

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Мосунова Дарья Александровна

**ВЛИЯНИЕ СБЛИЖЕНИЙ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ НА ДВИЖЕНИЕ
МАЛЫХ ТЕЛ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ TOI-2796**

Специальность

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Выпускная (диссертационная) работа

Научный руководитель:

канд. физ.-мат. наук

Верещагин Сергей Викторович

Москва – 2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Способы отбора данных	10
1.1. Характеристика комплекса Меча Ориона.....	10
1.2. Способ отбора по АД диаграмме	11
1.3. Данные для ONC.....	12
1.4. Апексы звезд с экзопланетами	13
1.5. Поиск по положению в пространстве.....	16
1.6. Обсуждения и выводы.....	19
Глава 2. Численные расчеты	23
2.1. Исходные данные NGC 1977	23
2.2. Характеристика и исходные данные TOI-2796	24
2.3. Численные расчеты кинематики выбранных объектов	25
2.4. Обсуждения и выводы.....	27
Глава 3. Эффекты сближения NGC 1977 и TOI-2796.....	29
3.1. Эффект изменения орбитальной (трансверсальной) скорости	29
3.2. Оценка частоты сближений звезд и звездных скоплений с Солнечной системой	32
3.3. Обсуждения и выводы.....	34
Заключение	35
Благодарности.....	37
Список литературы	38
Приложение А. Исходные данные ONC	42
Приложение Б. Программа построения АД диаграммы	44

Введение

Проблема поиска сближений звездных скоплений со звездами с планетными системами в Галактике, несомненно, представляет интерес. Близкие пролеты звезд в окрестностях рассеянных звездных скоплений (РЗС) в прошлые эпохи могли повлиять на элементы орбит кометных ядер и иных малых тел в аналогах облака Оорта, разумеется, при условии, что таковые существуют у экзопланетных систем. Гравитационное воздействие таких сближений приводит как к появлению новых комет (к примеру, в Солнечной системе), так и к появлению межзвездных астероидов, Torres et al. (2019). Теория этого эффекта была разработана Rickman (1976). Vereshchagin et al. (2022) обнаружили сближение Солнца со звездным скоплением Гиады около двух миллионов лет назад. Сближения в пространстве могли испытывать не только звезды и Солнце, но и звездные скопления и звезды с экзопланетами, также называемые родительскими звездами.

Рассмотрено молодое (возраст ≤ 15 млн лет) рассеянное звездное скопление (РЗС) NGC 1977 (MWSC 0587). Это скопление расположено в области Меча Ориона на расстоянии около 400 пк от Солнца. Данные Gaia DR3 позволили рассчитать движение скопления в пространстве, используя пространственную скорость, возраст и пространственные координаты. Очевидно, что особый интерес представляют звезды с планетными системами. В качестве каталога таких звёзд можно рассматривать Архив экзопланет НАСА (Exoplanet NASA Archive). Для поставленной задачи были выбраны звезды с планетными системами, которые могли сближаться со скоплением в прошлом.

Актуальность темы

Актуальность исследований состоит в использовании как вновь полученных, так и уточненных параметров кинематики родительских звезд и РЗС, необходимых для расчетов. Исследования эффектов сближения скоплений со звездами с экзопланетными системами углубляет понимание

как строения планетных систем, так и природы свободных планет и межзвездных астероидов. Наблюдения последнего времени, выполненные космическим аппаратом Gaia, позволили получить высокоточные астрометрические данные о звездах и практически удвоить число известных рассеянных звездных скоплений (РЗС), число которых в Галактике составляет приблизительно 100 тыс. (Piskunov et al. 2006, Vereshchagin et al. 2018). С другой стороны, с опорой на данные космических аппаратов Kepler и TESS создана база данных, включающая звезды с планетными системами. Накопление новых данных об РЗС и звездах с планетными системами позволяет сопоставить эти данные для выявления возможных источников межзвездных комет. Это явление объясняет появление таких объектов, как 2I/Борисов и 1I/Оумуамуа, а также появление новых комет в Солнечной системе и аналогично в других звёздных системах.

Выбор объектов исследования

Для исследования выбран комплекс скоплений в Мече Ориона, для которых перспективно изучение кинематики в галактическом диске, в том числе для рассмотрения их возможного влияния на планетные системы при прохождении около родительских звезд в прошлые эпохи.

Структура

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. В ней 45 страниц, рисунков 14, таблиц 9, приложения 2. Список литературы содержит 36 наименований.

В **Главе 1** представлено описание комплекса Ориона, источники и способы отбора данных, применение методов для поиска сближений РЗС и планетных систем. В **Главе 2** представлены результаты изучения сближения РЗС NGC 1977 с планетной системой звезды TOI-2796. В **Главе 3** дано описание возможных эффектов сближения. Список использованных данных, детальное описание метода AD диаграмм и его программный код для широкого применения приведены в Приложениях.

Цели работы

- Получение новых знаний о кинематике РЗС и звезд поля с экзопланетами и природе межзвездных объектов. Полученные результаты могут улучшить понимание эволюции потоков пылевых частиц, комет и астероидов, строения и эволюции Галактики в близких окрестностях Солнца. Изучение и выяснение природы сближений объектов важно, так как они могут формировать состав невидимых в оптике населений галактического диска.
- Получение новых знаний о строении и эволюции планетных систем на основе изучения свойств родительских звезд с планетными системами, входящих в состав рассеянных звездных скоплений.

Задача исследования

Идентификация кандидатов для поиска планетных систем, которые в прошлые эпохи могли сближаться с комплексом рассеянных звездных скоплений (РЗС) Меча Ориона. Выполнение работы включило:

- Отбор данных по избранным рассеянным звездным скоплениям и звездным потокам, содержащим звезды с экзопланетами, расположенным в околосолнечных окрестностях.
- Анализ полученных данных и связи характеристик экзопланет с возрастом и другими характеристиками звездных скоплений и потоков.

Научная новизна

- Впервые для скопления NGC 1977 по Gaia DR3 получена оценка параметров сближения с TOI-2796.
- Опробован метод апексов для поиска сближений звезд с экзопланетными системами и РЗС. Хотя он не является достаточным для поиска событий сближения и необходимы численные расчеты движения объектов в Галактике, с его использованием были найдены звезды с планетами, которые, возможно, сближались с NGC 1977 в прошлом.

Научная и практическая значимость

Представленные результаты имеют значение для понимания эволюции звездных скоплений и ассоциаций как одного из важнейших населений Галактики. Изучение и выяснение природы сближений объектов важно, так как они могут формировать состав невидимых в оптике населений галактического диска.

Используя данные наблюдений Gaia для численных расчетов параметров сближения звезд с планетной системой и РЗС, можно предсказать места этих событий с координатами на небесной сфере. Таким образом, полученные результаты дают возможность наблюдателям для поиска межзвездных планет и астероидов, а также экзокомет.

Методология и методы исследования

Большая часть задач решалась с использованием как классических методов отбора звезд скопления, так и применением разработанного ранее метода AD диаграмм и численных расчетов кинематики объектов в Галактике. Методика на начальном этапе разработана и применена для Солнечной системы и ближайших РЗС, Sizova, Vereshchagin, Shustov, Churina (2020). Детально проведены расчеты для сближения Гиад и Солнечной системы, Vereshchagin et al. (2022). В рамках работы 2024 года проведен поиск сближений родительских звезд с РЗС NGC 1977, Wakjira et al. (2024).

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов

Обеспечивается применением проверенных методов и обоснованным выбором объектов исследования, данных наблюдений и методов обработки, прошедших апробацию, а также согласованностью с опубликованными результатами других авторов и обсуждением полученных результатов на российских и международных конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке задачи, подборе и обработке наблюдательных данных, проведении расчетов по методу АД диаграмм, а также в обсуждении полученных материалов, их подготовке к публикации. Результаты получены автором в результате совместных исследований, опубликованных с соавторами в научных статьях.

Положения, выносимые на защиту

1. Определено положение среднего апекса Скопления Туманности Ориона (ONC): $A=89.4^\circ\pm0.4^\circ$ и $D=-4.4^\circ\pm0.3^\circ$. Использован список звезд с вероятностью принадлежности ONC, превышающей 50%.
2. На основе моделирования сближений звезд поля с рассеянным звездным скоплением NGC 1977 показано, что TOI-2796 в прошлом, возможно, входила в состав скопления NGC 1977 или сближалась с ним в пространстве.
3. Оценка изменения орбитальной скорости малого тела из гипотетического кометного облака родительской звезды TOI-2796. Показано, что пролет звезды около ~ 4 млн лет назад мимо скопления NGC 1977 на расстоянии около ~ 8 пк мог привести к дестабилизации кометного облака, как предполагается, окружающего TOI-2796.

Апробация работы

1. Wakjira H. Y., Negu S. H., **Mosunova D. A.**, Sizova M. D., Postnikova E. S., Chupina N.V., Fateeva A.M., Fateev A. M., Vereshchagin S. V. Approach of the NGC1977 star cluster to the TOI-2796 host star, XXXII IAU General Assembly, Symposium No. 393 “Planetary Science and Exoplanets in the Era of James Webb Space Telescope”, South Africa, Cape Town, 6-15 August 2024.
2. **Мосунова Д.А.**, Сизова М.Д., Постникова Е.С., Чупина Н.В., Верещагин С.В. Сближение звездного скопления NGC1977 с планетной системой TOI-2796. Всероссийская Школа-конференция молодых

астрономов «Космос, Астрофизика, Солнце, Планеты» – КАСП-2025. Сборник тезисов Секция 4. Экзопланеты, 72. Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Астрономическое Общество, 19 по 23 мая, 2025, Троицк.

3. Максимова Л.А., Верещагин С.В., Сизова М.Д., **Мосунова Д. А.** “Сближение комплекса Меча Ориона со звездами с планетными системами” Современная астрономия: наука и образование 2025, Всероссийская научная конференция «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского Университета)», в рамках мероприятий, посвященных 270-летию юбилею МГУ имени М.В. Ломоносова Секция СЗА-2025.

Публикации по теме диссертации

1. Wakjira H. Y., Negu S. H., **Mosunova D. A.**, Sizova M. D., Postnikova E. S., Chupina N.V., Fateeva A.M., Fateev A. M., Vereshchagin S. V. Approach of the NGC1977 Star Cluster to the TOI-2796 Host Star // Astronomy Reports, 2024, Volume 68, Issue 10, pp. 967–977.
2. Верещагин С. В., Максимова Л. А., Сизова М. Д., **Мосунова Д. А.**, Комплекс звездных скоплений в Мече Ориона и планетные системы. Скопление Туманности Ориона (ONC), сдана в печать.
3. Maksimova L.A., Sizova M.D., Postnikova E.S., Chupina N.V., **Mosunova D.A.**, and Vereshchagin S.V. Approach of the Orion Sword Complex (NGC 1977 Star Cluster) to Stars with Planetary Systems (TOI-2796) // «Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия» (Moscow University Physics Bulletin. Сайт журнала vmu.phys.msu.ru), 2025, принята в печать.
4. Hawi Yohanis Wakjira, Seblu Humne Negu, **Daria A. Mosunova**, Mariya D. Sizova, Ekaterina S. Postnikova, Natalia V. Chupina, Anna M. Fateeva, Alexander M. Fateev and Sergei V. Vereshchagin Approach of the NGC1977 star cluster to the TOI-2796 host star // Proceedings IAU

Symposium No. 393, Planetary Science and Exoplanets in the Era of James Webb Space Telescope Cape Town – South Africa, August 13– 15, 2024, принята в печать.

Другие публикации

1. Wakjira H. Y., Negu S. H., **Mosunova D. A.**, Sizova M. D., Postnikova E. S., Chupina N.V., Fateeva A.M., Fateev A. M., Vereshchagin S. V.
Approach of the NGC1977 star cluster to the TOI-2796 host star // 32nd General Assembly International Union (IAUGA 2024), Capetown, South Africa, poster id. 1893 (2024)
2. Postnikova, E. S., Vereshchagin, S. V., Chupina, N. V., **Mosunova, D. A.**
Kinematic structure of the stellar population of the solar neighborhood by Gaia DR3, Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory (ComBAO), Volume 70, pp. 338-343 (2023).

Глава 1. Способы отбора данных

1.1. Характеристика комплекса Меча Ориона

Область Меча Ориона привлекает внимание исследователей по разным аспектам астрофизики. В частности, большой интерес представляет связь кинематики объектов Ориона с планетными системами. В комплекс входят рассеянные звездные скопления NGC 1981, NGC 1977, Скопление Туманности Ориона (ONC), NGC 1980 и туманность Ориона М 42 (отметим, что в SIMBAD название NGC 1976 также принадлежит М 42). Область Н II, ионизованная ОВ-звездами Трапеции, известна как Большая туманность Ориона (М42).

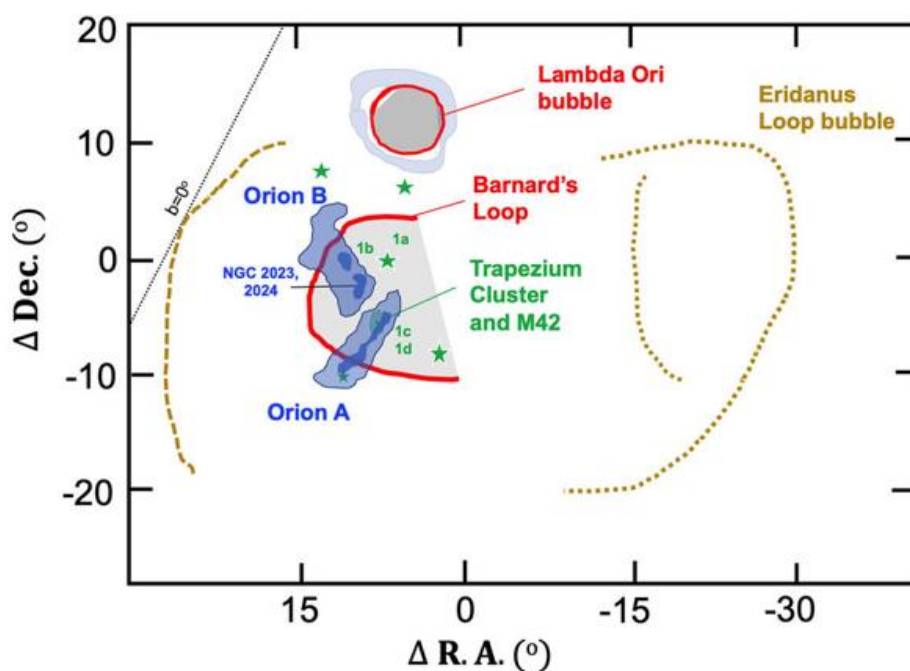


Рис. 1. Схема крупномасштабной (около 350 пк) структуры Комплекса Ориона. Расположение массивных звезд созвездия Ориона отмечено зелеными звездами. Два гигантских молекулярных облака А (включает М42 и скопление ОНС и Трапецию) и В показаны синим цветом. Заметные области Н II обозначены зеленым. Петля Барнарда, которая очень заметна в $H\alpha$, обозначена красной линией. Также обозначен «пузырь», окружающий λ Ori (серый) (красный — ионизированный газ, синий — молекулярная оболочка). Границы сверхпузыря - желтые пунктирная и пунктирная линии. Диффузный ионизированный газ обозначен серым цветом. Пунктирная линия, обозначенная $b = 0$, указывает на галактическую плоскость. Источник – (Alves, J.; Bouy, H. *Orion revisited. I. The massive cluster in front of the Orion nebula cluster* *Astronomy & Astrophysics, Volume 547, id.A97, 14 pp. (2012)*, Bouy, H.; Alves, J.; Bertin, E. L.; Sarro, M. and Barrado D., *A&A*, 564, A29, page 5 of 12, 2014).

На Рис. 1 показана схема крупномасштабной (~ 350 пк) структуры области Комплекса Ориона. На Рис. 2 показаны РЗС в области Меча Ориона.

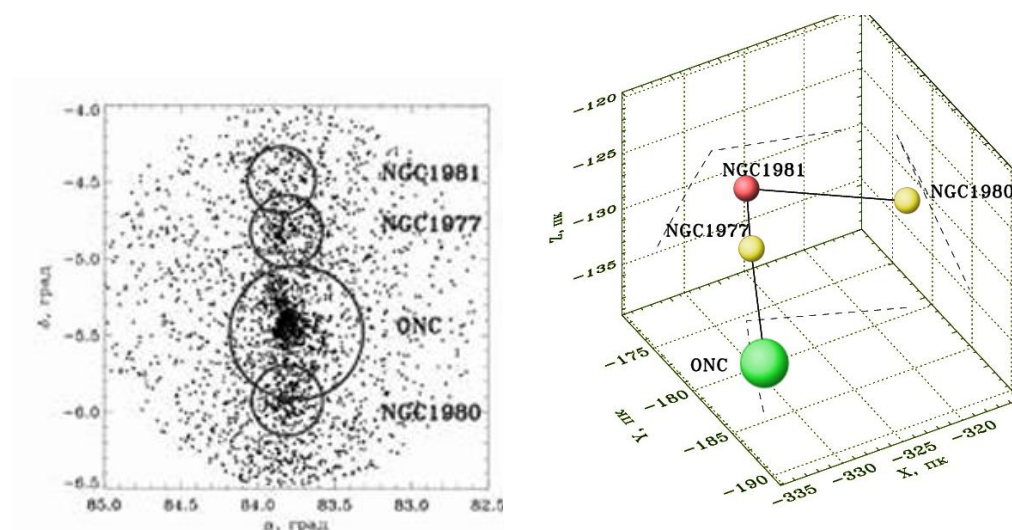


Рис. 2. Показаны положения РЗС в проекции на небесную сферу (слева) и в пространстве (справа). Штриховой линией показаны проекции линий соединения на плоскости XY, YZ, XZ. Окрас сфер соответствует возрасту: красный – 7 млн лет, желтый – 6.6 млн лет, зеленый – 6 млн лет.

Из каталога Gaia DR3 выбраны звезды в области с центром $\alpha=83.815^\circ$, $\delta=-4.819^\circ$ и радиусом 0.35° , что на расстоянии ≈ 400 пк соответствует ≈ 2.5 пк. Область характеризуется клочковатой структурой распределения звезд, наличием холодного (10K) и горячего (10000K) газа. Проведен анализ принадлежности звезд из ближайших ($r \leq 2.5$ пк) окрестностей NGC 1977 к различным звездным скоплениям.

1.2. Способ отбора по АД диаграмме

Метод АД диаграмм был разработан и применен ранее к потоку Большой Медведицы. Были обнаружены в пространстве скоростей неоднородности в короне и хорошо выраженное ядро. Формулы расчета и формулы для определения эллипсов ошибок можно найти в работах Vereshchagin, Chupina (2015) [27], Vereshchagin, Chupina (2013), Vereshchagin, Reva, Chupina (2013).

Индивидуальным апексом звезды называется точка на небесной сфере с координатами (A, D) в экваториальной системе координат (A – прямое

восхождение, D – склонение), на которую направлен вектор, параллельный вектору пространственной скорости звезды, отложенный от точки наблюдения. Ниже рассматривается как апекс, так и антиапекс. На небесной сфере антиапексы и апексы находятся в диаметрально противоположных точках, координаты которых по долготе имеют разницу в 180° , а по широте отличаются знаком ($aD = -D$, $aA = A - 180^\circ$ и, если $aA < 0^\circ$, то $aA = aA + 360^\circ$). Положение апекса определяется расстоянием звезды от Солнца и компонентами ее пространственной скорости. Очевидно, на эти компоненты оказывает влияние орбитальное движение звезд в двойной системе.

1.3. Данные для ONC

Для того чтобы рассчитать положение апекса звезды, необходимы астрометрические данные и лучевая скорость. Была получена (Vereshchagin et al. 2025) выборка входящих в состав ONC звезд ($n=26$) с этими параметрами. Для этого из каталога Gaia DR3 были выбраны звезды в области неба вокруг Туманности Ориона, оценена вероятность принадлежности (P) отдельных звезд к ONC. В Приложении А (формат csv) приведен полученный список звезд с $P \geq 0.5$. Детали приведены в (Vereshchagin et al. 2025).

Положение апекса ONC. На Рис. 3 показана полученная здесь AD-диаграмма для звезд выбранного списка (Приложение А). Детальное описание метода и его программный код для широкого применения приведены в Приложении Б в конце статьи.

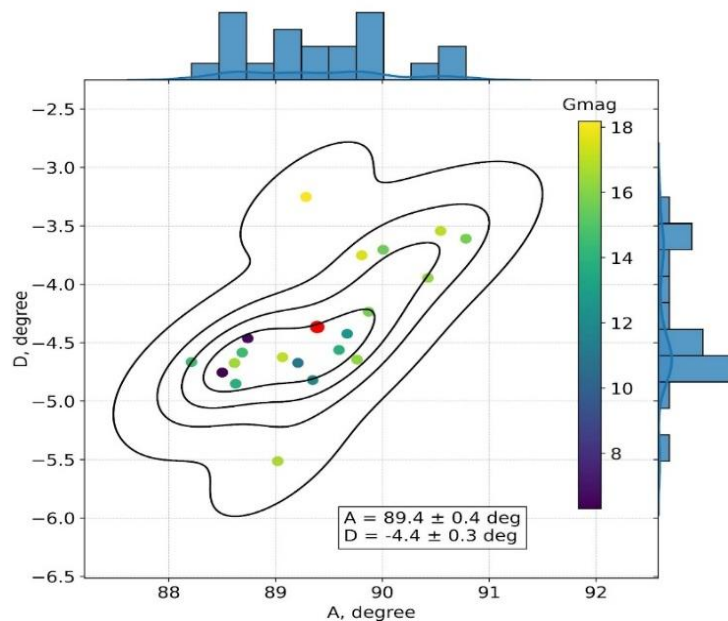


Рис. 3. Положение апексов звезд выбранного списка. Метод расчета дан в Приложении 1Г. Исходные данные приведены в Приложении 1Б. Красная точка представляет положение среднего апекса ONC: $A=89.4^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$ и $D=-4.4^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$. Положение антиапекса $aA=269.4^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$, $aD=+4.4^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$.

1.4. Апексы звезд с экзопланетами

Для данной задачи использован метод АД диаграмм. Для этого проведен поиск звезд с планетными системами, направление вектора пространственной скорости которых совпадает с апексом комплекса Меча Ориона (в данном случае ONC), Рис. 3. Для планетных систем использованы данные Архива экзопланет (Exoplanet NASA Archive)¹. Распределение подтвержденных звезд с экзопланетами (Exoplanet NASA Archive) показано на Рис. 4. Положение апексов звезд с экзопланетами из каталога Kepler (часть Exoplanet NASA Archive) показано на Рис. 5. Контурные линии показывают распределение звездной плотности и тем самым подчеркивают неравномерность распределения плотности звезд. Гистограммы по осям координат показывают то же самое. Также на Рис. 5 приведены положения среднего апекса и антиапекса ONC (Рис. 3). Были выделены объекты, движущиеся в пространстве приблизительно в одинаковом направлении в сторону от Солнца. Другая точка на небе – положение антиапекса. В этом

¹ <https://science.nasa.gov/exoplanets/> и <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

случае сопоставление антиапексов объектов Ориона с антиапексами планетных систем позволило обнаружить объекты, движущиеся в сходном направлении в сторону к Солнцу.

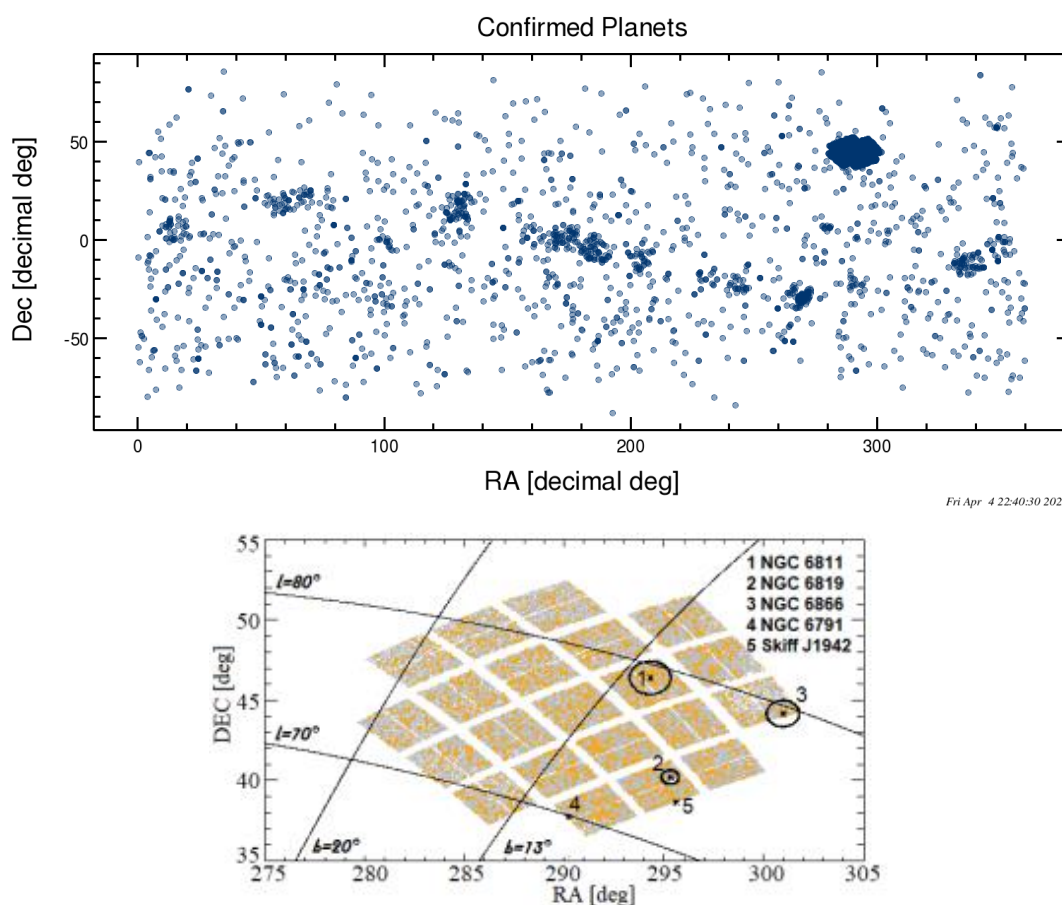


Рис. 4. На верхней панели - распределение экзопланет в экваториальных координатах. Источник: получено авторами по данным и утилите с Архива экзопланет². На нижней панели - расположение родительских звёзд экзопланет (оранжевые точки), целевых звёзд телескопа «Кеплер» (серые точки) и рассеянных скоплений (звёздочки) в поле зрения телескопа «Кеплер». Кружки вокруг некоторых рассеянных скоплений указывают размер внутренних цилиндров, используемых для статистики. Поле зрения телескопа «Кеплер» состоит из 21 поля, которые связаны с отдельными чипами, с небольшими промежутками между ними. Именно поэтому создан 21 пространственный луч, соответствующий этим полям. Каждый луч разделен на пять сегментов в соответствии с расстоянием. Таким образом, получено $21 \times 5 = 105$ пространственных ячеек. В каждой ячейке рассчитано отношение количества кандидатов в экзопланеты и целевых звёзд телескопа «Кеплер» (A.Maliuk and J. Budaj, 2020).

² <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/IcePlotter/nph-icePlotInit?mode=demo&set=confirmed>

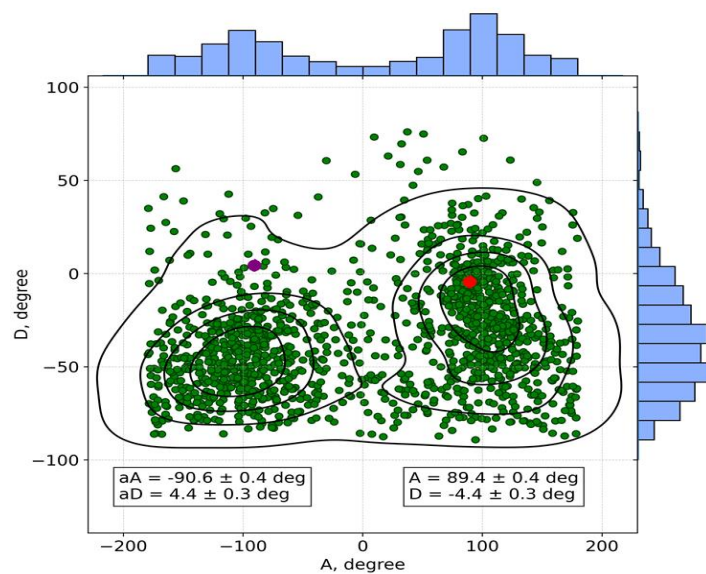


Рис. 5. Распределение апексов планетных систем из каталога Exoplanet NASA Archive, часть Kepler. Точка красного цвета – положение апекса $ONC\ A=89.4^{\circ}\pm0.4^{\circ}$ и $D=-4.4^{\circ}\pm0.3^{\circ}$. Точка, показанная фиолетовым цветом, - положение антиапекса $ONC\ aA=-90.6^{\circ}\pm0.4^{\circ}$ и $aD=4.4^{\circ}\pm0.3^{\circ}$. (Положение антиапекса на шкале от 0 – 360° $aA=269.4^{\circ}\pm0.4^{\circ}$, $aD=+4.4^{\circ}\pm0.3^{\circ}$).

Аналогом антиапексов в движении комет можно считать положения афелиев орбит комет. В том случае, если положения антиапексов скоплений и афелиев долгопериодических комет, не прошедших перигелий, совпадают, то эти объекты двигаются примерно из одной точки неба в близких направлениях. На Рис. 6 показано положение точек вокруг апекса звезд с планетными системами (Рис. 5) в окружности радиусом 3° .

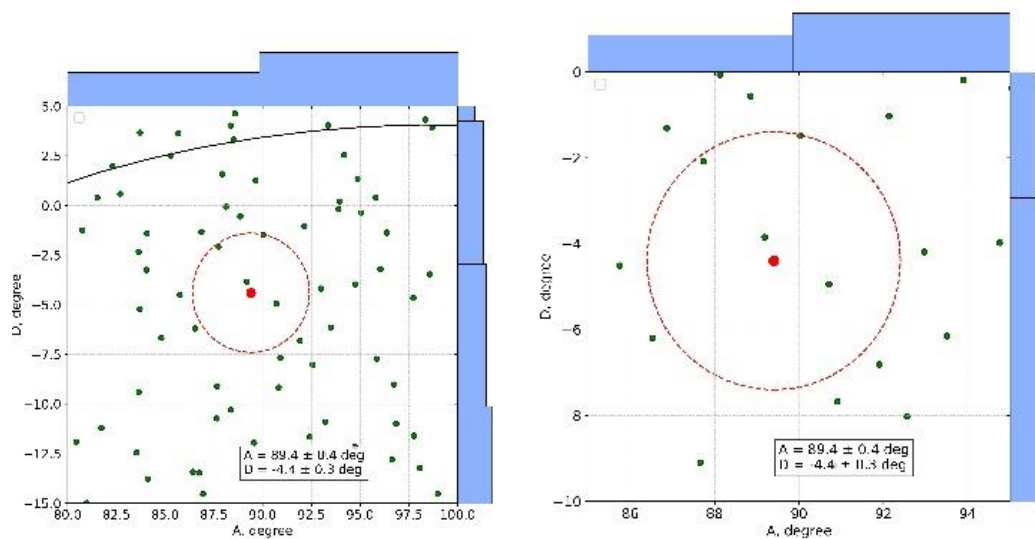


Рис. 6. Центральная часть Рис.5, радиус окружности взят равным 3° .

Данные о звездах с планетными системами из Exoplanet NASA Archive, попавших в пределы окружностей на Рис. 6, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Список родительских звезд в области апекса и антиапекса ONC.

Star_name	RA, deg	DEC, deg	pmRA, mas/yr	pmDE, mas/yr	Plx, mas	RV, km/s	A, deg	D, deg
Kepler-664	5.03972	0.84171	1.46	3.13	0.79	-17.69	90.0346	-1.4839
Kepler-57	5.12501	0.77941	4.21	5.84	1.52	-19.95	87.7356	-2.0803
Kepler-1773	4.99554	0.66773	1.13	2.23	1.50	-10.81	90.7104	-4.9416
Kepler-1152	5.06903	0.76982	16.71	27.67	4.67	-33.51	89.1831	-3.8480
Kepler-367*	5.18873	0.87234	16.82	24.13	5.36	-23.34	91.9046	-6.8085
Kepler-142*	5.15080	0.84616	13.41	16.41	1.79	-49.27	86.5272	-6.1961

*Звезды, не попавшие внутрь окружности 3 градуса, но находящиеся внутри квадрата $A \pm 3$ deg и $D \pm 3$ deg.

Астрометрические данные для ONC из SIMBAD: PM, mas/yr: 1.51 ± 0.11 0.50 ± 0.12 ; RV, км/с: 21.80 ± 6.6 . Средние экваториальные координаты ONC: ICRS (ep=J2000) RA= 083.7500° и DEC= -05.4833° .

1.5. Поиск по положению в пространстве

Для поиска звезд с планетными системами в звездном скоплении и окрестностях выбраны звёзды с экзопланетами из Exoplanet NASA Archive в области с центром 83.8° , -5.25° (центр NGC1976); радиус 15 градусов. Plx: 2.2 – 3.0 (330 – 450 пк). Сохраненная выборка GDR2 (Exoplanet NASA Archive) сравнена по координатам со всем каталогом звезд GDR3 (программа topcat SIMBAD). В результате получено пересечение, и таким образом отобраны звезды из GDR3, которые имеют экзопланеты.

Из Exoplanet NASA Archive выбраны звезды, расположенные в пределах ~ 100 пк от центра области Меч Ориона, в предположении, что в прошлом они могли принадлежать скоплению или сближаться с ним в пространстве.

Использован файл, полученный из Exoplanet NASA Archive. Файл получен путем чтения, редактирования и записи в файл единственной строки

в случае повторов в Exoplanet NASA Archive. Имя файла PS_2023.04.18_02.46.59_1.csv. Первые 5 строк из файла приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Данные о экзопланетах с Exoplanet NASA Archive.

hostname	Gaia_name	Gaia_ID	RA	DEC	sy_dist	sy_disterr2	sy_disterr1
11 Com	Gaia DR2	3946945413106333696	185.1788	17.7933	93.1846	1.9238	-1.9238
11 Com	Gaia DR2	3946945413106333696	185.1788	17.7933	93.1846	1.9238	-1.9238
11 Umi	Gaia DR2	1696798367260229376	229.2746	71.8239	125.321	1.9765	-1.9765
11 Umi	Gaia DR2	1696798367260229376	229.2746	71.8239	125.321	1.9765	-1.9765
11 Umi	Gaia DR2	1696798367260229376	229.2746	71.8239	125.321	1.9765	-1.9765

hostname – имя звезды, возле которой находится экзопланета, Gaia_name – выпуск каталога Gaia, RA, DEC – координаты экзопланетной системы в градусах, sy_dist – расстояние до экзопланетной системы в пк, sy_disterr1 и sy_disterr2 – ошибки определения расстояний до экзопланетной системы в пк.

Код программы, предназначенной для выбора звезд в указанной области по расстоянию от Солнца и экваториальным координатам:

```
import pandas as pd
# read the Table and remove all duplicate elements of 'hostname' (the method in this case will leave only the first element of the duplicates)
df = pd.read_csv('d:/PYTHON/PS_2023.04.18_02.46.59_1.csv').drop_duplicates(['hostname'])
# return results only for stars within 250-550 parsecs + alfa 70-100 + delta -15- +15 and remove the indexes of the initial table
dfnew = df[(df['sy_dist'] < 550) & (df['sy_dist'] > 250) & (df['ra'] < 100) & (df['ra'] > 70) & (df['dec'] < 15) & (df['dec'] > -15)].reset_index().copy()
# delete the column with indexes from the initial table (this column appears after the method .reset_index())
dfnew.drop(columns = 'index', inplace = True)
# save the table
dfnew.to_csv('d:/PYTHON/unique_host_stars_dist_ra_dec.csv', sep = ';', index = False)
```

Было обнаружено три звезды с планетными системами, расположенными в пределах 100 пк от центра Меча Ориона, Таблица 3. (Данные записаны в файл с именем unique_host_stars_dist_ra_dec.csv).

Таблица 3*. Планетные системы найденные из Exoplanet NASA Archive в окрестности 100 пк от центра NGC 1977.

hostname	Gaia_ID	RA, град	DEC, град	sy_dist, пк	sy_disterr, пк	sy_disterr, 2, пак	pmRA*, мсд/год	pmDE*, мсд/год	RV*, км/с
Gaia-1	Gaia-1	90.6437	-0.5771	363.66	3.06	-3.01	5.99 ±0.02	-40.63 ±0.01	-
TOI-2796	Gaia DR2 3222453935725951488	84.1527	0.8963	350.34	6.02	-5.82	2.54 ±0.02	2.64 ±0.01	20.91 ±0.16
TOI-892	Gaia DR2 3010759262610139776	86.7382	-11.2353	340.54	4.89	-4.76	-0.28 ±0.02	6.04 ±0.02	41.10 ±0.88

*SIMBAD

Таблица 4. Рассчитанные прямоугольные декартовы координаты и компоненты скорости родительских звезд расположенных в пределах 100 пк от NGC 1977.

hostname	Gaia_ID	x, пак	y, пак	z, пак	pmRA, мсд/год	pmDEC, мсд/год	V _r , км/с	U, км/с	V, км/с	W, км/с
Gaia-1	Gaia-1	-321.29	-168.81	22.99	5.99	-40.63				
TOI-2796	Gaia DR2 3222453935725951488	-320.35	-140.16	21.72	2.54	2.64	20.91	19.52	-6.55	7.08
TOI-892	Gaia DR2 3010759262610139776	-274.33	-200.52	22.41	-0.28	6.04	41.10	38.23	-16.78	6.40
NGC 1977		-329.45	-178.65	-129.98	1.27	-0.75	24.20	19.41	-13.19	-6.53

Таблица 5. Исходные данные Gaia и рассчитанные прямоугольные декартовы координаты и компоненты скорости NGC 1977 (UBC 621, MWSC 0587) (X, Y, Z, пак, U, V, W, км/с) = (−329.45, −178.65, −129.98, 19.41, −13.19, −6.53).

Параметр	Значение
α , J2000	83.8150
δ , J2000	-04.8190
$V_r \pm \sigma_{V_r}$	24.2 ± 2.0 , км/с
$\mu_\alpha \pm \sigma_{\mu_\alpha}$	1.271 ± 0.471 , мсд/год
$\mu_\delta \pm \sigma_{\mu_\delta}$	-0.753 ± 0.503 , мсд/год
$\varpi \pm \sigma_\varpi$	2.521 ± 0.069 , мсд (d = 396.67 пак)

На Рис. 7 показано положение звезд из Таблицы 4 и NGC 1977 (Таблица 5) с продлением вектора пространственной скорости до 20–100 млн

лет в прошлую эпоху. Скопление NGC 1977 приблизилось к Gaia DR2 3222453935725951488 (TOI-2796) около десяти миллионов лет назад, Таблица 6. Во время этого сближения могло проявляться воздействие на планетную систему TOI-2796, особенно на кометы во внешних областях.

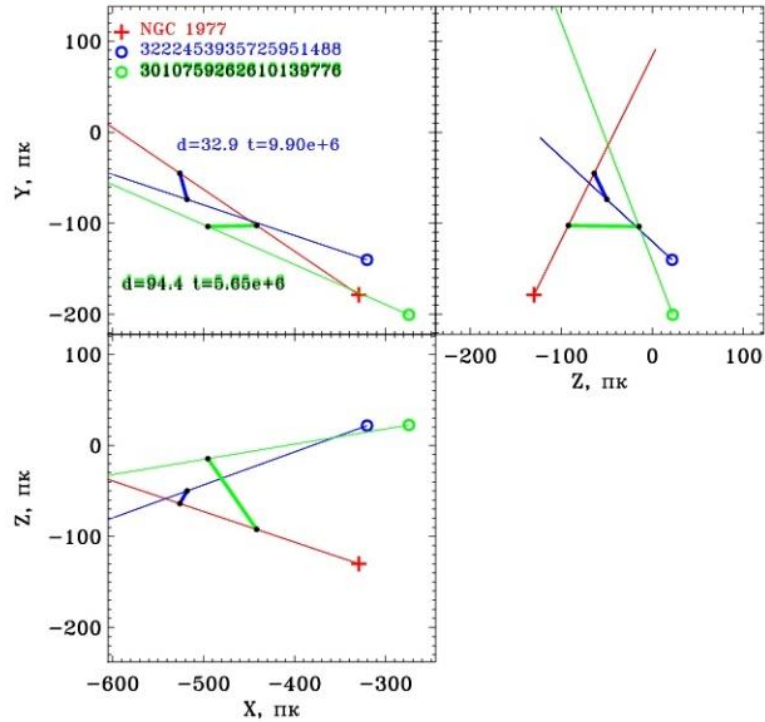


Рис. 7. На 3D XYZ представлены скопление NGC 1977 и две звезды (Gaia DR2, Таблица 4) с продлением вектора пространственной скорости до 20–100 млн лет в прошлую эпоху.

Таблица 6. Параметры (время в прошлой эпохе t_{min} и минимальное расстояние d_{min}) сближения на Рис.7.

ID	t_{min} , лет	d_{min} , пк
Gaia DR2 3222453935725951488	9.90000e+006	32.9047
Gaia DR2 3010759262610139776	5.65000e+006	94.3964

1.6. Обсуждения и выводы

В данной главе проведен поиск родительских звезд из Архива экзопланет (Exoplanet NASA Archive) в окрестности рассеянных звездных скоплений (РЗС) Меча Ориона. Обнаружено, что в окрестности РЗС NGC 1977 радиусом

100 пк расположены родительские звезды: Gaia-1, TOI-2796, TOI-892. С помощью SIMBAD проведено отождествление звезд с каталогами Gaia. Далее по данным Gaia для звезд с ID 3222453935725951488, 3010759262610139776 сделаны предварительные оценки их положения в пространстве в прошлые эпохи. Осуществлен поиск уникальных родительских звезд, расположенных по экваториальным координатам RA от 70 до 100 и DEC от 15 до 5 градусов, и найдены три звезды с планетными системами. Найдено, что TOI-2796 могла в прошлом приближаться к NGC 1977 на расстояние, достаточно близкое для того, чтобы эффект гравитационного влияния скопления на кометное облако пролетающей звезды был достаточным для дестабилизации этого облака (при определенных условиях и физических параметрах звезды и скопления).

Использована диаграмма апексов для поиска звезд с планетными системами, вектор пространственной скорости которых направлен близко (в пределах 3°) к направлению вектора ONC. Найден ряд ($n=6$) планетных систем, перспективных для поиска сближений с комплексом Ориона. В Таблице 1 приведены данные потенциальных кандидатов для сближения с комплексом Меча Ориона.

Концентрация точек на диаграмме апексов (Рис. 3) характеризует движение звезд в скоплении, которое в целом характеризуется единым направлением. Звезды скопления ONC удаляются от наблюдателя, а родительские звезды из каталога Kepler приближаются — то есть, их лучевые скорости имеют противоположные знаки. Это может показаться противоречивым, однако апекс, как направление полного вектора движения звезды, определяется не только по лучевой скорости, но и по собственным движениям и расстоянию. Это подчёркивает, что совпадение направления движения (апекса) возможно при существенно различающихся (даже противоположных по знаку) лучевых скоростях, что проиллюстрировано на Рис. 8.

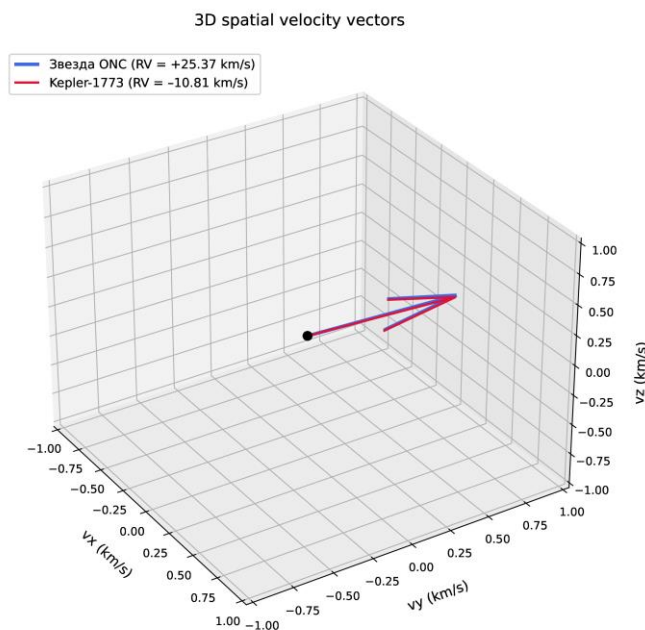


Рис. 8. Пространственные векторы скорости двух звёзд (подписаны сверху), построенные по наблюдательным данным. Несмотря на противоположные знаки лучевой скорости (V_r), направление полного вектора движения (апекс) совпадает.

Совпадение апексов в пределах 3 градусов не является достаточным условием связи экзопланетной системы со звёздным скоплением, и для отобранных звёзд-кандидатов необходимо провести расчёт движения в галактическом диске. Действительно, если апекс или антиапекс какой-то звезды с экзопланетой совпадает с положением далёкого квазара, это вовсе не означает, что звезда движется к нам из этой далёкой галактики, более того, это крайне маловероятно.

Положения этой главы, выносимые на защиту:

Определено положение среднего апекса Скопления Туманности Ориона (ONC): $A=89.4^\circ \pm 0.4^\circ$ и $D=-4.4^\circ \pm 0.3^\circ$. Использован список звезд с вероятностью принадлежности к ONC, превышающей 50%. В Архиве экзопланет найдены звезды с подтвержденными экзопланетами, движущиеся в пространстве со сходным положением апекса — направлением вектора пространственной скорости ONC.

Результаты этой главы опубликованы автором в работе

1. Верещагин С. В., Максимова Л. А., Сизова М. Д., **Мосунова Д. А.**,
Комплекс звездных скоплений в Мече Ориона и планетные системы.
Скопление Туманности Ориона (ОНС), сдана в печать.

Глава 2. Численные расчеты

Орбитальные параметры для выборки рассчитаны с использованием пакета *galpy*. Используется гравитационный потенциал MWPotential14, состоящий из степенного закона, экспоненциально обрезанного балджа, потенциального диска Миямото–Нагаи и гало темной материи Наварро–Френка–Уайта. Временные расчеты проводились в пределах возраста рассматриваемых объектов. Для расчета возраста скопления использовались диаграмма цвет–абсолютная величина и система изохрон. При помощи продления треков скопления и движения звезд в прошлые эпохи ($\sim 5,4$ млн лет) было найдено время максимального сближения (≈ 30 пк) звезды TOI-2796, содержащей планетную систему, с NGC 1977. В результате исследований сделан вывод, что сближение родительской звезды со скоплением может повлечь за собой эффекты, связанные с гравитационным притяжением скоплением ядер комет, расположенных на внешней границе аналога облака Оорта планетной системы.

2.1. Исходные данные NGC 1977

Исследование NGC 1977 выполнено по стандартной схеме. Она включает выбор звезд по экваториальным координатам и параллаксу, Vereshchagin, Chupina (2023). Для звезд с вероятностью принадлежности скоплению более 60% с учетом оценки качества данных отдельных звезд определены 3D координаты и компоненты пространственной скорости звезд. Для наиболее надежной оценки положения центра скопления и его размеров рассмотрено распределение параллаксов и распределение звезд в пространстве. В результате определены положение центра NGC 1977 в Галактике, компоненты пространственной скорости. Возраст скопления оценен с помощью теоретических изохрон.

В Таблице 7 приведены исходные данные для скопления, которые были использованы для расчетов его кинематики в Галактике. Данные взяты из каталога Gaia DR3.

Таблица 7. Исходные данные NGC 1977 для численного расчета кинематики.

Параметр	Значение	Источник
RA (EP=J2000), град	083.8150	Tarricq Y. et al. 2021
DEC (EP=J2000), град	-04.8190	Tarricq Y. et al. 2021
$\varpi \pm \sigma_{\varpi}$, мсд	2.521 ± 0.069	Cantat-Gaudin et al.2020
$\mu_{\alpha} \pm \sigma_{\mu_{\alpha}}$, мсд/год	1.2620 ± 0.4640	Poggio et al.2021
$\mu_{\delta} \pm \sigma_{\mu_{\delta}}$, мсд/год	-0.7350 ± 0.4830	Poggio et al.2021
$RV \pm \sigma_{RV}$, км/с	30.71 ± 0.17	Tarricq Y. et al. 2021

2.2. Характеристика и исходные данные TOI-2796



Рис. 9. Показаны характеристики планетной системы и ее художественное представление. У звезды TOI-2796 имеется планета TOI-2796b, которая была открыта транзитным методом в 2022 году. Для данной задачи, как уже говорилось, выдвинуто предположение, что у звезды есть и аналог облака Оорта, существующего в нашей Солнечной системе³.

В Таблице 8 приведены исходные данные для расчёта положения звезды в прошлые эпохи. Данные взяты из Exoplanet NASA Archive и каталога Gaia.

Таблица 8. Данные TOI-2796 для численных расчетов.

Параметр	TOI-2796
GAIA_ID	Gaia DR3 3222453935725951488
RA (EP=J2000), град	84.1527
DEC (EP=J2000), град	0.8963
$\varpi \pm \sigma_{\varpi}$, мсд	2.863 ± 0.0147
$\mu_{\alpha} \pm \sigma_{\mu_{\alpha}}$, мсд/год	2.537 ± 0.018
$\mu_{\delta} \pm \sigma_{\mu_{\delta}}$, мсд/год	2.635 ± 0.012
$RV \pm \sigma_{RV}$, км/с	20.91 ± 0.16

³ https://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/TOI-2796_b.html,
<https://www.stellarcatalog.com/ekzoplaneta.php?planetID=100933>

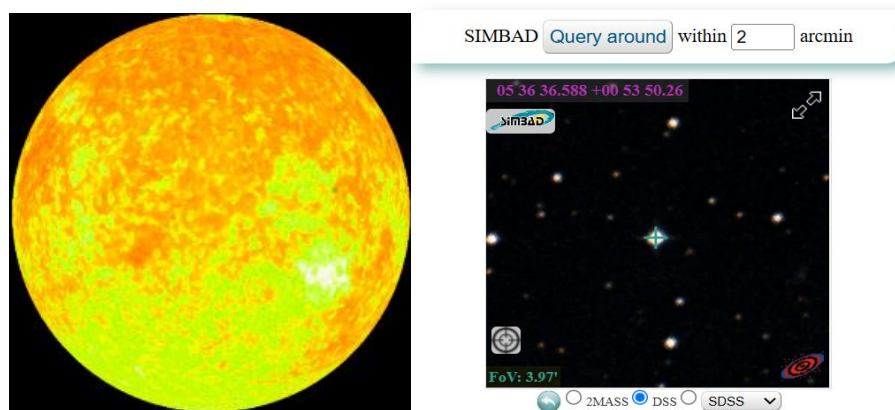


Рис.10. Звезда TOI-2796⁴ и ее положение на небе (SIMBAD). Некоторые характеристики – расстояние от Солнца 352.4 пк, масса 0.4 массы Солнца, спектральный класс G3, видимая звездная величина 22.0 mag.

2.3. Численные расчеты кинематики выбранных объектов

Космический аппарат Gaia дополнил данные об объектах наиболее точными на данный момент астрометрическими измерениями и данными лучевых скоростей. Это позволяет рассмотреть возможные прошлые встречи РЗС и Солнца. РЗС, проходя близко к Солнечной системе, может изменять орбитальные элементы малых тел, в том числе — особенно — в самых отдаленных частях их орбиты. Эти возмущения, в зависимости от их величины, могут при вести к переносу комет во внутренние области Солнечной системы, а также к выбросу комет в межзвездное пространство. Предполагается, что для других звёздных систем эти процессы аналогичны.

Проводилось интегрирование орбит точечных объектов вокруг Галактического центра. Орбитальные параметры для выборки рассчитываются с помощью пакета *galpy*. Используется MWPotential14 (Bovy 2015) — гравитационный потенциал, составленный на основании степенного закона, экспоненциально обрезанного балджа, потенциального диска Миямото-Нагаи и гало темной материи Наварро-Френка-Уайта. Расчеты времени проводились в пределах возраста рассматриваемых объектов. Для

⁴ Художественное представление. Источник <https://www.exoplanetkyoto.org/exohtml/TOI-2796.html>

расчета возраста скопления использовались диаграмма цвет-абсолютная величина и система изохрон. При помощи продления трека движения скопления и звезд в прошлые эпохи было найдено время максимального сближения звезды TOI-2796 с NGC 1977. В результате исследований сделан вывод, что сближение родительской звезды со скоплением может повлечь за собой эффекты, связанные с гравитационным притяжением скопления на ядра комет, расположенных на внешней границе предположительно существующего аналога облака Оорта планетной системы.

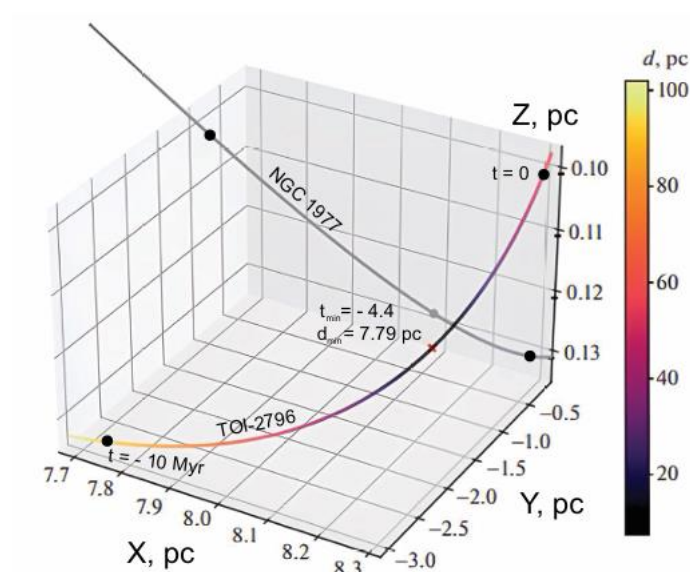


Рис. 11. Расположение объектов в галактическом диске XYZ (верхняя панель). Для каждого шага интегрирования по времени определены положения скопления и звезды и найдено расстояние между ними.

Используя данные из Таблицы 7 и Таблицы 8, проведены численные расчеты движения рассматриваемых объектов в Галактике в прошлые эпохи. На Рис.11 показаны фрагменты орбит и момент времени, когда расстояние между объектами было минимально. Серая кривая – траектория скопления, цветная – звезды. Цветная шкала справа характеризует расстояние между объектами. Расчеты проведены на интервале времени, близком к возрасту скопления. Использована классическая модель Галактики, включающая балдж, диск и гало. Поскольку нас интересует гравитационное влияние скопления на объекты планетной системы, было определено минимальное

расстояние, при котором влияние NGC 1977 на внешние части планетной системы звезды TOI-2796 должно быть наиболее значимым. Как можно видеть на Рис. 10, объекты сблизились на расстояние $\approx 7,8$ пк, и произошло это $\approx 4,4$ млн. лет назад. Взаимодействие малого тела со скоплением при сближении родительской звезды со скоплением приводит к изменению скорости малого тела. Считаем, что она может измениться на dV_p . Если скорость изначально была близка к той, что требуется, чтобы тело покинуло родительскую звезду, и увеличилась, из-за чего стала достаточной для этого, то это малое тело может быть потеряно планетной системой, превратившись в межзвездный объект типа Оамуамуа или Борисов. Если же скорость тела уменьшается, то его траектория также изменится. Комета может приблизиться к звезде в периастре. Это может вызывать временное увеличение потока комет, попадающих во внутреннюю часть планетной системы, т.н. «кометные ливни».

2.4. Обсуждения и выводы

В данной главе продолжено исследование связи комплекса звездных скоплений в Мече Ориона и звезд с планетными системами. Исследована кинематика скопления NGC 1977 и звезды с планетной системой TOI-2796, представлены результаты расчетов их движения в гравитационном поле Галактики в прошлом, полученные с использованием данных каталогов космического телескопа Gaia. Решена упрощенная задача, скопление рассматривалось как объект точечной массы. Данные расчетов показали, что рассмотренные объекты могли сближаться в прошлые эпохи на расстояние, достаточное для влияния скопления на динамику экзопланетной системы. Этот эффект следует учитывать в расчетах кинематики объектов в Галактике с целью изучения эволюции внешних частей планетных систем. Так, например, скопление массой $\sim 200 M_{\odot}$ может повлиять на малые тела, расположенные на расстоянии ~ 50 тыс. а.е. от родительской звезды.

Положения этой главы, выносимые на защиту:

Выполненные численные расчеты по данным Gaia DR3 и SIMBAD показали, что возможное максимальное сближение (~ 8 пк) скопления NGC 1977 и звезды с планетной системой TOI-2796 в прошлые эпохи (~ 4 млн. лет назад). Получена оценка гравитационного эффекта влияния скопления на планетную систему TOI-2796.

Результаты этой главы опубликованы автором в работах:

1. Wakjira H. Y., Negu S. H., **Mosunova D. A.**, Sizova M. D., Postnikova E. S., Chupina N.V., Fateeva A.M., Fateev A. M., Vereshchagin S. V. Approach of the NGC1977 Star Cluster to the TOI-2796 Host Star // Astronomy Reports, 2024, Volume 68, Issue 10, pp. 967–977.
2. Maksimova L.A., Sizova M.D., Postnikova E.S., Chupina N.V., Mosunova D.A., and Vereshchagin S.V. Approach of the Orion Sword Complex (NGC 1977 Star Cluster) to Stars with Planetary Systems (TOI-2796) // «Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия» (Moscow University Physics Bulletin. Сайт журнала vnu.phys.msu.ru), 2025, принята в печать.

Глава 3. Эффекты сближения NGC 1977 и TOI-2796

В данной работе подтверждается и предполагается, что существует возможность прошлых сближений звезд с экзопланетами с РЗС. Эти события могут нарушить стабильность Облака и вызвать кометные дожди в окрестностях планет. Важно отметить, что близкие столкновения вызывают возмущения на орбитах малых тел в экзопланетной системе. Некоторые из них могут менять орбиты и появляться как эзокометы, а также покидать экзопланетную систему и становиться межзвездными. Поскольку Солнечная система не уникальна, подобные процессы, происходящие в других планетных системах, могут привести к потере ранее связанных комет. Последние, как теперь известно, могут появиться в окрестностях Солнечной системы.

3.1. Эффект изменения орбитальной (трансверсальной) скорости

Обратимся к работе Rickman (1976), в которой получена формула приращения трансверсальной скорости малого тела (кометы) dV_p (Рис. 12) на интервале времени от $-T$ до T . Используются закон сохранения импульса и предположение об изотропии пространства.

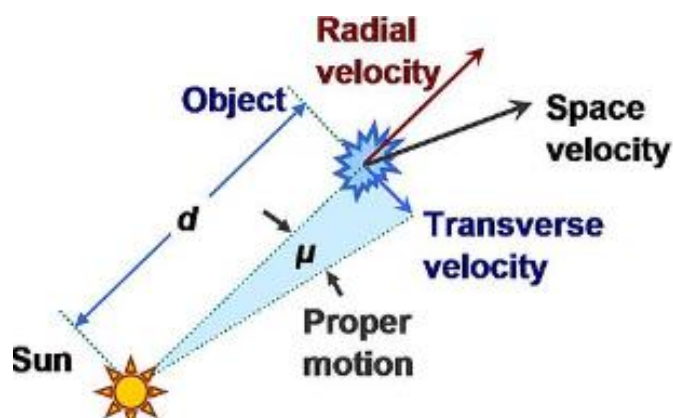


Рис. 12. Вектор приращения трансверсальной скорости малого тела (кометы).

Рассмотрена ограниченная задача 3-х тел, в которой одна из масс (малого тела или кометы) пренебрежимо мала по сравнению с массами других тел – Солнца (в данном случае TOI-2796) и РЗС, в рамках допущений:

1. радиус-вектор положения кометы относительно звезды не меняется ($\vec{r}_{comet}$)=const, в данном случае $\vec{r}_{comet}=0.5$ пк при условии приблизительного сходства параметров облака Оорта Солнечной системы и его предполагающегося аналога в TOI-2796 поскольку $M_{TOI-2796} \approx 1.0 \cdot M_{\odot}$.
2. интервал времени возмущения кометы (от -T до T) вследствие сближения с РЗС имеет центр $t_{min}=0$.
3. вектор скорости скопления ($\vec{V}_{cluster}$) не меняется, что справедливо при “далеком” прохождении РЗС.

Опуская некоторые преобразования, сделанные Rickman (1976), формула для приращения скорости малого тела (кометы) при прохождении РЗС на d_{min} :

$$dV_p = GM_{cluster} \int_{-T}^T \frac{\vec{r}_{cluster} - \vec{r}_{comet}}{|\vec{r}_{cluster} - \vec{r}_{comet}|^3} dt = \frac{2Gr_{comet}}{V_{cluster}} \frac{M_{cluster}}{d_{min}^2} \quad (3.1)$$

Момент импульса является аддитивной величиной. Это означает, что момент импульса системы равен сумме моментов импульсов её отдельных частей, независимо от того, взаимодействуют они между собой или нет. В таком случае суммарно приращения от n объектов комплекса Меча Ориона составит:

$$dV_p = \frac{2Gr_{comet}}{V_{Orion}} \left[\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i^2} \right] \quad (3.2)$$

Здесь постоянная гравитации $G=4,3 \times 10^{-3}$ пк· $M_{\odot}^{-1}$ ·(км/с)². Данные, необходимые для расчета (3.2), приведены в Таблице 9. В рассматриваемой области РЗС крайне молоды, расположены в области газовых облаков и представляют собой “погруженные” в газ скопления. По всей вероятности, они содержат газ. Оценки массы газа варьируются от 20 до $\sim 2000 M_{\odot}$, Chavarria et al. (2008) и даже до $\sim 4800 M_{\odot}$ внутри одного РЗС, Oh and Evans (2020). Согласно Piskunov et al. (2008), средняя масса скопления при рождении составляет $4,5 \cdot 10^3 M_{\odot}$. Масса РЗС была увеличена в 1.15 раза

(Seleznev et al., 2018), с учетом предположения, что существуют 20% компаньонов двойных звезд.

Таблица 9. Результаты расчетов параметров сближения.

Имя	d_{min} , пк	t_{min} , млн лет	$M_{cluster}$, $M_{\odot}$	dV_p , км/с	V_{Orion} , км/с
NGC 1977	7.8	-8.8	6500	0.02	20
ONC	45.8	-7.1	6500	0.0006	20

Суммарная величина dV_p в Таблице 9 равна ≈ 0.021 км/с. Это довольно значительная величина. При таком воздействии орбита кометы, находящейся в апоастре, изменится существенно. Напомним, что скорость кометы, движущейся по орбите с перигелийным расстоянием 5 а.е. и находящейся в афелии на расстоянии 10^5 а.е., составляет 1.63 м/с. Отметим, что dV_p может быть разнонаправленным со скоростью малого тела. В этом случае малое тело может приблизиться к звезде и стать в будущем экзокометой. Расчеты для сближения Солнечной системы и Гиад (Vereshchagin et al. 2022) показали, что в этом случае периастр может измениться от $q = 3.0$ а.е. до 2.6 а.е. В случае одинаково направленных скоростей малое тело может увеличить расстояние от звезды и даже покинуть планетную систему. С учетом величины второй космической скорости 0.133 км/с указанный эффект маловероятен. Понятно, что δV_p непрерывно менялась в процессе сближения. При этом здесь нет простой возможности учесть изменение элементов орбиты, а значит и положения в пространстве малого тела. Отметим, что скорость малого тела в афелии составляет ≈ 0.001 км/с ≈ 0.001 пак/млн лет. Перемещение малого тела может составить 0.001 пак/млн лет $\times 0.5$ млн лет = 0.0005 пак на интервале прохождения самых близких звезд и ядра, равном $dt = 0.5$ млн лет. Такое расстояние будем считать предельным для возможности считать малое тело «неподвижным».

3.2. Оценка частоты сближений звезд и звездных скоплений с Солнечной системой

Как часто могут происходить сближения звезд и звездных скоплений? Многие авторы изучали вопрос о динамическом звезд на Солнечную систему (см., например, Nordlander et al. 2017, Kaib and Quinn 2008, Malmberg et al. 2007). Если Солнце находилось в скоплении, то, согласно результатам расчета в варианте 3, сближения происходили с частотой примерно раз в 1 млн лет, и при времени жизни скопления 50 млн лет, Солнечная система могла испытать несколько десятков сближений. В работе García-Sánchez et al. (2001) по скорректированным данным HIPPARCOS получено, что Солнце испытывало 11.7 ± 1.3 сближений на расстояние до 1 пк за 1 млн. лет. В работе Martínez-Barbosa et al. (2017) по данным второго релиза Gaia получена оценка 19.7 ± 2.2 за 1 млн. лет. У Shustov et al. (2020) значение этой частоты составляет 16. В работе Piskunov et al. (2006) построена сложная модель движения Солнца в Галактике (учитывающая возможную радиальную миграцию Солнца). В расчетах без миграции авторы получили частоту сближений на расстояние 2 пк 66 сближений за 1 млн. лет. Согласно простой модели Shustov et al. (2020), значение частоты сближений на 2 пк составило 64. Также оценена частота сближений с Солнечной системой для всего ансамбля РЗС Галактики. Для этого использовали простой и быстрый стохастический подход. Моделировано движение ансамбля не всех 10^5 РЗС, а лишь 10^3 , случайным образом распределенных в расчетном объеме (радиусом 500 пк) вокруг Солнца. В рамках данной задачи скорости движения частиц распределены случайным образом, дисперсия скоростей взята равной 10 км/с. Для интегрирования на достаточно большое время, когда частицы могли вылетать за пределы счетной области пространства, использовано граничное условие диффузного отражения (см. более детальное описание в Malmberg et al. 2007). Фиксировались все сближения модельных РЗС с Солнечной системой. Время интегрирования составило до 4.5 млрд лет.

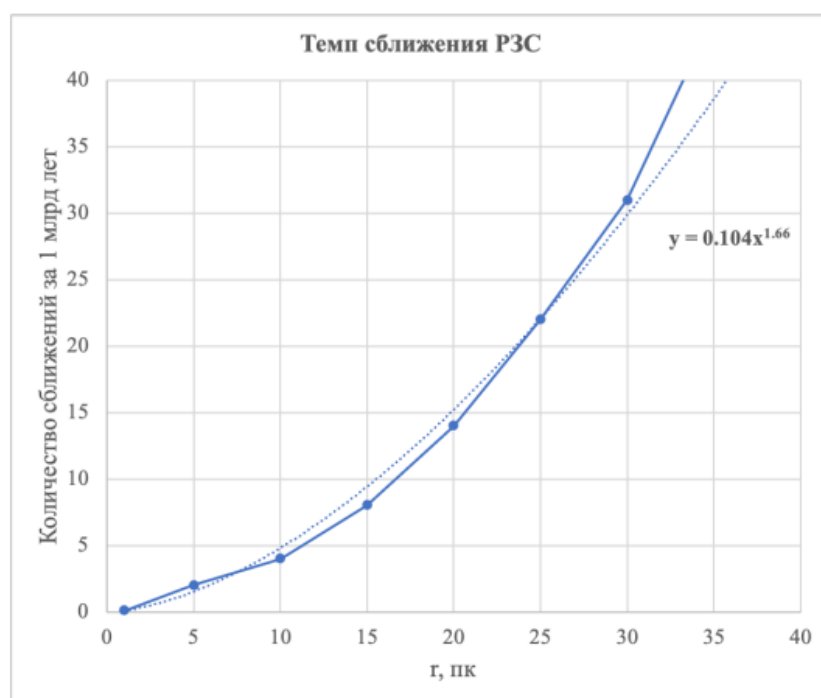


Рис. 13. Частота сближений РЗС с Солнечной системой в зависимости от расстояния сближения и соответствующая степенная кривая вида $y \approx 0.1 \cdot x^{1.66}$ (источник – М. Д. Сизова, диссертация).

На Рис. 13 представлена полученная зависимость частоты сближений от «прицельного» расстояния d_{min} (на графике r) до Солнца. Пунктирной линией обозначена зависимость частоты сближений (координата y) от r (x) аппроксимированная степенной функцией вида

$$y \approx 0.1 \cdot x^{1.66} \quad (3.3)$$

Представленные результаты расчетов данной модели носят лишь оценочный характер, однако при моделировании таким способом сближений со звездами было получено хорошее согласие с работами других авторов, использовавших очень сложные и детальные модели (см. обсуждение в Malmberg et al. 2007). Как видно из Рис. 12, сближения Солнечной системы со звездными скоплениями не являются исключительно редкими событиями в Галактике. Из Рис. 12 видно, что, например, сближения на ~ 25 пк (как сближение с Гиадами) могут происходить с частотой ~ 1 событие за 50 млн

лет. Таким образом, Солнечная система за время своей жизни могла подвергаться сближениям с РЗС ~ 90 раз.

3.3. Обсуждения и выводы

Исследование событий близких подходов вносит ясность в эволюцию малых тел в Солнечной системе. Например, в работе Ishchenko and Berczik (2025) с помощью численных расчетов задачи N тел показано, что шаровое скопление NGC 7078 (М 15) сближалось в прошлые эпохи с Солнечной системой. При этом малые тела, выброшенные из облака Оорта, могли распространиться по значительной области Галактики (до 16 кпк). Очевидно, что данные, полученные с современных спутников и наблюдательных систем (таких как Gaia), позволяют более точно оценить влияние таких явлений по эволюции Солнечной системы. С другой стороны, наблюдения за долгопериодическими кометами и межзвездными малыми телами позволяют сравнивать частоту событий появления комет и частоту встреч Солнечной системы с массивными телами и, таким образом, могут помочь нам прояснить события «бомбардировки» планет и их спутников.

Результаты этой главы опубликованы автором в работе

1. Wakjira H. Y., Negu S. H., Mosunova D. A., Sizova M. D., Postnikova E. S., Chupina N.V., Fateeva A.M., Fateev A. M., Vereshchagin S. V. Approach of the NGC1977 Star Cluster to the TOI-2796 Host Star // Astronomy Reports, 2024, Volume 68, Issue 10, pp. 967–977.
2. Maksimova L.A., Sizova M.D., Postnikova E.S., Chupina N.V., Mosunova D.A., and Vereshchagin S.V. Approach of the Orion Sword Complex (NGC 1977 Star Cluster) to Stars with Planetary Systems (TOI-2796) // «Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия» (Moscow University Physics Bulletin. Сайт журнала vmu.phys.msu.ru), 2025, принята в печать.

Заключение

1. Проведено численное моделирование сближений звезд поля с рассеянным звездным скоплением NGC 1977. Анализировалась выборка звезд, которые имеют планетные системы, окруженные, как предполагается, кометными облаками, являющимися аналогами известного кометного облака Оорта в нашей Солнечной системе. Согласно расчетам, скопление NGC 1977 и родительская звезда TOI-2796 находились на расстоянии $\approx 29,85$ пк. Таким образом, пролет этой звезды в прошлом (около 5.5 млн лет назад) мимо скопления мог привести к дестабилизации окружающего звезду TOI-2796 кометного облака. Результатом работы является то, что обнаруженное в данной работе сближение родительской звезды со скоплением могло повлечь за собой эффекты, связанные с гравитационным воздействием скопления на ядра комет, расположенных на внешних частях аналога облака Оорта планетной системы TOI-2796. Результатом этого воздействия, с одной стороны, может быть появление комет, которые в более поздние эпохи могли приближаться к звезде, с другой стороны, некоторые кометные ядра могли покинуть планетную систему и оказаться в межзвездном пространстве.
2. Проведен поиск звезд поля с планетными системами, расположенными в звездных скоплениях Меча Ориона и их окрестностях. Выбраны звезды, расположенные в пределах ~ 100 пк от центра области Меч Ориона. Показано, что TOI-2796 в прошлом, возможно, входила в состав скопления NGC 1977 или сближалась с ним в пространстве.
3. Оценен эффект гравитационного влияния скопления на кометное облако пролетающей звезды. Для родительской звезды TOI-2796, по мнению авторов [1, 2], такой эффект может быть значительным. А именно, пролет ее в прошлом (около 5.5 млн лет назад) мимо

скопления на минимальном расстоянии около 30 пк мог привести к дестабилизации окружающего звезда TOI–2796 кометного облака.

4. В прошлом могло произойти сближение комплекса Ориона и с Солнечной системой. Maconi, Alves, Swiggum et al. (2025) обнаружили, что траектория Солнечной системы пересекла волну Рэдклиффа в районе Ориона 18,2–11,5 млн лет назад, а максимальное сближение произошло 14,8–12,4 млн лет назад. Примечательно, что этот период совпадает с климатическим переходом в среднем миоцене на Земле. Оценено потенциальное воздействие пересечения волны Рэдклиффа на климат на Земле. Это пересечение также может привести к аномалиям в содержании радионуклидов, что является важной темой исследований в области геологии и ядерной астрофизики.

Перспективы продолжения работы

Провести поиск планетных систем из Exoplanet NASA Archive, расположенных вблизи РЗС из каталога Hunt and Reffert (2024). Использовать предложенную ранее методику (Vereshchagin, Tutukov, Chupina, Postnikova, Sizova 2022). Для объектов из полученного списка провести численные расчеты кинематики. Найти места близких встреч РЗС и планетных систем как потенциальные точки появления межзвездных комет. Также представляют интерес численные расчеты прохождений РЗС вблизи Солнечной системы. С учетом недавно опубликованных данных (Hui, Farnocchia, Micheli 2019): в 2031 году возможно к Солнцу приблизится рекордно огромная комета Бернардинелли — Бернштейна, летящая из Облака Оорта. Наблюдения проведены радиотелескопом ALMA, предполагается возможность впервые отследить молекулярные выбросы с ядра этой кометы и оценить их структуру.

Представляет интерес третья межзвездная комета **3I/ATLAS (C/2025 N1 (ATLAS))**, открытая 1 июля 2025 года с помощью автоматической системы раннего оповещения ATLAS (ixbt.comvk.com), Рис. 14.



Рис.14. Комета 3I/ATLAS (C/2025 N1 (ATLAS))-положение на небе, слева и предполагаемая орбита в Солнечной системе, справа⁵. Вход в Солнечную систему со стороны созвездия Стрельца, по предварительным оценкам, может достигать 20 километров, движется по гиперболе, скорость относительно Солнца — 61 км/с, комета относится к слабоактивным, у неё лёгкое красноватое свечение. Максимальное сближение с Солнцем ожидается 30 октября 2025 года, комета подойдёт к нему на 210 млн км и окажется внутри орбиты Марса. Сближение с Землёй: максимальное сближение с Землёй произойдёт 19 декабря 2025 года — на расстоянии 270 млн км, так что никакой угрозы объект не представляет.

Благодарности

Выражаю огромную благодарность своему научному руководителю за помощь и поддержку. Благодарю Чупину Наталию Викторовну, Постникову Екатерину Сергеевну, Сизову Марию Дмитриевну за обсуждения и ценные советы.

⁵ <https://science.nasa.gov/blogs/planetary-defense/2025/07/02/nasa-discovers-interstellar-comet-moving-through-solar-system/>

Список литературы

1. Bovy J. galpy: A python Library for Galactic Dynamics //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2015. – Т. 216. – №. 2. – С. 29.
2. Chavarría L. A. et al. Spitzer observations of the massive star-forming complex S254-S258: Structure and evolution //The Astrophysical Journal. – 2008. – Т. 682. – №. 1. – С. 445.
3. Cantat-Gaudin T., Anders F., Castro-Ginard A. et al. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters //Astronomy & Astrophysics. – 2020. – Т. 640. – С. A1.
4. García-Sánchez J. et al. Stellar encounters with the solar system //Astronomy & Astrophysics. – 2001. – Т. 379. – №. 2. – С. 634-659.
5. Exoplanet NASA Archive. 2023,
URL=<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
6. Hui M. T., Farnocchia D., Micheli M. C/2010 U3 (Boattini): A bizarre comet active at record heliocentric distance //The Astronomical Journal. – 2019. – Т. 157. – №. 4. – С. 162.
7. Hunt E. L., Reffert S. Improving the open cluster census-iii. Using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue //Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Т. 686. – С. A42.
8. Ishchenko M., Berczik P. Gravitational influence of the globular cluster NGC 7078 (M 15) flyby of the Oort cloud system //arXiv preprint arXiv:2506.15282. – 2025.
9. Kaib N. A., Quinn T. The formation of the Oort cloud in open cluster environments //Icarus. – 2008. – Т. 197. – №. 1. – С. 221-238.
10. Maconi E. et al. The Solar System's passage through the Radcliffe wave during the middle Miocene //Astronomy & Astrophysics. – 2025. – Т. 694. – С. A167.

11. Maliuk A., Budaj J. Spatial distribution of exoplanet candidates based on Kepler and Gaia data //Astronomy & Astrophysics. – 2020. – T. 635. – C. A191.
12. Malmberg D. et al. Close encounters in young stellar clusters: implications for planetary systems in the solar neighbourhood //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2007. – T. 378. – №. 3. – C. 1207-1216.
13. Martínez-Barbosa C. A. et al. The rate of stellar encounters along a migrating orbit of the Sun //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2017. – T. 464. – №. 2. – C. 2290-2300.
14. Mason B. D. et al. The 2001 US naval observatory double star CD-ROM. I. The Washington double star catalog //The Astronomical Journal. – 2001. – T. 122. – №. 6. – C. 3466.
15. Nordlander T., Rickman H., Gustafsson B. The destruction of an Oort Cloud in a rich stellar cluster //Astronomy & Astrophysics. – 2017. – T. 603. – C. A112.
16. Oh S., Evans N. W. Kinematic modelling of clusters with Gaia: the death throes of the Hyades //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – T. 498. – №. 2. – C. 1920-1938.
17. Piskunov A. E. et al. The initial luminosity and mass functions of the Galactic open clusters //Astronomy & Astrophysics. – 2008. – T. 487. – №. 2. – C. 557-566.
18. Piskunov A. E. et al. Revisiting the population of Galactic open clusters //Astronomy & Astrophysics. – 2006. – T. 445. – №. 2. – C. 545-565.
19. Poggio E., Drimmel R., Cantat-Gaudin T., Ramos P. et al. Galactic spiral structure revealed by Gaia EDR3 //Astronomy & Astrophysics. – 2021. – T. 651. – C. A104.
20. Rickman H. Stellar perturbations of orbits of long-period comets and their significance for cometary capture //Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin, vol. 27, no. 2, 1976, p. 92-105. – 1976. – T. 27. – C. 92-105.

21. Roth N. X. et al. The First Detection of Molecular Activity in the Largest Known Oort Cloud Comet: ALMA Imaging of C/2014 UN271 (Bernardinelli–Bernstein) at 16.6 au from the Sun //The Astrophysical Journal Letters. – 2025. – T. 986. – №. 2. – C. L22.
22. Seleznev A. F. et al. An Influence of Unresolved Binaries on the Open Cluster Mass Estimate //Modern Star Astronomy. – 2018. – T. 1. – C. 280-283.
23. Shustov B. M., Vereshchagin S. V., Sizova M. D. On a stochastic method for evaluating the approach frequency of stars and Solar system //INASAN Science Reports. – 2020. – T. 5. – C. 89-93.
24. Sizova M. D. et al. Solar System Encounters with Open Star Clusters //Astronomy Reports. – 2020. – T. 64. – №. 8. – C. 711-721.
25. Tarricq Y., Soubiran C., Casamiquela L., Cantat-Gaudin T. et al. 3D kinematics and age distribution of the open cluster population //Astronomy & Astrophysics. – 2021. – T. 647. – C. A19.
26. Torres S. et al. Galactic tide and local stellar perturbations on the Oort cloud: creation of interstellar comets //Astronomy & Astrophysics. – 2019. – T. 629. – C. A139.
27. Vereshchagin S. V. et al. Orion Nebula Cluster (ONC) and Planetary Systems from Gaia DR3 and JWST Data //Astronomy Reports. – 2025. – T. 69. – №. 3. – C. 157-168.
28. Vereshchagin S. V., Chupina N. V. Star Structure of the Northern Part of the Orion Sword Region //Astronomy Reports. – 2023. – T. 67. – №. 4. – C. 336-392.
29. Vereshchagin S. V., Emel'yanenko V. V., Sizova M. D. Approach of the Hyades star cluster to the Solar system //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – T. 513. – №. 2. – C. 2958-2964.
30. Vereshchagin S. V. et al. Binary Clusters: Theory and Observations //Astronomy Reports. – 2022. – T. 66. – №. 5. – C. 361-386.

31. Vereshchagin S. V., Chupina N. V. Details of the spatial structure and kinematics of the Castor and Ursa Major streams //Open Astronomy. – 2015. – T. 24. – №. 4. – C. 421-425.
32. Vereshchagin S. V., Chupina N. V. Apex and internal structure of the Praesepe open cluster //Astronomische Nachrichten. – 2013. – T. 334. – №. 8. – C. 892-895.
33. Vereshchagin S. V., Reva V. G., Chupina N. V. Rotation of the Hyades derived from Hipparcos data //Astronomy Reports. – 2013. – T. 57. – №. 1. – C. 52-55.
34. Vereshchagin S. V., Chupina N., Postnikova E. S. What Will Lead the Astrometry Data Accuracy Breakthrough in the Study of Star Clusters? //DAMDID/RCDL. – 2018. – C. 107-111.
35. Wakjira H. Y. et al. Approach of the NGC1977 Star Cluster to the TOI-2796 Host Star //Astronomy Reports. – 2024. – T. 68. – №. 10. – C. 967-977.
36. Wenger M. et al. The SIMBAD astronomical database-The CDS reference database for astronomical objects //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 2000. – T. 143. – №. 1. – C. 9-22.

Приложение А. Исходные данные ONC

Исходные данные ONC из каталога Gaia DR3 для звёзд выборки с вероятностью принадлежности ONC $P \geq 0.5$. Данные звезд с лучевыми скоростями (n=20).

GaiaID	P	RUWE	r	RV	RA	DEC	Plx	ePlx	pmRA	ePmRA	pmDE	ePmDE	Gmag
3017364132050194688	0.98	1.485	378	28.30	83.81595	-5.38731	2.6427	0.0718	1.355	0.058	0.250	0.048	6.63
3017360146320757888	0.97	1.001	410	24.63	83.79537	-5.46689	2.4367	0.0844	1.344	0.075	0.267	0.056	15.80
3017266206784582144	0.97	1.107	394	26.56	83.78774	-5.49979	2.5347	0.0167	1.459	0.015	0.261	0.012	12.74
3017360249399928832	0.97	0.867	390	25.23	83.84326	5.45789	2.5656	0.0763	1.411	0.073	0.188	0.057	16.23
3017366743390006144	0.96	0.768	402	32.41	83.79658	-5.32660	2.4909	0.0884	1.431	0.078	0.189	0.063	16.55
3017366709030057600	0.94	1.008	413	29.06	83.81922	-5.32659	2.4224	0.1033	1.359	0.088	0.177	0.072	17.05
3017364613086735360	0.94	1.167	397	28.65	83.73323	-5.38696	2.5161	0.0188	1.453	0.017	0.184	0.014	11.10
3017364132041596288	0.93	0.607	396	21.42	83.82134	-5.38057	2.5220	0.1132	1.389	0.091	0.347	0.079	15.70
3017364059023825280	0.92	1.434	407	31.91	83.82778	-5.38721	2.4597	0.0466	1.385	0.040	0.150	0.036	13.94
3017364368261463936	0.89	1.321	381	26.00	83.82175	-5.35881	2.6271	0.0341	1.389	0.030	0.130	0.025	12.13
3017362551501920640	0.87	0.834	415	26.61	83.86724	-5.38512	2.4101	0.1612	1.405	0.140	0.381	0.119	17.55
3017359149888300928	0.85	0.893	416	26.76	83.86377	-5.39350	2.5079	0.0541	1.191	0.046	0.196	0.040	14.44
3017360180680489600	0.83	0.823	408	25.37	83.80761	-5.46025	2.4529	0.0819	1.520	0.075	0.341	0.056	16.32
3017363410495899136	0.82	1.187	390	24.65	83.76877	-5.43455	2.5606	0.1378	1.453	0.121	0.397	0.089	15.58
3017363376136167936	0.75	2.229	494	28.13	83.75866	-5.44339	2.0263	0.0964	1.225	0.084	0.180	0.062	13.96
3017361074033180928	0.69	1.034	399	29.70	83.86377	-5.39350	2.5079	0.0541	1.191	0.046	0.196	0.040	14.44
3017360833515044480	0.60	1.012	419	28.50	83.86001	-5.41689	2.3870	0.0499	1.161	0.041	0.162	0.033	6.30
3017359390406490496	0.56	0.874	414	29.55	83.85131	-5.47895	2.4179	0.1197	1.357	0.113	-0.015	0.088	16.73
3017364235132349952	0.53	0.827	391	25.36	83.79847	-5.38099	2.5573	0.2336	1.616	0.205	0.433	0.155	16.98
3209518975997993216	0.53	1.007	396	27.65	83.70891	-5.33331	2.5244	0.2217	1.436	0.203	0.531	0.154	18.18

Описание строки

GaiaID – номер звезды по каталогу Gaia

P – вероятность принадлежности звезды скоплению

RUWE – качество данных Gaia

r – расстояние звезды от Солнца ($1/\text{Plx}$), пк

RV – лучевая скорость, км/с

RA – прямое восхождение, град (ICRS=J2000)

DE – склонение, град

Source – тот же GaiaID

Plx – параллакс, mas

$ePlx$ – ошибка параллакса

$pmRA$ – собственное движение RA

$ePmRA$ – ошибка СД

$pmDE$ – собственное движение DE

$ePmDE$ – ошибка СД DE

$Gmag$ – звездная величина

Приложение Б. Программа построения АД диаграммы

Апексом называют точку на небесной сфере, в которую направлена скорость движения наблюдателя относительно какой-либо системы отсчёта. Точка, противоположная апексу, называется антиапексом. Формулы расчета координат A, D и эллипсов ошибок приведены в Vereshchagin, Chupina (2015), Vereshchagin, Chupina (2013), Vereshchagin, Reva, Chupina (2013). Кратко приведем формулы, отражающие суть метода. Сначала с помощью параллакса π и собственных движений μ_α , μ_δ определялись компоненты тангенциальной скорости V_α и V_δ :

$$V_\alpha = 4,74047 \frac{\mu_\alpha}{\pi} \quad \text{и} \quad V_\delta = 4,74047 \frac{\mu_\delta}{\pi}$$

Затем с учетом лучевой скорости V_r и экваториальных координат звезды α , δ рассчитывались компоненты вектора пространственной скорости V_x , V_y , V_z :

$$V_x = -V_\alpha \sin \alpha - (V_\delta \sin \delta - V_r \cos \delta) \cos \alpha,$$

$$V_y = V_\alpha \cos \alpha - (V_\delta \sin \delta - V_r \cos \delta) \sin \alpha,$$

$$V_z = V_\delta \cos \delta + V_r \sin \delta.$$

Координаты A и D находятся по формулам: $A = \arctg \frac{V_y}{V_x}$ и $D =$

$$\arctg \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}$$

Код программы определения положения апекса

```
import math
import numpy as np
import pandas as pd
def compute_A_D(RA, DE, parallax, mu_alpha, mu_delta, V_r):
    results = []
    # Переводим координаты в радианы
    alpha = np.radians(RA)
    delta = np.radians(DE)
    # Вычисление тангенциальных скоростей
    k = 4.74047 # Коэффициент для перевода угловых скоростей в скорости (км/с)
    V_alpha = k * mu_alpha / parallax
    V_delta = k * mu_delta / parallax
    # Вычисление компонент скорости
```

```

V_x = -V_alpha * np.sin(alpha) - (V_delta * np.sin(delta) - V_r * np.cos(delta)) * np.cos(alpha)
V_y = V_alpha * np.cos(alpha) - (V_delta * np.sin(delta) - V_r * np.cos(delta)) * np.sin(alpha)
V_z = V_delta * np.cos(delta) + V_r * np.sin(delta)

# Вычисление A и D
A = np.degrees(np.arctan2(V_y, V_x))
D = np.degrees(np.arctan2(V_z, np.sqrt(V_x**2 / V_y**2)))
results=pd.DataFrame({"A": np.array(A), "D": np.array(D)})
return results
# Читаем данные из файла "orion_dat.csv"
Data = pd.read_csv("orion_dat.csv")
coord_ad = compute_A_D(data['RA'],data['DE'],data['Plx'],data['pmRA'],data['pmDE'],data['RV'])
data = pd.concat([data,coord_ad], axis=1)
# Сохраняем данные в файл "orion_ad_err.csv"
data.to_csv('orion_ad_err.csv', index=False)

```