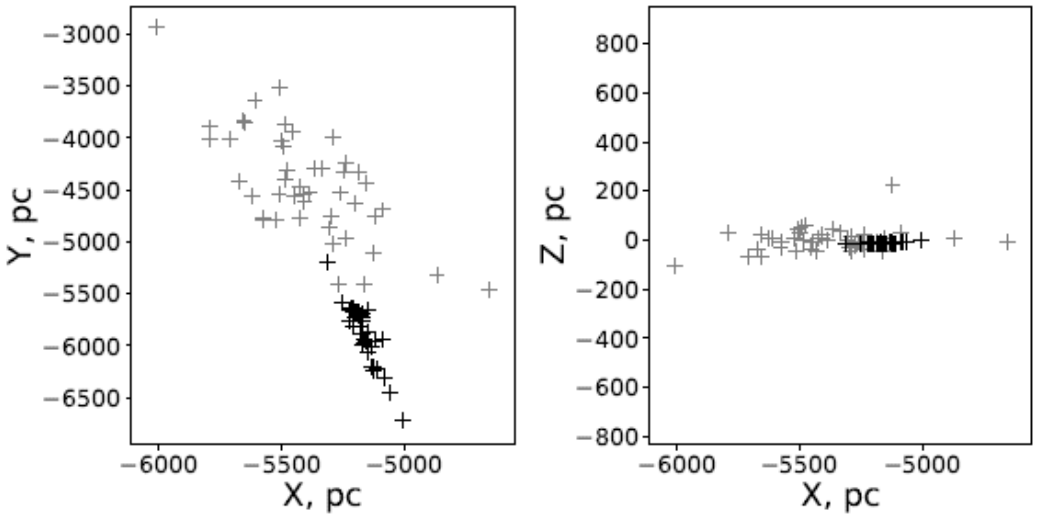

Рис 2.7. Области формирования звезд скопления (черные крестики, данные из Таб.2.1 и потока (серые крестики, данные из таб. 2.2).

2.1.6. Определение апекса

Апекс – это виртуальная точка в пространстве, в направлении которой движется объект. У движущейся группы звезд, как у группы, объединенной общей кинематикой, движения будут направлены к единому апексу, или сходящейся точке. Нами определен апекс и скопления, и потока IC 2391 с помощью методов сходящейся точки (CP) и AD-диаграммы (успешно использовался для M67, NGC 188 и Pleiades (см.[199], [72], [73]). Результаты сведены в таблицу 2.3.

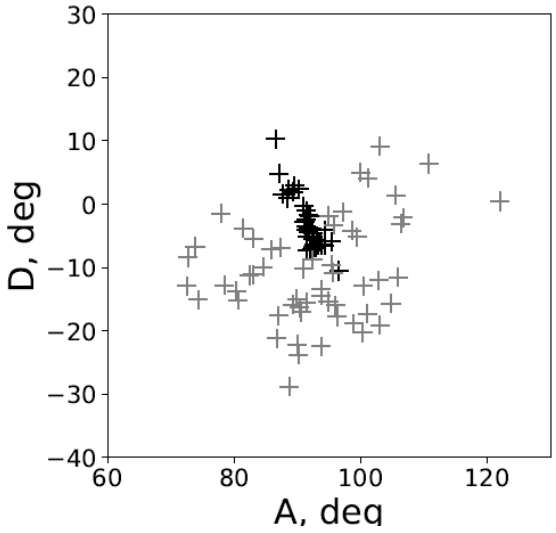

Рис 2.8. AD-диаграмма для скопления IC2391 (черные крестики) и потока (серые крестики). Данные о скоплении взяты из табл.2.1, данные о потоке – из табл.2.2.

Метод сходящейся точки – классический метод, основанный на использовании векторов собственных движений, описанный Смартом [179]. С помощью него можно оценить компоненты скорости (Vx, Vy, Vz), направленной вдоль осей x, y и z в галактической гелиоцентрической системе координат.

Формулы для построения AD-диаграммы можно увидеть в работах [39], [40]. Метод более подробно описан в разделе Приложении 4. Значение координат апекса, вычисленное этим методом для скопления IC 2391 по данным из таблицы 2.1, составляет (A_0, D_0) = (6.h12 ± 0.h004, −3.4 ± 0.3°). Апекс скопления, полученный по собственной выборке звезд (A_0, D_0) = (92.13 ± 0.7°, 4.7±1.5°.). Для звездного потока использовались данные из таблицы 2.2, и получено положение апекса (A_0, D_0) = (6.h21 ± 0.h007, −11.95895 ± 0.290°). На рисунке 2.8 представлена AD-диаграмма для скопления и потока, откуда видно, что направления движения в пространстве для скопления и потока практически совпадают.

Результаты, полученные двумя методами – сходящейся точки и AD-диаграммы, почти одинаковы.

2.1.7. Скопление – поток - ассоциация

В заключение мы приводим результаты рассмотрения комплекса ассоциация – поток – скопление. Этот комплекс включает следующие объекты: собственно скопление IC 2391; ассоциацию Argus [53]; поток - список звезд из Montes et al.[[140]. На Рис.2.9 показано построенное распределение звезд комплекса в плоскости XY галактического диска с векторами пространственных скоростей.

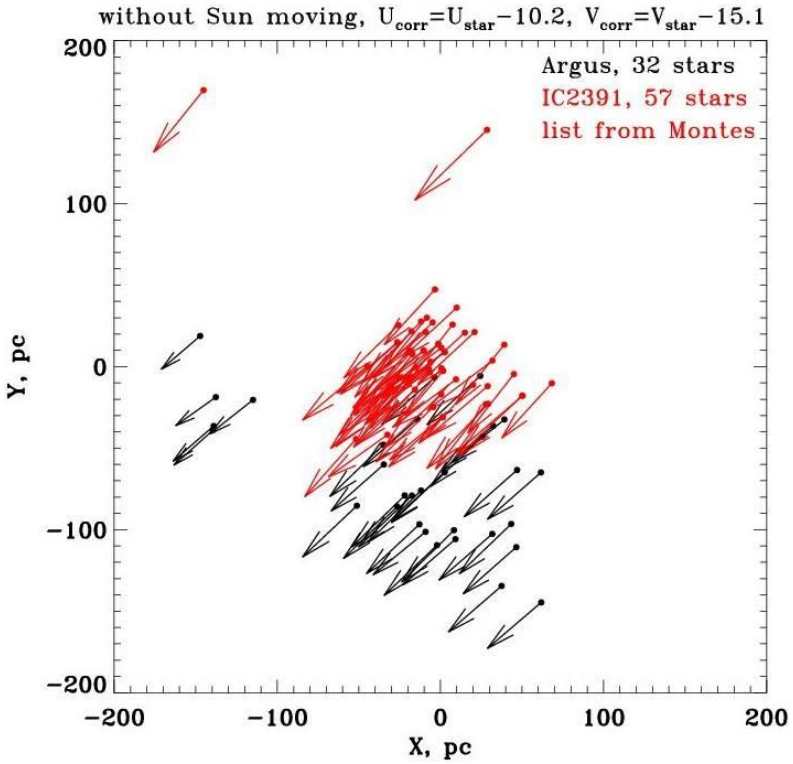

Рис.2.9. Ассоциация и поток – левая панель и скопление IC2391 (по данным GDR2) – правая панель. Для скопления U, V , W = (−19.545, −6.158, 0.012) км/с. Для потока U, V , W = (−21.110, −7.213, −6.653) км/с. Учитывая движение Солнца (относительно всех звезд, см. Аллен стр. 361): X=+15.1 – в направлении к галактическому центру, Y=+7.4– в направлении галактического вращения.

На плоскости XY распределения звезд ассоциации Argus – черные точки и потока[140] (красные точки). Векторы – пространственные скорости звезд с учетом движения Солнца относительно всех относительно близких звезд.

2.1.8. Заключение

Можно констатировать, что наши результаты подтверждают единую картину: скопление, как правило, имеет вытянутую форму по направлению к ЦГ.

В трехмерном пространстве скоростей поток IC 2391 (или движущаяся группа), состоящий из нескольких десятков звезд, кинематически связан с одноименным скоплением. Montes et al.[140] составили современный список членов потока. Он занимает обширную область неба, и его звезды рассеиваются почти по всему северному полушарию. Видимые размеры движущейся группы (в полосе V) – 60’ x 60’. Эгген [66], [68] предполагал, что звезды потока имеют неоднородное возрастное распределение. В публикации Montes et al.[[140] дана единая оценка для всех звезд в оценку 35 млн. лет. Данные для звезд скопления и потока представлены в таблице 2.1 и таблице 2.2, соответственно. Эти параметры использованы для определения положения апексов (например, [199], [72], [73]) скопления и потока, с использованием метода сходящихся точек (СР) и метода AD-диаграммы, а также изучения движения группы звезд в пространстве, определение пространственной формы и поиска места рождения и скопления, и потока.

Сводка определенных нами параметров приводится в Таблице 2.3. Также к результатам данной работы нужно отнести наш список звезд, входящих в состав РЗС IC 2391. По Gaia DR2 он построен впервые. Отметим, что пока он завышен по объему. Предстоит определить вероятности для отдельных звезд.

О возможной генетической связи потока и РЗС IC 2391 пока можно высказать положительное предположение, основанное на расчетах орбит с учетом приблизительно одинаковых возрастов объектов.

Таблица 2.3. Параметры скопления и потока IC2391, опеделенные в данном исследовании в сравнении с данными, плученными другими авторами.

Параметр	Результат	Данные
Число звезд скопления	39	Табл.4.1
Число звезд потока	56	Табл.4.2
$(A, D)_{CP}$	$6^h\ 17 \pm 0^h\ 004, -6^\circ 88 \pm 0.^\circ 381$	Табл.4.1
	$6^h\ 07 \pm 0^h\ 007, -5^\circ\ 00 \pm 0.^\circ 447$	Табл.4.2
(A_0, D_0)	$6\ ^h\ 12 \pm 0^h\ 004, -3^\circ 4 \pm 0.^\circ 3$	Табл.4.1
	$6^h\ 21 \pm 0^h\ 007, -11^\circ 895 \pm 0.^\circ 290$	Табл.4.2
	$5.\ ^h 83, -12.^\circ 44$	Montes et al. [140]
	$5.\ ^h 82, -12.^\circ 44$	Eggen [66]
U, V , W, км/с	−23.634, −14.449, −5.525	Табл.4.1
	−21.110, −7.213, −6.653	Табл.4.2
	−20.6, −15.7, −9.1	Montes et al. [140]
Координаты центра (x_c, y_c, z_c), пк	−57.84, 68.78, −119.66	Табл.4.1
	4.471, −0.552, 9.287	Табл.4.2
Пространственная скорость, км/с $(U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}$	28.25 ± 0.19	Табл.4.1
	23.28 ± 0.21	Табл.4.2
	27.453 ± 5.24	Montes et al. [140]
	30.00	Eggen [66]

Основные результаты этой главы опубликованы автором в работе

Postnikova, E. S.; Elsanhoury, W. H.; Sariya, Devesh P.; Chupina, N. V.; Vereshchagin, S. V.; Jiang, Ing-Guey The kinematical and space structures of IC 2391 open cluster and moving group with Gaia-DR2 Research in Astronomy and Astrophysics, Volume 20, Issue 2, id.016, 10 pp. (2020)

Каталог звезд входящих в состав скопления IC 2391, полученный автором опубликован в работе

Postnikova, E. S.; Chupina, N. V.; Vereshchagin, S. V. Catalog of stars in the open star cluster IC 2391 INASAN Science Reports, Vol. 3, pp. 336-341 2019

Положения, выносимые на защиту:

По данным каталогов GAIA DR2 получены физические характеристики скопления IC 2391: дисперсия скоростей, пространственные размеры, и

параметры скопления: расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость.

Составлен собственный каталог звезд – членов скопления IC 2391 с применением собственных фильтров отбора. Этот каталог сравнен с результатами других авторов и не противоречит им, но имеет определенные различия, связанные с применяемым методом.

Полученные параметры использованы для определения положения апекса скопления и потока, с использованием метода сходящихся точек (СР) и метод AD-диаграммы, а также изучения движения группы звезд в пространстве, определение пространственной формы и поиска места рождения и скопления, и потока.

В трехмерном пространстве скоростей поток IC 2391 (или движущаяся группа), состоящий из нескольких десятков звезд, кинематически связан с одноименным скоплением. О возможной генетической связи потока и РЗС IC 2391 пока можно высказать положительное предположение, основанное на расчетах орбит с учетом приблизительно одинаковых возрастов объектов.

2.2. Скопление Плеяды (115 миллионов лет)

2.2.1. Кинематика и физические параметры

2.2.1.1. Обзор данных

Рассеянное звездное скопление Плеяды (M45, Melotte 22 или NGC 1432) известно еще с древних времен. Эта звездная группа расположена в созвездии Тельца и содержит, по современным данным, около двух тысяч звезд [18]. Плеяды - одно из самых изученных рассеянных скоплений, но, тем не менее, оно остается перспективным.

Расстояние Плеяд было необычной загадкой для астрономического сообщества. На сегодняшний день существует несколько оценок расстояния до Плеяд от Солнца, полученных разными методами. Согласно данным Hipparcos,

расстояние Плеяды составляет 118 пк, в то время как большинство других источников дают значение в диапазоне от 130 до 140 пк (напр., [84]).

Используя метод движущегося скопления, Galli et al.[86] дали значение расстояния как 134,4 $^{+2,9}$+/-$_{2,8}$ пк., Melis et al. [135] определили расстояние 136,2 ± 1,2 пк на основе интерференции с длинной базой (VLBI). Браун и соавт.[24] с использованием данных из Gaia DR1 получили среднее значение параллакса как 7,45 ± 0,3 мс, что соответствует расстоянию около 134 ± 6 пк. Метод орбитального моделирования двойных звезд привел к значению расстояния до скопления 138,0 ± 1,5 пк [92]. Так же недавно метод двойных звезд дал расстояние 134,8 ± 1,7 пк [129]. Как можно заметить, большинство оценок расстояния дают схожие результаты, близкие к ∼135 пк. Однако van Leeuwen [197], основываясь на перекалиброванных параллаксах 53 звезд данных Hipparcos [74], получил расстояние 120,2 ± 1,9 пк, что отличается от приведенных выше оценок. Она заметно отличается от приведенных выше величин. Возможная причина связана, скорее всего, с используемым методом усреднения параллаксов.

Разница в измерении расстояний, полученная с использованием данных Hipparcos, может быть связана и со случайными ошибками и другими, пока что скрытыми от нас причинами, возникшими, вероятно, при математической обработке результатов данных о скоплении[79]. Для других объектов столь больших погрешностей не было выявлено.

2.2.1.2. Выборка звезд

Для определения параметров Плеяд использован актуальный на момент проведения исследования каталог TGAS, Gaia DR1[24]. На первом шаге взят список звезд Плеяд из [196], к данным которого мы присоединили лучевые скорости из RAVE DR5 [117] . Для сравнения результатов мы провели расчеты с данными, как из каталога Hipparcos [74] и так и из переобработанной версии Hipparcos–2 (HIP New) [196]. Поскольку нашей целью является получение наиболее точных параметров скопления на основе астрометрии, во всех случаях

мы использовали данные для одиночных звезд, исключив двойные и кратные системы, параметры которых могут быть искажены орбитальными движениями. Это также относится к лучевым скоростям. В случае обеих версий каталога Hipparcos мы взяли лучевые скорости из базы данных SIMBAD[177].

Список [197] включает 57 звезд, из которых он отбросил 4 звезды, которые являются двойными системами с высокой скоростью орбитального движения. Мы использовали этот список в качестве основы для поиска и расчета параметров скопления. Для 53 указанных выше звезд лучевые скорости (взятые из SIMBAD) найдены лишь для 48 звезд. Как уже упоминалось, для данных HIP и HIP New существует свой набор параллаксов и собственных движений, для каждого каталога отдельный, включающий их ошибки. Лучевые скорости в обоих случаях одинаковы, так как взяты из SIMBAD.

В таблице 2.5 перечислены звезды с астрометрическими параметрами, определенными для них в упомянутых каталогах и лучевые скорости. Таблица 2.5 показывает нашу выборку из 48 звезд с известными лучевыми скоростями и ее ошибками, взятыми из SIMBAD. Флаги d1 и d2, обозначенные знаком «+», представляют флаги двойственности звезды. Флаг d1 указывает на то, что звезда включена в каталог CCDM[61], а флаг d2– в Washington Double Star (WDS)[208]. Данные HIP используются для иллюстрации ошибок на AD-диаграмме. HIP содержит коэффициенты корреляции, необходимые для построения эллипсов ошибок.

Таблица 2.5. Астрометрические параметры для 48 звезд Плеяд из HIP. Звезды с отметкой * исползованы для расчета апекса.

HIP	HIP			HIP 2007			Vr±σVr, км/с	d1	d2	Ref Vr
	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год				
15341	8.50±1.33	22.79±1.43	-43.58±1.30	9.21±0.86	21.06±0.97	-43.68±0.70	-1.000±3.600			[89]
16407	7.62±1.15	22.07±1.30	-46.56±1.03	6.75±0.85	23.22±1.06	-46.91±0.82	-2.347±4.016	+	+	[117]
16423	8.44±1.45	24.13±1.80	-49.19±1.50	8.20±1.32	24.58±1.56	-47.50±1.44	2.150±2.460	+	+	[117]
16635*	9.62±2.18	23.02±2.81	-43.05±2.19	7.95±2.15	20.65±2.84	-49.58±2.45	3.800±0.400			[89]
16639*	8.11±1.47	19.64±1.80	-43.71±1.31	6.58±1.38	20.58±1.91	-44.51±1.48	5.923±1.952			[117]
16753*	9.98±1.58	23.92±1.76	-44.12±1.54	8.17±1.29	22.87±1.63	-44.60±1.65	5.600±0.400			[89]
16979*	5.86±1.77	20.33±1.87	-43.05±1.69	6.08±1.82	21.34±2.24	-42.16±2.17	6.800±0.780			[137]
17000	7.88±1.00	19.34±0.98	-45.29±0.90	8.12±0.51	19.88±0.63	-45.25±0.57	4.700±2.200			[89]
17034	6.87±1.08	21.36±1.24	-46.01±0.85	8.32±0.79	23.91±0.97	-45.11±0.74	3.000±3.000	+		[107]
17043	7.78±0.98	21.89±1.13	-41.60±1.10	7.33±0.61	20.57±0.81	-42.74±0.86	5.900±7.400			[107]
17091*	9.97±1.82	23.15±2.43	-46.14±1.64	11.82±1.94	26.82±2.74	-44.23±2.11	3.400±0.400			[89]
17125	7.69±1.51	19.70±1.76	-44.38±1.15	9.19±1.66	21.31±1.90	-46.36±1.67	0.014±2.835			[117]

HIP	HIP			HIP 2007			Vr±σVr, км/с	d1	d2	Ref Vr
	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	ϖ±σϖ, мсд	μα± μα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год				
17225	9.21±1.45	22.49±1.75	-44.32±1.46	8.10±1.06	21.78±1.42	-44.97±1.26	3.000±7.400			[107]
17245*	5.91±1.67	14.95±1.73	-46.42±1.50	6.64±1.51	14.67±1.80	-47.59±1.67	3.600±1.300			[89]
17289*	7.29±1.50	19.70±1.85	-41.66±1.45	7.65±1.50	20.04±1.89	-42.56±1.51	5.721±1.417			[117]
17316*	6.28±1.66	24.13±1.70	-47.88±1.22	7.27±1.59	23.97±1.78	-46.89±1.40	7.400±0.600			[89]
17401	9.48±1.11	20.36±1.15	-45.10±0.97	7.58±0.90	18.77±1.06	-46.36±0.95	-46.900±1.900		+	[89]
17489	9.75±1.05	20.73±0.96	-44.00±0.74	8.65±0.36	20.38±0.43	-44.81±0.37	5.500±0.900		+	[89]
17497*	9.76±1.29	22.71±1.41	-43.67±0.95	8.33±1.22	21.87±1.37	-43.18±1.08	6.230±0.630			[137]
17499	8.80±0.89	21.55±0.85	-44.92±0.64	8.06±0.25	20.84±0.28	-46.06±0.23	6.700±1.400		+	[89]
17511*	10.00±1.64	18.31±1.71	-42.76±1.18	10.67±1.37	16.52±1.46	-43.53±1.15	5.800±0.400			[89]
17527	8.87±0.89	19.03±0.85	-46.64±0.75	7.97±0.37	20.36±0.45	-46.52±0.41	4.800±0.800		+	[89]
17531	8.75±1.08	19.35±0.95	-41.63±0.76	7.97±0.33	21.24±0.38	-40.56±0.35	7.800±0.600	+	+	[89]
17547	8.27±1.14	21.08±1.86	-49.00±1.03	8.82±0.79	20.83±1.56	-48.34±0.92	-0.900±2.200			[89]
17552	11.21±1.09	19.02±1.02	-47.65±0.78	11.04±0.93	18.41±1.00	-46.82±0.87	5.900±2.900			[89]
17579	8.43±0.89	19.44±0.86	-45.36±0.67	8.77±0.54	20.18±0.70	-44.87±0.62	6.000±0.600		+	[89]
17583*	8.50±1.17	18.88±1.18	-46.40±1.13	8.00±0.89	19.00±0.99	-47.23±0.94	6.500±2.000			[89]
17588	9.21±0.92	19.83±0.92	-44.38±0.67	8.58±0.56	19.88±0.73	-44.37±0.65	6.900±1.300		+	[89]
17608	9.08±1.04	21.17±0.87	-42.67±0.61	8.58±0.37	21.13±0.35	-43.65±0.27	6.200±2.000	+	+	[206]
17625	4.73±1.48	20.07±1.50	-46.07±1.16	4.42±1.48	20.91±1.65	-45.13±1.38	4.000±4.600			[89]
17664	6.66±0.99	21.47±0.93	-45.43±0.70	7.66±0.66	22.73±0.84	-45.00±0.85	9.100±0.800	+	+	[89]
17692*	8.35±1.00	19.78±0.97	-43.97±0.65	8.90±0.77	18.56±0.75	-44.31±0.60	4.900±0.800			[89]
17702	8.87±0.99	19.35±0.82	-43.11±0.59	8.09±0.42	19.34±0.39	-43.67±0.33	5.400±1.200	+	+	[89]
17704	9.05±0.97	17.84±0.96	-44.94±0.67	9.42±0.75	18.33±0.87	-44.69±0.74	5.000±3.000			[89]
17729	7.61±1.17	19.34±1.05	-46.91±0.79	9.68±0.93	19.26±0.96	-46.75±0.91	5.100±2.500			[89]
17776*	9.64±0.91	19.14±0.84	-46.80±0.59	8.45±0.39	17.99±0.39	-46.57±0.32	7.600±0.500			[89]
17851	8.42±0.86	18.71±0.76	-46.74±0.58	8.54±0.31	18.07±0.30	-47.20±0.27	5.100±0.200	+		[89]
17862	8.02±0.91	18.34±0.86	-44.53±0.67	8.18±0.59	17.42±0.65	-45.38±0.52	7.200±0.900	+	+	[89]
17892	10.12±1.04	17.80±1.04	-45.00±0.79	8.30±0.66	18.52±0.80	-42.87±0.65	3.800±3.000			[89]
17900*	8.58±0.93	16.50±0.86	-44.53±0.65	8.72±0.60	16.73±0.63	-44.82±0.53	9.500±0.400			[89]
17921	10.14±0.90	23.88±0.88	-45.90±0.69	8.86±0.42	24.31±0.48	-44.46±0.39	4.100±3.200			[89]
17999*	9.83±1.00	16.80±0.94	-45.76±0.76	9.93±0.75	18.86±0.83	-43.51±0.69	4.500±0.900			[89]
18050*	7.56±1.47	20.19±1.42	-45.36±1.04	7.65±1.34	21.84±1.40	-45.50±1.08	9.200±1.800			[89]
18091*	7.71±1.89	13.35±2.65	-46.20±2.53	6.16±1.42	14.35±2.07	-45.32±1.95	7.600±0.400			[89]
18154	8.57±1.57	15.43±1.74	-45.83±1.30	10.13±1.66	15.64±1.99	-46.22±1.66	8.000±7.400			[107]
18431	8.66±1.53	16.99±1.28	-47.06±1.17	7.18±1.48	16.59±1.22	-47.78±1.08	13.000±5.100			[107]
18955*	6.13±1.42	19.18±1.70	-45.37±1.28	5.88±1.26	20.08±1.54	-46.67±1.12	5.040±1.650			[137]
19171*	6.60±0.85	22.13±0.91	-50.18±0.79	7.76±0.36	21.88±0.39	-52.34±0.33	-2.000±2.000			[206]

Мы не использовали звезды, имеющие хотя бы один из флагов “двойная звезда” (d1, d2) в таблице 2.5., в результате чего у нас осталось 33 звезды. Звезда HIP 17401 была исключена из-за большого значения лучевой скорости (Vr=-46,900 км/с), явно выходящего за пределы трех сигм от среднего значения Vr по нашей выборке. Наконец, мы наложили ограничение в 2 км/с на ошибку лучевой скорости, что уменьшило нашу выборку до 19 звезд, но увеличило ее качество. Для определения экваториальных координат апекса были использованы эти 19 одиночных звезд с наиболее надежными данными из таблицы 4.4

Мы приводим список из 35 звезд и их параметров в Таблице 2.6, для которых нам удалось присоединить лучевые скорости из RAVE DR5[117]. Если

в каталоге было приведено более одного измерения лучевой скорости, то выбиралось значение с наименьшей относительной ошибкой.

Таблица 2.6. Астрометрические параметры для 35 звезд Плеяд из каталогов TGAS (астрометрия) и RAVE DR5 (лучевые скорости). Звезды с отметкой * исползованы для расчета апекса.

TGAS	RA	DEC	ϖ±σϖ, мсд	μα±σμα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	d1	d2
69335615566555904	52.81657	+25.25527	7.57±0.34	22.687±0.058	-46.666±0.029	-2.347±4.016	+	+
61519668439604992	52.86820	+21.82172	7.81±0.26	24.116±0.102	-47.109±0.049	2.150±2.460		+
61554646652580736	53.27437	+22.13406	7.44±0.41	22.813±1.105	-46.278±0.562	0.593±2.512		
69250231614573056*	53.50763	+24.88072	7.43±0.28	21.268±0.167	-44.702±0.098	3.389±1.319		
68097015715726208*	53.53056	+24.34426	7.22±0.24	21.637±0.135	-45.051±0.066	5.923±1.952		
67618281484716544	53.88216	+22.82340	7.67±0.24	21.481±0.148	-45.391±0.084	109.263±2.243		
68444873706967808*	54.73703	+24.56963	7.26±0.23	20.140±0.282	-43.468±0.156	4.952±1.743		
65113559634339200*	54.92166	+23.29070	7.23±0.23	21.244±0.196	-43.681±0.097	3.921±1.802		
71371258264471424	55.01294	+27.74033	7.13±0.26	21.011±0.142	-44.371±0.093	0.014±2.835		
70941383577307392	55.02405	+26.19617	7.87±0.24	21.917±0.740	-49.352±0.449	-8.191±2.534		
68334235349446528	55.12810	+24.48713	7.27±0.48	23.272±1.463	-44.394±0.752	3.879±2.355		
70190245337962368*	55.14953	+26.15123	6.64±0.25	18.568±0.815	-40.566±0.338	1.452±1.703		
65150943028579200*	55.36604	+23.70815	7.72±0.24	20.093±0.753	-45.571±0.371	4.093±1.578		
70108469159560448*	55.40077	+25.61914	7.66±0.29	16.882±0.107	-43.604±0.064	2.210±1.373		
65027591568709632*	55.51978	+22.85837	7.36±0.25	21.049±0.138	-44.653±0.075	5.721±1.417		
64317994252099840*	55.60007	+21.47329	7.84±0.23	20.991±0.150	-47.972±0.094	6.298±1.060		
64449729487990912*	55.60019	+22.42095	7.33±0.24	19.649±0.195	-44.357±0.094	4.791±1.855		
64879398017459072*	56.21357	+23.26874	7.68±0.29	20.520±0.092	-44.280±0.060	5.639±1.448		
64739244643463552*	56.24559	+22.03227	6.98±0.29	18.675±0.111	-43.663±0.061	6.491±1.403		
65275497080596480	56.27733	+24.26332	8.14±0.46	19.282±0.508	-42.438±0.559	6.760±2.852		
70242781377368704*	56.28429	+26.29232	7.58±0.48	19.650±0.173	-45.539±0.103	1.169±1.855		
69872039800655744	56.49651	+25.39840	7.57±0.34	20.288±0.054	-45.367±0.035	11.350±4.254		
69964879813013248	56.83709	+25.52565	7.63±0.30	18.481±0.797	-44.980±0.442	2.653±2.232		
64898364591843712	56.84551	+22.92192	6.62±0.66	21.620±0.054	-47.038±0.034	6.791±2.549		+
69948249699646720	56.94524	+25.38551	7.37±0.28	19.469±0.070	-45.724±0.049	-1.840±3.861		
64933755122821120	57.18298	+23.25963	7.01±0.30	19.376±0.431	-44.386±0.303	4.465±2.279		
66980358578521856*	57.47057	+25.64726	7.17±0.24	18.072±1.124	-45.697±0.609	2.535±1.833		
64924409273987712*	57.48549	+23.21844	6.61±0.40	20.067±1.469	-42.796±0.373	4.336±1.495		
66558249192653952	57.48590	+24.34881	7.41±0.35	19.031±0.322	-44.427±0.330	8.457±9.470		
66960258131598720*	57.57373	+25.37938	7.35±0.25	19.397±1.011	-45.891±0.501	2.957±1.201		
64172034082472448	57.58886	+23.09616	7.20±0.61	20.869±2.236	-46.430±0.505	4.174±2.344		
63730305286697600*	57.92546	+21.66817	7.22±0.27	18.369±1.411	-43.122±0.657	3.654±1.329		
66570549979009280	58.34887	+24.06485	7.33±0.30	19.792±1.035	-45.735±0.595	10.642±3.779		
65819961494790400	52.81657	+24.07550	7.71±0.26	19.458±0.872	-45.686±0.447	-3.823±5.458		
65754128236100096	52.86820	+23.78413	6.64±0.24	22.523±1.351	-41.646±0.550	44.166±3.392		

Среди одиночных звезд в таблице 2.6 есть две звезды с лучевыми скоростями, значительно превышающими среднее значение для скопления Плеяды. Это Gaia 5754128236100096 (Vr = 44,166 км/с) и Gaia 67618281484716544 (Vr = 109,263 км / с). Для 13 звезд погрешность лучевой скорости превышает 2,0 км/с. Эти 15 звезд и 3 двойные звезды исключены из

наших расчетов. В конечном итоге использовалось 17 одиночных звезд из таблицы 2.6.

Итого, нами было создано 3 списка: по HIP и HIP New с лучевыми скоростями из SIMBAD одинаковыми для обоих списков и список из наиболее новых, точных и более однородных данных по TGAS с лучевыми скоростями из RAVE. Это было сделано для того, чтобы сравнить как старые данные между собой и определить параллакс по ним, сравнивая результат со старым и улучшенным каталогом HIP, а так же посмотреть насколько изменились параметры скопления с появлением новых данных TGAS и оценить дисперсию скоростей по всем трем наборам данных.

2.2.1.3. Кинематический анализ РЗС Плеяды

Используя данные Таблицы 2.5 и Таблицы 2.6, рассчитано положение апекса скопления, параметры эллипсоида скоростей, пространственная форма.

Мы изучаем кинематику Плеяды, используя данные HIP, HIP 2007 и TGAS. С использованием этих наборов данных, было получено положение апекса скопления. Звезды, связанные с рассеяным скоплением, имеют схожие параметры, такие как возраст, расстояние, кинематика и химический состав. Наша цель - определить точку, в которой движение звезд в скоплении будет сходиться, то есть апекс Плеяд.

Положения апексов отдельных звезд скопления (AD диаграмма) позволяют судить так же о возможной кинематической неоднородности скопления. Детальное сравнение положений апексов позволяет проводить поиск родственных звездных систем.

Для этого могут быть использованы два следующих метода:

1. CP-метод

2. Метод AD-диаграммы

Результаты, использующие разные входные данные и основанные на двух независимых методах, приведены ниже. Оба метода требуют знания лучевой скорости и параллакса (их описание и особенности описаны в Приложениях).

Для определения апекса СР-методом были использованы 19 звезд из каталога HIP 2007 (номера HIP, отмеченные звездочками в таблице 2.5) и 17 звезд из TGAS.

Точность полученных индивидуальных апексов звезд показывают эллипсы ошибок. Для их построения необходимо знать коэффициенты корреляции между астрометрическими параметрами. Полная ковариационная матрица есть в каталогах HIP и TGAS, но ее нет в HIP 2007. По этой причине эллипсы ошибок могут быть построены на AD-диаграмме для данных HIP и TGAS, но не для HIP 2007, что и показано на панелях (b) и (c) на рис. 2.10.

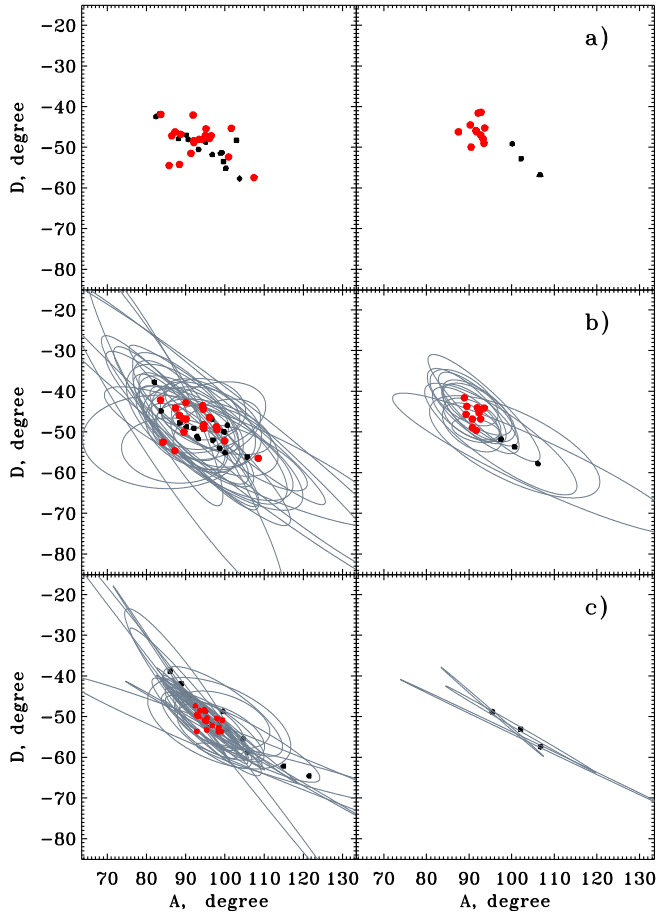

Рис.2.10. AD-диаграммы основаные на различных данных: (a) HIP New, (b) HIP и (c) TGAS + RAVE DR5. На левой панели для всех трех наборов данных показаны одиночные звезды, а на правой панели - двойные и кратные звезды. Красными точками обозначены звезды, ошибки лучевых скоростей которых не превышают 2 км/с. Эллипсы ошибок нанесены на панели (b) и (c), то есть для данных HIP и TGAS. На левой панели (c) TGAS не показаны звезды TGAS с номерами 67618281484716544 с Vr = 109.263 км / с и 65754128236100096 с Vr =

44.166 км/с, положение которых выходит за пределы рисунка. Также на левой панели (c) количество одиночных звезд с σVr> 2 км/с составляет 13, а не 15.

На рис. 2.10 представлены AD-диаграммы, построенные по разным астрометрическим данным. Отдельно построена AD-диаграмма, в которой используются только одиночные звезды (левые панели) и отдельно, где присутствуют двойные и кратные системы (правые панели), что демонстрирует разницу в результатах, при данных астрометрии не отягощеных орбитальными движениями в двойных и кратных системах. В конечном итоге во всех наших расчетах использовались только одиночные звезды. На верхней панели рис. 2.10, обозначенной как (a), показаны результаты, основанные на параллаксах и собственных движениях, взятых из HIP2007 (таблица 2.5). Средняя панель (b) показывает результаты, полученные из старых данных HIP (Таблица 2.5). Нижняя панель (c) содержит AD-диаграмму, полученную по данным TGAS (таблица 2.6).

Точки красного цвета на Рис.2.10 отображают звезды, ошибки лучевых скоростей которых не превышают 2 км/с. Как упоминалось ранее, только эти звезды использовались для расчета координат апекса скопления. Лучевые скорости для обеих панелей идентичны. На нижней панели рисунка 2.10 показан основной результат, представляющий диаграмму, построенную с использованием астрометрических параметров Gaia и лучевых скоростей RAVE DR5.

По причине того, что точность данных для лучевых скоростей гораздо хуже, чем остальных астрометрических параметров, AD-диаграмма (для данных TGAS+RAVE DR5), представленная на рис. 2.10, имеет вытянутую форму. Она растягивается как по положению отдельных точек, так и по областям эллипсов ошибок. Очевидно, что результаты по данным Gaia более точны, и мы будем рассматривать их как основной результат этой работы.

Результаты расчета положения апекса с использованием данных, перечисленных в таблице 2.5: HIP New (используется n = 19) и таблице 2.6 (используется n = 17) представлены в таблице 2.7.

Используя данные HIP New, мы получили

(ACP, DCP) = (95◦ .73 ± 3 ◦ .56, −50◦ .44 ± 8 ◦ .84) CP-методом

(A0, D0) = (93 ° 0,06 ± 5 ° 0,95, -48 ° 0,42 ± 4 ° 0,02) с использованием AD-диаграмм.

По данныым TGAS и RAVE DR5:

(ACP, DCP) = (92◦ .52 ± 1 ◦ .72, −42◦ .28 ± 2 ◦ .56) CP-методом

(A0, D0) = (95◦ .59 ± 2 ◦ .30, −50◦ .90 ± 2 ◦ .04) с использованием AD-диаграмм.

Результаты обоих методов AD-диаграммы и CP практически одинаковы. Мы показали, что кинематические параметры, полученные с использованием данных Gaia DR1 (TGAS), более надежны, чем другие наборы данных. Но этот набор данных с комбинацией Gaia DR1 и RAVE DR5 не содержит слишком много звезд (35 звезд, Таблица 2.6).

Наши результаты определения координат апекса хорошо согласуются с результатами других авторов (см.например, [86] и [131]), которые также упомянуты в таблице 2.7. Имеется расхождение с результатами, полученными в [140], что могло быть связано с тем, ими использовались данные ESA HIP 1997 [74].

Таблица 2.7 содержит координаты апекса скопления со среднеквадратической ошибкой (σA0, σD0), полученные нами и другими авторами для сравнения. Формулы для (A0, D0) и эллипсов ошибок даны в разделе ниже.

AD-диаграмма скопления Плеяды показывает кинематическую однородность скопления. Значения апекса, рассчитанные с использованием различных данных, существенно не различаются как по положению, так и по дисперсии. Сравнение результатов позволяют выделить значения, ошибки которых минимальны – по GDR2. Наши результаты наглядно показывают, что данные Gaia позволили увеличить точность определения апекса Плеяд почти в 2 раза, однако точность могла быть и больше, если бы у нас были более точные значения лучевых скоростей.

К сожалению, данные Gaia DR1 не дали преимущества с точки зрения количества звезд, являющимися членами Плеяд (таблица 2.6). Это сделало невозможным изучение тонкой структуры с помощью AD-диаграммы и выявлениях возможных кинематических групп внутри скопления.

Точки на нижней панели на Рис. 2.10 распределены более компактно по сравнению с двумя верхними панелями, но не во всех направлениях, то есть вдоль наклонной линии разброс остается большим. Точки с ошибками лучевых скоростей, превышающими 2 км/с, расположены на трассах диаграмм, которые находятся дальше всего от среднего положения апекса.

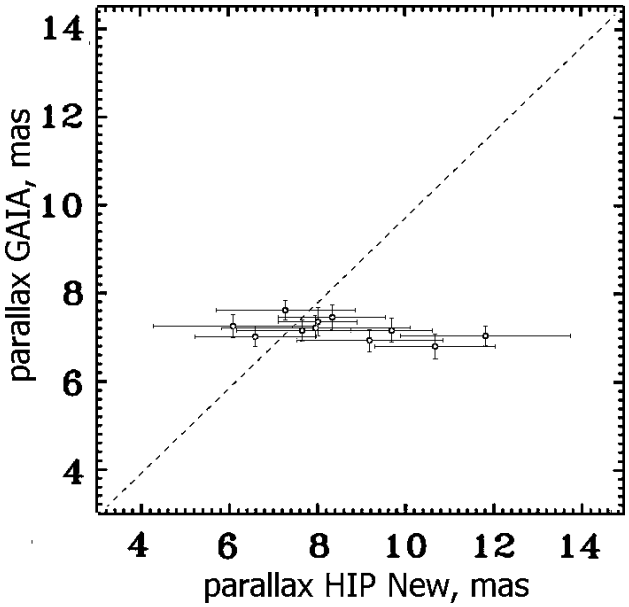

Рис.2.11. Сравнение параллаксов, взятых из HIP New и TGAS.

На рис.2.11 представлено сравнение параллаксов, взятых из HIP New и TGAS. Видно, что для некоторых звезд существует значительная разница между значениями параллаксов, определенными с использованием HIP 2007 и TGAS. Разброс точек и отдельно взятые ошибки параллакса из каталога HIP 2007 в несколько раз превышают соответствующие значения для данных TGAS. Также отличаются значения для среднего параллакса. Для наших результатов разница в значении параллакса (рис. 2.11) привела к различиям в координатах апекса, но его отклонение не сильно велико и находится в пределах 1°, как видно из таблицы 2.7.

Параллакс Плеяд по нашим данным. Мы использовали данные TGAS из таблицы 2.6 для определения среднего параллакса отдельных звезд. Для n = 17 одиночных звезд в Плеядах среднее значение параллакса было преобразовано в среднее гелиоцентрическое расстояние составившее 136,8 ± 6,4 пк.

Данное определение расстояния до Плеяд с использованием TGAS + RAVE DR5 хорошо согласуется с результатами других авторов, но значение расстояния отличается, когда если мы берем данные HIP, приведенные в таблице 2.5. Однако высокая точность TGAS не использовна с желаемой эффективностью для определения кинематических параметров. Причина в том, что точность определения лучевых скоростей еще не была сопоставима с астрометрической точностью Gaia для используемого здесь каталога RAVE DR5.

Таблица 2.7. Наши кинематические параметры скопления Плеяды, соответствующие данным HIP New (19 звезд) и TGAS + RAVE DR5 (17 звезд) и результаты, полученные другими авторами.

Параметр	Значение	Данные
Vx,Vy,Vz, км/с	−1.07,20.26,−23.26	Таблица 2.5
Vx,Vy,Vz, км/с	−1.94,19.98,−24.70	Таблица 2.6
ACP,DCP,град	95.73±3.56,	Таблица 2.5
ACP,DCP, град	−42.28±2.56	Таблица 2.6
A0,D0, град	−48.42±4.02	Таблица 2.5
A0,D0, град	−50.90±2.04	Таблица 2.6
A0,D0, град	89.7, −35.15	Montes et al.[140]
ACP,DCP, град	92.49±5.4, −47.87±5.3	Makarov and Robichon [131]
A0,D0, град	92.9±1.2, −49.4±1.2	Galli et al.[86]
V, км/с	35.36	Таблица 2.5
V, км/с	26.72	Таблица 2.6
V, км/с	26.5	Montes et al.[140]
d, пк	124.5±24.1	Table1
d, пк	136.8±6.4	Table2
d, пк	134±6	Brown et al.[24]
d, пк	132.0±2.0	Munari et al.[142]
d, пк	134.6±3.1	Soderblom et al.[181]
d, пк	122.2±1.9	van Leeuwen [196]
d, пк	134.4+2.9−2.8	Galli et al.[86]
d, пк	134.8±1.7	Mädler et al.[129]
Модуль расстояния(m−M)	5.48±0.32	Таблица 2.5

Параметр	Значение	Данные
Модуль расстояния(m−M)	5.68±0.12	Таблица 2.6
Модуль расстояния(m−M)	5.6	Munari et al.[142]
Модуль расстояния(m−M)	5.65±0.05	Soderblom et al.[181]
Модуль расстояния(m−M)	5.44±0.03	van Leeuwen [196]
U,V,W, км/с	−6.38±0.32,−26.91±2.04,−13.69±0.16	Таблица 2.5
U,V,W, км/с	−5.39±0.12,−28.29±1.36,−13.53±1.16	Таблица 2.6
U,V,W, км/с	−11.6,−21.0,−11.4	Montes et al.[140]
U,V,W, км/с	−6.2,−28.7,−14.7	Galli et al.[86]
Пространственная скорость V,км/с	30.86±3.72	Таблица 2.5
Пространственная скорость V,км/с	32.14±2.24	Таблица 2.6
Пространственная скорость V,км/с	32.9±0.3	Galli et al.[86]

2.2.1.4. Пространственная форма Плеяд

Пространственная форма скопления Плеяды, как оказалось, далеко не сферическая[124]. Предполагается, что большинство скоплений рождаются, имея сферическую форму, но взаимодействуя с приливными силами галактики, постепенно изменяют свой внешний вид. На эти изменения так же влияют и внутренние процессы, происходящие в скоплении. В результате обмена энергиями между звездами, происходит сегрегация по массе членов скопления, так как система стремится к равнораспределению энергий, в результате чего более тяжелые объекты переходят на низкие орбиты, становятся более медленными, а менее массивные обретают большую скорость. Однако, при взрыве первых сверхновых звезд может произойти выброс более массивных звезд из скопления, так что при наблюдении мы не обязательно будем видеть описанную в теории сегрегацию в чистом виде.

Из-за внутренних и внешних процессов скопление становится более рыхлым, так что вокруг него образуется обширная корона из легких звезд, которые постепенно будут покидать его через точки Лагранжа L1 и L2. В этих точках ускорение, вызванное силой тяжести скопления, равно ускорению, вызванному сочетанием галактической гравитации и центробежной силы. В итоге система образует два шлейфа – отстающий и опережающий. Звезды, выходящие через L1, имеют меньшие галактоцентрические радиусы и, таким образом, движутся в галактике быстрее, чем скопление, которое создает

ведущий поток; звезды, уходящие через L2, медленнее скопления и, следовательно, следуют за ним.

Вылетевшие звезды движутся рядом со скоплением, сохраняя схожие с ним характеристики движения, однако, чем дальше звезда находитьься от центра скопления, тем больше может отличаться ее пространственная скорость от его средней скорости [37]. Со временем звезды приливных шлейфов будут все дальше отдаляться от скопления, растворяясь в звездах поля Галактики. Само скопление при этом, все больше вытягиваясь и оставляя свои члены вокруг орбиты, замкнет кольцо вокруг центра галактики, полностью рассеявшись. Длительность этой стадии составляет $\sim 10^{10}$ лет [219]. Даже после того, как скопления распадутся, их звезды будут сохранять долгое время схожую кинематику и иметь общий химический состав. Некоторые волосоподобные структуры, ранее принадлежавшие единым звездным комплексам, уже обнаруживаются в Галактике [219].

Долгое время на уровне наблюдений обнаруживались хвосты у шаровых скоплений (например, Паломар 5 [146]) или у разрушающихся спутников галактик (см., напр., [149]). У РЗС они гораздо меньше, чем у ШС, поэтому их было сложно обнаружить до недавнего времени. Также одной из причин является то, что РЗС в основном находятся в диске Галактики, где плотность звезд в целом высока. Кроме того, возможные столкновения с массивными молекулярными облаками могут разрушить части хвостов [88], к тому же возможен частичный распад из-за взаимодействия со спиральными рукавами.

Однако, если судить по результатам моделирования, приливные шлейфы в той или иной степени должны прослеживаться у многих близких скоплений, таких как Гиады, Плеяды, Ясли, Альфа Персея, Волосы Вероники, NGC 188 и IC 2602 (см. работы [36], [37] и [108]). Модели показали, что форма приливных хвостов и их протяженность зависит от возраста скопления. Обычно они должны быть хорошо видны у старых скоплений. Достаточно старое скопление Гиады как раз и стало первым РЗС, у которого были обнаружены приливные хвосты уже с использованием данных из Gaia Data Release 2 сразу двумя

группами авторов Roser et al [165] и Meingast & Alves[134]. Полученные по наблюдениям результаты хорошо совпали с данными моделирования [108], особенно для опережающего хвоста. Однако шлейфы оказались короче, чем в модели, что, возможно, связано с их разрешением в результат взаимодействия с каким-то массивным объектов в галактике.

За тем последовал ряд публикаций, где приливные хвосты были обнаружены вокруг других рассеянных звездных скоплений. Были найдены приливные структуры у скопления Альфа Персея[175], Ruprecht 147 [175,209], Волосы Вероники [83, 189] и Ясли [166]. Скопление Ясли достаточно схоже со скоплением Гиады, возможно когда-то они даже являлись единой структурой [67], так что очевидно, что оно тоже должно уже иметь шлейфы. Так же как и для Гиад, положение приливных хвостов хорошо совпало с моделью [108].

Возраст перечисленных скоплений колеблится от 590 млн лет (Ясли, [91]) до 4.8 млрд лет (Ruprecht 147 [110]), что говорит о том, что приливные хвосты характерны для почти всех старых скоплений. Однако у массивного молодого скопления (возраст log t = 7.7 [110]) Альфа Персея они тоже прослеживаются, что дает простор для размышлений.

Скопление Плеяд – достаточно близкий к нам объект (135.6 пк [27]) и достаточно хорошо изученный. По послдним оценкам он содержит 992 звезды[27], однако это не является придельной оценкой количества членов – по данным SIMBAD скопление содержит более 4000 с вероятностью >= 90% (4043 членов из 7970 библиографических ссылок) по данным 7970 библиографических ссылок. Это достаточно молодое скопление (log t=8.15 [110]), но по результатам моделирования хвосты могут возникать и в этом возрасте, так как все зависит от того, с какими изначальными параметрами родилось скопление.

Lodieu et al.[124] в своем 5D обзоре близких скоплений при пересмотре членства звезд по данным кинематики и фотометрии Gaia DR2 обнаружили хвостоподобные структуры у скопления Ясли и Плеяды, однако в случае Плеяд авторы искусственно ограничили поиск членов трехкратным приливным

радиусом (то есть 34,8 пк). Мы, в свою очередь, хотим, не ставя никаких ограничений, определить истинную длину хвостов и сравнить их с расчетами.

2.2.2. Приливные шлейфы

2.2.2.1. Отбор данных

Все приливные хвосты, найденные за последнее время различными авторами, были найдены с использованием каталога Gaia DR2. Полнота этого каталога и точность данных так же хорошо подходят нашей задаче. Мы используем данные каталога, следуя процедуре отбора наиболее качественных измерений, описанных для данных Gaia DR2 в [122], часть. 4.3 и Приложении C. И приняв значений перенормированной ошибки единицы измерения RUWE<1.4, которая отбрасывает звезды, которые в силу своей неразрешенной двойственности или проблем с измерением астрометрических параметров, не подходят под модель одиночной звезды.

Мы взяли параметры скопления Плеяды, согласно каталогу [27], по данным которого координаты центра скопления RA, DEC = (056.601,+24.114) град, собственные движения скопления $\mu\alpha$, $\mu\delta$ = (20.077 -45.503) мсд/год, значение параллакса ϖ =7,346 мсд. Лучевая скорость взята из работы Galli et al. [86] и равна 5.54±0.10 км/с. Откуда координаты центра в галактических барицентрических координатах: (Xc, Yc, Zc) =(-120.8, 29.1, -54.3) пк, где ось X направлена в направлении галактической долготы $l = 0^\circ$, Y — в направлении $l = 90^\circ$ и Z - к Северному полюсу Галактики. Компоненты пространственной скорости: Uc, Vc, Wc = (6.71, -28.54, -14.18) км/с, где ось U – направлена к антицентру Галактики, V – на $l = 180^\circ$ и W – к Северному полюсу Галактики.

После того, как мы определили положение скопления в прямоугольной галактической барицентрической системе координат, мы можем очертить область поиска звезд приливных шлейфов. Мы захватываем дополнительный объем пространства вокруг скопления с областью 200 парсек. Эта область взята с большим запасом, в то время как данные симуляции N-тел в статье Чумака и Расторгуева [35] показывают, что звезды Плеяд не отстали от центра скопления

далее чем на 100 парсек в обе стороны. С другой стороны, примерный рост хвостов составляет 1,2 пк/1 млн лет, что говорит о том, что шлейфы могут быть и больше 100 пк [34]. Такой запас даем уверенность в том, что шлейфы скопления будут точно не упущены.

2.2.2.2. Метод

Мы использовали метод сходящийся точки, описанный ван Лювеном в [197], который использовали Roser et al [165] для поиска хвостов Гиад и Яслей. Для Плеяд этот метод еще является применимым, но уже для более удаленных скоплений он будет практически не результативен, так как чем дальше от нас скопление, тем меньше его собственные движения и тем больше ошибки определения параллакса. Этот метод хорош тем, что применим в условиях недостатка лучевых скоростей. Суть заключается в анализе разницы между прогнозируемой скоростью членов скопления и наблюдаемой.

Исходя из условия сходимости векторов собственных движений, для каждого вектора (заданного в пространстве) находят угол поворота такой, что одна ось направлена к точке сходимости (V∥), а другая ей перпендикулярна (V⊥). При повороте вектора на эти углы, и получается "назначенный" вектор – идеальный случай, если бы у звезд не было внутренней диспресии, и они двигались все одинаково параллельно. При сравнении назначенного и наблюдаемого вектора, делается вывод о схожести векторов назначенного и наблюдаемого. Если они близки, то их скорости направлены примерно в одном направлении в картинной плоскости. Также, наблюдаемые перпендикулярные составляющие собственного движения могут быть дополнительно исследованы для определения дисперсии скоростей скопления. Более подробно о методе написано в статье van Leeuwen [197] и в Приложении 4.

В результате применения метода мы получили гистограмму распределение скоростей звезд в плоскости тангенциальных скоростей («$V\parallel_{obs}$ - $V\parallel_{pred}$», «$V\perp_{obs}$») см. рис 2.12 (левая панель). Нулевая точка - это заданное

значение параметров Плеяд из изначальных данных о скоплении. Ось Y указывает в направлении сходящейся точки.

Положение звезд, отобранных по скоростям методом сходящейся точки, мы отобразили на рис.2.12 (правая панель). Видно, что скопление вытянуто и имеет два небольших хвоста. Кроме того, в выделенной области наблюдается еще одно небольшое сгущение звезд - сюда так же попадает и кусок от шлейфа еще более молодого скопления альфа Персея.

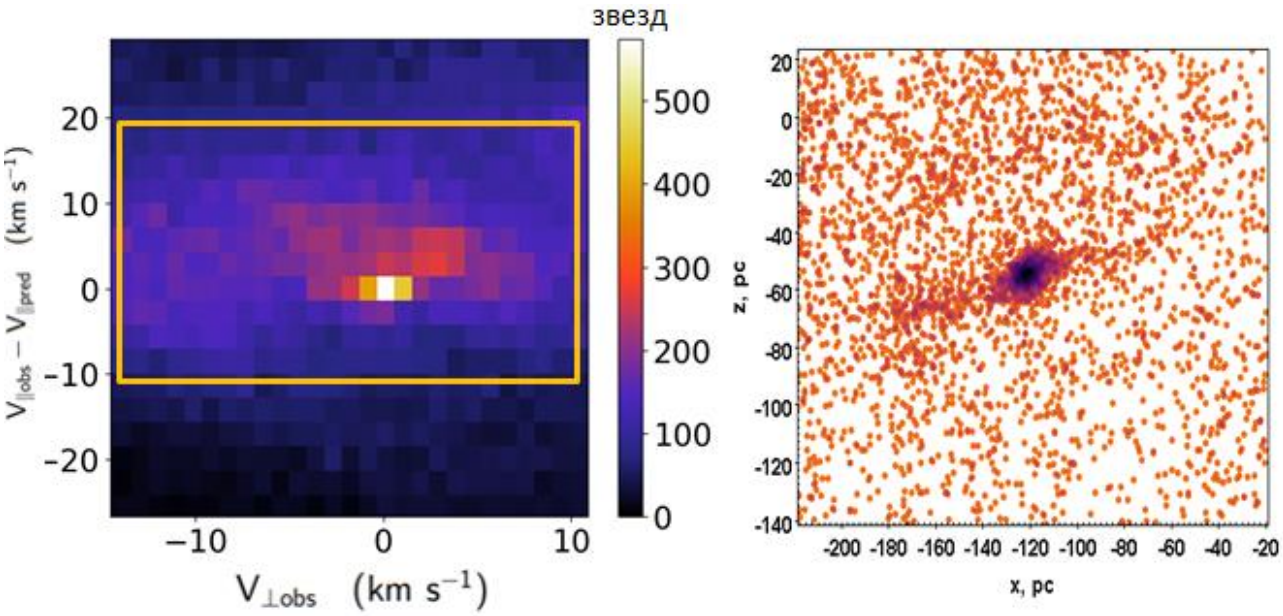

Рис.2.12 Левая панель: Распределение скоростей звезд в плоскости тангенциальных скоростей (Vobs - V‖pred, Vobs). Нулевая точка - это прогнозируемое значение пространственноо движения Плеяд. На цветной шкале указана плотность звезд на пиксель (пиксель равен 1 км/с). Желтым прямоугольнием очерчена область пространства, в которой могут находится хвосты. Правая панель: распределение звезд в плоскости Y, X после отбора на плоскости тангенциальных скоростей. Уплотнение звезд сверху – часть хвостов скопления Альфа Персея.

2.2.2.3. Отбор по пространственным скоростям

Чтобы отобрать наиболее надежные звезды, принадлежащиее хвостам Плеяд скопления, взяты только те звезды, чьи лучевые скорости известны,

чтобы наиболее полно рассмотреть их движение в пространстве. Мы принимаем, на основе данных по звездам скопления из Ludeu et al.[124], что дисперсия скоростей среди звезд скопления и шлейфов должна не превышать 10 км/с. Такая несколько завышенная оценка берется из-за больших ошибок в определении лучевых скоростей, что может отрицательно повлиять на количество звезд, выбранных по другим параметрам. На рис.2.13 изображены векторы пространственных скоростей UVW, отображаемые на соответствующей плоскости галактических координат. Видно, что члены шлейфов имеют общее направление в пространстве, относительно звезд поля, которые направлены хаотично (Рис.2.14).

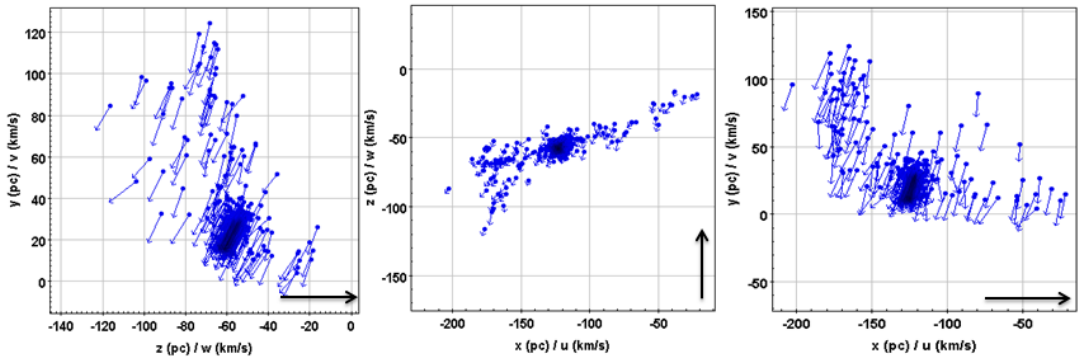

Рис.2.13. Движение звезд Плеяд в галактической плоскости. Черная стрелка отображает направление на галактический центр.

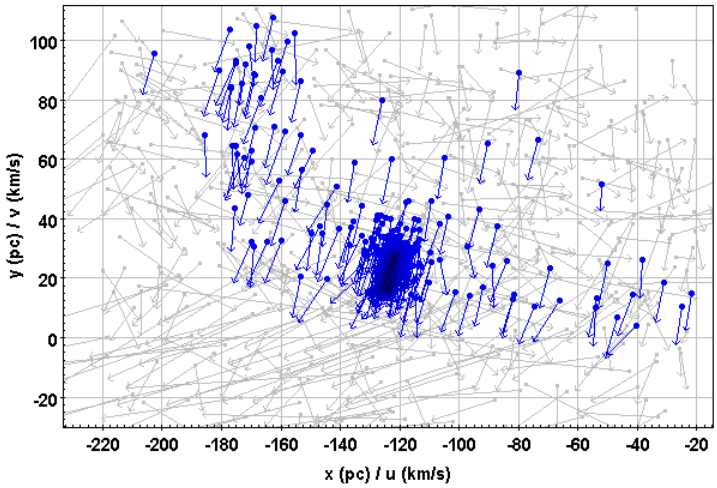

Рис 2.14. Движение звезд Плеяд (синие стрелки) среди звезд фона (серые стрекли) в галактичской плоскости.

Дальний от центра галактики шлейф выглядит более «растрепанным», что может свидетельствовать его о возможном давнем гравитационном взаимодействии с облаком или иным тяжелым гравитиционным объектом.

Если рассматривать орбиту скопления и направление движения членов скопления относительно центра галактики, то можно увидеть вдоль каких направлений происходит потеря звезд. Для данного возраста форма и ориентация хвостов хорошо соответствует моделям в работе Расторгуев, Чумак [36]. Как видно из рис.2.15 - у более далеких звезд, которые были отобраны в качестве членов скопления или хвостов, ошибки определения расстояния больше, но это не сильно влияет на конечный результат.

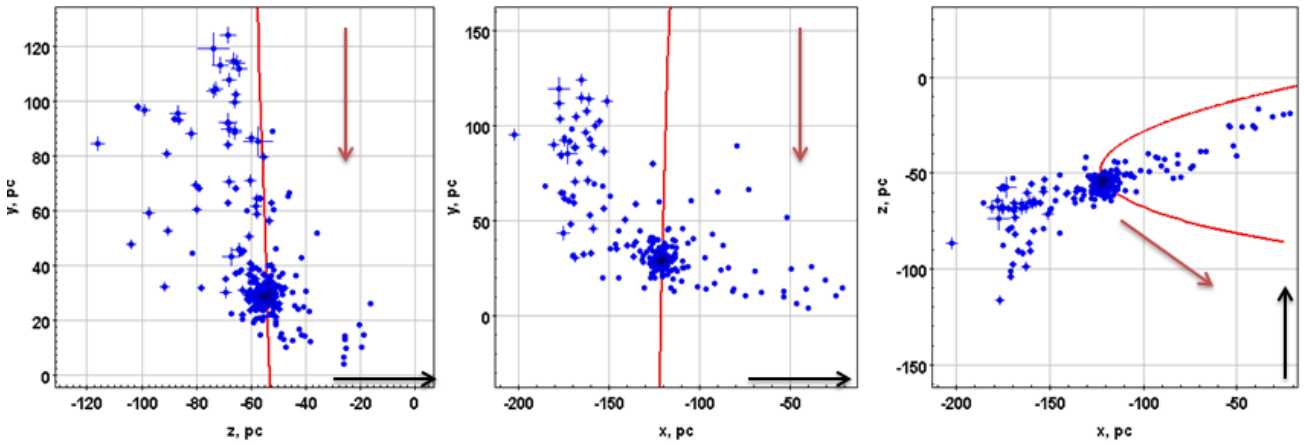

Рис. 2.15. Положение звезд Плеяд в галактической плоскости. На графике отображены бары ошибок по расстоянию. Красная линия – орбита скопления (рассчитана в galpy), стрелкой показано направление движения скопления.

Для отбора звезд по диаграмме «цвет-светимость» была взята падуанская система изохрон с металичностью, определенной для Плеяд как [Fe/H]=-0.036 [110]. Модели выбраны на основе работы Maíz-Apellániz & Weiler [130]. Данные, наносимые на изохрону, представляют собой абсолютную звездную величину объекта в данном диапазоне и показатель его цвета. Таким образом, мы используем диаграмму Герцшпрунга-Рассела в качестве эффективного фильтра. Различными цветами отмечены звезды, относящиеся к отстающему и опрежающему приливным хвостам, а так же самому скоплению. Как видно –

все они хорошо ложаться на изохрону, что говорит об их одинаковом возрасте. Это позволяет нам сделать вывод, что все эти звезды могли принадлежать скоплению.

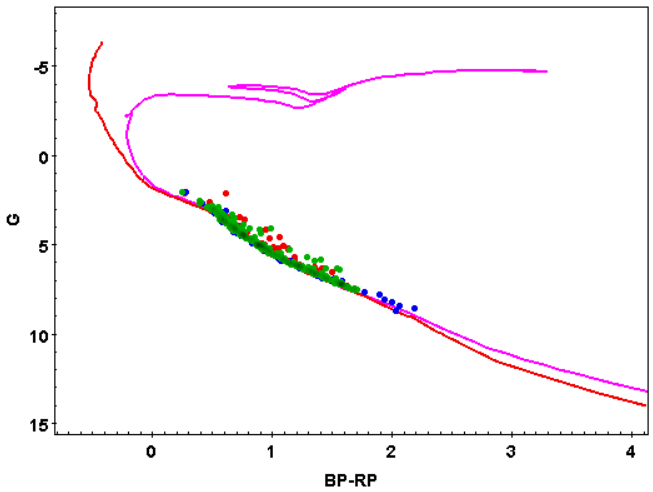

Рис.2.16. Изохрона для звезд скоплений Плеяды (синие точки), опережающего хвоста (красные точки) и отстающего (зеленые точки). Красня линия – главная последовательность нулевого возраста, сиреневая – изохрона log t= 8.1

Так же для звезд скопления были определены массы отобранных звезд путем интерполяции на изохрону. Их диапазон для данной выборки колеблется от 0.5M до 2 M. Это во многом связано с тем, что среди звезд, у которых Gaia измеряла лучевые скорости, нет сильно холодных или сильно горячих (звездных остатков или ярких массивыных горячих звезд). Так что по полученному результату сложно судить о массах звезд, которые попадают в шлейфы, так как отобранные звезды все относительно «легкие».

На рис.2.17 присутствует небольшая ассиметрия масс для отстающего хвоста – в нашей выборке в нем оказалось больше более крупных звезд, чем в опережающем. Так же несколько звезд, разделяющих общую кинематику и положение на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, находятся несколько в стороне от самого скопления и шлейфов – это может быть вызвано выбросом членов скопления после взрыва первых сверхновых звезд, которые могут выбросить или изменить скорость некоторых членов скопления.

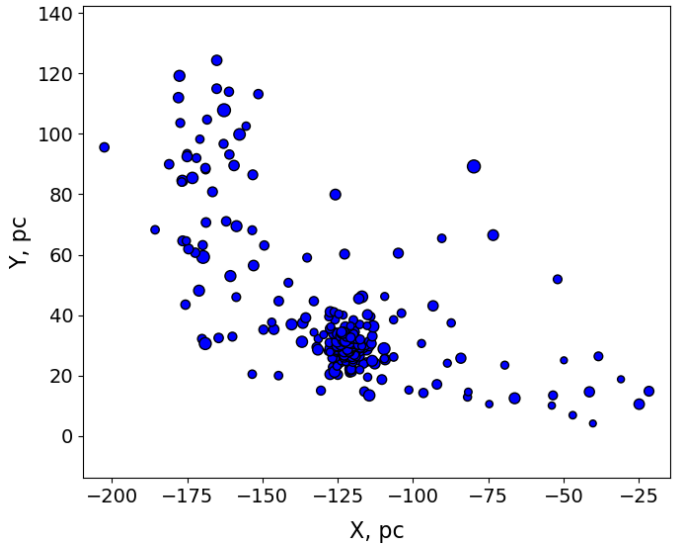

Рис 2.17. Распределение масс в опление Пледы – чем больше размер кружка, тем больше масса. Диапазон масс объектов лежит в области от 0.5M до 2 M.

2.2.2.4. Обсуждение и выводы

Плеяды по-прежнему имеют большое значение для понимания кинематики звезд. Изучены координата вершины и различные параметры кинематической структуры рассеянного скопления Плеяды. Некоторые параметры, аналогичные этой работе, были определены Chen et al.[32], Makarov & Robichon[131], Galli et al. [86].

Получен список звезд-кандидатов в звездные шлейфы РЗС Плеяды. Выборка соответствует критериям, удовлетворяющим генетическому сходству с родительским скоплением и согласуется с моделями.

Форма приливных хвостов и их протяженность зависит от возраста скопления. Обычно они хорошо видны у старых скоплений. В нашем исследовании мы решили найти приливные шлейфы у хорошо исследованного скопления Плеяды. Их наличие ранее было смоделировано в [36] и расстояние до этого скопления еще позволяет их рассмотреть.

Результаты этой главы опубликованы автором в работе

Elsanhoury, W. H.; Postnikova, E. S.; Chupina, N. V.; Vereshchagin, S. V.; Sariya, Devesh P.; Yadav, R. K. S.; Jiang, Ing-Guey The Pleiades apex and its kinematical structure Astrophysics and Space Science, Volume 363, Issue 3, article id. 58, 13 pp 2018

Положения главы, выносимые на защиту:

По данным каталогов GAIA DR1 и RAVE DR5 получены физические характеристики скопления Плеяды: дисперсия скоростей, пространственные размеры, и параметры скопления: расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость.

По данным каталога GAIA DR2, используя расширенный поиск по параллаксам, собственным движениям, фотометрии и лучевым скоростям, составлен собственный каталог звезд – членов скопления Плеяды. По этому списку показано наличие приливных шлейфов, согласующееся с результатами других авторов.

Глава 3. Поздние стадии эволюции звездных систем (от 600 млн. лет)

3.1. Кинематика и физические параметры скопления Гиады (625±50 млн. лет)

3.1.1 Обзор и использованные данные

Рассеянное звездное скопление Гиады (Collinder 50, Melotte 25) - одно из самых близких к нам звездных скоплений - расстояние от Солнца составляет 47 пк. Это также одно из самых старых рассеянных скоплений, возраст составляет 625 − 750 млн. лет [20, 152]. Оно совершило не один оборот вокруг центра галактики, что могло повлиять на параметры и пространственную форму скопления.

Близость Гиад от Солнца является преимуществом во многих отношениях. Например, члены скопления имеют незначительное межзвездное покраснение. Определения физических параметров будут наиболее надежны.

Кроме того, звезды в Гиадах относительно яркие, имеют большие собственные движения на небе, а также большие лучевые скорости. К тому же, ошибки определения характеристик близкого объекта будут меньше, чем более далеких. Это касается и значений параллаксов, а, следовательно, и распределение звезд скопления в пространстве. Близость скопления имеет и свои недостатки. Из-за большого углового размера скопления на небе члены скопления рассеяны на значительных расстояниях и имеются трудности их выделения среди звезд поля.

Мы изучили скопление Гиады с использованием астрометрических параметров Tycho-Gaia Astrometric Solution (TGAS), содержащегося в первом выпуске данных (Gaia DR1[24]) миссии Gaia. Отправной точкой для настоящей работы является список, взятый из работы van Leeuwen et al.[84](vLw). Он содержит 103 звезды-члена скопления. Список включает экваториальные координаты, параллаксы и собственные движения для 103 звезд. В нем отсутствуют лучевые скорости, которые мы взяли из SIMBAD для 92 звезд. Данные приведены в Таблице 3.3(см.Приложение 3). В столбцах указаны

номера по каталогам Gaia Collaboration, [24] и HIPPARCOS ESA 1997[74], экваториальные координаты индивидуальных апексов звезд (см. выше), собственные движения, параллаксы и их ошибки, лучевые скорости и их ошибки из SIMBAD[177].

3.1.2 Определение положения апекса

Скопление Гиады относится к «движущимся» скоплениям: направления собственных движений звезд, входящих в его состав, сходятся к одной точке - апексу. Это позволяет эффективно использовать для изучения его внутренней кинематики метод AD-диаграмм, основанный на определении положений апексов звезд скопления (описание метода см. Приложение 4).

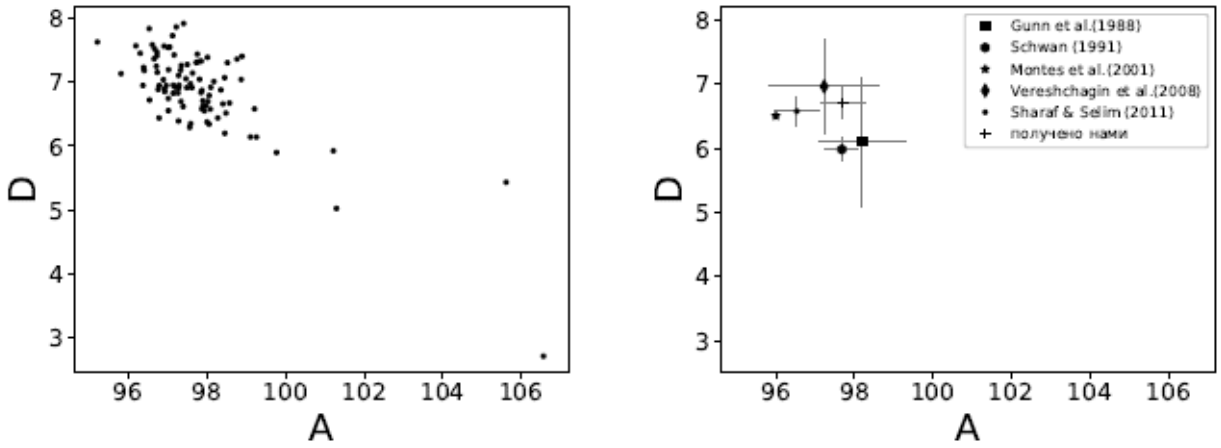

Рис. 3.1. AD-диаграмма РЗС Гиады, построена по 92 звездам (левая панель) и положение апекса РЗС Гиады по данным разных авторов, см. табл.3.2 (правая панель). Единицы измерения по осям - градусы.

На рис 3.1 показаны результаты наших расчетов и положения среднего апекса Гиад, полученные разными авторами. Сравнение правой и левой панелей рис. 3.1 показывает, что разброс средних апексов укладывается в область разброса апексов звезд.

Четыре звезды - HIP 19441, HIP 21267, HIP 22850, HIP19870 - на рис. 3.1 (левая панель) выходят за пределы трех сигм от среднего апекса. Данные об этих звездах представлены в табл. 3.1. Отклонение апекса звезды HIP 19870, возможно, обусловлено отличием ее лучевой скорости от среднего значения.

Средняя лучевая скорость Гиад Vr = 39.1±0.02 км/с, определенная по данным Ciardi et al.[41]. Оставшиеся три звезды представляют собой звезды с большими собственными движениями SIMBAD. Эти звезды могли приобрести свою скорость из-за распада двойных систем, в которой одна сколлапсировала в компактный объект или быть задеты ударной волной от взрыва одиночной массивной звезды.

Таблица 3.1 Звезды, положения апексов которых значительно отклоняются от среднего

TGAS	HIP	A, град	D, град	RA J2015.0, град	DEC J2015.0, град	ϖ±σϖ, мсд	μα±σμα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	Vr±σVr, км/с	Доп. информация
3300315439330018304	19441	105.615	5.433	62.456	9.305	28.08±0.25	154.748±0.15	-5.447±0.12	28.08±0.25	High PM Star
3307528029449757056	21267	101.214	5.927	68.444	13.251	21.67±0.41	102.816±0.04	-17.418±0.02	35±4.4	High PM Star
3408463506117452544	22850	101.293	5.024	73.743	19.485	15.92±0.39	62.838±0.03	-28.918±0.02	35±4.3	High PM Star
49365082792386816	19870	106.564	2.712	63.927	20.819	19.87±0.32	109.624±0.06	-35.151±0.04	27.2±2	SB

В столбцах таблицы 3.1 приведены номера звезд по каталогам TGAS и HIPPARCOS, координаты апекса, экваториальные координаты, параллакс, собственные движения и лучевые скорости, дополнительная информация из SIMBAD. В табл. 3.2 приведены определения положения апекса Гиад различными авторами.

Таблица 3.2. Положения апекса РЗС Гиады, определённые разными авторами

A	σA	D	σD	Источник
98.2	1.1	6.1	1.0	[93]
97.68	0.42	5.98	0.18	[168]
96	-	6.50	-	[140]
97.23	1.41	6.96	0.74	[213]
96.533	0.563	6.5735	0.226	[170]

Нами получены координаты апекса: A0 = 97.71±0.57, D0 = 6.71±0.24. Однородность и компактность формы AD-диаграммы свидетельствует о кинематической однородности ядра и короны.

3.1.3. Структура скопления в пространстве

Динамические эволюционные процессы, такие как столкновения звезд и взаимодействия с галактическим приливным полем, вызывают потерю значительной части звезд скопления в области поля. Первоначально сферическая форма скопления может становиться эллипсоидальной благодаря гравитационному взаимодействию с элементами диска и диссипации звезд. Поскольку рассеянные скопления вращаются вокруг плоскости Галактики, они постепенно деформируются приливными силами, исходящими от диска Галактики, а так же могут подвергнуться влиянию проходящих поблизости гигантских там молекулярных облаков.

Из-за этих внешних событий и динамической эволюции изменяется внутренняя структура скопления [120]. Важно понять в каком из направлений начинает происходить растекание скопления. Для этого мы построили трехмерное изображение, представленное на рис. 3.2, которое аппроксимировали эллипсоидом. Для построения эллипсоида использовалась программа, реализованная нами на языке программирования Python, алгоритм взят на сайте MathWorks[2] [141].

[2] https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9542-minimumvolume-enclosing-ellipsoid

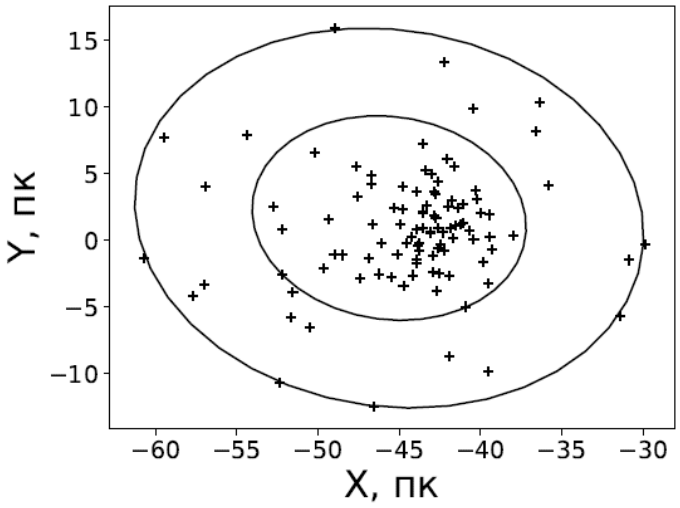

Рис.3.2. Распределение звезд Гиад в гелиоцентрической системе координат.

Направления осей: X — в направлении галактической долготы l = 0◦, Y — в направлении l = 90◦ и Z — в направлении Северного полюса Галактики Показана аппроксимация распределения точек расположенных внутри эллипсов на плоскости XY. Внешний эллипс охватывает все звезды. В области, ограниченной внутренним эллипсом, концентрация звезд по отношению ко всему распределению возрастает более чем в 5 раз.

Прямоугольная галактическая гелиоцентрическая система координат определена следующим образом: ось X направлена к центру Галактики (l = 0°, b = 0°), ось Y – в направлении вращения Галактики (l = 90°, b = 0°), ось Z – на северный полюс Галактики (b = 90°). Аналогичны направления осей для компонентов скорости U, V, W.

На рис. 3.2 показана проекция пространственного распределения звезд на плоскость галактического диска XY. Представлена аппроксимация распределения точек эллипсом путем последовательного уменьшения числа внешних точек. Как видно на рис. 3.3, скопление имеет эллиптическую форму. Большая ось эллипса направлена под углом 8◦ относительно оси абсцисс. Это свидетельствует о вытянутости РЗС в настоящее время в указанном направлении.

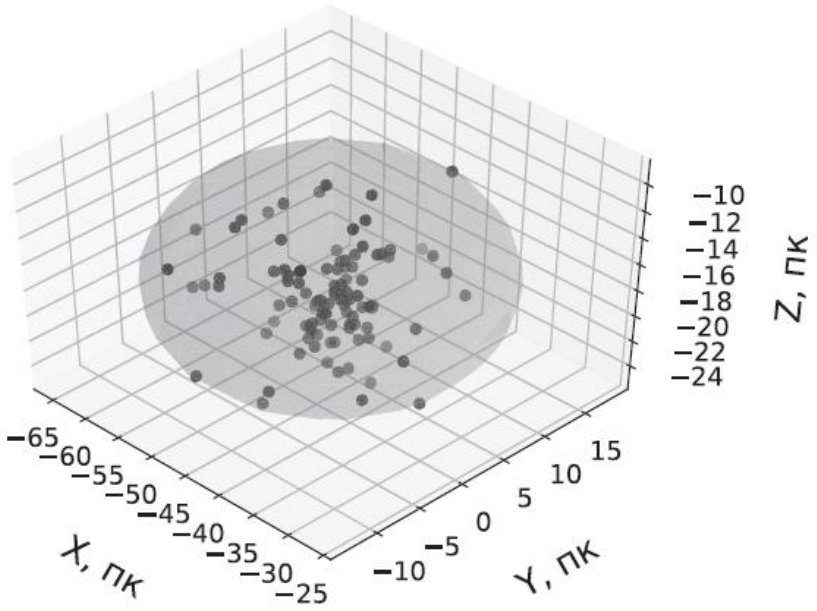

Рис. 3.3. Распределение звезд Гиад в пространстве. Направления осей: X - в направлении центра Галактики, Y - в направлении вращения и Z - в направлении Северного полюса Галактики.

Факт сплюснутости Гиад по Z-координате и вытянутости по X-координате не нов. На разном материале это показано в Perryman et al. [152], Röser et al.[163], и по данным Reino et al [159]. По данным GaiaDR2 было обнаружено, что скопление Гиады растянуто вдоль пространственной орбиты на десятки парсек (см. [134] и [165]).

Центральная область скопления. По данным Gaia DR1 [24] получено, что скопление имеет приблизительно сферическую форму в центральной части (с радиусом 10 пк) и уплощенную периферию. Отметим, что скопление выглядит компактным как кинематически на Рис.3.1, так и пространственно на Рис.3.3 без четкого разделения на ядро и корону.

Результаты опубликованы автором в работах

Е.С. Постникова, С.В. Верещагин, Н.В. Чупина. Детали кинематики звезд в скоплении Гиады методом AD-диаграмм. Научные Труды ИНАСАН. 2018, 440с. ISBN: 978-5-8037-0740-0.

Пункты, выносимые на защиту:

По данным Gaia DR1 определены параметры скопления Гиады: дисперсия скоростей, пространственные размеры, расстояние от Солнца, положение апекса, пространственная скорость. Впервые показана эллиптичность пространственной формы скопления с большой осью ориентированной вдоль её галактической орбиты. Такая вытянутость согласуется с принятым в данной работе сценарием эволюции РЗС и ОВ ассоциаций и указывает на наличие приливных шлейфов, позже обнаруженных многими авторами по данным Gaia DR2.

3.2. Звездный поток Большой Медведицы (600 млн. лет)

3.2.1. Природа потока БМ

Остатки ассоциаций, растянутые приливными силами и дифференциальным вращением Галактики, дрейфуют по галактической орбите как целое. Движущиеся группы могут быть старыми, такими как движущаяся группа звёзд HR 1614 возрастом в 2 миллиарда лет, или молодыми, такими как движущаяся группа звёзд AB Золотой Рыбы (AB Dorado) возрастом в 50 миллионов лет. Движущиеся группы интенсивно изучались Эггеном в 1950-60-х годах (см.например, Eggen [65]). Образовавшаяся движущаяся группа звезд обычно растянута вдоль орбиты.

Самой близкой является движущаяся группа звёзд Большой Медведицы, которая включает часть звезд в Ковше Большой Медведицы и простирается до Южного Треугольника.

Согласно современным представлениям о процессе звездообразования (см., например, обзор [119]), большинство звезд окрестности Солнца (одиночных, двойных и устойчивых кратных) могло образоваться в результате распада неиерархических малых групп звезд, содержащих от нескольких до нескольких десятков объектов. Эти представления восходят еще к работам van Albada [193], в которых была показана возможность формирования двойных и

кратных звезд с характерными размерами 10 а.е. и более в результате распада небольших звездных групп с размерами от 100 до 1000 а.е. (1 астрономическая единица (а.е.) составляет $4{,}848 \cdot 10^{-6}$ парсека). Процесс образования кратных систем в скоплениях рассмотрен в van den Berk et al. [195].

3.2.2 Пространственно-кинематическая неоднородность

Внутренняя структура скоплений мало понятна с точки зрения наблюдений. Давно известно, что распределение звезд в РЗС и даже шаровых скоплениях не является строго однородным (например, группы 189 и скопление NGC1977 [38]). Наблюдения показывают флуктуации плотности звезд в разных масштабах. Их природа еще не полностью понята. Перспективным направлением является поиск ранее неизвестных подструктур внутри РЗС среди членов скопления. Несмотря на динамические расчеты, подтверждающие возможность появления отдельных групп звезд внутри скопления, многие детали по-прежнему отсутствуют. Вполне уместно детальное сравнение параметров таких групп, как размер, число звезд, возраст и т. п.

Поток Большой Медведицы (БМ), выявленный в Галактике почти 150 лет назад, остается одним из пяти главных потоков в околосолнечных окрестностях и привлекает постоянное внимание исследователей. Свидетельства о существовании кинематических субструктур (звездных групп) в короне этого потока впервые появились по данным ИСЗ HIPPARCOS. Обнаружены три кинематические группы и обособленное ядро, отличающиеся направлениями векторов пространственных скоростей на диаграмме апексов (AD-диаграмме), см. рис. 3 в [39]. Подобные группы обнаруживались и в Плеядах [5,6,7]. Появление каталога Tycho-Gaia astrometric solution (TGAS) Gaia DR1 [24] позволило вновь обратиться к этой теме. По выборке из Gaia были рассмотрены детали структуры потока БМ. Это позволило проверить по независимым данным результаты, полученные при помощи HIPPARCOS [39,40,213]. Был проведен поиск новых кандидатов в состав потока по Gaia. Для этого данные

астрометрии TGAS дополнены измерениями лучевых скоростей из Data Release 5 of the Radial Velocity Experiment (RAVE DR5) [117].

Таблица 3.4. Астрометрические параметры звезд потока БМ по данным Gaia и HIPPARCOS.

HIP	Gaia (TGAS)			HIP	Gaia (TGAS)	HIP	Gaia (TGAS)	HIP
	RA2015, град	DEC2015, град	ϖ±σϖ, мсд	ϖ±σϖ, мсд	μα±σμα, мсд/год	μα±σμα, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год	μδ±σμδ, мсд/год
Ядро								
61946	190.4364	55.7247	44.07±0.26	43.06±0.82	122.79±0.05	121.53±0.65	−5.02±0.06	−4.36±0.63
Группа 1								
29884	94.3941	46.4240	13.24±0.38	13.86±0.78	−43.52±0.03	−43.79±0.64	11.15±0.02	11.26±0.38
35628	110.2773	67.6621	38.97±0.25	39.10±1.15	−70.23±0.05	−70.56±0.59	70.57±0.06	70.11±0.92
36827	113.6087	−6.8969	42.68±0.24	40.32±1.26	−80.29±0.09	−83.68±1.56	−42.97±0.06	−43.15±0.81
75342	230.9324	−1.0225	17.88±0.55	18.20±0.78	75.03±0.030	76.73±0.85	−29.13±0.02	−28.21±0.72
Группа 2								
954	2.9479	9.1399	7.83±0.75	7.81±0.96	−32.81±0.04	−32.99±0.84	−18.23±0.03	−18.32±0.61
38747	118.9927	−9.7973	20.30±0.25	20.69±1.15	21.09±0.08	21.01±1.08	−24.63±0.06	−25.39±0.95
59152	181.9627	18.9485	23.50±0.28	25.27±1.40	120.33±0.08	120.06±1.54	−73.46±0.06	−73.58±0.72
48331	147.7820	−43.5048	88.37±0.30	89.67±0.82	461.63±0.04	461.28±0.66	−471.80±0.04	−472.87±0.66
Группа 3								
56154	172.6617	−13.0505	16.35±0.57	15.56±0.82	29.77±0.03	30.16±0.66	−51.12±0.03	−51.37±0.61
50061	153.3185	−8.4457	9.92±0.32	10.80±0.96	22.67±0.05	23.44±0.97	−30.05±0.04	−30.88±0.69
Корона								
2213	6.9935	19.5140	6.60±0.59	6.12±0.79	−21.67±0.03	−22.3±0.72	−17.71±0.02	−17.33±0.49
12647	40.6205	10.7416	8.15±0.42	7.66±0.94	−24.79±0.06	−24.27±1.04	−22.93±0.05	−23.37±0.88
21295	68.5344	5.5686	7.32±0.74	7.99±1.09	−14.64±0.06	−15.58±1.21	−5.67±0.04	−7.77±1.03
22776	73.4842	36.7575	36.44±0.23	35.14±1.12	5.87±0.08	6.17±1.02	11.48±0.07	11.58±0.85
27015	85.9530	85.6684	5.40±0.30	6.90±0.56	−11.01±0.03	−10.52±0.49	11.57±0.03	11.39±0.61
38228	117.4794	27.3631	45.09±0.41	45.84±0.89	−10.12±0.04	−9.29±0.99	−11.24±0.02	−11.84±0.71
42438	129.7985	65.0213	69.42±0.64	70.07±0.71	−27.26±0.02	−27.73±0.59	87.83±0.03	87.90±0.49
43670	133.4582	26.9132	26.48±0.26	24.66±1.34	14.45±0.11	10.51±2.20	−5.04±0.06	−6.53±1.14
43852	133.9819	36.1961	39.43±0.30	38.21±10	−25.70±0.07	−23.50±1.19	−12.54±0.04	−12.23±0.86
46324	141.6786	−14.4913	25.53±0.26	25.07±10	38.14±0.06	37.6±1.08	−130.44±0.05	−130.80±0.67
51914	159.0894	36.3268	21.37±0.24	21.6±0.75	36.33±0.03	36.92±0.67	−33.22±0.02	−33.84±0.41
53985	165.6604	21.9669	83.77±0.35	85.76±1.36	142.75±0.08	141.40±1.45	−51.69±0.05	−51.13±0.99
56337	173.2382	52.5237	21.49±0.25	22.33±1.22	61.05±0.07	59.35±0.99	−11.47±0.08	−10.57±0.73
59496	183.0225	58.9265	39.21±0.56	35.24±1.24	97.82±0.06	102.00±0.97	9.77±0.06	20.26±1.01
61748	189.8204	35.9519	7.30±0.40	6.45±0.73	19.21±0.03	19.31±0.67	−2.81±0.02	−2.63±0.53
62541	192.2260	14.1225	7.81±0.51	8.10±0.77	28.47±0.03	28.96±0.82	−19.64±0.02	−20.23±0.51
67596	207.7691	34.7725	10.92±0.46	11.24±0.68	33.08±0.02	32.16±0.58	−8.07±0.02	−8.29±0.47

74702	228.9973	0.7958	62.98±0.38	64.19±0.97	178.07±0.04	178.00±0.85	−137.08±0.03	−136.50±0.70
79945	244.7822	−20.2181	8.03±0.33	6.65±0.84	16.80±0.04	16.84±0.94	−14.07±0.02	−15.31±0.74
80686	247.1197	−70.0839	81.23±0.90	82.61±0.57	200.22±0.03	199.90±0.31	110.64±0.03	110.80±0.51
85185	261.1315	16.3009	9.13±0.51	7.55±0.71	12.54±0.02	12.58±0.46	−28.46±0.02	−28.83±0.50
89282	273.2804	41.4748	28.81±0.25	29.91±0.59	50.87±0.03	51.47±0.55	−129.14±0.04	−128.5±0.58
90342	276.4951	29.8288	8.27±0.56	7.63±0.60	22.74±0.02	23.23±0.54	−24.38±0.02	−24.45±0.51
93179	284.6955	13.9065	13.26±0.48	13.45±0.67	0.45±0.03	0.94±0.72	−48.31±0.02	−51.42±0.58
94083	287.2921	76.5600	36.45±0.87	36.64±0.49	52.61±0.03	51.63±0.62	−119.35±0.04	−119.8±0.46
95352	290.9855	43.3881	7.43±0.28	8.06±0.47	14.89±0.02	16.30±0.41	−28.17±0.02	−27.36±0.46
107555	326.7534	70.1508	6.79±0.28	6.62±0.47	−10.48±0.02	−10.46±0.55	−25.09±0.02	−25.07±0.44
110091	334.5176	−0.2379	24.13±0.29	24.11±0.92	−42.00±0.04	−41.39±1.37	−54.41±0.03	−54.73±0.58

Звезды потока БМ были взяты из табл. 7 из работы [40] и отождествлены со звездами каталога Gaia DR1 TGAS. Полученная выборка, представленная в табл.3.8. Данные в табл. 3.4 разбиты на ядро, три группы и корону, наследуя это разбиение из [40]. В колонках приведены номера звезд по HIPPARCOS, экваториальные координаты из Gaia на эпоху J2015.0, параллаксы и компоненты собственных движений со средними квадратичными ошибками (ско). Астрометрические параметры взяты из каталогов Gaia и HIPPARCOS. В каталоге Gaia присутствуют не все звезды потока БМ, отождествленные ранее по каталогому HIPPARCOS. Так, в ядре найдена лишь одна звезда из пяти, представленных в табл. 7 из работы [40], в группе 1 – 4 из 13, в группе 2 – 4 из 13, в группе 3 – 2 из 8 и в короне – 28 из 78. Всего в табл. 3.4 имеются данные для 39 звезд Gaia. Это может быть связано как с ограничение звезд по яркости в каталоге, так и с тем, что поток расположен близко к Солнцу и содержит звезды с большим собственным движением, которые тоже не полностью присутствуют в TGAS.

Средняя точность Gaia намного превосходит среднюю точность HIPPARCOS, однако, по нашей выборке для БМ собственные движения обоих каталогов хорошо согласуются между собой (рис 3.4 для звезд из табл. 3.4), различие вносят только ошибки определения величин для Gaia (бары по вертикали) и HIPPARCOS (бары по горизонтали).

Почти все точки лежат на диагонали в пределах ско. Вне рамок рис. 3.4 оказалась звезда HIP 48331, компоненты собственного движения которой по

HIPPARCOS μα = 461.28, μδ = −472.87 мсд/год (табл. 3.4). Эти значения практически на порядок превосходят таковые для других звезд в табл. 3.4. HIP 48331 — близкая звезда, расположенная на расстоянии 11.1 ± 0.1 пк от Солнца [177], и по этой причине ее собственное движение намного превосходит собственные движения для других, более далеких звезд в табл. 3.4. Однако, значения собственных движений для этой звезды по данным HIPPARCOS и Gaia согласуются в пределах ско. Звезды, для которых различия в положениях на рис. 3.4 превосходят ско, приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Звезды, для которых разности компонент собственных движений по Gaia и HIPPARCOS превышают ско.

	Gaia (TGAS)	HIP		Gaia (TGAS)	HIP		
	μα	μα	Δμα	μδ	μδ	Δμδ	
HIP	мсд/год						Коментарий
21295	–14.64±0.06	–15.58±1.21	0.94	–5.67±0.04	–7.77±1.03	2.10	
36827	–80.29±0.09	–83.68±1.56	3.39	–42.97±0.06	–43.15±0.81	0.18	переменная типа BY Dra
43670	14.45±0.11	10.51±2.20	3.94	–5.04±0.06	–6.53±1.14	1.49	переменная типа BY Dra
59496	97.82±0.06	101.96±0.97	4.14	9.77±0.06	20.26±1.01	10.49	
93179	0.45±0.03	0.94±0.72	0.49	–48.31±0.02	–51.42±0.58	3.11	переменная типа alpha2 CVn

В ее колонках даны номера HIPPARCOS, компоненты собственных движений с ошибками из HIPPARCOS и Gaia (TGAS). В последней колонке даны комментарии. Значения Δμα и Δμδ (в 6-й и 11-й колонках соответственно) представляют собой соответствующие разности между значениями μα и μδ из HIPPARCOS и Gaia.

Значения параллаксов по TGAS и HIPPARCOS также хорошо согласуются. Их сравнение отображено на рис. 3.5, где видно, что практически все точки в пределах ошибок укладываются на диагональ. Ранее отмечалась проблема определений расстояний в HIPPARCOS на интервале 7–10 мсд, [84]. Интересно, что наш материал также показывает локальное увеличение разброса точек на этом диапазоне значений. На рис. 3.5 показан весь интервал

параллаксов (левая панель) и отдельно интервал для далеких звезд (правая панель). Интервалы с наибольшим разбросом точек: 6–10 мсд, около 25 мсд (правая панель) и 40–50 мсд (левая панель). Объяснения этого явления пока не найдено. Возможно, что в проекте HIPPARCOS для определения параллаксов использовалась единая модель, которая на определенных расстояниях не точна. В Gaia в зависимости от расстояний брались разные модели.

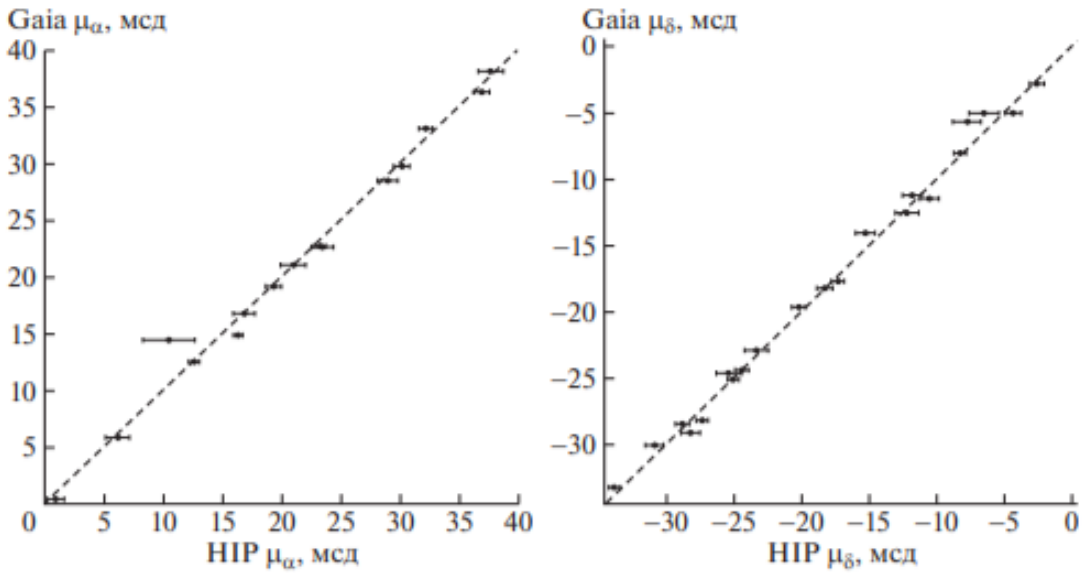

Рис. 3.4. Сравнение компонентов собственных движений по каталогам Gaia и HIPPARCOS для звезд потока БМ из нашей выборки, для μα (левая панель) и для μδ (правая панель).

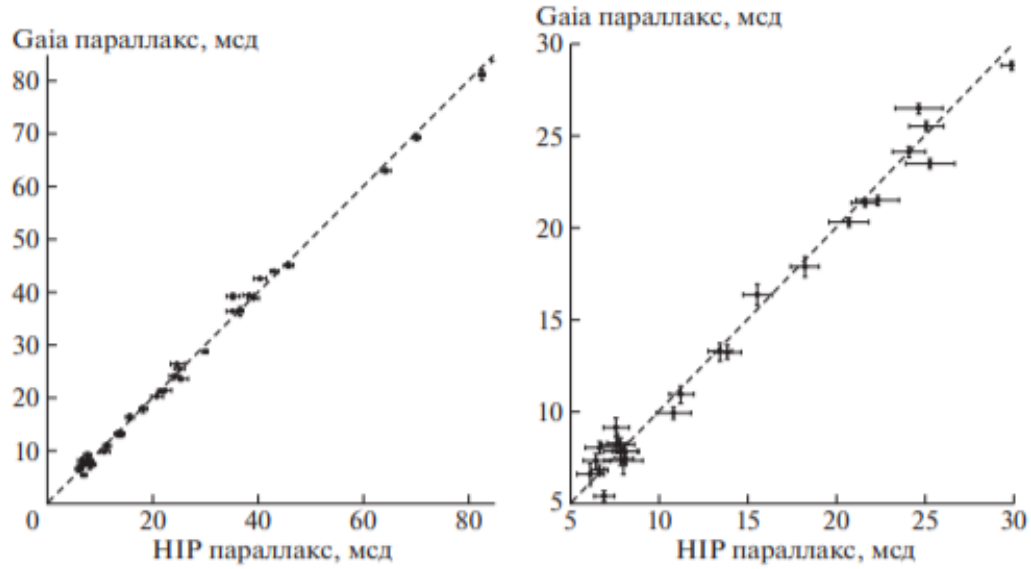

Рис. 3.5. Сравнение параллаксов по Gaia и HIPPARCOS. Весь интервал (левая панель), для далеких звезд (правая панель).

Так как лучевых скоростей в TGAS не представлено, и они появляются только во втором релизе Gaia, для получения данных о полном движении в пространстве были взяты лучевые скорости из каталога Duflot et al.[62] и отобранных из наиболее современных и точных публикаций из SIMBAD [177]. Для значений Vr в [62] (определенных с помощью объективной призмы) величины ошибок не приводятся. В табл. 3.6 , которая содержит значения лучевых скоростей, в этом случае дана единая для всех средняя по каталогу ошибка σVr = 2 км/с. Эти два источника данных о лучевых скоростях сравнены на рис.3.6.

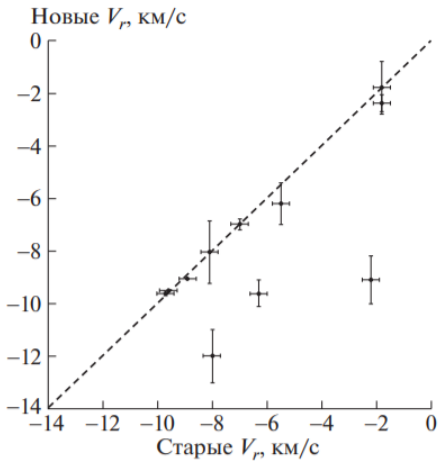

Рис. 3.6. Сравнение лучевых скоростей из табл. 3.5. Старые Vr взяты в колонке “Vr из [62] ”, новые — в колонке “Vr по современным публикациям”.

Для большинства звезд значения Vr согласуются в пределах ошибок. Как видно, сравнение величин лучевых скоростей по каталогу Galli et al.[86], использованных в Chupina et al.[40], с измерениями SIMBAD [177] показало, что замена старых измерений на современные не меняет картины распре деления звезд по группам. Точки для HIP 61946 и 29884 расположены вне пределов ско и находятся внизу, под диагональю. По данным SIMBAD [177] не выявлено каких-либо особенностей для этих звезд, которые помогли бы помочь понять причины этих несовпадений. Отметим лишь, что HIP 29884 —

быстровращающаяся звезда с V sin i = 220 км/с [177], что могло повлиять на точность измерения ее лучевой скорости.

Значение лучевой скорости имеет влияние на положение звезды на диаграмме апексов. Апекс звезды показывает нам направление на небесной сфере, куда направлена та или иная звезда по данным о ее пространственной скорости. Звезды скопления, обычно, направлены в одну, достаточно узкую область небесной сферы, с небольшим разбросом от центрального значения. Иногда некоторые звезды скопления еще дополнительно разбиваются на несколько обособленных плотных групп, как в случае с БМ [40], но все же в целом они остаются достаточно кучной группой, в отличие от звезд фона, движение которых достаточно хаотично. Метод AD-диаграмм хорошо позволяет выявить детали внутренних движений звезд внутри скопления.

Таблица 3.6. Индивидуальные апексы звезд, рассчитанные по данным HIPPARCOS и лучевым скоростям из [62] и современным данным.

HIP	r, пк	Vr из [62]			Vr по современным публикациям			Источник Vr
		A, град	D, град	Vr, км/с	A, град	D, град	Vr, км/с	
Ядро								
61946	23.22	293.6888	-21.7228	-6.3±2	301.0055	-29.9072	-9.95±0.27	[182]
Группа 1								
29884	72.15	335.3871	-10.393	-8.0±2	327.9459	-17.9694	-12±1	[89]
35628	25.58	327.5409	-19.493	-8.9±2	327.4014	-19.9325	-8.5±0.9	[89]
36827	24.8	337.466	-15.2518	-9.7±2	337.689	-15.3467	-9.62±0.09	[183]
75342	54.95	327.5839	-19.9595	-2.2±2	345.7203	-18.0741	-0.773±1.71	[117]
Группа 2								
954	128.04	272.9172	-29.3598	-1.8±2	271.2792	-29.5493	-2.38±0.33	[33]
38747	48.33	270.7768	-23.1541	-8.1±2	270.6451	-23.2833	-8.002±0.008	[183]
48331	11.15	282.5253	-18.5538	-9.6±2	282.4478	-18.6699	-9.51±0	[183]
59152	39.57	273.7922	-33.3693	-5.5±2	275.4727	-33.7344	-6.2±0.8	[89]
Группа 3								
56154	64.27	292.5792	-54.4587	-1.8±2	292.5792	-54.4587	-1.8±1	[89]
50061	92.59	284.2264	-42.2812	-7.0±2	284.195	-42.2981	-6.99±0.22	[33]

На рис. 3.7 представлена AD-диаграмма, построенная по данным HIPPARCOS. Астрометрические данные для вычисления координат A и D взяты из табл. 3.4, лучевые скорости из табл. 3.6: Vr из [62] и Vr по современным публикациям из [177] соответственно. На рис. 3.7 также показаны эллипсы ошибок. Размеры

осей эллипсов определяются величиной ошибки лучевой скорости (большая ось) и ошибками астрометрических параметров (малая ось) [213].

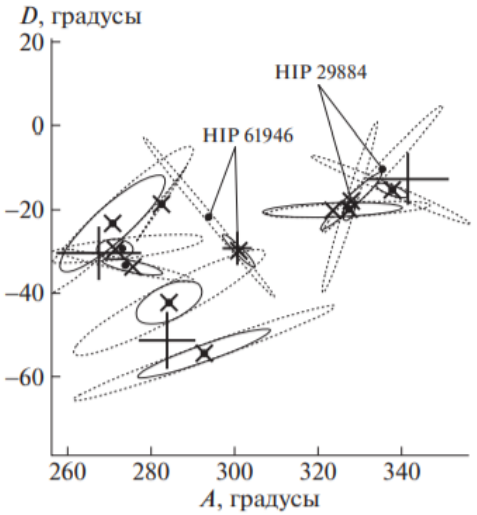

Рис. 3.7. Положения апексов звезд БМ. Данные астрометрии из HIPPARCOS, лучевые скорости (старые: каталог [62], точки; новые: SIMBAD [177] – косые крестики), табл. 3.6. Большие прямые крестики (размеры перекладин равны ско) – положения средних апексов групп и ядра (табл. 3.7)

Размеры осей эллипсов на рис. 3.7 тем больше, чем меньше точность измерений. Вследствие превосходящих величин ошибок σVr эллипсы для старых Vr [62] более вытянуты, чем для новых из [177]. Малые оси эллипсов в обоих случаях одинаковы, поскольку, как уже говорилось, данные астрометрии в обоих случаях взяты из HIPPARCOS. В табл. 3.7 приведены средние положения апексов групп и ядра, полученные по нашей выборке. Как видно на рис. 3.7, положения точек на AD-диаграмме для старых и новых Vr совпадают в пределах ско. Исключения — HIP 61946 и 29884, для которых новые лучевые скорости значительно отличаются от старых (рис. 3.7 и табл. 3.6). Разброс точек вдоль оси A превосходит разброс вдоль оси D (рис. 3.7). Этот эффект, как уже говорилось, обусловлен влиянием ошибок лучевых скоростей, [213]. Поиск лучевых скоростей в RAVE DR5 [117] дал лишь измерения для одной звезды – HIP 75342.

Была так же построена диаграмма апексов для данных Gaia с дополнением лучевыми скоростями по наиболее свежим источникам [177].

Высокоточные измерения астрометрических параметров, содержащиеся в данном каталоге – хороший тест для проверки, пополнения состава и изучения структуры потока БМ.

Таблица 3.7. Средние положения апексов групп и ядра.

	A	σA	D	σD	Число звезд для определения ско
	градусы				
Группа 1	341.47	9.89	–12.59	6.09	13
Группа 2	267.34	10.15	–30.43	6.47	12
Группа 3	283.75	6.7	–51.35	6.86	5
Ядро	300.58	3.56	–29.21	3.97	5

В табл. 3.8 приведены положения апексов, определенных: а) по астрометрии HIPPARCOS и старым Vr [62] и б) по астрометрии Gaia и новым Vr из SIMBAD [177]. AD-диаграмма по данным а) и б) приведена на рис. 3.8. Видно, что новые положения точек, располагаясь внутри областей потока БМ, не противоречат полученным ранее результатам. Наибольшее отличие в положениях старого и нового апексов на рис. 3.8 (около 3◦, табл. 3.8) наблюдается для HIP 36827. Это переменная типа BY Dra [177] с необычно большими разностями компонентов собственного движения на рис. 3.3 (табл. 3.6).

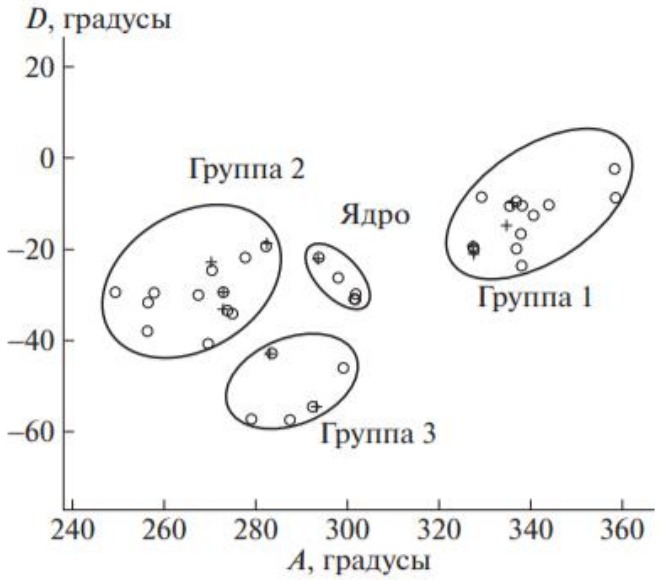

Рис.3.8. AD-диаграмма по данным HIPPARCOS (полые кружки, старые Vr из [62]) и Gaia (крестики, новые Vr из [177]). Овалами показаны области групп и ядра.

Gaia DR1 TGAS содержит более точную астрометрию для примерно 2.5 млн звезд по всему небу, что в сочетании с обширным каталогом лучевых скоростей RAVE DR5 может предоставить дополнительную информацию о членах потока БМ.

Ядро потока Большая Медведица находится в северном полушарии и исторически сложилось так, что большая часть исследований проводилась из этой области. Каталог RAVE DR5 охватывает в основном южное полушарие, а так как мы находимся внутри БМ, то в южной части неба так же должны находиться ее члены.

Возникает множество проблем для отбора звезд потока БМ, движущихся в одном направлении с множеством звезд поля (возможно из-за того, что апексы потока и Солнца расположены в сходных направлениях). Отчасти этим фактором объясняется многошаговая система применения различных фильтров, которые будут описаны здесь. Как уже говорилось, использовался каталог Gaia DR1 TGAS с лучевыми скоростями RAVE DR5. Первоначально, для сокращения объема данных, применены два простых критерия: $|Vr| \leq 500$ км/с и $0 < r \leq 500$ пк. В случае нескольких измерений лучевой скорости выбиралось измерение с минимальной относительной ошибкой $\min(\sigma Vr/Vr)$. В результате перед применением фильтров в нашем распоряжении имелось 96 313 звезд.

Следующий шаг — отбор звезд по пространственным координатам X, Y, Z. Границы области, занимаемой БМ в пространстве, взяты из [40]: X от –170 до 170 пк; Y от –100 до 150 пк; Z от –120 до 170 пк. По этим критериям отобрано 13 812 звезд. Направления осей таковы: X – в направлении галактической долготы $l = 0^\circ$, Y – в направлении $l = 90^\circ$ и Z – в направлении Северного полюса Галактики. Отбор звезд по компонентам пространственной скорости U, V, W (ось U – направлена к антицентру Галактики, V – на $l = 180^\circ$ и W – к Северному полюсу Галактики). Границы взяты из [112]: U от –16.3 до 52.4 км/с; V от –16.5

до 14.2 км/с; W от –41.8 до 11.4 км/с. По компонентам пространственных скоростей отобрано 3315 звезд. На следующем шаге отобраны 2716 звезд по критерию –23.5 ≤Vr ≤20.0 км/с (на основании [40],[112]). Для выделения звезд с сонаправленными векторами пространственных скоростей мы использовали условие $\lambda < 60^\circ$, где λ – угловое расстояние индивидуального апекса звезды от апекса БМ. Максимальное отклонение 60° определено ранее по списку звезд из табл. 7 из работы [40]. Координаты апекса БМ брались равными A0 = 303.1◦, D0 = −34.9◦ [40]. После применения этого критерия выборка уменьшилась до 1351 звезды.

Таблица 3.8. Индивидуальные апексы звезд по данным HIPPARCOS и Gaia

HIP номер	HIP + Vr из [177]		Gaia + Vr по современным публикациям	
	A	D	A	D
	градусы			
Ядро				
51814	298.0506	–26.17701		
53910	301.8287	–29.84371		
58001	301.5973	–30.86298		
61946	293.6888	–21.72277	293.6521	–22.10351
62956	301.7392	–30.94903		
Группа 1				
4520	358.4648	–2.27271		
7906	343.9594	–10.21447		
8588	338.2331	–10.43898		
29884	335.3871	–10.39303	336.0439	–9.76334
35628	327.5409	–19.49303	327.3147	–19.30940
36827	337.466	–15.25175	334.7613	–14.77030
64078	340.5282	–12.46548		
66200	337.9686	–23.58168		
71759	336.9003	–19.77974		
75342	327.5839	–19.95945	323.5218	–20.12937
77163	358.6376	–8.56689		
109577	329.2012	–8.50364		
116354	336.8974	–9.42344		
Группа 2				
954	272.9172	–29.35984	272.8784	–29.37554
1473	269.6006	–40.67591		
3231	257.7982	–29.52141		
13244	277.7128	–21.80558		
13717	256.542	–31.61938		
38747	270.7768	–23.15413	270.2014	–22.76104
48331	282.5253	–18.55378	282.3422	–18.67720

59152	273.7922	–33.36932	272.8827	–33.06071
59199	249.2628	–29.28332		
80337	274.9908	–33.99162		
102395	256.2824	–37.93988		
102978	267.5123	–30.07533		
Группа 3				
3909	299.03	–45.98114		
36425	287.4783	–57.43864		
56154	292.5792	–54.45865	293.2353	–54.45354
50061	284.2264	–42.28116	283.129	–43.04957
62103	279.0569	–57.17130		

Кроме пространственно-кинематических критериев важно отобрать звезды по значению возраста, так как поток, занимая столь обширное пространство, перемежается и попавшими в него звездами поля. Звезды одного возраста ложатся на соответствующую изохрону, которая отображает теоретически рассчитанное положение звезд разных масс, но одного возраста на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Для применения диаграммы Герцшпрунга-Рассела в качестве эффективного фильтра необходимо сравнить наблюдаемую диаграмму с выбранной системой изохрон.

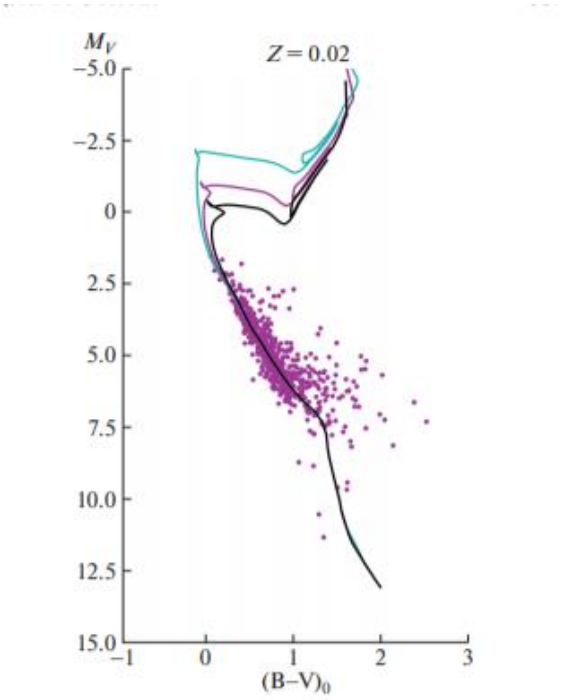

Рис.3.9.Диаграмма цвет-абсалютная звездная величина для 709 звезд нашей выборки. Показаны изохроны для различных возрастов:600 млн.лет – черная линия, 400 млн.лет – пурпурная, 200 млн.лет – голубая.

Нами взята падуанская система построения изохрон PARSEC [147]. Взяты изохроны со стандартным для БМ значением содержания тяжелых элементов Z = 0.02; диапазон возрастов взят из [115] – 200 млн. лет и [112] — 500 ± 100 млн. лет. Изохроны построены в стандартной системе координат: абсолютная звездная величина MV – показатель цвета $(B–V)_0$. Наблюдаемые величины переведены в систему координат изохрон следующим образом. В нашем распоряжении были звездные величины VT, BT и цвета в системе Tycho-2 [98]. Для их перевода в систему Джонсона использовались формулы перехода из раздела 1.3 работы [74] с использованием уравнений из [11]. Нормальные цвета вычислялись по формуле $(B–V)_0 = (B–V) – E(B−V)$, где $E(B−V) = A_V/R_V$, $R_V = 3.0$. Величина A_V определялась для каждой звезды по [15]. В случаях отсутствия A_V в каталоге RAVE DR5 бралась величина $A_V = = 1.9m/кпк$. Абсолютные величины найдены по формуле $M_V = V + 5 + 5\ \lg(\varpi) − A_V$. Звезды нашей выборки расположены на интервале V от 9m до 14m. На рис. 3.9 представлены полученные изохроны для нескольких значений возрастов. Диаграмма на рис. 3.9 позволила отобрать 709 звезд. Сюда вошли звезды, расположенные правее изохроны 200 млн. лет (показана черным цветом) и левее изохроны для возраста 600 млн. лет (показана голубым цветом). В последнем случае с учетом ошибок точки могут оказаться правее или соприкасаться с изохроной. Значения ошибок брались из Tycho-2 [98].

Так как звездные скопления и потоки рождаются из одного облака, то их члены имеют примерно одинаковый химический состав. К сожалению, данных о химическом составе звезд обычно не много и редкие каталоги содержат такую информацию. Однако, данные RAVE DR5 [117] включает информацию о содержаний тяжелых элементов звезд. Он включает многополосные спектры звезд, полученные на 1.2-метровом телескопе Шмидта Австралийской астрономической обсерватории (AAO). В каталоге даны содержания Fe, Mg, Al, Si, Ti, Ni, относительно водорода определенные, к сожалению, со значительными ошибками от 0.17 dex для Mg, Al и Ti; до 0.3 dex для Ti и Ni; 0.23 dex для Fe. Однако даже при такой точности мы можем отбросить звезды,

расположенные вне пределов содержаний химических элементов, характерных для звезд БМ. Эти пределы оценены следующим образом. Tabernero et al. [188] использовали критерий химического состава в сочетании с отбором по компонентам пространственной скорости U, V и W, Кинг [112]. Критерии химического состава Tabernero et al. [188] построены по данным [4, 99, 126]. Таким образом, по 16 звездам [188] были определены интервалы, в нашем случае равные [Fe/H] от –0.13 до 0.13; [Mg/H] от –0.17 до 0.075; [Al/H] от –0.12 до 0.115; [Si/H] от –0.073 до 0.105; [Ti/H] от –0.07 до 0.12; [Ni/H] от –0.14 до 0.083 (диапазоны фильтрации). В RAVE DR5 дано несколько измерений содержаний химических элементов для одной и той же звезды. Мы отобрали звезды, у которых хотя бы одно измерение для конкретного элемента по своему содержанию попадает в диапазон фильтрации. Этот подход обоснован низкой точностью спектральных данных каталога RAVE DR5. Из 709 звезд, оставшихся на предыдущем шаге, для 593 найдены содержания перечисленных химических элементов. Из них 229 звезд удовлетворяют критерию для [Fe/H] (при этом 27 звезд исключительно по [Fe/H], но ни по какому другому из перечисленных элементов). Для 61 звезды [Fe/H] и одно из содержаний [Mg/H], [Al/H], [Si/H] и [Ni/H] попали в указанные выше диапазоны. Далее 70 звезд попали в указанные диапазоны по [Fe/H] и еще двум различным содержаниям, 45 — по [Fe/H] и еще трем, 23 звезды — по [Fe/H] и еще четырем. Только у трех звезд содержания всех шести химических элементов (включая [Fe/H]) удовлетворяют нашим критериям (табл. 3.9). Проверка показала, что эти звезды в составе БМ обнаружены впервые. Для сравнения брались списки звезд БМ из статей [8, 65,69,87, 99, 112, 113,132,140,143,161,174 ,180,186]. Колонки табл. 3.9 содержат номер TGAS, координаты из Gaia, координаты индивидуального апекса звезды A и D, параллакс, компоненты собственного движения и их ошибки из Gaia, лучевую скорость с ошибкой, содержание химических элементов из RAVE DR5. Жирным шрифтом выделены содержания химических элементов, попадающие в диапазоны фильтрации.

Таблица.3.9. Звезды Gaia, прошедшие полный комплект фильтров.

TGAS	4349305401162869248	3568397574141437824	6269791540714113664
RA,град	242.775	177.94	215.51
DEC,град	−6.53599	−16.4103	−27.4073
A,град	319.99	317.241	261.668
D,град	−17.4357	−61.5193	−61.5194
π,мсд	3.02	7.31	5.03
σπ,мсд	0.33	0.33	0.5
μα,мсд/год	4.348	9.845	9.395
σμα,мсд/год	0.903	0.756	1.535
μδ,мсд/год	13.044	−29.929	−17.162
σμδ,мсд/год	0.578	0.308	0.587
Vr,км/с	0.232	−2.022	17.965
σVr,км/с	0.84	0.751	1.435
[Mg/H]	–0.25,**−0.17,−0.11, −0.11,−0.08**,–0.19	**0.04**,0.17,0.14,0.15, 0.15,0.18,0.22	**0.07,−0.09,−0.05,** –0.33,–0.18
[Al/H]	–0.25,**−0.1**,–0.27, –0.15,–0.13,–0.15	0.17,0.24,0.15,**0.04**, **0.06,0.02,−0.06**	**−0.03,**–0.27,–0.15, –0.31
[Si/H]	–0.18,**−0.01**,–0.08, **0.03,0.04,−0.05**	0.12,0.26,0.2,**0.11**,0.16, 0.15,0.13	0.18,**0.11**,0.28,0.32, **−0.07**
[Ti/H]	**0.01,**0.14,0.27,0.17, 0.4,0.22	**0.08**,–0.22,0.21,**−0.04**, **−0.05**,0.23,**−0.07**	–0.19,**0.07**,–0.1,**0.1**
[Fe/H]	**−0.1,−0.01,0.04, 0.03,0.09,−0.04**	**−0.08,0.09,0.02,−0.04, −0.06,−0.06,−0.04**	**−0.08,−0.09,0.07,** –0.14,–0.31
[Ni/H]	**0.07**,0.42,0.34	**0.07**,0.19,**−0.06**	0.33,**0**

Применив фильтры по пространственным координатам и скоростям, лучевым скоростям, $M_V - (B–V)_0$ диаграммы, а также отбор по [Fe/H], [Mg/H], [Al/H], [Si/H], [Ti/H], [Ni/H], мы получили списки звезд на каждом из этапов. Все фильтры прошли лишь три звезды, данные о которых приведены в табл. 3.9, а их положения на AD-диаграмме — на рис. 3.10. Аналогичный результат получен van Leeuwen et al.[84], где поиск слабых членов БМ осуществлен путем сопоставления собственных движений с локальной проекцией пространственной скорости группы. В [84] также найдены три звезды — кандидата в состав БМ. Номера их или координаты не приведены, что не позволило сделать сравнение. О трудности поиска новых членов БМ говорит тот факт, что число обнаруженных звезд потока БМза последние 60 лет практически не изменилось [200]. Новые данные по структуре потока БМ возможно получить с использованием каталога Gaia DR2 [102] с более полным

объемом звезд и данных для них, включая лучевые скорости. Однако в [102] нет данных о химическом составе и соответственно нет возможности использовать важный фильтр по содержаниям химических элементов.

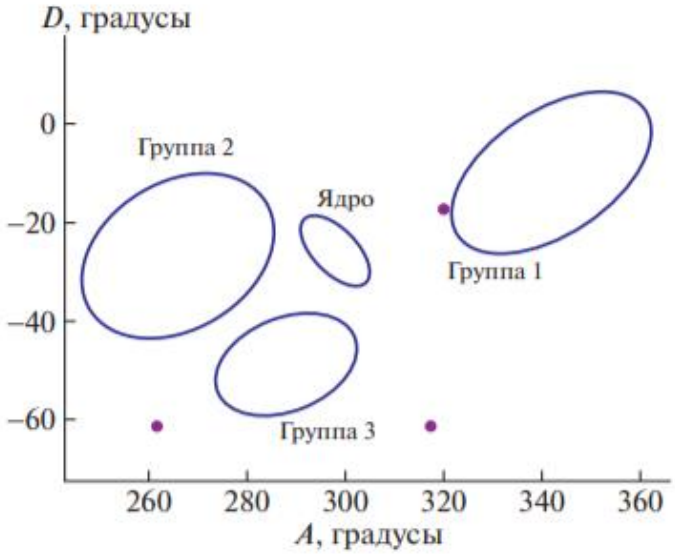

Рис.3.10. AD-диаграмма для звезд из табл. 3.9. Овалами показаны области групп и ядра потока. Фиолетовые точки – положени трех звезд, оставшихся после применения всех критерив (табл.3.9).

Обнаруженные 3 звезды сложно отнести к какой-либо из указанных ранее групп (разве что звезду Gaia DR1 4349305401162869248 можно с натяжкой приписать к Группе 1), но в целом видно, что с использованием новых данных картина не изменилась. Как показало наше исследование, видимые отличия положений апексов по HIPPARCOS и Gaia носят случайный характер (табл. 3.8 и рис. 3.8). В целом построенная по Gaia структура БМ подтверждает результаты [40]: звезды не выходят за пределы тех групп, в которых они были ранее обнаружены.

Что в итоге можно сказать о происхождении кинематических неоднородностей внутри РЗС? В звездных системах с низкой дисперсией скоростей взаимная гравитация могла бы привести к возникновению парных и множественных корреляций положений и скоростей звезд. Современные расчеты приводят к разнообразным проявлениям неустойчивости в звездных

скоплениях. Динамические расчеты показывают, что звезды в скоплениях могут образовывать группы или потоки с близкими кинематическими и динамическими параметрами (см. работы Данилова и Лескова [214,215,216,217]). Причинами образования таких групп на периферии скопления могут быть колебания силового поля [216, 217]. Рассмотрение флуктуаций фазовой плотности и их спектров позволяет обобщить влияние неустойчивости на динамику и кинематику звездных групп в скоплении. Этот метод позволяет рассмотреть вопрос о формировании волн плотности и звездных групп с различными кинематическими и динамическими характеристиками [46,47,48]. Группы могли возникать также при возмущениях, связанных с прохождением плотного диска или гигантских молекулярных облаков [10].

Нами так же была оценена дисперсия скоростей внутри потока БМ. На рисунке 3.11 показаны векторы UVW в ссответствующих им поскостях галактических координат XYZ. Звезды, принадлежащие разным группам, размечены цветами. Это данные HIP+Vr как в таблице 3.8. Здесь дисперсия скоростей внутри потока составляет 29.77 км/с. На рис. 3.12 произведено сравнение для новых данных (TGAS+RAVE DR5) со старыми, для тех звезд, для которых они имелись (11 звезд). Дисперсия, оцененная по новым и старым данным, не сильно отличается и составляет 24.93 и 24.68 км/с, соответственно.

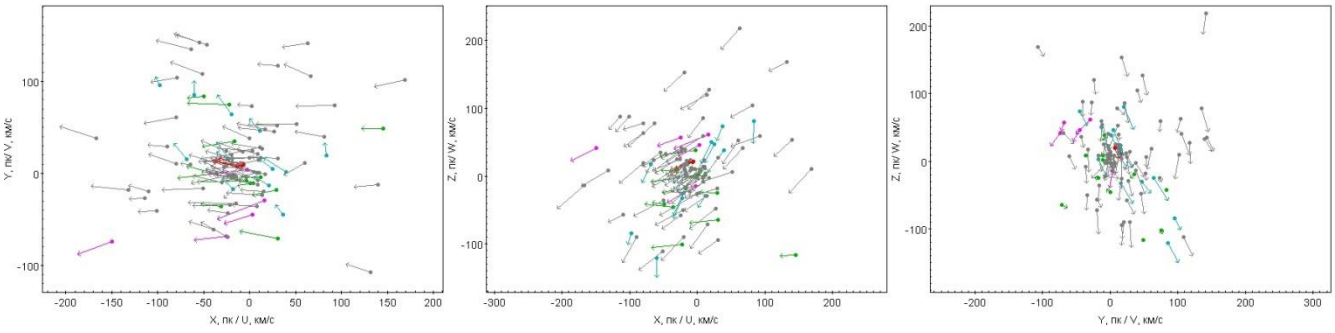

Рис.3.11. Движение звезд БМ в галактической плоскости. Цветом отмечены звезды, принадлежащие разным группам: ядро – красный, граппа 1 – сине-зеленый, группа 2 – зеленый, группа 3 – маджента, корона – серый.

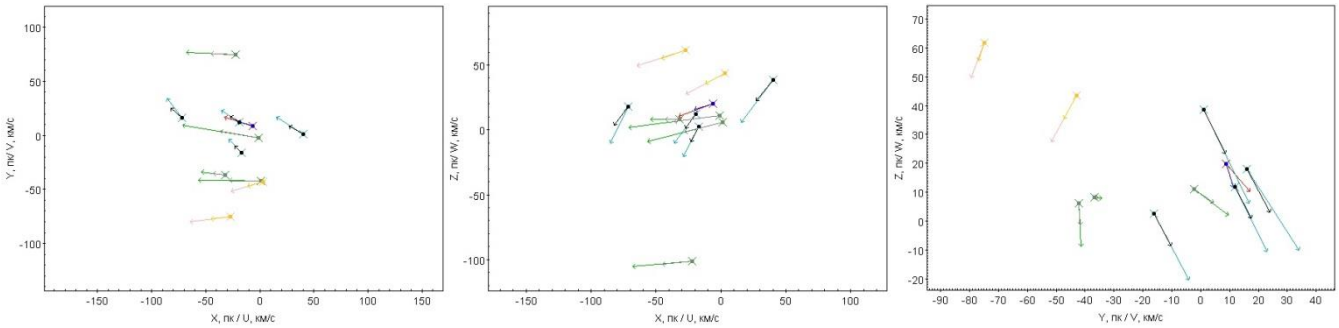

Рис.3.12. Движение звезд БМ в галактической плоскости. Цветом отмечены звезды, принадлежащие разным группам: старые данные (HIP), крестики: ядро – красный, граппа 1 – сине-зеленый, группа 2 – зеленый, группа 3 – бежевый; новые данные(TGAS), кружки: ядро – синий, граппа 1 – черный, группа 2 – серый, группа 3 – желтый.

Результаты опубликованы автором в работе

Vereshchagin, S. V.; Chupina, N. V.; Postnikova, E. S. Kinematic Groups in the Corona of the Ursa Majoris Flow Indicated by Gaia Data Astronomy Reports, Volume 62, Issue 8, pp.502-512 2018

Положения, выносимые на защиту:

Отбор звезд Gaia DR1, входящих в состав потока. Расширенный поиск по параллаксам, собственным движениям, фотометрии и детальному химическому составу (Fe, Mg, Al и тд). Сделана оценка роли точности лучевых скоростей и астрометрических параметров на деталях AD-диаграммы.

По новым высокоточным данным подтверждена неоднородность кинематической структуры БМ. Поток состоит из ядра и трех групп, разделяющихся по направлению средней пространственной скорости.

Предложена трактовка природы потока, как распадающейся звездной ассоциации. Исходя из наших оценок, дисперсия скоростей в кинематически выделенных группах не различается на уровне ошибок измерений и составляет величину характерную для распадающейся звездной ассоциации (приблизительно 20 – 30 км/с).

Глава 4. Сценарий эволюции ОВ-ассоциаций и звездных скоплений от образования до распада, характеристика выбранных объектов и их место в сценарии

4.1. Место выбранных объектов в эволюционном сценарии

Рис. 4.1 иллюстрируют процессы эволюции от зарождения скопления, затем начало фрагментации на первой ступени и далее звездообразование, потеря газа, распад, зарождение звездного потока. Постепенно расширяясь вдоль орбиты, скопление превращается в “копье”, хотя не успевает за время жизни Галактики замкнутся в кольцо вокруг галактического центра. Для скопления время недостаточно и оно достигает лишь стадии звездного потока. Звездные скопления являются основными местами образования звезд в галактиках, причем после удаления газа зонами ионизованного водорода остается только несколько процентов гравитационно связанных скоплений [191,116]

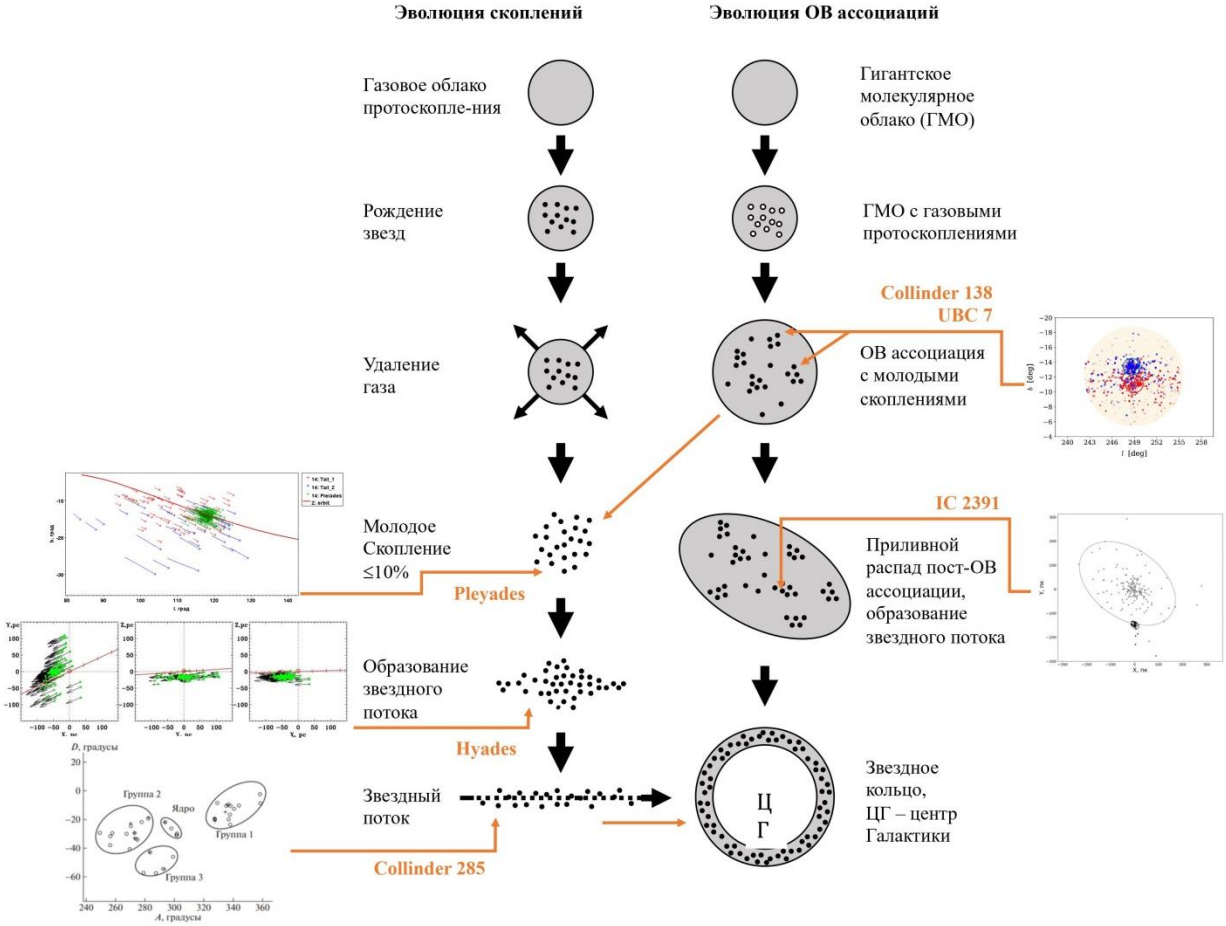

Рис.4.1.Сценарий эволюции звездных скоплений (левая ветка) и OB ассоциаций (правая ветка) [219]. Показаны последовательные стадии эволюции. Точками схематично обозначена звездная составляющая, группами точек - скопления, полыми кружками - протоскопления. Серым цветом показано присутствие газа в системе. Приведены скопления и потоки, изучению которых посвящена данная работа. Названия приведены около оранжевых стрелок (стрелки показывают место объекта в эволюционном сценарии). Показаны характерные для каждого скопления наши рисунки, которые детально рассматриваются ниже.

Распавшиеся скопления заполняют объем OB-ассоциации звездами, наследующими основные параметры исходных гигантских молекулярных облаков. OB-ассоциации не связаны гравитационно, поэтому приливные силы Галактики со временем искажают их форму за период порядка кеплеровского времени на уровне орбиты ассоциации в Галактике. Этот процесс численно промоделирован Тутуков и др.[219], Рис. 4.1.

В результате потери газа такая группа теряет гравитационную связь между своими членами и распадается. OB-ассоциации и звездные скопления (тесно связанные звездные системы) располагаются иерархически: ассоциации включают скопления. Следовательно, их эволюция представляет единый процесс. На Рис.4.1 представлен сценарий и место наших скоплений в нем. Мы видим на Рис.4.1 последовательность стадий процесса эволюции OB-ассоциаций и звездных скоплений от образования до распада, в ходе которого они превращаются в звездные потоки, движущиеся в диске, и звездные «кольца» вокруг галактического центра.

4.2. О природе потоков

Движущиеся звездная группа (кинематическая группа, поток, сверхскопление) – это ансамбль гравитационно несвязанных звезд, которые разделяют одинаковое пространственное движение [140, 34]. Отметим, что

взятое нами скопление IC 2391 является интересным объектом, который представляет собой рассеянное звездное скопление, а также кинематическую группу. Поток IC 2391 был открыт Эггеном[66], и он использовал термин «сверхскопление» для этого объекта. В эпоху Гайи, благодаря наличию чрезвычайно точных данных, движущиеся группы рассматриваются как объекты, способные дать ключ к пониманию структуры диска Галактики в окрестностях Солнца. Молодые скопления, такие как IC 2391, помогают получить информацию о химическом составе в области, близкой к солнечной системе [45].

О форме изучаемых звездных систем. Исторически первые результаты по форме скоплений получили Чумак и Расторгуев [35]. Если рассматривать звезды, покинувшие скопление отдельно, как не связанные гравитацией со скоплением, то они, оставаясь на орбите, образуют два шлейфа: позади и впереди скопления. Для расчетов в статье Чумак, Расторгуев [35] использовалась модификация программы NBODY6 [1]. Особенность в том, что расчеты продолжались после того, как звезда покинула скопление (где силы со стороны звезд скопления пренебрежимо малы и учитываются только силы регулярного гравитационного поля Галактики). Варьировались начальная масса скопления и вириальный радиус. Учитывались процессы звездной эволюции, динамика двойных и кратных (отдельно). Внешнее гравитационное поле Галактики взято из [138]. За 1.5 млрд. лет практически все звезды скопления уходят в шлейфы.

Наблюдения не противоречат теории. Так, в работе Adams et al [2], изучалась форма Плеяд, и было показано, что это скопление в плоскости XY растянуто по направлению к ЦГ.

В Kharchenko et al [110] показано, что под влиянием приливных сил Галактики РЗС приобретает форму эллипсоида с большой осью, направленной приблизительно в сторону ЦГ. Это происходит классическим путем: существующий градиент силового поля приводит к разнице сил притяжения (относительно центра скопления имеются диаметрально противоположно

направленные векторы силы, которые сильнее притягиват к ЦГ ближнюю часть скопления, а дальнюю - слабее). Согласно третьему закону Кеплера, система, скорее всего, еще немного поворачивается вокруг своей оси – дальние части скопления вынуждены двигаться быстрее по орбите, чтобы уравновесить центробежную силу, – скопление не разваливается. Звезды, покинувшие скопление образуют “хвосты”, расположенные вдоль орбиты. Для расчетов в [110] использовалась программа N тел (fiGRAPE), галактический потенциал - из Mayamoto & Nagai[138], учитывались времена жизни звезд, потеря массы звездами. Скопление превращается в эллипсоид, большая ось которого расположена под углом 30°–40° к радиус-вектору на ЦГ. Изучены наблюдаемые параметры для 650 скоплений. Только для двух (БМ и Гиады) удалось построить 3D распределения, остальные рассмотрены как проекции на небесную сферу.

Итак, оценки по пространственному расположению и компонентам пространственной скорости (полученных по измерениям Gaia) позволили в целом подтвердить общность положения и направления движения в пространстве звезд потока и скопления IC 2391. Получено свидетельство их генетической связи в прошлом, возможно, в момент их образования в диске.

Webb et al. [202] убедительно подтверждают существование звездных потоков в форме копья, использовали данные APOGEE и Gaia для идентификации звезд, которые соответствуют рождению в той же ассоциации или звездном скоплении, что и Солнце. Анализ ограничен звездами, которые соответствуют солнечному изобилию металлов в пределах их погрешнсти, поскольку они могли сформироваться из того же гигантского молекулярного облака (ГМО), что и Солнце. Расчеты движения ограничены диапазоном орбитальных воздействий в статических и зависящих от времени приливных полях. Пространственное распределение звезд в модели солнечного скопления напоминает копье (также см. Рис.4.1). Расчеты орбит в статическом приливном поле MWPotential2014 и в зависимости от времени действия приливных сил с учетом спиральных волн и с переходными спиральными рукавами.

Благодаря гравитационному взаимодействию, звезды с большей массой теряют кинетическую энергию и опускаются к центру, тогда как члены с меньшей массой увеличивают свою скорость и занимают все больший объем пространства. Если скорость звезды превышает скорость убегания из системы, она покидает скопление и продолжает двигаться рядом с ним. Выбросу из скопления подвержены наиболее легкие его члены (см, напр. [16] и [13]). Этот процесс способствует образованию и пополнению приливных хвостов. В дополнение к внутренней звездной динамике на эволюцию пространственной формы скопления влияет дифференциальное вращение, что постепенно меняет и вытягивает его форму. Это подтверждают численные модели ([35] и [36], [110]).

Эффекты влияния проходов скопления через спиральные рукава, взаимодействие с диском, при некруговой наклонной орбите и большой массе скопления, приливное разрушение от близлежащих гигантских молекулярных облаков или возможное взаимодействие с другими массивными скоплениями также меняют форму скопления. Все эти причины ведут к постепенному распаду скопления, перемешиванию его бывших членов со звездами других распавшихся скоплений.

В конце концов, распавшееся звездное скопление может быть распознано как движущаяся звездная группа, или звездный поток, если его члены все еще имеют общую кинематику и занимают ограниченный объем в пространстве [212]. При этом звезды малой массы легче покидают скопление, а их общее количество играет важную роль в выживании звездного скопления [51]. Отметим, что наиболее компактные, а также и далекие от галактического центра скопления имеют больше шансов на более длительное существование. Скопления включающее достаточное количество маломассивных звезд противостоят перемешиванию со звездами поля и выживают на относительно небольшой шкале времени приблизительно в 1 млрд лет [52].

4.3. Спутники галактик

Известно более 100 карликовых галактик являющихся спутниками нашей Галактики. Это возможные источники звездных потоков, в которые они могут превратиться, проникнув в область гравитационного влияния Галактики.

В работе Shipp et al. [173] обнаружено более 15 далеких потоков, на расстоянии от ЦГ 50 кпк и далее. У них очень маленькие собственные движения звезд и металличности. Их невысокая поверхностная яркость делает их сложными для обнаружения. Появление крупных обзоров неба быстро увеличило количество известных потоков вокруг Млечного Пути. Для их изучения и изучения используется сочетание данных GDR2 и The Dark Energy Survey (DES) [173] - это исследование в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, в котором для съемки используется 4-метровый телескоп Виктора М. Бланко, расположенный в Межамериканской обсерватории Серро Тололо (CTIO) в Чили, оснащенный камерой для наблюдений темной энергии (DECam).

Массивные карликовые галактики, которые сливаются с Млечным Путем, могут достигать плоскость диска, прежде чем будут полностью разрушены. В статье Necib et al. [144] приведены свидетельства существования огромного звездного потока в окрестностях Солнца, которые могут дать первое указание на то, что такое событие произошло в Млечном Пути. Идентифицированы около 500 звезд, которые имеют когерентное радиальное и тангенциальное движение в этом потоке. Использован каталог аккрецированных звезд, построенный с применением методов глубокого обучения построенный по Gaia DR2. Этот поток (Nyx) сосредоточен в пределах ± 2 кпк от средней плоскости Галактики и охватывает весь изученный радиальный диапазон (6,5–9,5 кпк).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В диссертации рассмотрен ряд звездных систем (скопление, поток, ассоциация) расположенных на различных стадиях эволюции в сценарии приведенном на Рис.4.1. Детально изучены строение и определены параметры выбранных объектов. В целом картина нашего сценария получает убедительные наблюдательные свидетельства. Подтверждается иерархия рассмотренных систем на разных стадиях эволюции. Так, рождаясь в ассоциациях, скопления быстро распадаются и превращаются в потоки. Выжившие скопления продолжают разрушаться в основном действием приливных сил Галактики.

На самых ранних стадиях эволюции OB-ассоциаций разрушаются сотни скоплений внутри ассоциации (размер 100 пк). Характерный объем на одно скопление внутри ассоциации составит $100^3/10^3 = 10^3$ пк^3. Взяв радиус 2пк, получим расстояние между скоплениями 20 пк, радиус области скопления 10 пк, скопленния расположены на 2х радиусах, соответственно. В течение этого времени (до 10^8 лет) в пределах ассоциации мы видим выжившие скопления (характерное расстояние между ними составляет 20 пк). В том случае, если их два или несколько, то расстояния между выжившими скоплениями, естественно не превышает размер ассоциации. Поскольку эти скопления связаны общим поисхождением и кинематикой, то представляет интерес сравнение их параметров. Такое сравнение выполнено в диссертации для Cr 135 и UBC 7. Подтверждена концепция эволюционной схемы на Рис.4.1 – скопления обладают близкими кинематическими параметрами и расположением в пространстве.

Более старое IC 2391 показывает связи и с потоком и ассоциацией, подтверждая Рис.4.1. По прошествии 10^8 лет в ассоциации наблюдается лишь одно выжившее скопление. Скопления, превратившиеся в поток, а также звезды, перемешавшиеся от распавшихся скоплений, составлят население ассоциации Аргус.

В более старых скоплениях с возрастами превышающими 100 млн.лет – Плеядах и Гиадах присутствуют потоки. Ассоциации же за время равное их

возрастам превращаются в настолько вытянутые звездные группы, что их трудно выделить наблюдениями. Отмечается в этом случае появление межзвездных и новых комет вероятно связанными с этими скоплениями.

Самым старым в нашем распоряжении оказался поток Большой Медведицы. Его характерной чертой подтверждаемой в диссертации является кинематическая неоднородность. В нашей модели это уже полностью проэволюционировавшая ОВ-ассоцмация. В ее составе нет скоплений. Это значит – она в зависимости от возораста могла полностью превратиться в кольцо (см.например, [150], [201]). Подобное распределение звездных потоков наблюдается в других галактиках [151]. Этот эффект также хорошо укладывается в схему на Рис.4.1. На поздних стадиях все скопления в ассоциации (каковой является данный поток) разрушены и превратились в потоки. По этой причине наблюдения показывают наличие нескольких субпотоков, т.е. распавшихся скоплений внутри БМ.

Список литературы

1. Aarseth, S.J. Cambridge University Press, P. 430. (2003)
2. Adams, J. D.; Stauffer, J. R.; Monet, D.G.; Skrutskie, M. F.; Beichman, C. A., AJ, 121, Issue 4, 2053 (2001)
3. Ahn, C. P.; Alexandroff, R.; Allende P., C.; Anderson, S. F.; Anderton, T.; A&A, Suppl., 203, Issue 2, 21, 13. (2012).
4. Ammler-von Eiff, M. & Guenther, E. W., A&A, 508, 677 (2009).
5. Asiain, R., Figueras, F., Torra, J. and Chen, B., A&A, 341, 427 (1999)
6. Asiain, R., Figueras, F., Torra, J., A&A, 350, 434–446 (1999)
7. Asiain, R., Figueras, F., Torra, J., Astrophys. and Sp. Sci. 272, 105 (2000)
8. Bannister, N. P., Jameson, R. F., MNRAS,. 378, L24 (2007).
9. Bekki, K., Beasley, M. A., Forbes, D. A., & Couch, W. J., ApJ, 602, 730 (2004)
10. Bergond, G., Leon, S. and Guibert, J., A&A, 377, 462 (2001).
11. Bessell, M. S. Publ. Astron. Soc. Pacif. 112, 961 (2000).
12. Bhatia, R. K. & Hatzidimitriou, D., MNRAS, 230, 215(1988)
13. Bhattacharya S, Mishra I, Vaidya K, Chen W.P. ,ApJ 847,138 (2017)
14. Bica, E., Dutra, C., Soares, J., & Barbuy, B., A&A, 404, 223 (2003)
15. Bica, Eduardo; Pavani, Daniela B.; Bonatto, Charles J.; Lima, Eliade F. AJ,157,12(2019)
16. Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics: Second Edition. Princeton University Press(2008)
17. Bonatto, C. & Bica, E., MNRAS, 403, 996 (2010)
18. Bouy, H., Bertin, E., Sarro, L.M., et al.: Astron. Astrophys. 577, A148 (2015)
19. Bovy. J., AJ. Supp., V. 216, Issue 2, P. 27. (2015)
20. Brandt, T. D. and Huang, C. X. ApJ, 807, 24 (2015)
21. Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al., MNRAS, 427, 127 (2012)
22. Bronfman, L., Nyman, L.-A., & May, J. A&AS, 115, 81 (1996)
23. Brown, A.G.A., Arenou, F., van Leeuwen, F., Lindegren Luri, X.:In: Proceedings of the ESA, ‘Hipparcos’ Symposium, Venice 97.ESA SP, vol. 402, pp. 63–68 (1997)

24. Brown, A.G.A., Vallenari, A.; Prusti, T.; de Bruijne, J. H. J.; Mignard, F. et al. A&A, 595, 337 (2016).

25. Brown, J. H., Burkert, A., & Truran, J. W., ApJ, 440, 666 (1995)

26. Bukowiecki, Ł., Maciejewski, G., Konorski, P., & Strobel, A., Acta Astron.,61, 231(2011)

27. Cantat-Gaudin, T., Jordi, C., Vallenari, A., Bragaglia, A., Balaguer-Nunez, L., Soubiran, C.,Bossini, D., Moitinho, A., Castro-Ginard, A., Krone-Martins, A., Casamiquela, L., Sordo, R.,Carrera, R., A&A, 618, A93 (2018)

28. Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S., ApJ, 345, 245 (1989)

29. Castro-Ginard A , C. Jordi , X. Luri , F. Julbe , M. Morvan, L. Balaguer-Núñez, and T. Cantat-Gaudin, A&A Vol. 618, A.59 (2018)

30. Castro-Ginard, A., Jordi, C., Luri, X., et al., A&A, 635, A45 (2020)

31. Chakrabarty, D., A&A, 467, 145 (2007)

32. Chen, L., Zhao, J.: In: Proceedings of the ASP Conference Series Harmonizing Cosmic Distance Scales in a Post-Hipparcos Era. Astronomical Society of the Pacific, vol. 167, pp. 259–262 (1999)

33. Chubak, C. and Marcy, G. American Astronomical Society, AAS Meeting No 217, id.434.12; Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 43, (2011).

34. Chumack Ya.O. & Rastorguev, A. S.. Astronomy Letters, 32, 157 (2006)

35. Chumak, Ya. O. & Rastorguev, A. S., Astronomy Letters, 32, 446 (2006)

36. Chumak, Ya. O., Rastorguev, A. S., Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, V.246, p. 107-108 (2008)

37. Chumak, Ya. O., Platais, I., McLaughlin, D. E., Rastorguev, A. S.,Chumak, O. V., MNRAS,402, 1841 (2010)

38. Chupina, N. V. and Vereshchagin, S. V.. Star formation from the small to the large scale. ESLAB symposium (33 : 1999 : Noordwijk, The Netherlands). Edited by F. Favata, A. Kaas, and A. Wilson. Proceedings of the 33rd ESLAB symposium on star formation from the small to the large scale, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2-5 November 1999 Noordwijk, The Netherlands: European Space Agency (ESA), ESA SP 445., p.347 (2000)

39. Chupina, N. V., Reva, V. G. and Vereshchagin, S. V., A&A, 371, 115 (2001)

40. Chupina, N. V., Reva, V. G. and. Vereshchagin, S. V.,A&A, 451, 909 (2006).

41. Ciardi, D. R., Crossfield, I. J. M., Feinstein, A. D., Schlieder, J. E et al., AJ,155, 10 (2018)

42. Ciaría, J. J., and Kepler, S. O. Publ. Astron. Soc. Pac. 92, 501. (1980)

43. Conrad, C., Scholz, R. -D., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E.,Schilbach, E.; Röser, S., A&A, 562, A54 (2014)

44. Conrad, C., Scholz, R. D., Kharchenko, N. V., et al., A&A, 600, A106 (2017)

45. D'Orazi, V. D., Randich, S., A&A, 2009, 501, 553 (2009)

46. Danilov, V. M. & Putkov, S. I., Astrophys. Bull. 70, 71 (2015)

47. Danilov, V. M. & Putkov, S. I., Astrophys. Bull. 68,154 (2013)

48. Danilov, V. M. & Putkov, S. I., Astrophys. Bull. 69, 27 (2014)

49. de Bruijne, J.H.J. MNRAS, 306, 381 (1999)

50. de La Fuente Marcos, R. & de La Fuente Marcos, C., A&A, 500, L13 (2009)

51. de Grijs, R., Parmentier, G,Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, Volume 7, Issue 2, pp. 155-186 (2007).

52. de Grijs, R., Astrophysics and Space Science, 324, Issue 2-4, 283 (2009)

53. De Silva, G. M.; D'Orazi, V.; Melo, C.; Torres, C. A. O.; Gieles, M.; Quast, G. R.; Sterzik, M. MNRAS, 431, 1005 (2013)

54. De Simone, R. S., Wu, X., & Tremaine, S., MNRAS, 350, 627 (2004)

55. Dehnen, W., AJ, 115, 2384 (1998)

56. Dias, W. S.; Alessi, B. S.; Moitinho, A.; Lépine, J. R. D. , A&A Vol. 389 A.871(2002)

57. Dias, W., S., Monteiro, H., Lepine,J. R. D., Prates, R., Gneiding, C., D.,Sacchi, M., MNRAS 481, 3887 (2018)

58. Dieball, A., & Grebel, E. K., A&A, 339, 773 (1998)

59. Dieball, A., Müller, H., & Grebel, E. K., A&A, 391, 547 (2002)

60. Dodd, R. J., MNRAS, 355, 959 (2004)

61. Dommanget J., Nys O. The Catalogue of the Components of Double and Multiple Stars (C C D M) — First edition. In: Høg E., Seidelmann P.K. (eds) Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Optical Astrometry. International Astronomical Union / Union Astronomique Internationale, vol 166. Springer, Dordrecht. (1995)

62. Duflot, M., Figon, P., Meyssonnier, N., A&AS, 114, 269 (1995)

63. Dutra, C. M., Bica, E., Soares, J., & Barbuy, B., A&A, 400, 533 (2003)

64. Efremov, Y. N., Schilbach, E., Zinnecker, H., Astronomische Nachrichten, 318, 335 (1997)

65. Eggen, O. J., MNRAS, 118, 65 (1958).

66. Eggen, O. J., AJ, 102, 2028 (1991)

67. Eggen, O. J., AJ, 104, 1482 (1992)

68. Eggen, O. J., AJ, 110, 2862 (1995)

69. Eggen, O. J., AJ. 116, 782 (1998).

70. Elmegreen, B. G. & Efremov, Y. N., ApJ, 466, 802 (1996)

71. Elsanhoury,W. H., Nouh, M. I., Abdel-Rahman, H. I., Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, 51, 199 (2015)

72. Elsanhoury, W. H., Haroon, A. A., Chupina, N. V., Vereshchagin, S. V., Sariya, D. P., Yadav R. K. S., Jiang I.-G., New Astron. 49, 32 (2016)

73. Elsanhoury, W. H., Postnikova, E. S., Chupina, N. V., Vereshchagin, S. V., Sariya, Devesh P.,Yadav, R. K. S., Jiang, I.-G., Astrophysics & Space Science (ApSS), 363, 58 (2018)

74. ESA, ed., The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission, ESA Special Publication, volume 1200 (1997).

75. Ernst, A., Just, A., Berczik, P., & Olczak, C., A&A, 536, A64 (2011)

76. Evans, D.S. IAU Symp., 30, held in Toronto, Canada, 30, 57-62 (1979)

77. Famaey, B., Jorissen, A., Luri, X., Mayor, M., Udry, S., Dejonghe, H., Turon, C., A&A, 430, 165 (2005)

78. Famaey B., Pont F., Luri X., Udry S., Mayor M., Jorissen A., A&A, 461, 957 (2007)

79. Francis C., Anderson E., Astron. Lett., 38, 763 (2012)

80. Froebrich, D., Scholz, A., & Raftery, C. L., MNRAS, 374, 399 (2007)

81. Froebrich, D., Schmeja, S., Samuel, D., & Lucas, P. W., MNRAS, 409, 1281(2010)

82. Fujimoto, M. & Kumai, Y., AJ, 113, 249 (1997)

83. Fürnkranz, V., Meingast, S., & Alves, J., A&A, 624, L11 (2019)

84. Gaia Collaboration, F. van Leeuwen, A. Vallenari, C. F. Jordi, et al., A&A, 601, A19 (2017).

85. Galli, P.A.B., Teixeira, R., Ducourant, C., Bertout, C., BenevidesSoares, P.: A&A, 538, A23 (2012)

86. Galli, P. A. B. , E. Moraux, H. Bouy, J. Bouvier, J. Olivares, and R. Teixeira, Astron. and Astrophys. 598, A48 (2016).

87. Galvez-Ortiz, M. C., Kuznetsov, M., Clarke, J. R. A , Pavlenko, Ya. V. et al., MNR AS. 439, 3890 (2014).

88. Gieles M, Portegies Zwart SF, Baumgardt H, Athanassoula E, Lamers HJGLM, et al. MNRAS, 371,793 (2006)

89. Gontcharov, G. A., Astron. Lett., 32, 759 (2006)

90. Goodwin, S. P., MNRAS, 284, 785 (1997)

91. Gossage, S., Conroy, C., Dotter, A., Choi, J., Rosenfield, P., Cargile, P., Dolphin, A., ApJ, 863,67 (2018)

92. Groenewegen, M.A.T., Decin, L., Salaris, M., De Cat, P.: Astron. Astrophys. 463, 579 (2007)

93. Gunn, J. E., Griffin, R. F., Griffin, R. E. M. and Zimmerman, B. A. AJ, 96, 198 (1988)

94. Gusev, A. S. & Efremov, Y. N., MNRAS, 434, 313 (2013)

95. Harfst, S., Gualandris, A., Merritt, D., et al., New A, 12, 357 (2007)

96. Harris, W. E. , AJ, 112, 1487 (1996)

97. Hatzidimitriou, D. & Bhatia, R. K., A&A, 230, 11(1990)

98. Høg, E., Makarov, V.V. , Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P. and Wicenec, A. A&A, 355, L27 (2000).

99. Holmberg, J., Nordstrom, B. and Andersen, J. A&A , 501, 941 (2009).

100. Jones, E., Oliphant, E., Peterson, P. et al., SciPy: Open Source Scientific Tools for Python,2001, http://www.scipy.org/

101. Karataş, Y., Bilir, S., Eker, Z., Demircan, O. MNRAS, 349, Issue 3, 1069 (2004)

102. Katz, D. and Brown, A. G. A., in: Proceedings of the Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, SF2A-2017, pp. 259–263 (2017).

103. Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., Schilbach, E., & Scholz, R.-D., A&A, 440, 403 (2005)

104. Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., Schilbach, E., & Scholz, R.-D., A&A, 438, 1163 (2005)

105. Kharchenko, N. V., Scholz, R.-D., Piskunov, A. E., Roeser, S., & Schilbach, E. Astronomische Nachrichten, 328, Issue 9, 889 (2007)

106. Kharchenko, N. V., Scholz, R.-D., Piskunov, A. E., Roeser, S., & Schilbach, E. b, VizieR Online Data Catalog: III/2801 (2007)

107.Kharchenko, N.V., Scholz, R.-D., Piskunov, A.E., Röser, S., Schilbach, E.: Astron. Nachr. 328, 889 (2007)

108.Kharchenko N. V., Berczik P., Petrov M. I., Piskunov A. E., Röser S., Schilbach E., and Scholz R.-D., A&A, 495, 807 (2009)

109.Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Schilbach, E., Röser, S., & Scholz, R.-D., A&A, 543, A156 (2012)

110.Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Schilbach, E., Röser S., Scholz R. -D. A&A, 558, id.A53,8 (2013)

111.King, I., AJ, 67, 471 (1962)

112.King, J. R.,. Villarreal, A. R, Soderblom, D. F., Gulliver, A. F. and Adelman, S. J. AJ. 125, 1980 (2003).

113.Klutsch, F. R. Freire, P. Guillout, A. Frasca, E. Marilli, and D. Montes, A&A,567, A52 (2014).

114.Krone-Martins, A., & Moitinho, A., A&A, 561, A57 (2014)

115.Konig, B., Fuhrmann, K., Neuhauser, R., Charbonneau, D. and Jayawardhana, R., A&A, 394, L43 (2002).

116.Kroupa, P., in Proceedings of IAU Symposium 241, eds A. Vazdekis and R. F. Peletier, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 109-119 (2007)

117.Kunder, G. Kordopatis, M. Steinmetz, T. Zwitter,et al., A J. 153, 75 (2017).

118.Lada, C. J., & Lada, E. A., ARA&A, 41, 57 (2003)

119.Larson, R. The Formation of Binary Stars, Proceedings of IAU Symp. 200, held 10-15 April 2000, in Potsdam, Germany, Edited by Hans Zinnecker and Robert D. Mathieu, 2001, p. 93 (2000)

120.Lee, S. H., Kang, Y.-W., & Ann, H. B., MNRAS, 432, 1672 (2013)

121.Lindegren, L., Lammers, U., Bastian, U., Hernández, J., Klioner, S., Hobbs, D. et al. A&A, 595, A4 (2016)

122.Lindegren, L.; Hernández, J.; Bombrun, A.; Klioner, S.; Bastian, U.; Ramos-Lerate, M.; de Torres, A.; Steidelmüller, H.; Stephenson, C.; Hobbs, D.; et al. A&A, 616, A.2 (2018)

123.Liu, J.-C., Zhu, Z., Hu, B., A&A, 536, A102 (2011)

124.Lodieu, N.; Pérez-Garrido, A.; Smart, R. L.; Silvotti, R., A&A, 628, id.A66, 26 (2019)

125.Loktin, A. V., Beshenov, G. V., Astronomy Reports, 47, 6 ed. R. Pallavicini, A. K.Dupree p. 371 (2003)

126.Lopez-Santiago, J., Montes, D. , Galvez-Ortiz, M. C., Crespo-Chacon, I., Martinez-Arnaiz, R. M., Fernandez-Figueroa, M. J., de Castro, E. and Cornide, M., A&A, 514, A97 (2010)

127.Lynga. Catalogue of open clustars data (1987)

128.Maderak, R. M.; Deliyannis, C. P.; King, J. R.; Cummings, J. D. AJ., 146, 143 (2013)

129.Mädler, T., Jofré, P., Gilmore, G., Worley, C.C., Soubiran, C., BlancoCuaresma, S., Hawkins, K., Casey, A.R.: A&A, 595, 59 (2016)

130.Maíz-Apellániz, J. & Weiler, M., A&A, 619, A180 (2018)

131.Makarov, V.V., Robichon, N., A&A, 368, 873 (2001)

132.Maldonado, J., Martinez-Arnaiz, R. M., Eiroa, C., Montes, D. andMontesinos B., A&A, 521, A12 (2010).

133.Marigo, P., Girardi, L, Bressan, A.,Groenewegen, M. A. T., Silva, L.,Granato, G. L, A&A, 482, 883 (2008)

134.Meingast, S., Alves, J. A&A, 621, id.L3, 6 (2019)

135.Melis, C., Reid, M.J., Mioduszewski, A.J., Stauffer, J.R., Bower, G.C.: Science 345, 1029 (2014)

136.Melnik, A. M., & Dambis, A. K., MNRAS, 400, 518 (2009)

137.Mermilliod, J.C., Mayor, M., Udri, S.: Astron. Astrophys. 498, 949 (2009)

138.Miyamoto, M., Nagai, R. Astronomical Society of Japan, Publications, 27, 4, P. 533-543 (1975)

139.Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., Ables, H. D., Bird, A. R., Dahn, C.C. et al, AJ, 125, 984 (2003)

140.Montes D., Lopez-Santiago P. J., Galvez M. C., Fernandez-Figueroa M. J., De Castro E. and Cornide M., MNRAS, 328, 45 (2001)

141.Moshtagh N. An open exchange for the MATLAB and Simulink user community. Program: Computes the minimum-volume covering ellipoid that encloses N points in a D-dimensional space, version 1.2 (2009)

142.Munari, U., Dallaporta, S., Siviero, A., Soubiran, C., Fiorucci, M., Girard, P. A&A, 418, L31 (2004)

143.Nakajima, T. and Morino, J.-I., AJ. 143, id. 2 (2012).

144.Necib, L.; Ostdiek, B.; Lisanti, M. et al. eprint arXiv:1907.07681 (2019)

145.O'Donnell, J. E., ApJ, 422, 158 (1994)

146. Odenkirchen, M., Grebel, E. K., Rockosi, C. M., et al., ApJ, 548, L165 (2001)

147. Padova database of stellar evolutionary tracks and isochrones, http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd

148. Patel, M. K.; Pandey, J. C.; Savanov, Igor S.; Prasad, Vinod; Srivastava, D. C MNRAS, 430, Issue 3, 2154 (2013)

149. Peng, E. W.; Ford, H. C.; Freeman, K. C.; White, R. L. AJ,124,3144 (2002)

150. Perottoni, H.D., Martin, C., Newberg, H.J. et al., MNRAS, 486, 843 (2019)

151. Pearson, S., Starkenburg, T. K., Johnston, K. V., Williams, B. F., Ibata, R. A., ApJ, 883, 87 (2019)

152. Perryman M. A. C., Brown A. G. A., Lebreton Y.,. Gomez A, et al., A&A, 331, 81 (1998)

153. Pietrzynski, G. & Udalski, A., Acta Astron., 49, 165 (1999)

154. Piskunov, A. E., Kharchenko, N. V.,Röser, S., Schilbach, E.,Scholz, R. -D. , A&A, 445, Issue 2, 545 (2006)

155. Pourbaix, D.; Tokovinin, A. A.; Batten, A. H.; Fekel, F. C.; Hartkopf, W. I.; Levato, H.; Morrell, N. I.; Torres, G.; Udry, S., A&A, 424, 727 (2004)

156. Priyatikanto, R., Kouwenhoven, M. B. N., Arifyanto, M. I., Wulandari, H. R. T.,& Siregar, S., MNRAS, 457, 1339 (2016)

157. Quillen, A. C., & Minchev, I., AJ, 130, 576 (2005)

158. Randich, S., Pallavicini, R., Meola, G. et al., A&A, 372, 862 (2001)

159. Reino, S., de Bruijne, J., Zari, E., d'Antona, F., & Ventura, P., MNRAS, 477, 3197 (2018)

160. Robichon, N., Arenou, F., Mermilliod, J.-C., Turon, C., A&A, 345, 471 (1999)

161. Roman, N.G., AJ. 110, 205 (1949).

162. Röser, S.; Demleitner, M.; Schilbach, E., AJ, 139, 2440 (2010)

163. Röser, S., Schilbach, E., Piskunov, A. E., Kharchenko, N. V., & Scholz, R. D., A&A, 531, A92 (2011)

164. Röser, S., Schilbach, E., & Goldman, B., A&A, 595, A22 (2016)

165. Röser, S., Schilbach, E., Goldman, B, A&A, 621, id.L2, 5 (2019)

166. Röser, S., Schilbach, E., A&A 627, A4 (2019)

167. Rozhavskii, F. G., Kuz'mina, V. A., & Vasilevskii, A. E., Astrophysics, 12,204 (1976)

168. Schwan, H. A&A, 243, 386 (1991)

169. Scott, D.W., Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, Chicester, 384 pp. (2015)

170. Sharaf, M. A. and Selim, H. H. International Journal of Astronomy and Astrophysics, 1, 104, (2011)

171. Schmeja, S., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., et al., A&A, 568, A51 (2014)

172. Scholz, R.-D., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., & Schilbach, E., A&A, 581, A39 (2015)

173. Shipp, N., Li, T. S., Pace, A. B. et al. ApJ, 885, 3 (2019)

174. Shkolnik, E. L., Anglada-Escude, G., Liu, M. C., Bowler, B. P., Weinberger, A. J., Boss, A. P., Reid, I. N. and Tamura, M. AJ. 758, 56 (2012).

175. Seleznev, A. F.; Danilov, V.M.; Carraro, G., Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 351, pp. 502-506 (2020)

176. Siess, L., Dufour, E., & Forestini, M., A&A, 358, 593 (2000)

177. SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg). http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/

178. Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al, AJ, 131, 1163 (2006)

179. Smart, W. M., 1968, Stellar kinematics. Longmans, London (1968)

180. Soderblom, D. R. and Mayor, M., AJ. 105, 226 (1993)

181. Soderblom, D.R., Nelan, E., Benedict, G.F., Mc Arthur, B., Ramirez,I., Spiesman, W., Jones, B.F.: Astron. J. 129, 1616 (2005)

182. Soubiran, C., Bienayme, O., Mishenina, T. V. and Kovtyukh, V. V., A&A, 480, 91 (2008).

183. Soubiran, C., Jasniewicz, G., Chemin, L., Crifo, F., Udry, S., Hestroffer, D. and Katz, D. A&A, 552, A64, (2013).

184. Soubiran, C. , Cantat-Gaudin, T., Romero-Gomez M., Casamiquela, L., Jordi, C., Vallenari, A., Antoja , T. et al. A&A, 619, A.155(2018)

185. Soubiran, C. , Cantat-Gaudin, T., Romero-Gomez M. et al., A&A, 623, C2 (2019)

186. Sperauskas, J. , Bartasiute, S. , Boyle, R. R., Deveikis, V. and Raudeliunas, S. ,A&A 596, A116, (2016)

187. Subramaniam, A., Gorti, U., Sagar, R., Bhatt, H. C., A&A,302,86S (1995)

188. Tabernero, H. M., Montes, D., Gonzalez Hernandez, J. I. and Ammler-von Eiff, M. A&A, 597, A33 (2017).

189. Tang, S. Y., Pang, X., Yuan, Z., et al., ApJ, 877, 12 (2019)

190. Tokovinin, A., AJ, 145, 76 (2013)

191. Tutukov, A.V., A&A, 70, p. 57 (1978)

192. Urban S.E., Corbin T.E., Wycoff G.L., Martin J.C., Jackson E.S., Zacharias M.I., Hall D.M., AJ, 115, 2161 (1998)

193. van Albada. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, Vol. 20, p.57 (1986)

194. van den Bergh, S., ApJ, 471, L31 (1996)

195. van den Berk, J., Portegies Zwart, S. F., McMillan, S. L. W.., MNRAS, 379, 111(2007)

196. van Leeuwen, F., A&A, 474, 653 (2007)

197. van Leeuwen, F., A&A, 497, 209 (2009)

198. Vázquez, R. A., Moitinho, A., Carraro, G., & Dias, W. S., A&A, 511, A38 (2010)

199. Vereshchagin, S.V., Chupina, N.V., Sariya, Devesh P., Yadav, R.K.S., Kumar, B., New Astron. 31, 43 (2014)

200. Vereshchagin, S. V. and Postnikova, E. S. In: Proceedings of the Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, XIX International Conference, DAMDID/RCDL 2017, Springer, in press (2018).

201. Wang, H.-F., Huang, Y., Carlin, J.L. et al., arXiv:1905.11944 (2019)

202. Webb, J. J.; Price-Jones, N.; Bovy, J. et al. MNRAS, 494, Issue 2, 2268-2279 (2020)

203. WEBDA database: https://webda.physics.muni.cz/

204. White, R. J., Gabor, J. M., Hillenbrand, L. A., AJ, 133, 2524 (2007)

205. Williams, P. U. Mon. Not. Astron. Soc. So. Africa 26, 139 (1967)

206. Wilson, R.E.: Carnegie Inst. Washington DC Publ. 60 (1953)

207. Wilson, R. E., General Catalogue of stellar radial velocities (1963 reprint), Washington:Carnegie Institute (1963)

208. Worley, C.E. WDS Catalogue. Astrophys Space Sci 142, 21

209. Yeh, F.-C., Carraro, G., Montalto, M., & Seleznev, A. F., AJ, 157, 115 (2019)

210. Zhong, J., Chen, L., Kouwenhoven, M. B. N., et al., A&A, 624, A34 (2019)

211. Zhong, S., Berczik, P., & Spurzem, R., ApJ, 792, 137 (2014)

212.Zuckerman, B.; Song, I, Annual Review of Astronomy &Astrophysics, vol. 42, Issue 1, pp.685 (2004)

213.Верещагин, С. В., Рева, В. Г. и Чупина, Н. В. Астрон.журн. 85, 349 (2008).

214.Данилов, В. М., Астрон. журн. 79, 986 (2002).

215.Данилов, В. М. Астрон. журн. 82, 678 (2005).

216.Данилов, В. М. и Лесков, Е. В. Астрон. журн. 82,219 (2005).

217.Данилов, В. М., Астрон. журн. 83, 393 (2006).

218.Ковалева, Д. и др. http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/gaia-workshop-2018/files/ Gaia-DR2-warnings-caveats-GaiaUserWorkshop.pptx

219.Тутуков А.В, Сизова М.Д., Верещагин С.В. Астрон.журн.97, 820 (2020)

Приложение 1. Формирование звездных скоплений. Особенности появления парных скоплений

Образование ОВ-ассоциаций в спиральных галактиках является примером разбиения галактического газового диска на гигантские облака с размерами порядка его толщины. Расположение ОВ-ассоциаций и звездных скоплений (тесно связанных звездных систем) структурировано иерархически: ассоциации включают скопления. Следовательно, их эволюция представляет единый процесс. Важно отметить, что эффективность превращения газа в звезды не превышает 30% [118], поэтому его потеря вследствие истечения, вызванного ионизацией водорода, приводит к потере звезд и распаду ~ 90% скоплений за время ~ 10^5 лет [191], [118].

Процесс охлаждения газа приводит к его фрагментации. Так в результате последовательной фрагментации возникают протоскопления с характерными массами ~ 10^3 $M_\odot$. В итоге ОВ-ассоциация заполняется молодыми звездами. Отсутствие гравитационной связанности ОВ-ассоциации приводит к ее рассеянию в направлении орбитального движения вокруг центра галактики. Со временем возникает мощный звездный поток, состоящий из звезд поля ассоциации и потоков выживших звездных скоплений. Эволюция этого потока приводит за время ~ 10^9 лет к его замыканию в кольцо вокруг центра галактики, Рис.П.1.1.

Естественно предположить, что выжившие скопления оказываются внутри ассоциации не единственными, а составляют пары и даже группы.

Характеристикой условий сближения является относительная скорость скоплений. Чтобы скопления считались гравитационно связанными, эта скорость не должна превышать

$V_{крит} = \sqrt{GMc/R}$,

где R – расстояние между центрами скоплений. Для пары скоплений массой $Mc = 1000M_\odot$, находящихся на расстоянии 20 пк друг от друга, значение $V_{крит}$ составляет 0.47 км/с.

Предполагается, что подобно звездам звездные скопления могут образовывать группы (см. например, работы [70], [82],[17], [94]и ссылки в них) и физические пары. Часть этих двойных скоплений была сначала оценена на уровне 20% [167], но позже упала до 10% [50]. В последних и некоторых других работах (см., например, [44] , [198]) приводятся списки потенциальных двойных скоплений и даже тройных, однако многие из предполагаемых в указанных работах пар в конечном итоге были отклонены [198, 184]. Главным кандидатом в нашей Галактике являются h и χ Per (NGC 869 / NGC 884), – крупные и достаточно близкорасположенные рассеянные скопления с почти одинаковым расстоянием 2,2 ± 0,2 кпк от Солнца [210]. Однако такое большое расстояние затрудняет их детальное изучение. Пространственное разделение между ними составляет в среднем 200 пк [50].

Численное моделирование пробного двойного скопления в приливном поле Галактики демонстрирует сложную зависимость между его начальными свойствами и будущей историей, прежде чем компоненты фактически сливаются и образуют одиночные вращающиеся звездные скопления [156].

UBC 7, был найден на расстоянии около 300 пк от Солнца около скопления Collinder 135 (далее Cr 135) и упоминается как, вероятно, связанный с ним [29]. До Гайи звезды, приписываемые UBC 7, рассматривались как часть Cr 135.

П.1.1. Особенности появления парных звездных скоплений

В одних из первых работ по оценке формирования парных скоплений была дана оптимистичная оценка, что доля кратных систем среди РЗС в нашей Галактике примерно 20%[167]. Позже это предположение упало до 8% [187], основываясь на исследовании Магеллановых Облаков, где звездообразование имеет горазо более бурную фазу, чем у нас. Первые из таких исследований (БМО [12] и ММО [97]) показали, что доля звездных парных скоплений составляла почти 10%. Несколько большее значение – 12%, были найдены

Pietrzynski & Udalski[153]. Эти результаты были позже подтверждены более тщательной и всеохватывающей статьей Dieball et al. [59].

Subramaniam et al. [187] смогли идентифицировать ряд кандидатов, заключив, что около 8% РЗС могут быть двойными, что заставляет иначе смотреть на формирование скоплений. Несмотря на этот результат, все еще подчеркивается (см., например, [58] и [9]), что количество парных скоплений в Млечном Пути мало по сравнению с их количеством в Магеллановых облаках. Несколько путей формирования этих объектов, которые были предложены теми же авторами[50]:

Совместное рождение. Это истинно двойные скопления - они рождаются в одном звездном комплексе (одно молекулярное облако), соответственно имеют схожий химический состав, кинематику и возраст (сценарии подтверждены в работах [82] и [9]). Fujimoto & Kumai [82] рассматривают процессы формирования на примере Магеллановых Облаков (подробную физику и формулы см.в их статье).

Последовательное формирование. Возникают в результате взрыва сверхновой в соседнем скоплении, которое может индуцировать звездообразование в ближайшем облаке (см., например, [25]и [90]). Эти скопления могут быть как физически двойными, так и не быть.

Приливный захват. Такие двойные скопления формируются путем случайного сближения в пространстве, в результате чего их пространственная скорость будет схожа, но они, скорее всего, будут иметь разный химический состав и возраст (см. подробнее в [194]). Это физически двойной объект, но ставший таким не в результате совместного рождения, а, можно сказать, случайно.

Захват в резонансах. Dehnen [55] указал, что многие движущиеся группы в солнечной окрестности могли возникнуть из-за орбитальных резонансов, которые формируются спиральной структурой галактики и баром (см., например [31] ,[54], [77], [157]). В областях резонанса объекты затормаживаются, изменяя свою кинематику. Это может привести к

образованию «резонансных» скоплений из-за высокой плотности звезд в данной области – но получившееся скопление будет состоять из случайных, генетически неродственных звезд. Можно так же применить этот механизм к формированию двойных или кратных скоплений. Скопления должны иметь одинаковую кинематику, но разный возраст и химсостав, при чем, само скопление может иметь внутри себя звезды разного возраста и химсостава, если оно так же образовалось в резонансах. Являются псевдодвойными (кратными) скоплениями.

Сближающиеся двойные скопления: сближения на гиперболической орбите.

Не смотря на то, что расстояние между скоплениями близкое и может происходить гравитационное взаимодействие – назвать эту пару двойным скоплением нельзя, так как они не образуют стабильную пару, а будут влять друг на друга приливно, как это происходит во взаимодействующих галактиках. Результатом их взаимодействия может стать разрушение или столкновение обоих скоплений, а так же слияние – все зависит от скоростей и их направления, которыми обладают скопления. Не обладают общей кинематикой, хотя могут иметь схожий возраст и химический состав, особенно если это молодые скопления диска.

В звездообразующих комплексах одно звездное скопление может захватывать другое, образуя гравитационнно связанную пару в присутствии третьего тела или вследствие рассеяния энергии. Этот механизм может также работать в орбитальных резонансах для скоплений, рожденных в разных местах. Истинные двойные скопления могут образоватся одновременно как связанная система, и последовательно; кратные системы - последовательно. Однако не многие такие системы проживают период времени больше чем 50 млн лет [50], так как РЗС рыхлы по своей природе и подвержены большому влиянию приливных сил Галактики и не сильно способствует их долгой выживаемости как совместной системы. В результате они могут, как слиться, так и разлететься на отдельные объекты.

Subramaniam et al [187] сделали выборку из примерно 1400 объектов каталога Lynga[127] и отобрали из них 18 пар со схожими возрастами и расстоянием в пространстве до 20 парсек. В работе так же было посчитано примерное время разрушения пар скоплений. Однако точность по расстоянию для каталога имела погрешность в 20%, к тому же не было практически никаких данных о кинематике этих пар.

De La Fuente Marcos, R. & de La Fuente Marcos [50] составили свой список кандидатов на основе базы даных скоплений WEBDA [203] (34 пары) и каталога [56] (27 пар). Ими было обнаружено, что большинство кандидатов в двойные скопления имеют достаточно молодой возраст, 25-50 млн лет, что может говорить о последующем разлете пары вследствие изменении орбиты и постепенной потери звезд скоплениями. Так же авторами были найдены кандидаты в пары, образовавшиеся в процессе приливного или резонансного захвата – они обычно имели больший возраст. Еще были найдены кандидаты в сближения на гиперболической орбите (скопления с разной кинематикой, но находящиеся близко) и кандидат в иерархическое тройное скопления. Для большинства объектов была известна кинематика и пространственное расположение пар.

Vázquez et al. [198] исследовали 8 кандидатов на двойные скопления в достаточно спокойной внутренней области Галактики на $180° \leq l \leq 270°$ и $-5° \leq b \leq 5°$. Данные включали расстояния, возраст и металличность, однако не один из выбранных объектов не оказался истинно двойным скоплением. Из четырех возможных пар только NGC 2383/NGC 2384 близки друг к другу в пространстве, но имеют разную металличность и возраст. Остальные объекты оказались флуктуациями плотности, либо случайно попавшими на линию зрения. Авторы предполагают, что выбранная окрестность галактики сейчас не имеет достаточно условий для формирования таких объектов.

Conrad et al. [44] в своем исследовании изучали галактическую структуру и формирование скоплений с использованием информацию о шестимерном фазовом пространстве (координаты и скорости) базируясь на основе Каталога

данных рассеянных скоплений (COCD [104]) и лучевых скоростей из RAVE. Была так же проведена проверка распределения потенциальных кандидатов по возрасту, чтобы различать реальные и случайные группы. Группы выделялись алгоритмами кластеризациипо расстоянию и скорости и проверкой результатов моделированием по методу Монте-Карло со случайными выборками. В обнаружены 19 групп, в том числе 14 пар, 4 группы по 3-5 членов и 1 комплекс с 15 членами. Авторы предполагают, что комплекс и группы РЗС скорее всего родились из одного облака, а пары скоплений вероятно случайны.

Soubiran et al [184,185] обнаружили некоторое количество кратных скоплений из выборки в 861 в результате исследования кинематики по новым точным данным Gaia DR2. Предполагается, что пять пар скоплений и одна группа из пяти членов могут быть физически связаны между собой. Исследование развенчало двойственность некоторых объектов, которые ранее считались кандидатами в двойные [50, 44].

Кроме того, Dias et al.[57] выявил двойственность в скоплении Dias 4, которое ранее считалось одиночным.

Таблица П.1.1. Поиск кандидатов в двойные скопления различными авторами.

Статья	Число скоплений	Число пар
Subramaniam et al. [187]	~1400	18
Vázquez et al. [198]	8	1
de La Fuente Marcos, R. & de La Fuente Marcos [50]	3543	61
Conrad et al. [44]	650	14 пар, 4 групп с 3−5 членами и 1 комплекс с 15 членами
Soubiran et al. [184,185]	861	20

П.1.2.Пара Cr 135 и UBC 7

Скопление Collinder 135 (α = 108,3 °, δ = -37,35 °) впервые обнаружено в 1931 году, но из-за разреженности вопрос его существования был спорным [42, 205]. Занимает на небе область 4 x 4 градуса (наиболее густонаселенная его

часть) и удаленное от нас примерно на 300 пк, расположенное на южном небе в районе созвездия Корма. Совсем недавно рядом с Collonder 135 по данным Gaia DR2 было обнаружено новое скопление UBC7, которое имеет близкие к Collonder 135 характеристики (возраст и собственное движение) [29]. Авторы, открывшие скопление UBC 7, не утверждали прямо, что это новый отдельный объект, а склоняясь к тому, что их результат может быть следствием ошибок измерения Gaia и быть частью Cr 135.

Разные источники дают различную оценку количества звезд в скоплении Collonder 135. По данным [56] оно содержит 18 членов, по данным MWSC – 234 (с вероятностью P>90%), а последние данные из каталога [27] – 352, однако, часть этих звезд, на самом деле, может принадлежать соседнему скоплению UBC 7. Близкое расположение друг к другу этих двух скоплений и достаточно молодой возраст (примерно 50 млн лет) дает возможность предположить, что эта пара сформировалась вместе, и пока еще не была разлучена или слита под воздействием сил Галактики.

П.1.3. Определение параметров

Мы взяли обширную область для выбора членов обоих скоплений радиусом 6.5 градусов вокруг центра Cr 135 (координаты), так как оба скопления достаточно рассеянны. Данные о параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях были взяты из Gaia DR2. Нами были отобраны звезды, у которых относительная ошибка параллакса составляла не более 10% и значение перенормированной средневзвешенной единичной ошибки RUWE<1.4 (согласно критериям выборки по [122] и техническим примечаниям из GAIA-C3-TN-LULL-124-01). Выборка является фотометически чистой, так как удовлетворяет требованиям, указанным в статье [122]. Количество источников, отобранных с условием этих ограничений, составляет 411 153. Для каждого объекта была рассчитана вероятность его принадлежности к скоплению Cr 135 или UBC 7, следуя принципам, описанным в [109] с подстройкой под

особенности данных Gaia DR2 (иная фотометрия и лучшая точность) и адаптацией к данным скоплениям.

Параметры скопления вычислялись следующим образом: вычислялась вероятность пространственной принадлежности звезды к скоплению, потом кинематической и фотометрической по формулам в [109]. Так же делался визуальный осмотр и анализ данных. На основе наиболее выбранных членов скопления определялись параметры скопления (координаты и радиусы, среднее собственное движение, возраст, расстояние и покраснение).Далее процедура повторялась уже по выбранным данным. Если эти параметры не совпадали с параметрами предыдущей итерации и / или список элементов отличался от предыдущего, список параметров корректировался и итерация повторялась, если же изменений уже не происходило - процесс останавливался.

Для определения возраста скоплений взяты изохроны для фотометрии Gaia DR2 на основе вычислений Maíz-Apellániz & Weiler [130] с веб-сервера Padova CMD 3.3 [147] для Z = 0.019 [21]. Используется соотношение между E (BP - RP) и A_G с использованием коэффициентов, предоставленных в CMD 3.3 для A_λ/A_V для фотометрических полос Gaia. Следуя соотношениям [28] и [145], получено отошение A_G / E (BP - RP) ≈ 2,05.

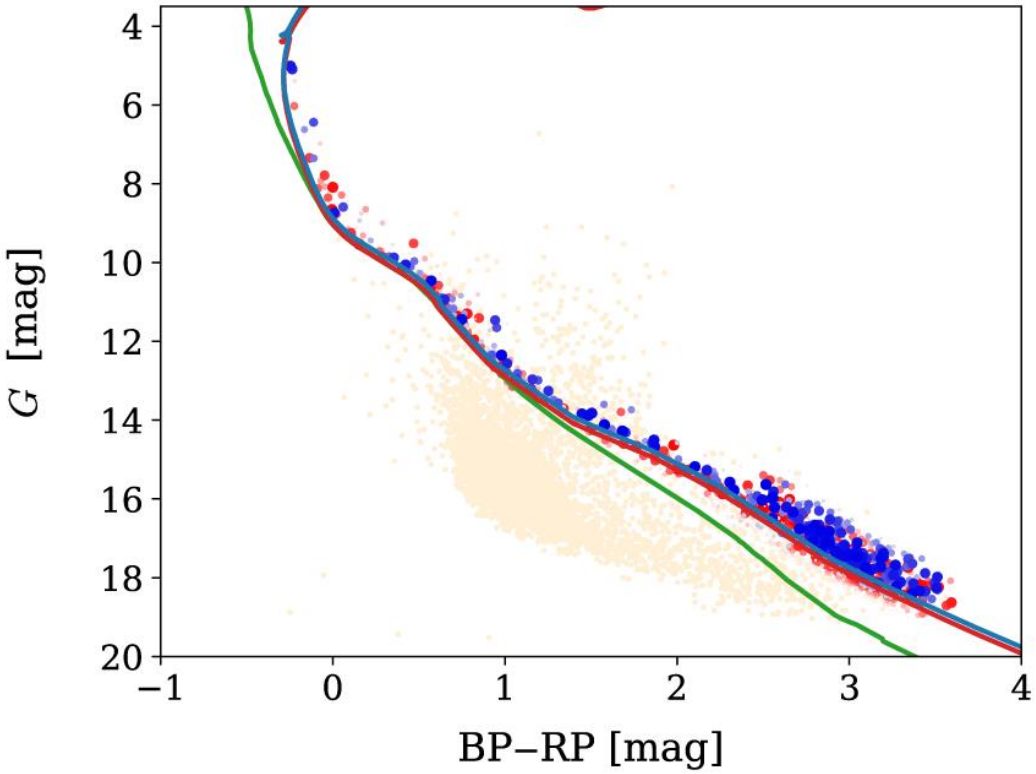

Рис.П.1.1. Изохрона для звезд скоплений Cr 135 (красные точки) и UBC 7(синие точки). Зеленая линия – главная последовательность нулевого возраста, синяя и красная – изохроны 40 млн лет для соответствующих скоплений. Здесь используется видимая звездная величина, поэтому линии изохрон поправлены за расстояние до скопления. Величина кружка зависит от вероятности членства – чем больше, тем больше и вероятность. Бежевые точки – звезды фона.

Как видно на рис.П.1.1, скопления имеют малоразличимые характеристики межзвездного покраснения и возраста, поэтому для выбора звезд скопления используются одинаковые значения этих параметров ($\Delta m \approx 0.05$). Возраст скоплений находится в диапазоне значений от 40 до 50 млн. лет, он определен по звездам с вероятностью членства $P > 0.6$.

Собственные же движения и средние параллаксы выбранных групп звезд имеют характерное различие. Для скопления, удаленного от нас на расстояние 300 пк, дисперсия собственных движений его членов обусловлена скорее фактическим разбросом скоростей звезд скопления, чем ошибками собственного движения отдельных звезд (среднее значение 0.15 мсд/год,

максимальное – 0.45 мсд/год для кандидатов в члены скопления). Мы принимаем диапазон $\varepsilon\mu_l$, $\varepsilon\mu_b$ = 1,8 мсд/год для выбора членов скопления.

Разница в параллаксах, напротив, в большей степени определяется точностью наблюдений, а не фактическим разбросом расстояний. Заданная относительная ошибка в 10% для расстояния 300 пк даст точность примерно 30 пк, что явно больше, чем дисперсия расположения звезд в пространстве для среднестатистического размера скопления (большинство скоплений имеют размер около десятка парсек, с расстоянием между звездами 0.5 – 1 пк). Значение $\varepsilon_{i\ ph}$ = 0.12 мсд определено по наиболее надежным членам скопления, с учетом и индивидуальных ошибок звездной величины G.

Учитывая эти ограничения 244 звезды идентифицированы как вероятные члены Cr 135 и 184 звезды как вероятные члены UBC 7, 12 из которых могут равно принадлежать и тому, и другому скоплению. Оценка случайного попадания звезд поля в выборку дается по данным об окружающих звездах фона и составляет от 0 до 7 звезд.

Координаты и параллаксы центров определены по положению максимумов распределения плотности звезд скоплений Cr 135 и UBC 7. Внешний вид скоплений представляет собой более плотную внутреннюю часть, окруженную короной с радиусом более 5 градусов.

Радиусы центральных частей скоплений определены по их видимому радиусу полумассы (см., например, [163]). Массы членов скопления определены путем интерполяции на изохрону 40 млн лет без учета неразрешенных двойных. Это дает нам нижнюю границу оценки массы скопления, которая составляет $126M_\odot$ для Cr 135 и $87M_\odot$ для UBC 7. Угловой размер видимого радиуса полумассы составляет 1.20° и 1.13° (или 6.3 и 5.6 пк) для Cr 135 и UBC 7 соответственно.

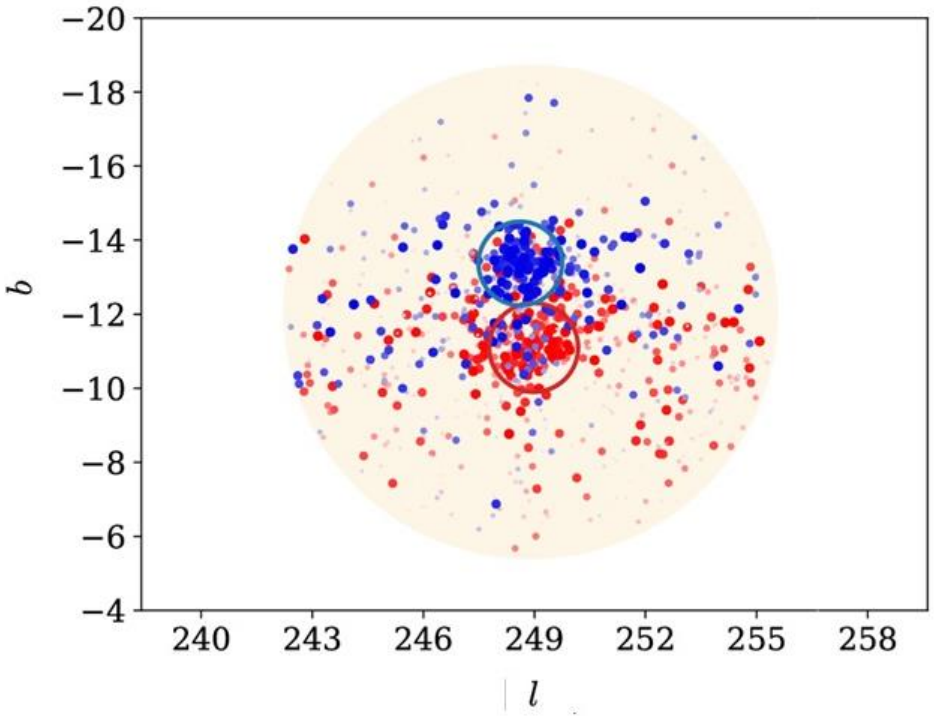

Рис.П.1.2. Расположение членов Cr 135 (красные точки) и UBC 7 (синие точки) в галактических координатах. Красный и синий кружок – видимые приливные радиусы скоплений. Величина кружка зависит от вероятности членства – чем больше, тем больше и вероятность. Бежевые точки – звезды фона.

Полученные параметры согласуются с оценками приливных радиусов по Кингу [111]. Далее радиус полумассы и члены, в него входящие, используются для получения оценок средних основных параметров Cr 135 и UBC 7, которые перечислены в Табл.П.1.2. Они содержат 91 звезду для Cr 135 и 80 звезд для UBC 7. В таблице 1 отображены параметры скоплений, полученные путем усреднения индивидуальных значений l, b, ϖ, μl, μb вероятных членов, расположенных в центральной части. Для l, b точности рассчитываются через ско. Для ϖ, μl, μb точность вычисляется как комбинация ошибки среднего и оценки ожидаемой систематической ошибки.

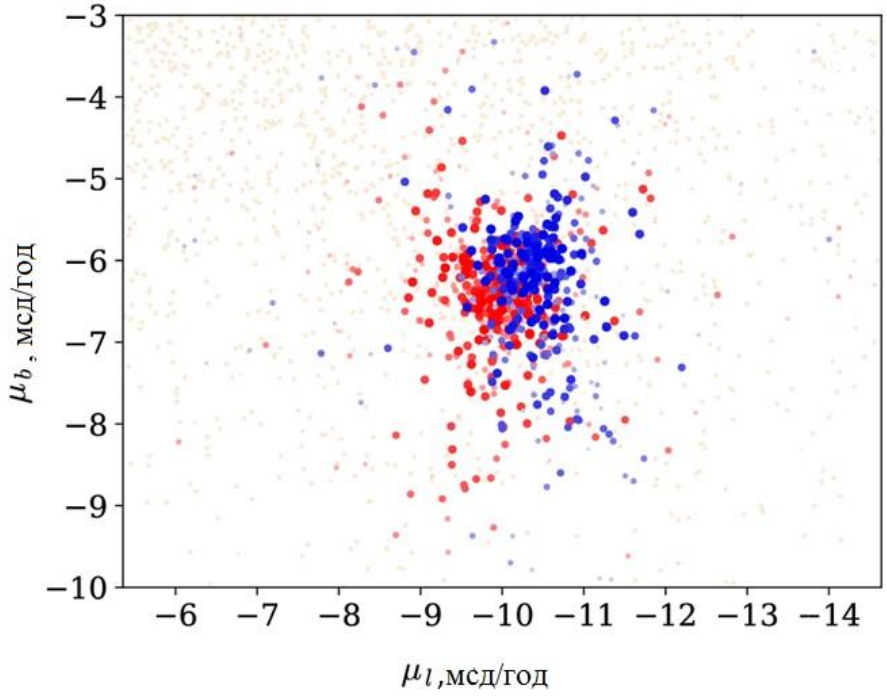

Рис.П.1.3. Диаграмма векторов собственных движений для Cr 135 (красные точки) и UBC 7(синие точки). Величина кружка зависит от вероятности членства – чем больше, тем больше и вероятность. Бежевые точки – звезды фона.

Количество звезд с измерениями лучевых скоростей в центральной части скоплений оказалось невелико – только 14 объектов для Cr 135 и 5 для UBC 7. Поэтому для улучшения статистики были взяты не только астрометрически чистые объекты, но и все вероятные члены скопления с измерениями лучевой скорости (30 и 24 источника, соответственно), по которым получены их медианные значения.

Таблица П.1.2. Параметры скоплений.

РЗС	Число членов	Масса, $M_\odot$	l°	b°	$\varpi\pm\sigma\varpi$, мсд	$\mu_l\pm\sigma\mu_l$, мсд/год	$\mu_b\pm\sigma\mu_b$, мсд/год	Vr±σVr, км/с
Cr135	244	126	248.98	-11.10	3.31±0.02	-9.92±0.05	-6.47±0.06	17.4±1.3
UBC7	184	87	248.62	-13.37	3.56±0.02	-10.25±0.05	-5.98±0.05	16.7±1.5

Таким образом, кинематика и возраст для двух скоплений, очень похожи. Вопрос в том, позволит ли их нынешнее состояние узнать, родились ли они

вместе, или просто случайно сблизились в космосе, имея схожие характеристики.

П.1.4.Гипотезы образования

Чтобы проверить вероятность близкого образования этих объектов надо «прокрутить» их движение назад во времени и оценить полученный результат. Но данные о скоплениях неизбежно содержат ошибки, особенно в определении лучевых скоростей.

Моделирование обратного движения скоплений было ограничено простейшей моделью: звездные скопленя были представлены в качестве гравитирующих точечных масс, вращающихся в фиксированном внешнем потенциале Млечного Пути [75] . Интегрирование выполнено назад во времени на промежуток в 50 млн лет с использованием кода Hermite высокого порядка ϕ-GRAPE[95]. Масса точек была постоянной во время интегрирования, однако варьировалась в ряде экспериментов, чтобы оценить влияние ее изменения на конечный результат, так как затруднительно точно определить массу скоплений. Оказалось, что чем больше масса скоплений, тем больше должна быть лучевая скорость скопления, чтобы сформировалась устойчивая пара. У моделей варьировались значения лучевых скоростей, что давало наиболее близкие к наблюдаемым на данный момент параметрам пары, с начальным расстоянием между скоплениями менее 15 пк. При моделировании назад на 40 млн лет расстояние между скоплениями со значениеями 15 пк и менее было больше, чем при моделировании на 50 млн лет, но не один из них не давал нам отрицательной энергии, необходимой для гравитационной связи между скоплениями. В случае интеграции назад на 50 млн лет моделей с небольшим разделением было меньше, но при этом уже появлялись различные комбинации условий для возможности их гравитационной связи.

Как показывают модели, совместное рождение из одного облака и даже физическая гравитационная связь возможна для этих объектов во многих

сценариях. На данный момент времени скопления также могут являться физически связанным объектом.

Приложение 2. История создания современных катлогов Hipparcos, TGAS, Gaia DR2

В работе использованы различные каталоги, которые наилучшим образом подходили для наших задач. Представим небольшой обзор этих каталогов. Основные астрометрические каталоги получены с помощью КА Hipparcos и Gaia. Принципы астрометрических измерений для Hipparcos и Gaia схожи, хотя их научные задачи имеют различия: задача Hipparcos заключалась, в основном, в получении астрометрических данных для звезд, а миссия Gaia ориентирована на Галактику с целью изучения ее структуры и истории формирования. Каталоги Gaia содержат также данные об астероидах и других малых телах Солнечной системы. Наблюдения Hipparcos охватили 48 малых планет, но это число несравнимо с количеством объектов Солнечной системы в каталогах Gaia, включая и экзопланеты. Миссии Hipparcos и Gaia были разнесены по времени почти на 25 лет.

КА Hipparcos был запущен с космодрома Куру (Французская Гвиана) на ракете Ариан-4 в 1989 году. Продолжительность полета составила 3,3 года, в течение которых было произведено в среднем 110 измерений на каждый объект. Окончательные результаты были опубликованы в 17-титомном каталоге в 1997 году [74], и долго оставались непревзойденными по объему и качеству. Собранные данные позволили получить параллаксы примерно для 120 000 звезд Галактики [74, 196] до звездной величины равной Hp = 12.4. Каталог является практически полным для $7.3 \leq V\ mag \leq 9.0$, однако степень полноты зависит от области на небесной сфере.

Получены астрометрические данные на уровне миллисекундной точности. Через десять лет после публикации каталога Hipparcos была осуществлена и опубликована редукция астрометрических данных – Hipparcos-

2[196], где почти все звезды ярче Hp = 8, имеют улучшенную до 4 раз точность, по сравнению с оригинальным каталогом. Улучшения были достигнуты за счет крайне тщательного изучения движения спутника и включения результатов в моделирование ориентации. В резуьтате практически исчезли корреляции данных, вызванные ошибками моделирования положения спутника, существовавшие в исходном каталоге, практически исчезли. Так же произведена калибровка светимости источников.

Каталог Hipparcos–2 содержит 23882 двойных и кратных систем. Благодаря высокой точности полученных данных, согласно рекомендациям Международного Астрономического Союза (МАС), модифицированная система каталога Hipparcos называется небесной опорной системой координат Hipparcos - Hipparcos Celestial Reference Frame (HCRF). Она является первичной реализацией системы ICRS (International Celestial Reference System – барицентрическая - то есть начало отсчета помещено в центр масс Солнечной системы) в оптическом диапазоне.

Кроме данных, на основе данных для основного каталога, были созданы каталоги Tycho[74] и Tycho-2 [98].

Tycho-2 - это астрометрический каталог, в котором содержатся положения и собственные движения для 1058332 звезд (включая 6301 звезду из каталога HIP). Tycho-2 значительно больше по числу звезд и более точен благодаря применению совершенных методов обработки результатов. Собственные движения с точностью до 2,5 мсд /год получены в результате сравнения с данными Astrographic Catalog [192] и 143 другими наземными астрометрическими каталогами, все из которых приведены к небесной системе координат Hipparcos.

Космический телескоп Gaia (сокращение от Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) Европейского космического агентства является преемником телескопа Hipparcos. ИСЗ был выведен на орбиту 19 декабря 2013 года и находится в области точки Лагранжа системы Земля-Солнце (L2), где

должен проработать как минимум 6 лет по предварительным оценкам. Релизы точных данных миссиии запланированы вплоть до 2024 года.

Первый набор данных миссии Gaia (GDR1) [24], был основан на результатах, полученных за 14 месяцев работы КА. За это время не было достигнуто равномерное качество измерений по всей небесной сфере, оно чаще производилось в областях, расположенных ближе к полюсам эклиптики, так что качество данных значительно различалось в разных областях неба.

Gaia DR1. Каталог содержит координаты и звездные величины для более чем 1 миллиарда объектов ярче G $>20.7^{m}$. Tycho-Gaia Astrometric Solution (TGAS)[121] – подмножество каталога Gaia DR1, в которое входит 2 млн. источников с астрометрическими данные, полученные на основе Gaia, Hipparcos-2 и Tycho-2. Данные Gaia DR1 состоят из трех частей:

Астрометрический каталог, который содержит координаты, параллаксы и средние собственные движения для 2 057 050 источников, в том числе общих с каталогами Hipparcos и Tycho-2. Исходные данные включают 1 140 622 719 источников ($G \simeq 20,7$) для которых имеются измерения координат звезд на эпоху J2015.0, параллаксов и собственных движений (на основе метода Байеса).

Типичная систематическая ошибка определения параллаксов составляет около 0,3 мсд, собственных движений 0,5–2,6 мсд /год (Lindegren et al. 2016). Предел полноты в 11 - $11,5^{m}$. Типичная стандартная ошибка положений составляет 10 мсд, фотометрии в полосе G до ~ $0,03^{m}$.

Собственные движения из TGAS в текущий момент являются более надежными, чем в Gaia DR2, однако параллаксы лучше в GDR2 [218]. Таким образом, благодаря использовани данных с Hipparcos и Tycho-2, TGAS дал возможность получить усовершенствованные данные с Гайи, чем, если бы это были только данные со спутника за 14 месяцев.

В апреле 2018 года был опубликован каталог GDR2, точнее и полнее, чем в Gaia DR1. Фотометрические данные в полосе G и координаты звезд даны для 1 692 919 135 звезд, включая объекты с измеренными собственными

движениями и параллаксами (1 331 909 727). Также были получены данные о лучевых скоростях для 7224631 источников со средней погрешностью около 1 км/с. Кроме того, определен ряд астрофизических параметров для большого количества звезд, таких как радиус, эффективная температура, светимость, указание на переменность. Для 87 733 672 объектов измеряно межзвездное поглощение (A_G) и покраснение (E (G_{BP} -G_{RP})).

Миссия Gaia привела к открытию многих ранее неизвестных скоплений (например, [27], [29] , [30]).

Данные из каталога Gaia DR1 (наблюдение с 25.07.2014 по 16.09.2015) и каталога Gaia DR2 (наблюдение с 25.07.2014 по 23.05.2016) являются полностью независимыми между собой, хотя, обычно для них имеется кросс-идентификация, однако номера не наследуются. Некоторые из объектов, полученных в каталоге GDR1, могут отсутствовать в GDR2 по тем или иным причинам. Различаются и эпохи наблюдений - у Gaia DR1 это J2015.0, а у Gaia DR2 - J2015.5. Данные в каталогах GDR1 и GDR2 определены по наблюдениям, выполненным каждое по своей программе, независимо друг от друга. Списки объектов каталогов пересекаются, но не полностью.

Звезды в обоих релизах редакциях Gaia рассматриваются как одиночные объекты (предел разрешения до 0.4 угловых секунд между двумя источниками). Изначально был запланирован отдельный каталог двойных звезд, но он не был реализован.

Ошибки параллакса находятся в диапазоне от 0,04 мсд (для источников с G $<15^m$) до 0,1 мсд (до G = 17^m) и возрастают до 0,7 мсд при G = 20^m. Соответственно, ошибки собственных движений составляют 0,06 мсд/год (для G <15 m), 0,2 мсд/год, (для G = 17m) и 1,2 мсд/год (для G = 20m). Около 20% звезд известных на данный момент, с большими собственными движениями отсутствуют в Gaia DR2.

Лучевые скорости измерены только для объектов с $4^m \leq G \leq 13^m$. Эффективные температуры источников, для которых определен этот параметр находятся в диапазоне от 3550 до 6900 К, поэтому "холодные" и "горячие"

звезды туда не входят. Общая точность лучевых скоростей на ярком конце составляет порядка 200-300 м/с, в то время как на слабом конце общая точность составляет примерно 1,2 км /с для эффективной температуры 4750 К и около 2,5 км/с для эффективой температуры 6500 К. Лучевые скорости не определены для звезд с эмиссионными линиями в спектре, а так же могут быть некорректно определены для спектроскопически двойных звезд.

Оценки эффективной температуры сделаны без учета межзвездного поглощения (только по данным фотометрических полос и параллаксам), что сильно влияет на точность этого параметра для объектов, которые находятся в областях с его высоким коэффициентом. В таком данном случае нужно обращаться к дополнительной литературе, если она имеется для источника или относиться с достаточной осторожностью к полученным данным.

В GDR2 есть систематическая ошибка параллакса, которая зависит от положения объекта на небесной сфере, а также его звездной величины и цвета, но они обычно не превышают 0.1 мсд.

Приложение 3.

Таблица 2.3. Каталог 148 звезд, входящих в состав звездного скопления IC 2391.

Source id	RA J2015.5, град	DEC J2015.5, град	ϖ±σϖ, мсд	d, пк	x,пк	y,пк	z, пк	$\mu_\alpha \pm \sigma\mu_\alpha$, мсд/год	$\mu_\delta \pm \sigma\mu_\delta$, мсд/год	Vr±σVr, км/с	G, mag	BP-RP, mag	M_G, mag	A, град	D, град	U, км/с	V, км/с	W, км/с	vLw	C-G
5304511938898669568	132.2126	-57.0957	6.40±0.04	153.82	11.14	-151.77	-22.42	-25.56±0.08	22.67±0.08		15.32	2.67	9.36							
5315988950500555520	127.7605	-56.4987	6.39±0.04	154.17	5.94	-151.72	-26.72	-23.03±0.09	24.43±0.09		15.48	2.83	9.51							
5316982664196394752	131.3964	-54.9883	6.89±0.06	142.30	5.52	-140.99	-18.42	-26.14±0.11	24.59±0.13		15.93	2.87	10.12							+
5317364680071917184	131.9820	-54.7561	6.92±0.06	141.54	5.56	-140.37	-17.32	-26.41±0.11	24.36±0.10		15.81	2.83	10.01							+
5317423934811472640	131.8926	-54.4835	6.55±0.02	151.58	5.30	-150.38	-18.21	-25.28±0.05	23.66±0.04	12.86±2.16	11.94	1.21	6.02	91.38	-1.04	24.32	-13.25	-5.23	+	+
5317426493243673088	132.0503	-54.3262	6.32±0.08	153.83	5.21	-152.68	-18.03	-24.80±0.15	22.99±0.13		15.92	3.14	9.92							+
5317451747652324352	132.3360	-54.1977	6.47±0.06	151.62	5.15	-150.55	-17.22	-25.50±0.10	22.78±0.10		15.79	2.80	9.85							+
5317475558950416000	131.9637	-53.8052	5.95±0.06	164.36	4.31	-163.27	-18.46	-22.94±0.14	21.04±0.12		16.39	2.97	10.26							
5317514110577328384	133.3499	-53.7349	6.43±0.05	152.72	5.24	-151.86	-15.35	-25.85±0.11	21.90±0.09		15.59	3.03	9.63							+
5317541907606547200	133.2866	-53.6230	6.51±0.06	150.05	4.86	-149.23	-14.97	-26.03±0.13	22.50±0.10		16.18	3.00	10.25							+
5317616640039918976	133.2284	-53.1412	6.61±0.06	148.32	3.79	-147.60	-14.07	-27.17±0.12	22.65±0.10		15.59	2.80	9.69							
5317621446087088896	133.1535	-53.0139	6.20±0.07	157.48	3.67	-156.74	-14.82	-25.44±0.12	21.69±0.10		16.20	2.99	10.16							+
5317681678714511232	129.5023	-55.1056	6.51±0.07	149.58	4.32	-147.92	-21.78	-23.58±0.15	24.96±0.15		16.10	3.18	10.16							
5317776069215504000	130.4786	-54.8202	6.86±0.06	143.14	4.41	-141.76	-19.31	-26.66±0.11	24.55±0.10		15.94	3.23	10.12							
5317793214724700928	130.3018	-54.6412	6.86±0.08	142.32	3.88	-140.97	-19.14	-25.33±0.14	24.34±0.15		16.41	3.29	10.59							+
5317797818929671808	130.2077	-54.5060	6.99±0.06	140.37	3.48	-139.06	-18.78	-26.53±0.12	24.75±0.10		16.32	3.02	10.54							
5317884439832479872	130.7515	-53.9020	6.38±0.03	155.10	3.08	-153.89	-19.09	-23.29±0.06	22.85±0.06	16.48±4.82	10.88	0.91	4.91	94.29	-6.48	23.66	-16.48	-5.37	+	+
5317886329617953536	130.4031	-53.9338	6.71±0.11	143.50	2.60	-142.32	-18.11	-25.40±0.22	24.38±0.20		16.51	3.27	10.65							+
5317887321743547264	130.5757	-53.9022	6.64±0.04	148.88	2.79	-147.69	-18.54	-24.63±0.06	23.31±0.06	16.12±0.68	9.26	0.58	3.37	93.10	-6.34	23.58	-16.02	-5.83	+	+
5317904162322274688	130.3101	-53.7203	6.61±0.06	148.48	2.16	-147.30	-18.52	-25.29±0.13	22.68±0.14		15.72	2.81	9.82							+
5317906155187202176	130.3446	-53.6358	6.53±0.02	152.05	2.07	-150.87	-18.79	-24.91±0.04	23.20±0.05	16.51±1.32	9.40	0.60	3.47	92.58	-6.38	24.11	-16.26	-6.20	+	+
5317950066928748160	128.8396	-54.4152	6.40±0.08	151.69	2.31	-150.09	-21.83	-23.79±0.17	23.86±0.16		16.51	3.33	10.54							+
5318027651219220224	128.6368	-53.8782	6.20±0.05	158.03	1.02	-156.46	-22.14	-22.31±0.11	22.87±0.10		16.05	2.87	10.01							
5318069604459639552	129.1008	-54.0181	6.47±0.02	153.43	1.73	-151.96	-21.13	-23.69±0.04	23.38±0.05	14.11±2.21	10.04	0.73	4.10	91.02	-2.74	23.90	-13.77	-5.75	+	+
5318077919506923520	129.5995	-53.7217	6.77±0.04	145.88	1.48	-144.63	-19.05	-24.07±0.08	24.41±0.06		7.63	0.10	1.78						+	+
5318096125872352768	130.0258	-53.6352	6.29±0.02	157.56	1.83	-156.29	-19.88	-23.66±0.05	21.40±0.04	13.02±0.84	10.30	0.79	4.30	89.29	-1.94	23.43	-12.68	-6.12	+	
5318104307796222464	129.8532	-53.5353	6.61±0.05	148.62	1.36	-147.41	-18.81	-24.30±0.11	22.49±0.10		15.66	2.78	9.76							+
5318113550566048256	129.8492	-53.4397	6.53±0.14	146.18	1.14	-145.02	-18.36	-25.79±0.31	21.19±0.32		5.42	-0.21	-0.51						+	
5318114924955333760	129.7735	-53.3623	6.72±0.06	145.45	0.90	-144.30	-18.24	-25.22±0.12	23.52±0.10		15.79	2.90	9.93							+
5318116299344817024	130.0340	-53.2946	6.64±0.03	148.91	1.03	-147.78	-18.25	-24.77±0.07	24.08±0.06		14.87	2.50	8.98							+
5318117325830884224	129.9972	-53.2609	6.51±0.05	150.70	0.93	-149.56	-18.46	-23.66±0.11	23.62±0.13		7.20	-0.01	1.27						+	+
5318119116844316032	128.9664	-53.8681	6.46±0.05	152.15	1.27	-150.71	-20.89	-23.63±0.10	24.23±0.11		15.66	2.83	9.71							+
5318143752776545280	128.7979	-53.4535	6.49±0.07	150.07	0.22	-148.71	-20.18	-23.90±0.13	24.39±0.15		16.27	3.01	10.34							+
5318160692128569472	129.6011	-53.2512	6.55±0.07	148.88	0.53	-147.70	-18.71	-24.65±0.15	23.09±0.14		16.89	3.31	10.97							+
5318162238316886528	129.7446	-53.3201	6.60±0.02	150.31	0.82	-149.13	-18.82	-24.90±0.04	23.00±0.04	16.87±11.83	13.07	2.01	7.17	92.27	-7.11	23.81	-16.37	-6.47		+
5318165743010208000	129.8630	-53.1643	6.59±0.05	149.03	0.60	-147.90	-18.27	-25.84±0.10	24.35±0.08		15.48	2.76	9.58							+
5318182197023848448	129.7446	-53.0234	6.46±0.07	151.49	0.20	-150.36	-18.50	-24.75±0.11	22.56±0.11		15.83	2.79	9.88							+
5318182648001349248	129.7318	-52.9643	6.53±0.03	151.72	0.06	-150.60	-18.45	-24.18±0.05	23.23±0.04		10.13	0.86	4.20							+
5318185706017892736	129.4868	-52.9317	6.62±0.07	147.41	-0.24	-146.29	-18.18	-25.01±0.15	24.00±0.13		16.37	3.11	10.48							+
5318186565011453056	129.6357	-52.9351	6.23±0.07	156.28	-0.10	-155.11	-19.09	-24.74±0.13	23.07±0.12		15.72	2.77	9.69							+
5318229274167094656	131.5635	-53.7562	6.65±0.03	149.01	3.42	-147.98	-17.13	-24.66±0.05	22.92±0.04	16.00±0.83	10.23	0.78	4.34	93.73	-6.46	23.31	-16.07	-5.53	+	+
5318240131844762880	131.9969	-53.4612	6.62±0.09	146.20	3.18	-145.31	-15.84	-25.75±0.16	21.80±0.15		16.93	3.26	11.04							+
5318267653995965568	131.0423	-53.7259	6.68±0.03	148.37	2.86	-147.29	-17.64	-25.05±0.05	23.87±0.05	12.63±1.28	11.94	1.19	6.07	90.96	-0.33	24.02	-12.63	-5.14		+
5318269371982962432	131.0522	-53.6261	6.63±0.05	148.36	2.66	-147.30	-17.47	-25.49±0.10	23.68±0.09		15.47	2.78	9.58							+
5318277412161521024	130.5963	-53.6884	6.55±0.05	150.46	2.39	-149.32	-18.37	-25.28±0.08	22.42±0.09		15.29	2.70	9.37							+
5318283012799031808	130.6706	-53.5099	6.54±0.03	151.45	2.11	-150.35	-18.11	-24.13±0.05	23.69±0.06		14.34	2.26	8.42							+
5318293526879324288	130.8904	-53.2329	6.61±0.04	149.17	1.71	-148.17	-17.13	-25.62±0.08	23.36±0.07		15.39	2.70	9.49							+
5318296275658773888	131.4496	-53.4306	6.71±0.03	147.67	2.63	-146.71	-16.60	-26.09±0.05	23.48±0.05	15.83±8.73	10.10	0.77	4.24	92.44	-5.54	24.10	-15.74	-6.00	+	+
5318329913841442048	132.3007	-53.4646	6.81±0.07	143.71	3.42	-142.86	-15.22	-27.19±0.13	23.55±0.13		15.81	2.84	9.98							
5318333349814767744	132.1409	-53.4626	6.75±0.06	145.13	3.29	-144.25	-15.55	-26.60±0.11	23.89±0.10		16.00	3.00	10.15							+
5318341905390002048	132.6044	-53.1385	6.50±0.02	152.94	3.26	-152.14	-15.28	-26.29±0.03	22.32±0.03		13.74	1.97	7.80							+
5318354408031489664	132.0356	-53.0936	6.48±0.11	148.73	2.53	-147.90	-15.47	-25.21±0.22	23.14±0.21		17.59	3.56	11.65							+
5318359153978705920	132.3437	-52.9613	6.47±0.05	151.82	2.62	-151.03	-15.19	-25.98±0.09	22.05±0.11		16.06	2.95	10.12							+
5318376093330970112	133.1371	-52.7896	6.49±0.04	152.06	3.07	-151.39	-13.95	-25.94±0.08	21.95±0.06		14.87	2.50	8.93							+
5318410349990827008	132.1994	-52.8727	6.59±0.07	148.05	2.23	-147.28	-14.85	-25.80±0.14	22.62±0.14		15.35	2.79	9.44							+
5318412686452956800	132.0007	-52.8501	6.44±0.04	153.09	2.06	-152.29	-15.56	-24.95±0.07	23.27±0.07		6.25	-0.12	0.30						+	+
5318417118858937088	131.6226	-52.9464	6.78±0.03	146.24	1.80	-145.41	-15.47	-26.23±0.06	23.79±0.04		11.62	1.16	5.78							+
5318420039436905856	131.7642	-52.7811	6.53±0.13	146.76	1.61	-145.98	-15.10	-25.77±0.25	22.10±0.25		17.96	3.78	12.03							+
5318471304162465664	130.3581	-53.4429	6.49±0.09	148.97	1.64	-147.86	-18.09	-23.79±0.17	22.11±0.16		16.66	3.25	10.72							+
5318474941990522368	130.3577	-53.3781	6.65±0.03	149.10	1.51	-148.00	-18.01	-25.04±0.05	25.06±0.04	20.72±11.17	12.17	1.36	6.28	96.58	-10.53	24.78	-20.47	-5.85		+
5318476423763513344	130.4646	-53.3498	6.48±0.04	152.36	1.58	-151.26	-18.22	-24.58±0.07	23.30±0.07		14.71	2.45	8.76							+
5318485735252703232	130.7444	-53.0983	6.75±0.04	145.83	1.27	-144.87	-16.72	-25.17±0.08	22.90±0.09		14.98	2.80	9.12							+
5318486456796462848	130.6056	-53.1139	7.11±0.23	130.20	1.04	-129.32	-15.10	-24.58±0.38	22.77±0.46		4.78	-0.24	-0.96							
5318487208427013632	130.6940	-53.0169	6.38±0.03	154.86	1.12	-153.84	-17.68	-25.70±0.06	22.61±0.06		10.22	0.76	4.24							+
5318490476885356928	130.4127	-53.1565	6.86±0.06	143.29	1.06	-142.29	-16.91	-25.68±0.11	23.88±0.12		15.76	2.84	9.94							+
5318490545615836032	130.3997	-53.1574	6.57±0.07	148.66	1.09	-147.61	-17.56	-24.61±0.14	22.86±0.16		16.68	3.13	10.77							+
5318493569273146496	130.1560	-53.1284	6.55±0.05	150.17	0.81	-149.09	-17.99	-25.79±0.10	23.17±0.09		15.75	2.77	9.84							+
5318496764728574848	130.5511	-53.1010	6.60±0.03	149.72	1.12	-148.70	-17.41	-22.73±0.06	21.79±0.08	17.37±1.89	9.50	0.64	3.60	95.12	-9.07	22.17	-17.07	-5.42		
5318498688873909632	130.5772	-53.0324	6.56±0.02	151.18	1.02	-150.17	-17.44	-23.47±0.04	23.34±0.05		13.16	2.11	7.25							+
5318499822745556992	130.5413	-52.9676	6.63±0.04	148.65	0.83	-147.67	-17.09	-25.69±0.07	23.53±0.08		7.36	0.02	1.47						+	+
5318500303781947776	130.5613	-52.9339	6.59±0.03	149.95	0.79	-148.96	-17.16	-24.68±0.07	23.39±0.07		10.48	1.03	4.57							+
5318501334573605504	130.4151	-52.9927	6.58±0.03	150.69	0.77	-149.66	-17.52	-24.12±0.05	20.11±0.05	14.56±4.55	12.84	1.69	6.93	89.89	-6.19	21.97	-14.04	-6.66		
5318502743323310848	130.4731	-52.9653	6.54±0.07	149.41	0.77	-148.41	-17.25	-24.70±0.13	22.90±0.16		15.81	2.84	9.88							+

5318503533597353856	130.5204	-52.8982	6.51±0.04	151.47	0.68	-150.48	-17.33	-24.44±0.08	23.37±0.08		14.83	2.53	8.89								+
5318505285944674432	130.9138	-53.1320	6.30±0.06	155.26	1.59	-154.24	-17.64	-24.17±0.11	23.91±0.14		16.31	3.07	10.31								+
5318510332522027008	130.8659	-52.9599	6.61±0.01	150.45	1.14	-149.50	-16.88	-24.20±0.03	24.35±0.03		13.34	1.83	7.45								+
5318513459254598528	130.9099	-52.8486	6.50±0.08	149.59	0.94	-148.67	-16.55	-24.90±0.16	22.72±0.14		16.49	3.05	10.55								+
5318517449291928960	131.2313	-52.7782	6.92±0.07	141.14	1.05	-140.32	-15.13	-24.98±0.14	23.76±0.14		16.69	3.15	10.89								+
5318524183800706048	130.7041	-52.8709	6.42±0.08	151.60	0.80	-150.63	-17.07	-25.68±0.15	23.77±0.15		15.99	3.21	10.02								+
5318532735067774848	130.8719	-52.6911	6.61±0.03	149.84	0.58	-148.94	-16.37	-24.58±0.05	19.76±0.05	13.41±4.10	11.57	1.15	5.67	88.61	-4.54	21.92	-12.90	-6.69			
5318536037910263808	130.8144	-52.6469	6.58±0.08	147.83	0.43	-146.94	-16.16	-25.26±0.14	23.01±0.15		16.13	3.18	10.22								+
5318536999982933248	130.8244	-52.6030	6.52±0.03	151.51	0.36	-150.62	-16.47	-24.65±0.05	22.76±0.05	14.15±1.45	9.03	0.54	3.11	91.32	-2.43	23.97	-13.74	-5.56	+	+
5318541982138813824	129.9937	-53.0506	6.61±0.04	148.93	0.49	-147.85	-17.92	-25.30±0.07	24.69±0.07	17.24±0.83	8.62	0.39	2.72	93.48	-5.86	24.98	-16.80	-5.85			+
5318541982145960064	129.9898	-53.0546	6.76±0.21	137.91	0.45	-136.91	-16.61	-25.43±0.39	22.32±0.40		5.14	-0.20	-0.71								+
5318543425255007872	130.0726	-53.0153	6.46±0.09	149.51	0.49	-148.44	-17.84	-24.79±0.17	23.08±0.16		5.52	-0.18	-0.43								+
5318544971443141632	129.9078	-53.0008	6.63±0.05	148.32	0.30	-147.24	-17.88	-25.01±0.09	22.30±0.08		15.51	2.75	9.62								+
5318546139674245888	129.9292	-52.9641	6.64±0.03	149.33	0.25	-148.25	-17.92	-25.44±0.05	22.48±0.05	16.78±2.79	8.99	0.52	3.10	91.52	-7.25	23.70	-16.17	-6.81			+
5318552496225991680	130.2867	-52.8106	6.46±0.08	150.23	0.27	-149.22	-17.34	-23.79±0.16	23.26±0.18		16.86	3.28	10.92								+
5318554076773891328	130.1879	-52.8144	6.40±0.05	153.40	0.19	-152.36	-17.84	-23.97±0.10	22.53±0.08		15.18	2.74	9.22								+
5318554179853105024	130.2002	-52.7916	6.56±0.04	150.28	0.15	-149.27	-17.42	-24.26±0.09	23.07±0.09		14.88	2.50	8.96								+
5318557237870027776	130.3086	-52.6725	6.53±0.04	150.67	0.00	-149.69	-17.14	-24.27±0.10	23.75±0.09		14.68	2.40	8.75								+
5318557512747932672	130.2920	-52.6558	6.61±0.04	148.94	-0.05	-147.97	-16.94	-25.16±0.09	23.51±0.10		15.17	2.64	9.28								+
5318557581467400320	130.2840	-52.6348	6.63±0.04	149.06	-0.10	-148.10	-16.93	-25.58±0.08	24.05±0.08		15.10	2.59	9.21								+
5318565656005527936	129.7616	-52.7106	6.50±0.02	152.61	-0.45	-151.53	-18.12	-23.71±0.05	23.82±0.05	11.82±3.91	10.69	0.93	4.76	90.27	2.36	24.29	-11.33	-4.76			+
5318567958108066944	130.0067	-52.7034	6.64±0.03	149.21	-0.22	-148.20	-17.40	-24.57±0.06	23.38±0.05	15.65±0.49	8.47	0.34	2.58	92.38	-4.63	23.90	-15.11	-5.72	+	+
5318569195058991616	130.2395	-52.6390	6.59±0.03	150.13	-0.13	-149.15	-17.11	-25.24±0.06	23.57±0.06		14.37	2.28	8.47								+
5318569676094904192	130.2298	-52.5805	6.55±0.09	147.95	-0.26	-147.00	-16.79	-25.62±0.18	23.53±0.20		17.02	3.38	11.10								+
5318571840758892288	130.0415	-52.5864	6.44±0.08	150.96	-0.44	-149.95	-17.38	-24.52±0.18	23.47±0.16		16.74	3.39	10.78								+
5318573971062181248	130.1152	-52.5001	6.29±0.09	154.08	-0.56	-153.08	-17.50	-23.55±0.18	22.17±0.20		17.28	3.42	11.27								+
5318575482892257536	130.5365	-52.7470	6.62±0.03	149.16	0.37	-148.21	-16.80	-24.90±0.07	23.01±0.06		14.06	2.34	8.17								+
5318575654690961152	130.5054	-52.7450	6.59±0.11	145.86	0.33	-144.93	-16.47	-24.35±0.21	23.41±0.23		17.00	3.37	11.09								+
5318581530206048256	130.4466	-52.5548	6.64±0.07	147.11	-0.11	-146.19	-16.38	-24.92±0.14	22.01±0.16		16.31	3.00	10.42								+
5318599362909734400	130.2010	-52.3414	6.50±0.07	150.13	-0.79	-149.20	-16.69	-24.38±0.13	22.82±0.15		16.70	3.16	10.76								+
5318602592725367424	130.6088	-52.3142	6.43±0.04	153.24	-0.46	-152.35	-16.47	-24.10±0.08	22.04±0.08		14.97	2.53	9.01								+
5318607540527504768	130.4048	-52.2121	6.65±0.06	147.40	-0.85	-146.54	-15.94	-26.04±0.11	23.36±0.10		15.83	2.79	9.95								+
5318623586524753280	131.7858	-52.3329	6.53±0.04	151.21	0.75	-150.49	-14.80	-25.14±0.06	22.95±0.06		14.73	2.41	8.80								+
5318630905148648704	131.4129	-52.4331	6.54±0.03	151.40	0.59	-150.60	-15.45	-25.96±0.06	21.08±0.05		9.76	0.67	3.84							+	
5318678802624759680	131.9445	-51.7942	6.75±0.06	144.90	-0.19	-144.30	-13.14	-26.46±0.11	23.05±0.10		15.91	2.92	10.06								+
5318694917343684480	131.1596	-52.0223	6.19±0.07	157.61	-0.54	-156.83	-15.72	-25.12±0.13	22.08±0.11		15.73	2.99	9.69								+
5319702757181332608	124.6699	-54.2130	6.20±0.08	156.77	-1.83	-154.30	-27.66	-22.07±0.15	21.46±0.13		16.56	3.22	10.52								
5321134149526405120	127.4127	-53.0945	6.63±0.05	148.35	-1.79	-146.83	-21.14	-23.46±0.10	24.34±0.09		15.59	2.76	9.70								+
5321150951435896064	128.6775	-53.2840	6.71±0.06	145.69	-0.24	-144.38	-19.48	-23.81±0.12	24.17±0.15		16.02	3.00	10.15								+
5321154967220812032	128.9395	-53.2566	6.54±0.02	151.57	-0.07	-150.26	-19.90	-24.65±0.04	23.58±0.04		12.17	1.35	6.25								+
5321167959506065280	128.3990	-53.1638	6.30±0.04	156.28	-0.79	-154.85	-21.07	-23.30±0.08	23.67±0.07		15.39	2.67	9.39								+
5321172323192731008	128.7795	-53.0735	6.53±0.05	150.57	-0.60	-149.28	-19.68	-23.44±0.10	23.92±0.11		15.57	2.82	9.64								+
5321176205843037440	128.5542	-52.9721	6.70±0.02	148.11	-1.01	-146.82	-19.49	-24.41±0.04	24.29±0.04	15.12±1.26	11.85	1.18	5.98	91.44	-3.43	24.12	-14.37	-5.83			+
5321192457993772672	129.2231	-52.8420	6.31±0.06	155.37	-0.70	-154.15	-19.36	-24.02±0.11	22.89±0.11		15.95	2.79	9.95								+
5321209809668118912	129.0870	-52.6699	6.35±0.10	151.85	-1.18	-150.68	-18.83	-23.87±0.22	23.57±0.19		16.46	3.23	10.48								+
5321210870519453440	129.0092	-52.6210	6.43±0.09	150.78	-1.35	-149.61	-18.72	-24.18±0.17	24.37±0.21		17.16	3.28	11.20								+
5321212730245914752	129.2335	-52.5226	6.39±0.05	153.39	-1.37	-152.25	-18.60	-23.56±0.10	22.76±0.13		16.09	2.82	10.11								+
5321251591111558400	128.8664	-52.6754	6.61±0.07	147.48	-1.34	-146.30	-18.57	-23.13±0.15	22.71±0.15		16.58	3.10	10.68								+
5321265816043488512	128.9307	-52.3379	6.64±0.07	147.41	-1.98	-146.29	-17.97	-24.39±0.13	23.20±0.14		16.22	2.89	10.33								+
5321275295028390912	128.5755	-52.2659	6.44±0.02	153.94	-2.57	-152.73	-19.12	-23.47±0.04	23.07±0.04	14.90±0.59	12.01	1.19	6.06	91.11	-2.80	24.10	-13.95	-5.78			+
5321280728169745536	128.7548	-52.2336	6.83±0.02	145.38	-2.33	-144.26	-17.79	-24.52±0.04	24.36±0.04	17.26±2.55	11.90	1.21	6.07	93.34	-6.39	23.93	-16.35	-5.83			+
5321281449724262400	128.6132	-52.2133	6.68±0.07	146.05	-2.51	-144.91	-18.02	-24.15±0.15	24.17±0.14		16.64	3.17	10.76								+
5321288527827254784	126.9367	-53.3226	6.53±0.06	149.70	-1.74	-148.03	-22.27	-22.74±0.14	24.16±0.13		16.29	2.94	10.36								
5321572442349020160	129.5049	-52.5337	6.73±0.05	146.26	-1.03	-145.22	-17.42	-24.78±0.10	23.78±0.08		15.70	2.83	9.84								+
5321600445535344000	129.6502	-52.1107	6.63±0.03	149.62	-1.80	-148.64	-16.97	-24.97±0.05	23.59±0.04	11.74±6.47	12.54	1.45	6.65	88.62	2.30	24.32	-10.96	-5.46			+
5321618724917007104	129.9207	-52.1953	6.49±0.05	151.28	-1.38	-150.32	-16.95	-24.89±0.10	23.80±0.09		15.44	2.72	9.50								+
5321663392577750400	129.3820	-51.9360	6.17±0.05	159.53	-2.58	-158.47	-18.17	-22.66±0.09	21.41±0.07		15.23	2.60	9.19								
5321664870046502272	129.3892	-51.9310	6.09±0.06	160.31	-2.60	-159.25	-18.24	-22.57±0.12	21.39±0.13		16.00	2.84	9.92								
5321665965252347136	129.3369	-51.8677	6.66±0.06	147.19	-2.57	-146.22	-16.72	-24.24±0.12	24.00±0.09		15.68	2.81	9.80								+
5321723105501397888	130.9120	-51.5068	6.50±0.04	151.43	-1.84	-150.72	-14.59	-23.05±0.06	21.81±0.06	19.29±7.48	12.03	1.25	6.09	96.41	-9.95	23.05	-18.64	-5.34			
5322112646157544576	129.6522	-50.1976	6.64±0.08	146.73	-5.68	-145.98	-13.71	-23.94±0.15	22.28±0.16		16.77	3.17	10.88								+
5322573994359986944	126.1475	-50.8572	6.87±0.05	143.16	-7.43	-141.72	-18.82	-23.77±0.09	25.33±0.10		15.48	2.78	9.66								
5322769913589393280	127.7273	-50.5937	6.51±0.08	149.38	-6.83	-148.24	-17.13	-23.05±0.14	22.70±0.16		16.71	3.14	10.78								+
5322833994504018688	128.9798	-50.3830	6.15±0.09	157.83	-6.41	-156.88	-16.00	-22.94±0.16	22.11±0.17		16.69	3.30	10.63								
5322839182824535808	129.1030	-50.2554	6.53±0.03	151.56	-6.30	-150.68	-15.00	-23.55±0.05	22.48±0.06		9.35	0.59	3.42							+	+
5323126464596520704	128.6195	-49.3076	7.03±0.04	140.38	-8.16	-139.53	-13.13	-26.53±0.07	23.65±0.06		14.81	2.53	9.04								
5323397666014856960	135.9031	-53.3904	6.32±0.05	155.24	7.30	-154.61	-11.89	-26.51±0.09	20.32±0.09		15.66	2.79	9.67								
5323642616594496000	134.1247	-52.7126	6.60±0.06	148.62	3.84	-148.05	-12.32	-26.09±0.10	21.96±0.10		15.55	2.69	9.65								+
5324423991395670912	133.6223	-52.1043	6.74±0.07	145.09	2.08	-144.61	-11.63	-26.22±0.12	22.54±0.14		16.14	2.97	10.29								+
5324711513688725376	133.0237	-51.2293	6.31±0.03	157.06	-0.25	-156.61	-11.85	-24.42±0.05	21.00±0.04		14.08	2.09	8.08								
5328033481911917056	132.6597	-49.1519	6.66±0.08	145.83	-4.69	-145.53	-8.11	-24.27±0.16	21.13±0.15		16.29	3.21	10.41								
5328090622157311744	131.4765	-49.6444	6.97±0.09	139.12	-4.71	-138.69	-9.94	-24.89±0.17	22.21±0.15		17.27	3.41	11.48								+
5328127730675533440	130.6325	-49.5221	7.08±0.08	137.56	-5.70	-137.03	-10.67	-26.44±0.13	23.86±0.13		16.99	3.41	11.24								
5515254920272567296	126.7778	-49.0377	6.17±0.07	157.84	-11.69	-156.49	-17.00	-21.55±0.14	21.67±0.12		16.39	2.97	10.34								
5515321646885722880	126.5201	-48.6898	6.70±0.07	145.54	-11.75	-144.23	-15.53	-22.92±0.14	23.89±0.12		15.71	3.07	9.84								

Таблица 3.3. Список звезд Гиад

TGAS	HIP	A град	D град	RA J2015.0 град	DEC J2015.0 град	ϖ±σϖ, мсд	f (1/σπ)	$\mu_\alpha \pm \sigma\mu_\alpha$, мсд/год	$\mu_\delta \pm \sigma\mu_\delta$, мсд/год	Vr±σVr, км/с	Ref Vr	Доп. Инфор-мация
1441712288095598 08	21099	97.869	6.873	67.816	20.133	21.70±0.23	4.35	106.41±0.13	-39.26±0.08	39.7±0.2	[33]	
1443779795562074 88	21256	96.380	7.232	68.405	21.151	22.99±0.27	3.70	108.32±0.14	-46.26±0.10	41.4±0.4	[89]	
1452931773503632 64	20712	97.212	7.866	66.578	21.470	21.46±0.44	2.27	103.54±0.06	-37.87±0.04	38.2±0.1	[155]	SB
1453255442204439 04	20480	96.7272	7.155	65.844	21.379	20.12±0.25	4.0	99.37±0.11	-37.94±0.07	38.5±0.2	[33]	SB
1453733729762565 12	20557	98.0802	6.578	66.061	21.736	23.36±0.32	3.13	117.37±0.05	-45.80±0.03	37.3±0.5	[89]	
1466778748044422 40	21637	98.048	6.344	69.714	23.150	23.00±0.29	3.45	105.49±0.06	-54.19±0.08	39.1±0.2	[128]	
1445347204818498 56		-	-	66.699	21.235	23.44±0.42	2.38	113.89±1.07	-45.79±0.78	-		High PM
1466980783289040 64	21741	97.013	7.545	70.025	23.304	16.91±0.23	4.35	75.66±0.15	-38.49±0.09	40.7±0.7	[89]	
1471821726831877 12	22394	97.341	7.263	72.304	24.803	20.47±0.31	3.23	84.70±0.10	-52.92±0.07	40.6±0.4	[101]	Var.RS CVn
1481838621355339 52		-	-	70.039	25.592	22.68±0.34	2.94	102.33±2.03	-63.19±1.38	-		Rotat. var.
1489460642122269 44		-	-	64.545	23.284	18.67±0.23	4.35	93.58±1.07	-38.81±0.64	-		Var. RS CVn
1490052660405198 08	19793	97.256	6.833	63.635	23.575	22.19±0.25	4.00	119.82±0.08	-48.31±0.05	37.5±0.2	[33]	Var. BY Dra
1513791460071072 00	20949	96.364	6.950	67.379	26.671	17.60±0.41	2.44	82.80±0.08	-48.48±0.06	38.5±0.2	[33]	
1704575968917977 60		-	-	60.282	33.196	21.82±0.31	3.23	132.03±0.79	-74.20±0.41	-		
3239389678968988 288	23312	98.008	7.390	75.204	4.733	19.25±0.24	4.17	72.65±0.17	9.97±0.11	42.9±0.6	[107]	
3277270534605393 920	17766	98.050	6.793	57.050	7.146	27.36±0.25	4.00	175.52±0.19	6.50±0.11	35.4±0.4	[89]	High PM
3281064262038614 912	22177	96.531	6.722	71.579	3.636	22.13±0.25	4.00	93.26±0.18	13.29±0.14	43.2±0.4	[89]	
3282171745125201 792		-	-	69.493	4.670	20.86±0.34	2.94	96.07±1.09	8.33±0.82	-		High PM
3283285790922135 424		-	-	65.268	3.269	26.81±0.34	2.94	139.23±1.10	17.54±0.53	-		
3300315439330018 304	19441	105.616	5.434	62.456	9.305	28.08±0.25	4.00	154.75±0.15	-5.45±0.12	28.1±0.3	[89]	High PM
3300934223858467 072	19796	98.514	7.306	63.644	10.701	22.18±0.24	4.17	119.57±0.06	-5.52±0.05	37.1±0.4	[89]	High PM
3304337452864501 120	19316	96.396	7.184	62.112	12.192	21.82±0.28	3.57	119.35±0.17	-10.87±0.13	38.4±0.4	[89]	High PM
3304412597612195 328	19786	97.971	6.635	63.614	12.435	20.92±0.27	3.70	114.82±0.09	-13.06±0.06	38.3±0.0	[183]	Var. BY Dra
3305871821341047 808	21066	98.450	6.201	67.739	10.752	21.20±0.36	2.78	102.99±0.04	-10.82±0.02	39.0±0.7	[89]	
3306922954457367 936	20826	98.402	6.661	66.942	11.736	21.64±0.25	4.00	110.01±0.08	-12.47±0.04	39.7±0.0	[183]	
3307504218151520 256	21179	97.997	6.378	68.107	13.113	21.42±0.24	4.17	104.59±0.23	-18.43±0.13	40.4±0.6	[148]	Var.BY Dra
3307528029449757 056	21267	101.214	5.927	68.445	13.252	21.67±0.41	2.44	102.82±0.04	-17.42±0.02	35.0±4.4	[89]	
3307645127438373 888	20762	96.920	6.854	66.727	13.138	20.78±0.24	4.17	104.52±0.22	-16.50±0.13	41.2±0.4	[89]	
3307815001984777 088	21112	98.271	6.442	67.873	13.903	18.56±0.32	3.13	89.95±0.06	-17.36±0.03	39.2±0.9	[117]	SB
3307844860597241 088	20850	97.010	6.746	67.019	13.868	20.88±0.24	4.17	102.35±0.16	-18.99±0.08	40.4±0.2	[33]	
3307992332594320 640	21723	96.647	7.366	69.963	12.728	23.40±0.24	4.17	102.59±0.17	-16.17±0.12	41.7±0.0	[183]	
3309006597711379 328	22203	95.806	7.135	71.627	15.472	21.40±0.27	3.70	86.72±0.08	-25.98±0.06	42.8±0.8	[117]	
3309956850635519 488		97.842	6.839	69.022	15.684	19.96±0.24	4.17	96.05±0.71	-24.18±0.40	41.5±0.4	[128]	
3310820620098473 728	20527	96.295	7.453	65.977	14.052	23.24±0.24	4.17	115.60±0.27	-18.94±0.18	40.6±0.5	[89]	High PM
3310903736305456 512	20827	97.281	6.955	66.946	14.418	20.38±0.27	3.70	100.51±0.15	-19.25±0.08	40.1±0.3	[89]	
3311024785663873 920	20357	96.751	6.888	65.395	14.410	20.45±0.35	2.86	104.23±0.04	-19.13±0.03	39.8±0.6	[89]	
3311148824319241 472	20492	97.119	7.729	65.885	14.670	21.57±0.24	4.17	109.27±0.16	-17.96±0.11	39.9±0.2	[33]	
3311179335766914 944		-	-	66.520	15.041	20.99±0.36	2.78	101.54±1.21	-22.62±0.65	-		
3311492799660064 384	19834	97.609	6.917	63.794	14.398	20.97±0.23	4.35	114.41±0.30	-18.32±0.22	38.8±0.5	[89]	High PM
3311514205777562 496	19781	96.603	7.588	63.607	14.625	20.56±0.28	3.57	107.12±0.09	-16.30±0.06	38.3±0.2	[33]	
3312025581763840 512	20485	98.091	6.921	65.856	15.763	24.24±0.31	3.23	125.00±0.18	-26.47±0.12	38.8±0.3	[137]	Var.BY Dra
3312136494998639 872	19877	98.568	6.674	63.943	15.401	21.85±0.81	1.23	115.63±0.03	-21.52±0.03	36.4±2.0	[76]	Ellips. var.
3312197930211158 784	19862	97.456	7.055	63.891	15.706	22.14±0.30	3.33	120.51±0.20	-23.20±0.14	39.0±0.4	[33]	High PM
3312281664893305 728	20082	97.848	7.331	64.581	16.088	22.19±0.22	4.55	118.86±0.21	-23.42±0.15	38.8±0.2	[182]	Var.BY Dra
3312564033223630 720	21138	97.273	7.107	67.969	15.499	22.02±0.25	4.00	105.21±0.34	-24.27±0.17	40.4±0.2	[137]	
3312575681175439 616	21317	97.270	6.393	68.648	15.505	21.74±0.24	4.17	101.12±0.10	-26.74±0.06	40.3±0.0	[183]	Var.BY Dra
3312602344331419 136		98.760	7.362	68.634	15.827	19.06±0.33	3.03	90.29±1.00	-20.08±0.42	38.8±0.8	[117]	
3312644881687518 976		97.136	6.955	68.248	15.819	21.28±0.24	4.17	100.08±0.67	-25.13±0.40	40.4±0.5	[204]	Var.BY Dra
3312709374919349 248	20815	98.019	6.699	66.900	15.589	21.13±0.39	2.56	105.20±0.06	-23.80±0.03	39.1±0.3	[89]	Var.BY Dra
3312783557591565 440	20661	97.891	6.627	66.406	15.941	20.87±0.72	1.39	106.89±0.06	-25.07±0.03	39.6±0.1	[155]	SB
3312921374502681 984		96.774	6.441	67.046	16.471	23.57±0.24	4.17	114.22±1.84	-31.78±1.05	40.1±0.9	[117]	High PM
3312951748510907 648	20978	97.479	6.915	67.491	16.673	22.37±0.25	4.00	106.80±0.12	-28.27±0.07	39.1±0.8	[117]	
3313259165090609 280		98.866	7.044	68.409	16.762	20.31±0.42	2.38	97.94±0.65	-25.17±0.35	38.8±0.9	[117]	High PM
3313630078465745 280		97.137	6.828	66.054	16.379	17.69±0.24	4.17	88.38±0.53	-21.67±0.47	39.2±0.2	[128]	
3313662892016181 504	20577	98.889	7.407	66.119	16.886	22.13±0.26	3.85	113.09±0.08	-25.04±0.05	37.7±0.2	[33]	Var.BY Dra
3313689417734366 720	20741	97.890	6.710	66.668	16.747	21.94±0.47	2.13	108.85±0.07	-28.09±0.04	38.7±0.1	[33]	Var.BY Dra
3313947699887831 808	20567	96.909	6.893	66.093	17.079	19.88±0.32	3.13	99.91±0.06	-26.65±0.03	39.8±0.6	[89]	
3314079503847287 424	20563	97.806	7.046	66.071	18.003	21.76±0.41	2.44	110.88±0.12	-30.63±0.07	38.9±0.4	[89]	Var.BY Dra
3314109912215994 112	20899	98.445	7.072	67.202	17.285	21.64±0.28	3.57	108.70±0.07	-28.42±0.04	39.2±0.0	[183]	Var.BY Dra
3314212063714381 056	20948	99.102	6.145	67.377	17.863	21.49±0.33	3.03	106.09±0.06	-31.97±0.03	37.5±0.7	[89]	High PM
3314213025787054 592	20951	97.932	6.551	67.382	17.893	21.97±0.24	4.17	107.64±0.16	-32.89±0.09	39.1±0.3	[128]	Var.BY Dra
3387381641964995 712	24923	97.334	6.698	80.106	11.610	18.13±0.29	3.45	52.19±0.10	-13.60±0.07	44.2±0.6	[107]	
3391712034151625 984	23498	97.015	7.197	75.782	13.731	18.81±0.28	3.57	66.26±0.10	-18.03±0.06	43.1±0.3	[128]	
3391728561185367 168		97.747	7.440	75.401	13.933	23.22±0.29	3.45	85.67±1.99	-21.62±1.35	42.7±1.1	[117]	High PM
3392446817156214 784	23069	97.326	7.192	74.457	14.002	18.34±0.25	4.00	69.78±0.11	-18.05±0.08	42.9±0.2	[33]	
3404812680839290 368	22505	97.777	7.321	72.641	15.083	21.16±0.43	2.33	88.98±0.06	-23.36±0.04	42.6±0.3	[33]	SB
3404850785786832 512	22566	96.523	7.839	72.847	15.433	16.45±0.28	3.57	65.82±0.06	-18.20±0.04	43.4±0.8	[117]	
3405113740864365 440	22422	97.159	7.427	72.384	15.889	20.88±0.24	4.17	86.74±0.07	-25.50±0.05	42.7±0.7	[117]	
3405127244241184 256		97.493	7.278	72.216	15.947	16.64±0.23	4.35	69.37±1.27	-20.41±0.85	41.9±1.5	[117]	

3405220084257276416	22524	96.659	7.525	72.703	16.210	20.07±0.33	3.03	83.10±0.04	-26.25±0.03	44.2±1.0	[89]	EB
3405988677241799040		97.629	7.144	72.503	16.412	20.57±0.30	3.33	84.27±4.61	-26.91±2.68	41.3±0.3	[137]	High PM
3406943087694799744	22654	96.706	7.252	73.098	18.997	19.85±0.22	4.55	79.24±0.26	-35.21±0.17	42.9±0.4	[89]	
3407121827053483776	23750	97.270	6.911	76.575	17.816	18.80±0.28	3.57	64.51±0.09	-31.18±0.05	42.7±0.6	[107]	
3407518510233429248		-	-	75.780	19.018	18.59±0.36	2.78	64.78±2.36	-32.99±1.84	-		
3408463506117452544	22850	101.293	5.025	73.743	19.485	15.92±0.39	2.56	62.84±0.03	-28.92±0.02	35.0±4.3	[89]	
3410453484725565312	21261	96.901	7.565	68.425	19.014	21.02±0.25	4.00	100.11±0.21	-33.77±0.12	41.4±0.4	[89]	
3410640882737635200		97.580	6.353	68.171	19.113	19.12±0.41	2.44	90.61±0.86	-33.23±0.76	39.3±0.3	[137]	
3412605297699792512		-	-	71.788	20.882	23.67±0.23	4.35	98.42±1.67	-50.04±1.14	-		High PM
3413146910255989248	22253	97.399	7.920	71.859	23.051	18.37±0.30	3.33	78.94±0.15	-41.25±0.09	41.8±0.4	[89]	
38354676428572288	18322	97.574	6.976	58.757	12.486	21.82±0.24	4.17	131.22±0.17	-10.25±0.08	35.8±0.4	[137]	
43538289638888064	18327	97.045	7.551	58.778	16.998	24.64±0.23	4.35	147.59±0.12	-24.49±0.07	36.2±0.3	[89]	
43789768566924416	17962	95.202	7.630	57.605	17.246	21.03±0.52	1.92	127.10±0.09	-22.28±0.04	37.4±0.5	[101]	EB Algol
45159897490770816	19207	96.718	7.414	61.756	15.335	22.37±0.28	3.57	124.59±0.15	-19.84±0.11	38.0±0.3	[137]	High PM
45367052352895360	19148	96.719	7.472	61.568	15.698	21.34±0.24	4.17	118.93±0.12	-19.62±0.07	37.8±0.3	[128]	
45567507066546048	19263	96.777	6.948	61.931	16.519	21.94±0.24	4.17	122.33±0.17	-24.95±0.12	38.0±0.0	[183]	
45789299177700352	20019	98.478	6.517	64.413	16.948	21.39±0.27	3.70	115.40±0.09	-27.24±0.06	37.7±0.1	[101]	EB
46975431705914112	19504	99.254	6.143	62.677	18.423	21.31±0.35	2.86	121.50±0.03	-30.93±0.02	36.1±0.6	[89]	
47345005052090880	20146	98.350	6.880	64.784	17.525	21.17±0.26	3.85	113.07±0.09	-27.78±0.06	38.1±0.0	[183]	
47541096078933376	20350	99.766	5.901	65.385	18.417	20.47±0.76	1.32	110.61±0.04	-31.87±0.03	37.0±2.0	[206]	
47620260916592384	20056	97.868	6.582	64.508	18.257	21.29±0.47	2.13	113.16±0.06	-31.30±0.03	38.0±0.3	[101]	Var. RS CVn
48061405596787712	20890	97.012	6.555	67.156	19.741	21.01±0.30	3.33	102.72±0.07	-38.13±0.04	39.8±0.1	[101]	Var.BY Dra
49005576847854080	20130	96.886	7.039	64.742	19.907	21.74±0.28	3.57	112.83±0.11	-36.52±0.07	38.8±0.2	[33]	Var.BY Dra
49231663928585344	20349	97.722	7.309	65.382	21.040	20.90±0.37	2.70	104.84±0.04	-35.99±0.03	37.1±2.0	[206]	
49365082792386816	19870	106.565	2.712	63.927	20.820	19.87±0.32	3.13	109.62±0.06	-35.15±0.04	27.2±2.0	[206]	SB
50298121485861120	19082	96.958	6.950	61.357	19.442	21.11±0.36	2.78	122.02±0.24	-32.64±0.16	38.0±0.4	[89]	High PM
50327292903510144	18946	97.554	6.293	60.913	19.455	20.86±0.26	3.85	122.15±0.18	-33.42±0.12	36.9±0.5	[89]	Var.
52548237672091392	19934	97.186	6.925	64.140	21.907	19.56±0.25	4.00	104.68±0.10	-38.41±0.07	38.3±0.3	[33]	Var.BY Dra
52813460492850304	19789	99.205	6.582	63.627	22.452	15.65±0.73	1.37	92.69±0.04	-32.50±0.02	38.4±2.0	[206]	
53942246617146240		-	-	62.151	23.768	21.24±0.30	3.33	119.80±1.11	-43.44±0.72	-		
66482348530642176	18018	96.184	7.570	57.764	23.903	24.55±0.29	3.45	152.53±0.17	-48.10±0.10	36.5±0.9	[89]	High PM
67351752990540544		97.388	6.619	58.172	25.804	22.35±0.26	3.85	140.71±1.12	-51.81±0.55	35.3±0.3	[137]	High PM
68000018174329600	16529	98.171	7.012	53.209	23.692	23.79±0.26	3.85	162.22±0.08	-39.41±0.04	31.9±0.8	[89]	High PM
71487325460694912		-	-	54.784	28.382	18.07±0.69	1.45	117.62±2.99	-41.80±0.72	-		

Приложение 4. Использованные методы исследований

П.4.1. Введение. Особенности метода AD-диаграмм

Звезды скопления имеют схожие параметры, такие как возраст, расстояние, кинематика и химический состав. Так как пространственные движения звезд схожи, то существует точка на сфере, в которой движение звезд будет сходиться, то есть апекс. Апексы говорят об общем направлении движения (только направление, модуль здесь не рассматривается). По общему движению можно выделять группировки звёзд, движущихся в одном направлении, а значит, они могут быть как-то связаны.

Мы использовали два независимых метода определения апекса СР-метод и метод AD-диаграммы. Оба этим методы способны дать индивидуальный апекс звезды, что дает более полную информацию и ее движении и принадлежности к скоплению.

Апексы говорят об общем направлении движения (только направление, модуль здесь не рассматривается). По общему движению можно выделять группировки звёзд, движущихся в одном направлении, а значит, они могут быть связаны какой-то идеей. По диаграмме можно находить сам апекс скопления, который необходим для других исследований (например, смотреть схожесть кинематики по собственным движениям, если нет лучевых скоростей).

Анализ диаграмм апексов звезд скопления позволяет выделять кинематически связанные группы звезд внутри скоплений и потоков. В нашем случае это поток Большой Медведицы, в котором нашим методом найдены разделяющиеся три субструктуры. Возможно, эти структуры когда-то были ядром и шлейфами. Мы знаем, что звезды шлейфов потеряли связь со скоплением и для далеких скоплений шлейфы искать не так легко из-за ограниченной точности астрометрических данных. В случае БМ имеются, скорее всего, наиболее надежные астрометрические измерения. Это давало возможность давно заметить предполагаемые шлейфы. Так же применяется аналог метода AD-диаграмм − метод LB-диаграмм.

П 4.1.1. Метод AD-диаграмм

Для поиска закономерностей в положениях апексов (или антиапексов) звёзд (скоплений) применяют метод AD-диаграмм.

Количество звезд, у которых есть измерения собственных движений обычно намного больше количество звезд с известными значениями лучевой скорости. Однако для полной картины пространственного движения объекта, необходимо знать и то и то. Для идентификации звездных групп, имеющих общее движение в пространстве, был разработан метод получения звездных апексов, известный как метод AD-диаграммы, который включает использование лучевых скоростей. Этот метод использовался для изучения кинематики потока Большой Медведицы, Плеяд, Гиад, IC 2391 и других скоплений (напр., M67[199], NGC 188 [72] и др.). Метод AD-диаграммы использует понятие

«индивидуального апекса звезды». Этот термин был введен по аналогии с апексом Солнца или апексом скопления − точкой на небесной сфере, к которой движется объект, в данном случае звезда. Отдельные апексы могут быть получены, если начало вектора поместить в точку наблюдения и продолжить его до пересечения с поверхностью небесной сферы. Точка пересечения является апексом. AD-диаграмма показывает положение отдельных апексов в системе экваториальных координат (есть модификация и для галактических). Кучность расположения точек на AD-диаграмме указывает на параллельность соответствующих векторов пространственной скорости. По определению положение апекса показывает направление в пространстве или точку на небе, из которой (или куда в случае антиапекса) движется данное скопление (или отдельная звезда, рассматриваемая в данной работе как член скопления). На небесной сфере антиапексы и апексы находятся в диаметрально противоположных точках, координаты которых по долготе имеют разницу в 180°, а по широте отличаются знаком.

Уплотняя точки на диаграмме, мы можем выделить группы звезд, имеющих общее движение в пространстве. Этот метод удобен своей простотой и наглядностью. В отличие от диаграмм (UVW), где необходимо учитывать эллипсоид скоростей, метод апексов выделяет однонаправленные векторы на экваториальной плоскости без ограничений, налагаемых на модуль вектора скорости.

Анализ диаграмм апексов звезд скопления позволяет выделять кинематически связанные группы звезд внутри скоплений и потоков. Как, например, поток Большой Медведицы разделяющийся на три субструктуры.

Формальное описание метода, техники построения диаграмм и формулы для определения эллипсов ошибок можно найти в [39]. Этот метод требует знания лучевой скорости и параллакса

Сначала нам необходимо вычислить компоненты скорости Vx, Vy и Vz вдоль осей x, y и z в гелиоцентрической системе координат [71].

В этой системе плоскость небесного экватора берется в качестве основной плоскости координат. Основная ось OX направлена от центра сферы O к точке весеннего равноденствия T. Ось OY находится под углом 90 градусов к оси OT. Ось OZ перпендикулярна другим осям и указывает на северный полюс. По формулам, приведенным Смартом [179]:

$$Vx = -4.74r_i\mu_\alpha \cos\delta \sin\alpha - 4.74r_i\mu_\delta \sin\delta \cos\alpha + Vr \cos\delta \cos\alpha,$$

$$Vy = +4.74r_i\mu_\alpha \cos\delta \cos\alpha - 4.74r_i\mu_\delta \sin\delta \sin\alpha + Vr \cos\delta \sin\alpha, \quad (П.4.1.1)$$

$$Vz = +4.74r_i\mu_\delta \cos\delta + Vr \sin\delta$$

AD-диаграмма может быть использована для изучения кинематической структуры скоплений и выявления внутренних кинематических субструктур в нем. В этом методе экваториальные координаты сходящейся апекса вычисляются как:

$$A0 = tan^{-1}\left(\frac{\overline{V_y}}{\overline{V_x}}\right),$$

$$D0 = tan^{-1}\left(\frac{\overline{V_x}}{\sqrt{\overline{V_x^2+V_y^2}}}\right), \quad (П.4.1.2)$$

П4.1.2. Эллипсы ошибок для метода AD-диаграмм

Методика определения различных коэффициентов и формул эллипсов ошибок для AD-диаграмм описана в [24] и [39]. Формулы даны следующим образом:

$$Cov\left(\frac{A}{D}\right) = JKJ^T \quad (П.4.1.3)$$

где C – матрица ковариаций собственных движений и параллаксов

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_{\mu_\alpha}^2 & \sigma_{\mu_\alpha}\sigma_{\mu_\delta}\rho_{\mu_\alpha\mu_\delta} & \sigma_{\mu_\alpha}\sigma_{\mu_\delta}\rho_{\mu_\alpha\varpi} & 0 \\ \sigma_{\mu_\alpha}\sigma_{\mu_\delta}\rho_{\mu_\alpha\mu_\delta} & \sigma_{\mu_\delta}^2 & \sigma_{\mu_\delta}\sigma_{\varpi}\rho_{\mu_\delta\varpi} & 0 \\ \sigma_{\mu_\alpha}\sigma_{\mu_\delta}\rho_{\mu_\alpha\varpi} & \sigma_{\mu_\delta}\sigma_{\varpi}\rho_{\mu_\delta\varpi} & \sigma_{\varpi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Vr}^2 \end{pmatrix} \quad (П.4.1.4)$$

а J – якобиан для преобразования матрицы $\begin{bmatrix}\mu_\alpha\\ \mu_\delta\\ \varpi\\ V_R\end{bmatrix}$ в матрицу$\begin{bmatrix}A\\ D\end{bmatrix}$, откуда следует:

$$J = \begin{pmatrix}\frac{\partial A}{\partial \mu_\alpha} & \frac{\partial A}{\partial \mu_\delta} & \frac{\partial A}{\partial \varpi} & \frac{\partial y}{\partial V_R}\\ \frac{\partial D}{\partial \mu_\alpha} & \frac{\partial D}{\partial \mu_\delta} & \frac{\partial D}{\partial \varpi} & \frac{\partial y}{\partial V_R}\end{pmatrix} \qquad \text{(П.4.1.5)}$$

Доверительная область вокруг (A, D) определяется как

$$C = (\Delta A, \Delta D)\left[Cov\left(\frac{A}{D}\right)\right]^{-1}\left(\frac{\Delta A}{\Delta D}\right) \qquad \text{(П.4.1.6)}$$

Мы используем ковариационную матрицу C для расчетов эллипсов ошибок, показанных на Рис. 3.7. Коэффициент C равен 11,83 для числа степеней свободы, равного двум [23].

П4.2. Классический метод сходящейся точки

Метод сходящейся точки, которым пользуются астрономы вот уже почти пол века, является классическим методом определения принадлежности звезд к скоплению, основанный на использовании компонентов собственных движений. Метод существует в нескольких вариациях, так как ни раз был усовершенствован в различных работах, например, [100], [49], [197], [85] и т. д. Этот метод позволяет выбирать звезды путем оценки параллельности векторов собственных движений.

Для определения апекса данным способом берется группа из N звёзд-членов скопления для которых определены: координаты каждой звезды (α, δ), расстояние до звезды r_i (пк), собственные движениям $\mu_\alpha\cos\delta$ и μ_δ (мс/год) и лучевые скорости Vr (км/с). По этим данным вычисляются компоненты скорости Vx, Vy и Vz вдоль осей x, y и z в гелиоцентрической системе координат (см.[71]). Направление осей и формулы, приведенные Смартом [179] описаны выше. Далее из этих формул, вычислив$\xi = \frac{V_x}{V_z}$,$\eta = \frac{V_y}{V_z}$ мы получаем

$a_i\xi + b_i\eta = c_i$, где коэффициенты посчитаны следующим образом:

$a_i = \mu_\alpha^{(i)} \sin\delta_i \cos\alpha_i \cos\delta_i - \mu_\alpha^{(i)} \sin\alpha_i,$

$b_i = \mu_\alpha^{(i)} \sin\delta_i \sin\alpha_i \cos\delta_i + \mu_\delta^{(i)} \cos\alpha_i,$ (П.4.2.1)

$c_i = \mu_\alpha^{(i)} \cos^2\delta_i,$

а индекс i принимает значения от 1 до N, и обозначают номер звезды, которая являются членом скопления. Таким образом

$$\tan A_{CP} = \frac{\eta}{\xi},$$

$$\tan A_{CP} = (\eta^2 + \xi^2)^{-1/2}$$ (П.4.2.2)

Откуда вычисляются A_{CP} и D_{CP} - координаты апекса скопления.

П4.3. Метод сходящейся точки по преобразованиям ван Лювен 2009

Как упоминалось выше, метод сходящейся точки был модифицирован различными авторами. Одна из удобных и успешно применяемых модификаций прописана в статье ван Лювен [197]. С помощью этого метода были найдены приливные хвосты в[165] и [166]. Этот метод неплохо подходит для достаточно близких скоплений (до 100-150 парсек), так как во многом его точность зависит от точности определения расстояния.

Суть метода заключается в анализе разницы между прогнозируемой скоростью членов скопления и наблюдаемой. Для этого сначала необходимо определить центр скопления. Его положение в экваториальных координатах можно выразить как:

$$\boldsymbol{R} = R\begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\delta\\ \sin\alpha\cos\delta\\ \sin\delta\end{bmatrix}$$ (П.4.3.1)

Эта формула, аналогична указанной ранее формуле для получения положения скопления в галактических гелиоцентрических координатах X, Y, Z, просто имеет матричную запись. Откуда вектор скоростей выражается как:

$$\dot{\boldsymbol{R}} = \begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\delta & -\sin\alpha & -\cos\alpha\sin\delta\\ \sin\alpha\cos\delta & \cos\alpha & -\sin\alpha\cos\delta\\ \sin\delta & 0 & \cos\delta\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{R}\\ R\dot{\alpha}\cos\delta\\ R\dot{\delta}\end{bmatrix}$$ (П. 4.3.2)

Что, в свою очередь аналогично получению галактических скоростей U, V, W.

В (П.4.3.2) коэффициенты справа относятся к наблюдаемым лучевой скорости V_{rad} и собственным движениям (pmra, pmdec):

$$\dot{R} = Vr$$

$$R\dot{\alpha}\cos\delta = \kappa\frac{\mu_\alpha}{\varpi} \qquad (П.4.3.3)$$

$$R\dot{\delta} = \kappa\frac{\mu_\delta}{\varpi}$$

Здесь к = 4.74047 является множителем, который позволяет перевести значения собственных движений из 1 масд/год на 1 кпк к 1 км/с (используется $\mu\alpha \equiv \mu\alpha\cos\delta$).

Нас интересует, как собственные движения членов зависят от их положения в скоплении. Для этого мы подставляем уравнение (П.4.3.3) в правую часть формулы (П.4.3.2) и инвертируем её, чтобы получить

$$\begin{bmatrix} Vr_i \\ \kappa\,\mu_{\alpha,i}/\varpi_i \\ \kappa\,\mu_{\delta,i}/\varpi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i\cos\delta_i & \sin\alpha_i\cos\delta_i & \sin\delta_i \\ -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ -\cos\alpha_i\sin\delta_i & -\sin\alpha_i\cos\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \cdot \dot{\boldsymbol{R}} \qquad (П.4.3.4)$$

где $i = 0$ – значение центра скопления, а остальные индексы $i = 1 \ldots N$ относятся к индивидуальным звездам скопления. Можно переписать уравнения (П.4.3.2) и (П.4.3.3) как

$$\dot{\boldsymbol{R}} = A_0^{-1} v_0 \qquad (П.4.3.5)$$

что дает нам галактические скорости центра скопления. Здесь v_0 = (Vr, $k\mu_\alpha/\varpi$, $k\mu_\delta/\varpi$) и, совершая преобразования подобно уравнению (П.4.3.4), получаем прогнозируемую скорость для каждой звезды скопления, повернув вектор v0 в систему отсчета, связанную с *i*-й звездой:

$$v_i = A_i\dot{\boldsymbol{R}} = A_i A_0^{-1} v_0 \qquad (П.4.3.6)$$

И это уравнение теперь полностью описывает наблюдаемые компоненты пространственной скорости как функции положения на небе и расстояния до звезды. Можно переписать vi,p как

$$v_i, p = \begin{bmatrix} Vr \\ V\alpha, \mathrm{p} \\ V\delta, \mathrm{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vr \\ V \parallel, p \\ V \perp, p \end{bmatrix}$$

Так как параллакс у нас известен, то из $V_{\alpha,p}$ и $V_{\delta,p}$ вычисляются значения $\mu_{\delta,\,p}$ и $\mu_{\alpha,\,p}$.

Вектор скорости скопления указывает на место, называемое сходящейся точкой или апексом:

$$\dot{\boldsymbol{R}} = \dot{R} \begin{bmatrix} \cos\alpha_C \cos\delta_C \\ \sin\alpha_C \cos\delta_C \\ \sin\delta_C \end{bmatrix} \quad (\text{П.4.3.7})$$

Положение апекса зависит от фактического вектора скорости, из которого один компонент - лучевая скорость - измеряется непосредственно, а другой компонент, собственное движение, масштабируется с помощью параллакса скопления. Поэтому определение собственного движения на небе позволяет измерять расстояние до скопления.

Указанные ранее формулы для скорости приводятся для трёхмерного вектора, где присутствует лучевая скорость. Но в используемом методе поворачивается только картинная плоскость вокруг нового вектора скорости Vr,i. При этом повороте направление, связанное с Vr, не меняется, поэтому Vr здесь участвует только номинально и может быть принято любым, так как после поворота не изменится и не повлияет на тангенциальную составляющую скорости.

Это достаточно старый метод, использовавшийся когда-то для определения расстояния до Гиад, когда точность измерений, сделанных с Земли, была не так высока как сейчас. Уравнение (П.4.3.4) можно повернуть так, чтобы собственное движение поровнялось с положением апекса путем умножения его справа и слева на матрицу

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & \sin\psi \\ 0 & -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \qquad (П.4.3.8)$$

где ψ = arctan ($\mu_{\delta,p}/\mu_{\alpha,p}$). Дополнительный индекс «р» показывает, что собственное движение, используемое здесь, прогнозируется на основе предполагаемой пространственной скорости скопления и положения звезды на небе. Данный поворот матрицы затем создает прогнозируемое собственное движения в направлении апекса. Применение того же поворота матрицы к наблюдаемому собственному движению дает наблюдаемые собственные движения в направлении апекса и перпендикулярные ему:

$$v_i \times M = \begin{bmatrix} Vr \\ V\alpha \cdot \cos\psi + V\delta \cdot \sin\psi \\ -V\alpha \cdot \sin\psi + V\delta \cdot \cos\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vr \\ V \parallel \\ V \perp \end{bmatrix} \quad (П.4.3.9)$$

Длина наблюдаемого вектора собственного движения в направлении сходящейся точки является мерой расстояния до звезды, учитывая предполагаемое расстояние от центра скопления. Прогнозируемое значение для перпендикулярного компонента должно быть равно нулю.

Исходя из условия сходимости векторов собственных движений, для каждого вектора (заданного в пространстве) находят угол поворота такой, что одна ось направлена к точке сходимости (V∥), а другая ей перпендикулярна (V⊥). Поворачивают вектор на эти углы, и полученный вектор называют "назначенный". Сравнивая назначенный вектор и наблюдаемый, делают вывод о схожести векторов назначенного и наблюдаемого. Если близки, то скорости примерно в одном направлении. Также, наблюдаемые перпендикулярные составляющие собственного движения могут быть дополнительно исследованы для определения дисперсии скоростей скопления.