

АСТРОНОМИЯ
и
ИССЛЕДОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*Всероссийская с международным участием
научная конференция студентов и молодых ученых,
посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой*

(Екатеринбург, Россия, 1–5 февраля 2021 г.)

Сборник научных трудов



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

АСТРОНОМИЯ
И
ИССЛЕДОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Всероссийская с международным участием
научная конференция
студентов и молодых ученых,
посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой
(Екатеринбург, Россия,
1—5 февраля 2021 г.)

Сборник научных трудов

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 521(063)
ББК 22.6я43
А914

Издается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

Э. Д. Кузнецов (ответственный редактор), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН),
А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский федеральный университет),
К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов
(Институт астрономии РАН)

Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с
A914 международным участием научная конференция студентов и молодых ученых,
посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой (Екатеринбург, Россия,
1—5 февр. 2021 г.) : сборник научных трудов. — Екатеринбург : Изд-во Урал.
ун-та, 2021. — 222 с. — ISBN 978-5-7996-3229-8. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-7996-3229-8

DOI 10.15826/B978-5-7996-3229-8.00

В сборнике представлены доклады и сообщения студенческой научной кон-
ференции, которая ежегодно проводится в Астрономической обсерватории
Уральского федерального университета. Цель конференции — обобщить дости-
жения в области астрономии и астрофизики и способствовать формированию
навыков и способностей молодых исследователей.

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, сту-
дентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 521(063)
ББК 22.6я43

ISBN 978-5-7996-3229-8

© Уральский федеральный
университет, 2021

**АСТРОНОМИЯ
и
ИССЛЕДОВАНИЕ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА
ВСЕРОССИЙСКАЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

Организаторы

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии, геодезии, экологии
и мониторинга окружающей среды
Астрономическая обсерватория

Екатеринбург, Россия

1—5 февраля 2021 г.

Организационный комитет

Э. Д. Кузнецов (председатель, Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (заместитель председателя, Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), С. В. Салий (Уральский федеральный университет)

Программный комитет

А. М. Соболев (председатель, Уральский федеральный университет), А. Б. Островский (заместитель председателя, Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (Институт прикладной физики РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), О. К. Сильченко (Государственный астрономический институт имени Штернберга, МГУ), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

Д. З. Вибе (председатель, Институт астрономии РАН), Г. Н. Дремова (РФЯЦ—ВНИИТФ), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), С. А. Хайбрахманов (Уральский федеральный университет), В. Ш. Шайдуллин (Санкт-Петербургский государственный университет)

Финансовая поддержка

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина



Что-то случилось, нас все покидают...

Ю. Левитанский

Укрыты пухом снежным
Тропинки, павильоны.
Как будто всё по-прежнему
На зимних бастионах.

Но лгут иллюзии безбожно! –
Жить можно лишь неосторожно,
Пока прелестница-душа, покорна власти провиденья,
Презрев законы тяготения,
Не отлетит, оставив тело... –

И ЗАШ осиротела...

28.09.2020 – 10.01.2021

Наталья Дмитриевна Калинина

ПОЛИНА ЕВГЕНЬЕВНА ЗАХАРОВА

Э. Д. Кузнецов, С. В. Салий, Т. С. Полушина

Уральский федеральный университет

Статья посвящена памяти Полины Евгеньевны Захаровой (12.03.1940—28.09.2020), нашего Учителя, звездного астронома, кандидата физико-математических наук, директора Коуровской астрономической обсерватории Уральского университета (1982—2016), вдохновителя и организатора Всероссийских студенческих научных конференций «Физика Космоса», автора учебно-наглядного пособия «Календарь "Астрономия"», члена ряда профессиональных советов и обществ, человека, беззаветно преданного своему делу — развитию астрономии на Среднем Урале и в России.

POLINA EVGENIEVNA ZAKHAROVA

E. D. Kuznetsov, S. V. Saliy, T. S. Polushina

Ural Federal University

The article is dedicated to the memory of Polina Evgenievna Zakharova (12.03.1940—28.09.2020), our Teacher, stellar astronomer, Candidate of Science in Physics and Mathematics, director of the Kourovka Astronomical Observatory of the Ural University (1982—2016), inspirer and organizer All-Russian student scientific conferences "Physics of Space", the author of the teaching-visual aid Calendar "Astronomy", a member of a number of professional councils and societies, a person selflessly devoted to her work — the development of astronomy in the Middle Urals and in Russia.

28 сентября 2020 г. ушла Полина Евгеньевна Захарова. Невыносимо поверить, невозможно смириться. . .

Как жить, когда невыносимо?
Уходит почва из-под ног.
Или всему, что так любимо,
Господь установил свой срок? ¹

Полина Евгеньевна. . . Казалось, она навсегда. Кто для нас Полина Евгеньевна? Если одним словом — Учитель. Заглавная буква не преувеличение, не фигура речи. Что бы ни делала Полина Евгеньевна, все было с большой буквы, самозабвенно, безоглядно, истово и от чистого сердца, с глубокой уверенностью в необходимости действия.

В сто тысяч звезд душа горела
Астрономическим огнем,
И до всего ей было дело
И по ночам, и ясным днем.
И неизменное движение,
Упорство, воля и борьба,
И, безусловно, достижение
Высокой цели. . .

© Кузнецов Э. Д., Салий С. В., Полушина Т. С., 2021

¹Здесь и далее стихи Н. Д. Калининой

Полина Евгеньевна Захарова родилась 12 марта 1940 г. в семье Евгения Константиновича и Надежды Александровны Серовых в городе Серове. Город был назван в честь брата Евгения Константиновича, Героя Советского Союза Анатолия Константиновича Серова, легендарного летчика-истребителя, героя войны в Испании, погибшего при выполнении учебного полета вместе со штурманом Полиной Осипенко. Евгений Константинович и Надежда Александровна в память о Полине Осипенко дали своей дочке имя Полина. Как знать, возможно, любовь к небу Полине Евгеньевне передалась по наследству вместе с фамилией и именем. Во всяком случае, Полина Евгеньевна рассказывала так:

Как я только стала себя воспринимать, я всегда была только астрономом. В городе, где прошло мое детство, астрономических учреждений не было. Читала популярную литературу. Первая книга, которую я выписала по почте в 1953 г., была «Труды Второго совещания по вопросам космогонии». До сих пор как дорогую реликвию храню ее. Это были первые настоящие научные статьи, которые я читала. Доклад В. А. Амбарцумяна «О происхождении и развитии звезд и звездных систем», выступления Б. А. Воронцова-Вельяминова, Г. А. Шайна, С. Б. Пикельнера, С. А. Каплана, В. А. Крата, П. П. Паренаго, Э. Р. Мустеля, А. Б. Северного, В. В. Соболева, А. Г. Масевич, Д. Я. Мартынова, П. Н. Холопова. Это имена ученых, вписавших в Астрономию золотые страницы. Именно в этой книге я прочитала первую научную статью своего будущего учителя — профессора К. А. Бархатовой. В школьные же годы однажды ранним утром я наблюдала прохождение Меркурия по диску Солнца в максутовский телескоп, которым снабдил меня преподаватель металлургического техникума. Наконец, когда я училась в 10 классе средней школы № 16 г. Серова, директор школы Иван Сеидорович Марцок, зная, что я увлекаюсь астрономией, познакомил меня с первым в моей жизни настоящим астрономом — И. Генкиным, выпускником 16-й школы, в ту пору аспирантом Московского университета, ныне доктором физико-математических наук. В 1957 г. я поступила в Уральский университет. В 22 часа 28 минут московского времени 4 октября 1957 г. началась космическая эра, и это определило навсегда мою жизнь в астрономии (из ответов на вопросы читателям e1.ru: <https://www.e1.ru/talk/guest/desc/37.htm>).

По окончании университета (в 1962 г.) Полина Евгеньевна вернулась в родной город Серов, в среднюю школу № 27 и стала работать учителем физики. С учениками, классным руководителем которых ее назначили, Полина Евгеньевна сразу подружилась и потом еще долгие годы поддерживала теплые отношения.

Но детская мечта об астрономии не отпускала. В 1966 г. Полина Евгеньевна вернулась в астрономическую обсерваторию УрГУ заниматься астрономией под руководством Клавдии Александровны Бархатовой, звездного профессора, основателя научной школы звездной астрономии на Урале.

Сферой научных интересов Полины Евгеньевны были рассеянные звездные скопления, определение их фотометрических параметров, исследование проблемы универсальности начальной функции светимости. Результатом стал вывод, что звезды в рассеянных звездных скоплениях рождаются одновременно. Кроме того, Полина Евгеньевна создала каталог звездных величин и показателей цвета примерно 40 тыс. звезд в окрестностях 21 рассеянного звездного скопления. Этот каталог передан (частично) в Международный центр астрономических данных (Франция). Обобщив полученные результаты, Полина Евгеньевна 1 апреля 1982 г. успешно защитила диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по теме «Функции светимости РЗС». Защита проходила в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова. В 1986 г. Полине Евгеньевне присвоено ученое звание старшего научного сотрудника.

Полина Евгеньевна активно занималась научно-образовательной деятельностью. С 1984 по 1992 г. она входила в состав рабочей группы «Скопления и ассоциации» проблемной международной комиссии «Физика и эволюция звезд». С 1980 по 2003 г. являлась членом Президиума Головного совета по астрономии Министерства образования РФ.

В 1982 г. начался новый этап в жизни Полины Евгеньевны: Клавдия Александровна Бархатова поручила ей возглавить астрономическую обсерваторию УрГУ. Понимая всю степень ответственности, Полина Евгеньевна (как потом вспоминала) проплакала всю ночь, но наутро взялась за это нелегкое дело со свойственной ей решимостью и ответственностью. В то время основными инструментами обсерватории были звездный телескоп АЗТ-3, солнечный телескоп АЦУ-5 и астрогеодезическая камера СБГ.

Никто, кроме самой Полины Евгеньевны, не мог представить и осознать, какой невыносимо тяжкий труд и неразделенную ответственность взвалила она на себя. Неимоверными трудами удалось Полине Евгеньевне сохранить обсерваторию в 90-е. И не только сохранить, но и вывести ее на новый уровень. Был создан и установлен 70-см телескоп, введенный в эксплуатацию в 1995 г. В 2006 г. современными приемниками излучения (ПЗС-камерами) оснащены телескопы СБГ и АЗТ-3. В ходе выполнения работ по Инновационно-образовательной программе УрГУ в рамках национального проекта «Образование» в 2008–2009 гг. в обсерватории установлены два новых телескопа — телескоп с диаметром зеркала 1.2 м и робот-телескоп «Мастер II». В 2011 г. выполнены первые наблюдения на эшелле-спектрографе 1.2-м телескопа. В 2015 г. в рамках проекта поддержки уникальных научных установок приобретены 50-см телескоп АСТРОСИБ и 60-см роботизированный фотометрический телескоп РОБОФОТ.

Не счесть проблем и безобразий,
Окутавших уж вся и всех.
По кругу: гранты, уголь, фразы,
Бензин, Москва, друзья, успех...
Да, времена сейчас глухие,
И всех корезжит нервный стресс,
Но ей подвластны все стихии —
Оваций треск и тишь небес.

Более того, Полине Евгеньевне удалось сохранить и сплотить коллектив обсерватории. Она, как заботливая мама, была в курсе и радостей, и горестей своих сотрудников. Умела в нужную минуту помочь, приободрить, а иногда и отругать, что непременно имело положительное воздействие.

Невозможно переоценить вклад Полины Евгеньевны в проведение научных студенческих конференций «Физика Космоса», зимних астрономических школ — ЗАШ, как с любовью называли их участники. Большинство участников, однажды приехав на школу, уже не могли отказать себе в удовольствии приезжать сюда снова и снова. Много среди них таких, кто приехал юным студентом, а сейчас приезжают уже маститыми докторами наук. Полина Евгеньевна внесла существенный вклад в организацию и проведение 45 школ, она была председателем оргкомитета 24 конференций (1993–2016). Все отмечают особую, теплую, практически семейную атмосферу, царящую на школах, которая способствует установлению и развитию творческих контактов, а также вовлечению студентов в научные коллективы. Поэтому в 1996 г. Международный астрономический союз, признав Коуровскую астрономическую обсерваторию «меккой студентов-астрономов России», своим решением присвоил малой планете № 4964 имя КОУРОВКА. А личный вклад Полины Евгеньевны Захаровой в это нелегкое, но благородное дело был отмечен присвоением малой планете № 4780 имени POLINA, в ее честь.

Большое внимание Полина Евгеньевна уделяла организации и проведению в обсерватории летней практики студентов, выполнению студентами кафедры астрономии и геодезии курсовых и выпускных квалификационных работ, организации познавательных экскурсий и лекций для жителей Екатеринбурга и Свердловской области. По инициативе Полины Евгеньевны стали выпускаться календари «Астрономия» (по сути — учебно-наглядные пособия), призванные восполнить пробелы в астрономическом образовании.

Награды Полины Евгеньевны Захаровой, члена Международного астрономического союза, члена Европейского астрономического общества, члена правления международной общественной организации «Астрономическое общество», члена бюро Научного совета по астрономии РАН:

- 1970 — юбилейная медаль «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина»;
- 1983 — первая премия Уральского университета за научную работу (коллективная работа по комплексному исследованию РЗС);
- 1985 — серебряная медаль Главного комитета Выставки достижений народного хозяйства СССР;
- 1986 — Почетная грамота Республиканского совета по научной работе студентов высших и учащихся средних специальных учебных заведений РСФСР за многолетнюю плодотворную работу по организации студенческих научных конференций;
- 1991 — премия имени А. Ф. Фиолетовой Астрономического совета АН СССР;
- 1998 — первая премия Уральского университета за научную работу (коллективная работа по созданию 700-миллиметрового телескопа Коуровской обсерватории);
- 2001 — звание «Дочь города — дочь России»;
- 2004 — медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени;
- 2009 — благодарность Председателя Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации С. М. Миронова за большой вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов в области астрономии;
- Почетные грамоты губернатора Свердловской области и мэра Екатеринбурга;
- 2013 — серебряная Почетная медаль Международного биографического центра Кембриджа — награда двадцатого века за достижения. Биография Полины Евгеньевны включена в международные биографические справочники ученых мира.

Не время мчится —
Вы сквозь годы
Летите, как заправский метеор:
На фото вспыхивают лица,
А в памяти — заветный разговор.
 Нам не угнаться, нет!
 Давай назначим встречу,
 Пожалуй, через пару тысяч лет.
Мы будем ждать
 В Коуровке, на Млечном...



Вверху слева — Герои Советского Союза Анатолий Константинович Серов и Полина Денисовна Осипенко, погибли при испытании самолета УТИ-4 (фото wikimedia.org). Справа — Евгений Константинович и Надежда Александровна Серовы. В центре — Полина Евгеньевна с мамой (фото из архива Полины Евгеньевны). Внизу — панорама города Серова, 30-е гг. (фото serovlive.narod.ru)



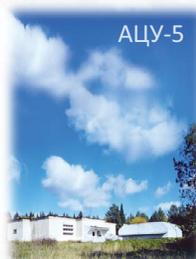
Вверху слева — Полина Евгеньевна с подругой на кафедре, справа — Полина Евгеньевна с подругой и Робертом Григорьевичем. В центре справа — Полина Евгеньевна с Робертом Григорьевичем. Внизу — Полина Евгеньевна с мамой Надеждой Александровной (фото из архива Полины Евгеньевны)



Вверху — Полина Евгеньевна с учениками. В центре — Полина Евгеньевна и Роберт Григорьевич.
Внизу — Полина Евгеньевна с дочерьми (фото из архива Полины Евгеньевны)



Вверху — Полина Евгеньевна, Клавдия Александровна Бархатова. В центре слева — с коллегами в обсерватории: Георгий Сергеевич Ромашин, Татьяна Павловна Герасименко, Полина Евгеньевна, Елизавета Дмитриевна Павловская, Клавдия Александровна Бархатова. Справа сидят: Людмила Петровна Шашкина, Ольга Петровна Пыльская, Клавдия Александровна Бархатова, Полина Евгеньевна Захарова; стоят: Анатолий Ефимович Василевский, Борис Флегонтович Магуськин. Внизу — коллектив обсерватории (фото из архива Полины Евгеньевны)



Инструменты Коуровской астрономической обсерватории (фото С. Ю. Горды)



Инструменты Коуровской астрономической обсерватории (фото С. Ю. Горды)



На зимних астрономических школах (фото из архива Полины Евгеньевны)



Полина Евгеньевна с сотрудниками обсерватории и кафедры (из архива Полины Евгеньевны)



Вверху слева — Свидетельство о присвоении малой планете 4780 имени POLINA, справа — Свидетельство о присвоении малой планете 4964 имени KOUROVKA. Внизу — телескоп АЗТ на фоне звездного неба (из архива Полины Евгеньевны)



Выпуск любительской студийской группы, 1984 г.



«Мне в жизни очень повезло с учителями, к которым я отношу... всех людей, с которыми меня столкнула жизнь. Это и коллектив обсерватории, и коллектив кафедры, и родная группа (выпуск 1984 г.), где я была куратором, и моя семья: мой лучший друг по жизни мой муж Роберт Григорьевич, дети, внуки. Но самым великим учителем была и есть жизнь, порой очень жестокая, но чаще справедливая и добрая...» (из архива Полины Евгеньевны)

ПАМЯТИ КОНСТАНТИНА ВЛАДИСЛАВОВИЧА ХОЛШЕВНИКОВА

Л. Л. Соколов, В. Ш. Шайдулин

Санкт-Петербургский государственный университет

Константин Владиславович Холшевников (19.01.1939—10.01.2021) — заведующий кафедрой небесной механики СПбГУ, провел у ее руля 50 лет. Получил много важных результатов в науке и воспитал множество учеников, продолжающих его дело по всему миру. Константин Владиславович создал уникальные курсы по небесной механике, занимался просветительской работой и заслужил множество почетных наград и званий. Многолетний председатель оргкомитета и жюри конкурса студенческих докладов Зимних астрономических школ.

IN MEMORY OF KONSTANTIN VLADISLAVOVICH KHOLSHEVNIKOV

L. L. Sokolov, V. Sh. Shaidulin

Saint Petersburg State University

Konstantin Vladislavovich Kolshevnikov (19.01.1939—10.01.2021) was Head of the Department of Celestial Mechanics of St. Petersburg State University, that ruled it for 50 years. He got many important results in science and taught many students who continue his work around the world. Konstantin Vladislavovich created unique courses in celestial mechanics, was engaged in educational work and earned many honorary awards and titles. Long-term chairman of the organizing committee and the jury of the student report competition of the Winter Astronomical School.

10 января 2021 г. после тяжелой болезни ушел из жизни профессор Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий кафедрой небесной механики, доктор физико-математических наук Константин Владиславович ХОЛШЕВНИКОВ.

Вся научная и преподавательская деятельность профессора К. В. Холшевникова была связана с университетом. Константин Владиславович окончил математико-механический факультет университета в 1962 г., затем окончил аспирантуру университета, защитил кандидатскую диссертацию. Проходил научную стажировку в Италии. С 1970 г., после организации в ЛГУ факультета прикладной математики — процессов управления, в течение 50 лет бессменно заведовал кафедрой небесной механики СПбГУ (ЛГУ). Доктор физико-математических наук с 1972 г. Автор более 250 научных работ, в том числе 13 монографий и учебных пособий.

Константином Владиславовичем Холшевниковым и его учениками получены важные результаты в самых разных областях небесной механики. Его докторская диссертация «Построение аналитической теории движения спутника в поле тяготения несферической планеты» посвящена одной из наиболее актуальных тогда проблем — теории движения искусственных спутников Земли с учетом ее несферичности. Константин Владиславович получил в диссертации новые результаты как в теории гравитационного потенциала (оценки гармоник), так и в аналитических методах построения решений уравнений небесной механики (радиусы сходимости рядов, эйлера промежуточная орбита).

Константина Владиславовича всегда интересовала проблема устойчивости и динамической эволюции Солнечной системы, а после открытия планет у других звезд — и экзопланетных систем. В 70-е гг. прошлого века на кафедре небесной механики ЛГУ рассматривались выводы об устойчивости Солнечной системы, которые можно сделать, исходя из теории Колмогорова—Арнольда—Мозера. И в дальнейшем проблема устойчивости планетных систем на космогонических временах рассматривалась во многих работах Константина Владиславовича и его учеников до самого последнего времени.

Существенные результаты получены под руководством Константина Владиславовича в классической небесно-механической задаче N тел при произвольном N в области больших энергий, где удалось доказать интегрируемость и конструктивно получить сходящуюся к точному решению последовательность функций. В связи с этим Константин Владиславович ввел понятие региональной интегрируемости.

Большое внимание Константин Владиславович уделял задачам, имеющим прикладное значение, работе по хоздоговорам с организациями, занимающимися проектированием и созданием космических аппаратов. В 1970—1980 гг. под его руководством на кафедре и в лаборатории небесной механики и звездной динамики Астрономической обсерватории ЛГУ проводились исследования возможных характеристик перспективных спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС). Позднее, в 1980-х гг., исследовались возможности передвижения космических аппаратов в дальнем космосе с использованием гравитационных маневров, а также солнечного паруса. В последние годы Константин Владиславович активно занимался задачами, связанными с проблемой астероидной опасности. В частности, им совместно с его учениками и соавторами рассмотрены возможности увода астероида от столкновения с Землей с использованием двигателя малой тяги. Много работал Константин Владиславович и в других областях небесной механики, в частности, им получены новые результаты в классической задаче двух тел, ограниченной задаче трех тел, обосновании асимптотических методов. Одна из последних его работ посвящена фигурам Плутона и его спутника Харона.

На кафедре Константин Владиславович славился умением выигрывать гранты, быстро и хорошо писать статьи. Мы помним, например, совместный российско-японский грант и нашу поездку в Японию для обсуждения научных проблем. Международное сотрудничество — одна из сильных сторон Константина Владиславовича. Под его руководством успешно защитили кандидатские диссертации аспиранты из Египта и Сирии. Константин Владиславович работал и с израильскими коллегами, будучи в научной командировке в Технионе (г. Хайфа, Израиль). Италия, Франция, Китай, Япония, Уругвай, Финляндия, Болгария —

трудно перечислить все страны, где он был в научных командировках. В разных странах работают ученики Константина Владиславовича, некоторые достигли серьезных успехов в научной карьере.

До последних дней своей жизни Константин Владиславович продолжал активную научную работу, будучи руководителем гранта Российского научного фонда, а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Достаточно сказать, что в 2020 г. у Константина Владиславовича с соавторами вышло шесть статей, и он принимал самое активное участие в их написании.

Константин Владиславович много и плодотворно занимался педагогической работой, известен в университете и за его пределами как прекрасный лектор. С 1991 г. являлся бессменным членом оргкомитета ежегодной Зимней студенческой научной конференции, проводимой на базе Уральского университета. Сегодня многие серьезные научные работники, бывшие на этой Зимней школе студентами, с благодарностью вспоминают и эту школу, и Константина Владиславовича. Студенты там учились докладывать и обсуждать свои первые научные работы вместе с ведущими астрономами России. А кроме того, было весело. Был КВАС — Клуб Веселых Астрономов, астрономический КВН. Константин Владиславович показывал, как танцевать вальс, как читать стихи, которых он знал множество и прекрасно умел их сочинять.

Среди учеников Константина Владиславовича 19 кандидатов и 5 докторов физико-математических наук, сейчас один из его учеников представляет кандидатскую диссертацию в диссертационный совет. Как научный руководитель Константин Владиславович отличался тем, что предоставлял своим ученикам большую свободу творчества. И всегда помогал им. Это касалось не только молодых студентов-аспирантов, но и таких заслуженных людей со сложившейся научной репутацией, как Вадим Анатольевич Антонов. Его сосредоточенность на науке была феноменальной, но во многих бытовых вопросах ему была нужна нянька, и этой нянькой был Константин Владиславович. Константин Владиславович познакомил своих сотрудников с корифеями советской небесной механики (В. И. Арнольд, М. Л. Лидов, Д. Е. Охочимский, В. В. Белецкий, Е. А. Гребеников и многие другие). Константин Владиславович тесно сотрудничал с небесными механиками Москвы (ГАИШ МГУ, ИПМ им. Келдыша и др.); Екатеринбурга, где сейчас заведует кафедрой его ученик; Томска, где создана замечательная школа небесной механики, многие ее молодые представители защищали диссертации в Совете при СПбГУ, где председателем был Константин Владиславович. И конечно, он тесно сотрудничал с ленинградскими-петербургскими астрономическими учреждениями (ИТА-ИПА РАН, ГАО РАН), для которых кафедра все время готовила кадры.

Широко известен Константин Владиславович как популяризатор науки, ведущий и участник многих телепередач, посвященных пропаганде науки и научного мировоззрения. Много лет он читал курс «Концепции современного естествознания» на философском факультете.

Константин Владиславович Холшевников — академик РАЕН, Академии космонавтики, член Нью-Йоркской академии наук, был председателем совета по защите докторских и кандидатских диссертаций при СПбГУ, членом четырех ученых советов. Кроме того, он член Международного астрономического союза, член редколлегии журнала «Вестник СПбГУ». Его имя носит малая планета № 3504.

Константин Владиславович Холшевников имеет многочисленные благодарности и награды:

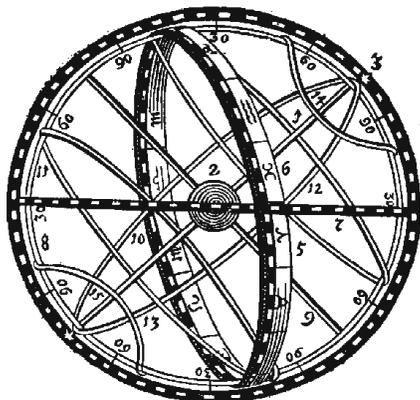
- памятная медаль Леонарда Эйлера, АН СССР, 1983;
- университетская премия за лучшую научную работу, ЛГУ, 1986;
- медаль С. П. Королева, Федерация космонавтики СССР, 1987;

- университетская премия за высокое педагогическое мастерство, СПбГУ, 1999;
- почетное звание «Заслуженный работник высшей школы РФ», 1999;
- Ветеран труда, 1999;
- медаль «В память 300-летия Санкт-Петербурга», 2003;
- нагрудный знак «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», 2004;
- памятная медаль Санкт-Петербургского университета, 2006;
- серебряная медаль «За вклад в российское просветительство» имени академика И. Ф. Образцова, общество «Знание», Санкт-Петербург, Ленинградская область, 2008;
- диплом № 1 лауреата Главной премии за 2008 г. МАИК «Наука/Интерпериодика» за лучшую книгу в области науки, технологии и образования, 2009;
- почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ» (Указ Президента РФ от 4 июня 2009);
- почетное звание и знак «Рыцарь науки и искусств», РАЕН, 2011;
- медаль «Подвижнику просвещения» в память 300-летия М. В. Ломоносова, общество «Знание» России, 2011;
- медаль «60 лет космическим войскам России», Межрегиональная общественная организация «Северо-Западный Союз "Ветераны космических войск"», 2018.

Коллеги Константина Владиславовича Холшевникова на кафедре небесной механики в Санкт-Петербургском государственном университете, а также в академических институтах хорошо знают его замечательные человеческие качества. За полвека его руководства кафедрой трудно вспомнить хоть один мало-мальски серьезный конфликт в нашем небольшом коллективе. Такое нечасто можно встретить, говорят наши знакомые из других организаций.

Безвременная кончина Константина Владиславовича — тяжелый удар как для науки, так и для всех нас, кто его знал. Мы навсегда сохраним о нем самые теплые воспоминания.

Студенческие доклады



ПЕКУЛЯРНЫЕ СКОРОСТИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД ТИПА Ia В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

Е. А. Балакина^{1,2}, М. В. Пружинская²

¹Физический факультет Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова, ²Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Наблюдения сверхновых Ia позволяют оценить значения космологических параметров при помощи диаграммы Хаббла. В первую очередь такие наблюдения дают значение постоянной Хаббла, которая является одним из основных космологических параметров. Повышение точности измерений данной величины представляет важную задачу для современной космологии, поэтому необходимо учитывать влияние пекулярных скоростей сверхновых на измерение красного смещения, используемое при построении диаграммы Хаббла. Мы изучаем вклад пекулярных скоростей, обусловленных движением родительских галактик в поле тяготения скопления галактик, для космологической выборки сверхновых PANTHEON.

PECULIAR VELOCITIES OF SUPERNOVAE Ia IN CLUSTERS OF GALAXIES

Е. А. Balakina^{1,2}, М. V. Pruzhinskaya²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, ²Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute

Observations of supernovae Ia make it possible to estimate the values of cosmological parameters using the Hubble diagram. First of all, such observations give us a value of the Hubble constant, which is one of the most important cosmological parameters. Improving the accuracy of measurements of this parameter is a priority for modern cosmological analysis. Therefore, it is necessary to take into account the influence of the peculiar velocities of supernovae Ia on the measurement of the redshift, which is used in constructing the Hubble diagram. We study the contribution of peculiar velocities due to the motion of host galaxies in the gravitational field of galaxy clusters for a cosmological sample of supernovae PANTHEON.

Изучение влияния пекулярных скоростей сверхновых (СН), обусловленных движением родительской галактики в скоплении галактик, проводилось для космологической выборки сверхновых PANTHEON. Данная выборка содержит СН из различных обзоров, которые были собраны и взаимно откалиброваны. Среди сверхновых PANTHEON 297 объектов имеют красное смещение $z < 0.15$. Для таких СН вклад пекулярных скоростей наиболее значим [1] (рис. 1). Для того чтобы идентифицировать сверхновые в скоплениях галактик, мы провели процедуру кросс-матча: взаимное сопоставление сверхновых из PANTHEON со скоплениями галактик из каталогов Planck-SZ [2] и MCXC [3], в которых скопления определялись по эффекту Сюняева–Зельдовича или по наличию мощного рентгеновского излучения горячего газа в центре скопления [4, 5].

Результатом начального этапа кросс-матча является выборка из 30 сверхновых и соответствующих им скоплений. На следующем шаге исследования мы определили дополнительные критерии сопоставления, чтобы учесть эффекты проекции. В итоговом списке

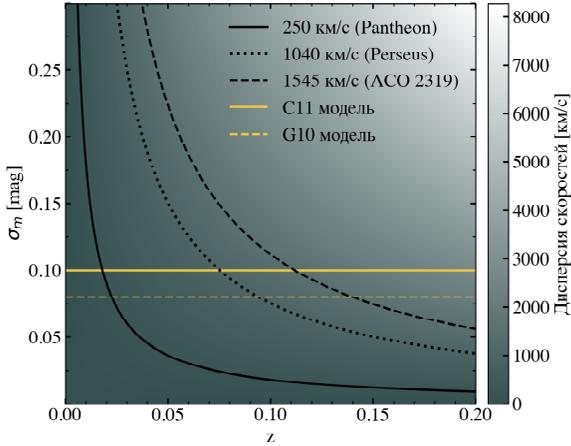


Рис. 1. Величина σ_m показывает дисперсию звездной величины, пересчитанную для различных значений дисперсии скоростей σ_v , для малых красных смещений. Желтая пунктирная и сплошная линии показывают принятое значение σ_m для двух моделей в PANTHEON

надежных сверхновых типа Ia в скоплениях оказалось 25 СН, для которых необходимо учитывать пекулярные скорости родительских галактик: использовать красное смещение скопления вместо красного смещения родительской галактики в качестве космологического z на диаграмме Хаббла. Для каждого скопления, которое содержало родительскую галактику СН, на основе данных SDSS (<https://www.sdss.org>) [6, 7] мы рассчитали величины красных смещений при помощи двухвесовой техники [8]. Для тех скоплений, для которых не было спектральных данных в обзоре SDSS, мы взяли данные из литературы. Для каждой СН в скоплении красное смещение родительской галактики заменялось на найденные красные смещения соответствующих им скоплений. На рис. 2 показана разница $\Delta\mu$ теоретического модуля расстояния и модуля расстояния, рассчитанного с использованием исправленного красного смещения.

В работе [1] проводился анализ на выборке близких сверхновых NEARBY SUPERNOVA FACTORY. Авторы показали, что поправка за пекулярные скорости в скоплениях галактик для красного смещения для 11 сверхновых дает статистически значимое уменьшение дисперсии на диаграмме Хаббла. Помимо такого анализа было проведено исследование в работе [9], которое показало, что вклад влияния пекулярных скоростей СН значительно больше вклада эффекта микролинзирования на измерения красного смещения при малых z . В данной работе мы рассмотрели космологическую выборку СН и обнаружили 25 объектов в скоплениях галактик. На рис. 2 показано, что пекулярные скорости родительских галактик СН действительно влияют на измерение модуля расстояния сверхновых. Данный эффект представляет интерес для дальнейшего изучения и определения его значимости, в частности, чтобы учитывать его влияние при работе с данными телескопов и обзоров нового поколения.

Е. А. Б. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» 20-2-1-34-1. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

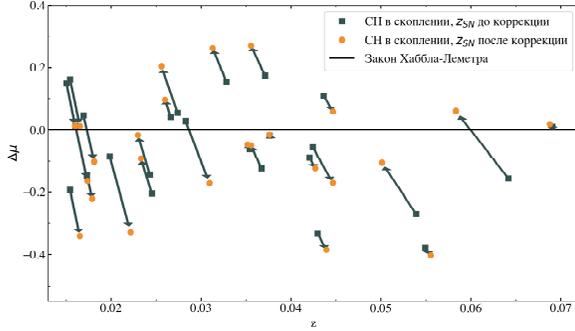


Рис. 2. Разность модуля расстояния μ на диаграмме Хаббла до поправки peculiarной скорости (зеленые квадраты) и после нее (оранжевые кружки). Закон Хаббла–Леметра показан черной сплошной линией

Библиографические ссылки

- [1] *Léget P. F., Pruzhinskaya M. V., Ciulli A. et al.* Correcting for peculiar velocities of Type Ia supernovae in clusters of galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 615. — P. A162. 1804.03418.
- [2] *Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al.* Planck 2015 results — XXIV. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts // *A&A.* — 2016. — Vol. 594. — P. A24.
- [3] *Piffaretti R., Arnaud M., Pratt G. W. et al.* The MCXC: a meta-catalogue of x-ray detected clusters of galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 534. — P. A109. 1007.1916.
- [4] *Boldt Uhu, McDonald Frank B., Riegler Guenter, Serlemitsos Peter.* Extended Source of Energetic Cosmic X Rays // *Phys. Rev. Lett.* — 1966. — Vol. 17, № 8. — P. 447–450.
- [5] *Sarazin Craig L.* X-ray emission from clusters of galaxies. — Cambridge Astrophysics Series, Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [6] *Wilson J. C., Hearty F. R., Skrutskie M. F. et al.* The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) Spectrographs // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2019. — Vol. 131, № 999. — P. 055001. 1902.00928.
- [7] *SDSS-IV Collaboration, Ahumada Romina, Allende Prieto Carlos et al.* The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2020. — Vol. 249, № 1. — P. 3. 1912.02905.
- [8] *Beers Timothy C., Flynn Kevin, Gebhardt Karl.* Measures of Location and Scale for Velocities in Clusters of Galaxies—A Robust Approach // *Astron. J.* — 1990. — Vol. 100. — P. 32.
- [9] *Habibi Farhang, Baghran Shant, Tavasoli Saeed.* Peculiar velocity measurement in a clumpy universe // *International Journal of Modern Physics D.* — 2018. — Vol. 27, № 3. — P. 1850019. 1412.8457.

ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛАЗАРА S5 0716+714 В АСПЕКТЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

М. А. Горбачев^{1,2}, М. С. Бутузова², С. В. Назаров²

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет,*

²*Крымская астрофизическая обсерватория РАН*

Оптическое излучение блазара S5 0716+714 формируется в его ультррелятивистском джете в компактной области, расположенной вблизи истинного начала струи. Предполагая, что переменность образуется только за счет изменения коэффициента релятивистского усиления излучения (доплер-фактора) для некоторой части излучающей области и что спектр излучающей области, характеризуемый степенным законом на наблюдаемых частотах, имеет завал на более низких частотах, вызванный синхротронным самопоглощением, мы анализируем архивные данные Крымской астрофизической обсерватории по B-, V-, R-, I-фотометрии блазара S5 0716+714 с 2002 по 2019 г. Получено объяснение наблюдаемому изменению показателя цвета при переменности блазара S5 0716+714 без изменений физических параметров источника.

COLOR CHARACTERISTICS OF THE BLAZAR S5 0716+714 UNDER GEOMETRICAL ORIGIN OF THE LONG-TERM VARIABILITY

M. A. Gorbachev^{1,2}, M. S. Butuzova², S. V. Nazarov²

¹*Kazan (Volga Region) Federal University,* ²*Crimean Astrophysical Observatory of RAS*

The optical radiation of the blazar S5 0716+714 is formed within its ultrarelativistic jet in a compact region located near the true origin of the jet. Assuming that the variability is formed only by changing the relativistic radiation amplification coefficient (Doppler factor) for some part of the emitting region and that the spectrum of the emitting region, characterized by a power law at the observed frequencies, has a turn-over at lower frequencies, caused by synchrotron self-absorption, we analyze the archival data of the Crimean Astrophysical Observatory of B-, V-, R-, I-photometry of the blazar S5 0716+714 from 2002 to 2019. An explanation for the observed change in the color index during the blazar S5 0716+714 variability without changes in the physical parameters of the source was obtained.

Введение

Блазары — класс активных ядер галактик (АЯГ), релятивистский джет которых направлен под малым углом ($< 10^\circ$) к лучу зрения. Вследствие релятивистских эффектов излучение, образованное в джете, усиливается в системе отсчета наблюдателя и преобладает над излучением других частей АЯГ. Непосредственно джеты на парсековых масштабах наблюдаются методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Самый длительный ряд РСДБ-наблюдений нескольких сотен АЯГ реализован на VLBA в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/index.html>). На радиокартах проявляются яркая компактная деталь, называемая РСДБ-ядром, и более протяженные и тусклые детали джета. В результате анализа этих данных доказано, что РСДБ-ядро, наблюдаемое на 15 ГГц, это область джета, в которой среда джета становится

оптически прозрачной для излучения данной частоты [1]. Учитывая то, что напряженность магнитного поля и концентрация электронов увеличивается при приближении к истинному началу струи согласно степенным функциям, и то, что в блазарах наблюдается временная задержка между событиями переменности на различных частотах: переменность на большей частоте лидирует и чем больше частотный интервал, тем больше время задержки (см., например, [2]), можно предположить, что излучающая в оптическом диапазоне область расположена ближе к истинному началу струи, чем РСДБ-ядро, и представляет собой часть джета, в которой среда становится оптически прозрачной для оптического излучения.

Обычно полагают, что если переменность возникает за счет геометрических эффектов (т. е. изменения коэффициента релятивистского усиления — доплер-фактора, вызванного изменением угла зрения и/или скорости излучающей области), то показатель цвета не изменяется при изменении яркости объекта. Изменение цвета объекта может быть вызвано только физическими процессами, происходящими в джете. При сделанных предположениях об излучающей в оптическом диапазоне области спектр ее вогнутый и увеличивающийся доплер-фактор некоторой ее части может приводить не только к увеличению общей интенсивности, но и к изменению показателя цвета. Мы анализируем эту возможность, используя данные фотометрических наблюдений блазара S5 0716+714 в полосах В, V, R, I системы Джонсона, выполненных на 70-см телескопе АЗТ-8 Крымской астрофизической обсерватории с 02.2002 по 06.2019.

Анализ данных

Так как при анализе мы используем формулы синхротронного излучения, то оперировать спектральной плотностью потока ($F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, где α — спектральный индекс) в этом случае удобнее, чем звездными величинами. Мы построили зависимости потоков в фильтрах В, V, R от потока в фильтре I (рис. 1). Наблюдаемые точки хорошо аппроксимируются прямыми, что может свидетельствовать о неизменном α переменного компонента, если поток постоянного компонента (F^c) находится на продолжении этих экспериментальных прямых (см., например, [3]). В нашем случае спектр взятого таким образом постоянного компонента не соответствует излучению никакой части АЯГ. Анализ спектра наблюдаемого излучения показал, что поток ниже 10 мЯн (в фильтре I) скорее всего производится только постоянным компонентом, находящимся в тусклом состоянии со спектральным индексом 2—2.5. Мы предполагаем, что точка, соответствующая постоянному компоненту, находится ниже прямых на рис. 1. Так как рассматриваемая нами область — часть джета, то при движении по изогнутой траектории изменяется ее доплер-фактор, что приводит к изменению F^c , только на более длительной временной шкале, чем изменения потока переменного компонента (F^{var}). Мы выбрали $F^c = 10, 30$ и 50 мЯн и $\alpha^c = 1.5$. Результаты для рассматриваемых в работе F^c подобны. Поэтому мы иллюстрируем только один случай: $F^c = 30$ мЯн. Полагая, что наблюдаемый поток — это сумма потоков переменного и постоянного компонентов и что спектральный индекс переменного компонента $-2.5 \leq \alpha^{\text{var}} \leq 2.5$, с использованием экспериментальных прямых мы получили наблюдаемый спектр переменного компонента в зависимости от его потока (рис. 2).

На рис. 3 показаны частоты ν'_I и ν'_V в системе отсчета, сопутствующей релятивистскому джету, которые соответствуют наблюдаемым частотам в фильтрах I и В: $\nu'_{I,V} = \delta_0 \nu'_{I,V} / (1+z)$, где δ_0 — доплер-фактор излучающей в оптическом диапазоне области, рассматриваемой нами как постоянный компонент; z — красное смещение объекта. В потоке джета возможно развитие (магнито)гидродинамических неустойчивостей и турбулентности, потому в некоторый момент у части излучающей области может увеличиться доплер-фактор из-за уменьшения угла между вектором скорости этой части с лучом зрения. Эту часть излучающей области мы рассматриваем в качестве переменного компонента.

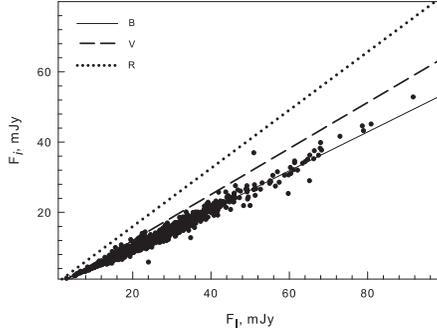


Рис. 1. Линейные аппроксимации наблюдаемого потока в фильтрах B, V, R относительно I по данным наблюдений АЗТ-8. Приведены точки данных для фильтра B, в котором они имеют наибольшие отклонения от линии аппроксимации

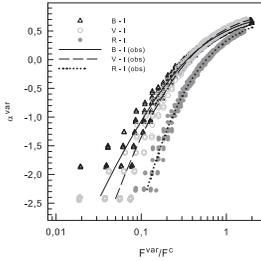


Рис. 2. Экспериментальная зависимость α^{var} (F^{var}) и соответствующие ей теоретические точки

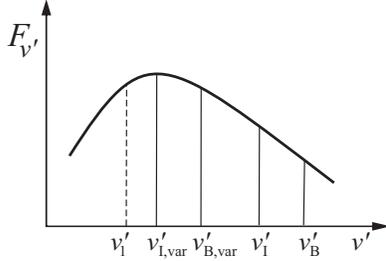


Рис. 3. Спектр излучающей области в системе отсчета, сопутствующей релятивистскому джету

Тогда в поток на наблюдаемых частотах ν_I и ν_B вносит вклад излучение, образованное на частотах $\nu'_{1,\text{var}}$ и $\nu'_{B,\text{var}}$ в системе отсчета источника. Как видно из рис. 3, спектр между этими частотами становится более плоским, что и приводит к наблюдаемому изменению показателя цвета.

Спектральный поток постоянного и переменного компонента при учете синхротронного самопоглощения выражается как

$$F_i = \delta^{2-5/2} Q'_i \nu_i^{5/2} (1+z)^{-3+5/2} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\nu_i (1+z)}{\delta \cdot \nu'_1} \right)^{-\alpha^c - 5/2} \right] \right\} \quad (1)$$

при подстановке соответствующих δ , α и коэффициентов Q' . В формуле (1) индекс i обозначает, что величина относится к соответствующему фильтру из рассматриваемых, ν'_1 — частота, для которой оптическая толщина среды равна единице. Для каждого фильтра, зная поток постоянного компонента и вводя параметр $D = Q'_{\text{var}}/Q'_c$, нашли потоки переменного компонента, которые использовали для определения α^{var} . При этом δ_{var} изменяли от 10 до 32 с шагом 0.1, ν'_1 — от 10^{13} до $9.5 \cdot 10^{13}$ Гц с шагом $0.5 \cdot 10^{13}$ Гц. Так как мы подразумеваем, что есть одна излучающая область, а переменность образуется за счет увеличения

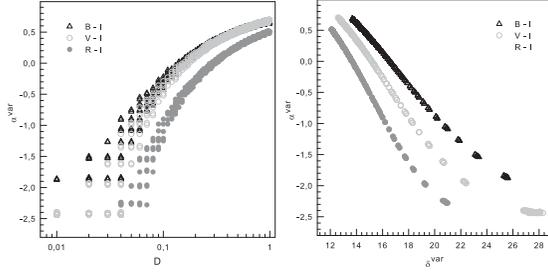


Рис. 4. Зависимость α^{var} от D (слева) и от δ_{var} (справа)

доплер-фактора некоторой части этой области, то магнитное поле и концентрация релятивистских электронов, входящие в Q'_c и Q'_{var} , одинаковые, следовательно, D определяется только отношением угловых размеров переменного и постоянного компонента. Поэтому D изменяли от 0.01 до 1 с шагом 0.01. Отбирали теоретические точки, попадающие в интервал $-2\sigma \leq F_{i,j}^{\text{var}} \leq 2\sigma$, где $\sigma = 0.65$ мЯн — стандартное отклонение значений потока переменной компоненты по данным наблюдений (см. рис. 2). Получили, что значения ν'_1 находятся в интервале $2 \cdot 10^{13} - 7 \cdot 10^{13}$ Гц, максимальное количество точек приходится на $\nu'_1 = 3.5 \cdot 10^{13}$ Гц, которую взяли для построения зависимостей α^{var} от D и от δ_{var} (рис. 4).

Выводы

Мы предположили, что оптическое излучение блазара S5 0716+714 приходит из области джета, в которой среда джета становится прозрачной для излучения данной частоты. При этом переменность потока излучения может возникать вследствие увеличения доплер-фактора некоторой части излучающей области. При вогнутом спектре излучающей области это приводит к изменению показателя цвета объекта при росте потока. На основе многолетних данных фотометрических наблюдений мы показали, что данная интерпретация объясняет наблюдаемые долговременные свойства переменности S5 0716+714. При этом чем меньше размер части области, ответственной за переменность, тем больший доплер-фактор ей присущ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФН (грант 19-72-00105).

Библиографические ссылки

- [1] *Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y. et al.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 545. — P. A113. 1207. 5457.
- [2] *Raiteri C. M., Villata M., Tosti G. et al.* Optical and radio behaviour of the BL Lacertae object 0716+714 // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 402. — P. 151–169. [astro-ph/0302518](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302518).
- [3] *Hagen-Torn V. A.* On the separation of components of radiation of variable extragalactic sources // *Astrofizika.* — 1985. — Vol. 22. — P. 449–460.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ БАРЫ: ВЗГЛЯД С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ДЕЙСТВИЯ

В. Д. Зозуля

Санкт-Петербургский государственный университет

Мы перевели результаты моделирования баров в N -body экспериментах на язык переменных действия J_R , L_z и J_z . Для этого мы использовали пакет AGAMA и формализм, связанный с потенциалом Штеккеля. Переменные действия считались в меняющемся неосесимметричном потенциале модели на различные моменты эволюции бара. Мы обнаружили, что на поздних стадиях эволюции бара максимальные значения J_R достигаются на его концах, после чего, при переходе к диску, J_R монотонно убывает. Что касается J_z , то максимальные значения J_z фактически очерчивают контуры В/PS балджа, наиболее толстой части бара. Такое поведение переменных действия можно использовать для тестов по выявлению особенностей бара нашей Галактики на основе данных GAIA.

GALACTIC BARS: A LOOK AT THE POINT OF VIEW OF ACTION VARIABLES

V. D. Zozulia

Saint-Petersburg State University

We have translated the results of bar modeling in N -body simulations into the language of action variables J_R , L_z and J_z . We used the AGAMA package and the formalism associated with the Steckel potential. Action variables were calculated in the changing non-axisymmetric potential of the model at different moments of the bar evolution. We found that at the later stages of the bar evolution, the maximum values of J_R are reached at its ends, after which, upon going to the disk, J_R decreases monotonically. As for J_z , the maximum values of J_z actually outline the B/PS bulge, the thickest part of the bar. Such a behavior of the action variables can be used for tests to identify the features of the bar of our Galaxy based on GAIA data.

Введение

Структура звездно-динамической системы полностью описывается фазовой плотностью, которая для равновесных систем, в свою очередь, является функцией интегралов движения. Среди интегралов движения, которые обычно используются для представления реальных и модельных галактик, выделяются переменные действия, так как их можно вычислить точно из орбит звезд или приближенно по мгновенным положениям и скоростям звезд в предположении, что потенциал может быть аппроксимирован потенциалом Штеккеля [1]. Преимуществом описания динамической системы в переменных действия является то, что вместо изменяющихся координат каждой отдельной звезды фактически рассматривается орбита звезды целиком. При этом каждой орбите ставится в соответствие три интеграла движения: радиальное действие J_R , азимутальное действие J_φ (или L_z в осесимметричном случае) и вертикальное действие J_z . Такой подход упрощает выделение различных динамических подсистем в рассматриваемой системе и позволяет сделать выводы о механизмах их образования. Для данных GAIA это было сделано в работе [2], где

было показано, что в пространстве переменных действия заметны так называемые “ridges” (хребты), связанные со спиральными рукавами и баром нашей Галактики.

В данной работе рассматривается структура распределения переменных действия орбит звезд, населяющих трехмерный бар модельной галактики, потенциал которой схож с потенциалом Млечного Пути. Как известно, звездные диски подвержены различного рода неустойчивостям, в том числе изгибной неустойчивости и бароподобной неустойчивости. В результате действия такого рода неустойчивостей галактика формирует так называемый V/PS (boxy/peanut shaped) балдж — бар, выросший в вертикальном направлении. Интегралы движения и переменные действия, как правило, не сохраняются во время развития неустойчивости. Однако после прошедшей бурной эволюции система приходит в квазистационарное состояние, для которого формализм, связанный с переменными действия, можно применять даже в условиях неосесимметричного потенциала. Так, в работе [3] было показано, что для отдельных звезд вблизи коротации и внешнего резонанса Линдблада переменные действия осциллируют вокруг некоторого среднего значения. В данной работе будет исследовано, как распределены переменные действия в сформировавшемся V/PS балдже. Также будут выделены различные особенности этих распределений, которые в будущем помогут лучше понять структуру бара нашей Галактики.

Модель

Мы использовали одну из N -body моделей из [4], чтобы вычислить действия для всех звезд. Начальная равновесная модель состоит из экспоненциального диска, изотермического в вертикальном направлении, который погружен в гало темной материи. Гало моделируется самосогласованным образом. Для его описания используется сферически симметричная модель с профилем плотности, близким к профилю Наварро–Френка–Вайта [5]. Для задания начальных условий использовалась утилита `mkGalaxy` из [6].

Детали численного моделирования следующие. Мы рассматриваем динамически холодный диск со значением параметра Тоомре $Q = 1.2$ на расстоянии $R = 2R_d$, где R_d — радиальный масштаб диска. Значения размерных параметров выбирались так, чтобы модель была близка к нашей Галактике. Мы полагаем $R_d = 3.5$ кпк и $M_d = 5 \cdot 10^{10} M_\odot$, где M_d — масса диска. Тогда единица времени будет равна $t_\approx \approx 14$ млн лет. Параметры темного гало были выбраны так, чтобы его относительная масса в пределах четырех радиальных масштабов диска $M_h(r < 4R_d)/M_d$ была приблизительно равна 1.5. В расчетах мы используем $4kk$ частиц для диска и $4.5kk$ для гало. Эволюция модели была прослежена с помощью кода `gyrfalcon` [7] примерно до 8 млрд лет ($t = 600$).

К моменту времени $t = 100$ в системе образуется бар, амплитуда которого растет со временем, а скорость узора постепенно замедляется. К моменту $t = 200$ бар испытывает быструю потерю симметрии в вертикальном направлении (buckling), после чего симметрия восстанавливается, а у самого бара выделяется толстая внутренняя часть. При взгляде с ребра сформировавшаяся структура напоминает арахис. Подобные структуры в литературе принято называть V/PS балджами.

Переменные действия

Переменные действия J_R , L_z и J_z вычислялись с помощью пакета `AGAMA` [8]. Для этого в каждый момент времени для представления гравитационного потенциала модели мы брали те гармоники в представлении потенциала темного гало и диска, которые отвечают за осесимметричное распределение частиц галактики. Затем мы вычисляли переменные действия на ряд моментов времени, используя формализм, основанный на приближении

потенциала потенциалом штеккелевского вида [1]. Данный метод находит переменные действия намного быстрее, чем прямой. Например, чтобы численно найти значение J_R и J_z для $4kk$ частиц диска на один момент времени, нам потребовалось около 5 ч, тогда как с использованием приближения Штекеля эта процедура занимает всего 2 мин. Относительная погрешность метода по сравнению с численным в среднем составила $\sim 1\%$ при максимальном отклонении $\sim 5\%$, что согласуется с выводами из оригинальной статьи [8].

В отличие от работы [9] мы действительно вычисляли переменные действия в меняющемся потенциале галактики, а не только на начальный момент времени. Тем самым мы смогли определить, как эти величины изменяются для отдельных частиц, а также в целом проследить, как эволюционирует распределение переменных действия по галактике по мере того, как формируется бар, а в последующем и В/PS балдж. Тем самым мы смогли связать особенности в распределении переменных действия с морфологическими особенностями галактики.

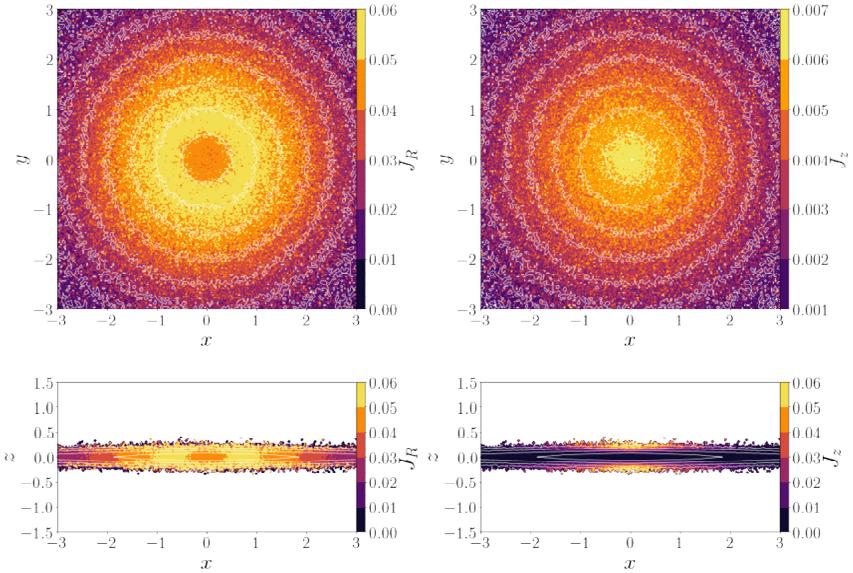


Рис. 1. Карты начального распределения действий J_R (слева) и J_z (справа). Вверху: плоскость xy ; внизу: на плоскости xz показаны средние значения переменных действия в полосе $|y| < 1$. Белые контуры — линии одинаковой поверхностной плотности

Результаты

Распределение средних значений действий J_R и J_z в проекции на плоскости xy и xz на начальный момент времени и на момент времени $t = 400$, когда сформировались и бар, и В/PS балдж, а скорость узора меняется уже медленно, приведено на рис. 1 и 2. Карты на начальный момент приведены лишь для последующего сравнения, поскольку модель неустойчива и потенциал, вплоть до формирования бара, быстро меняется. Распределение среднего значения L_z тоже строилось, но поведение этой величины предсказуемо: угловой

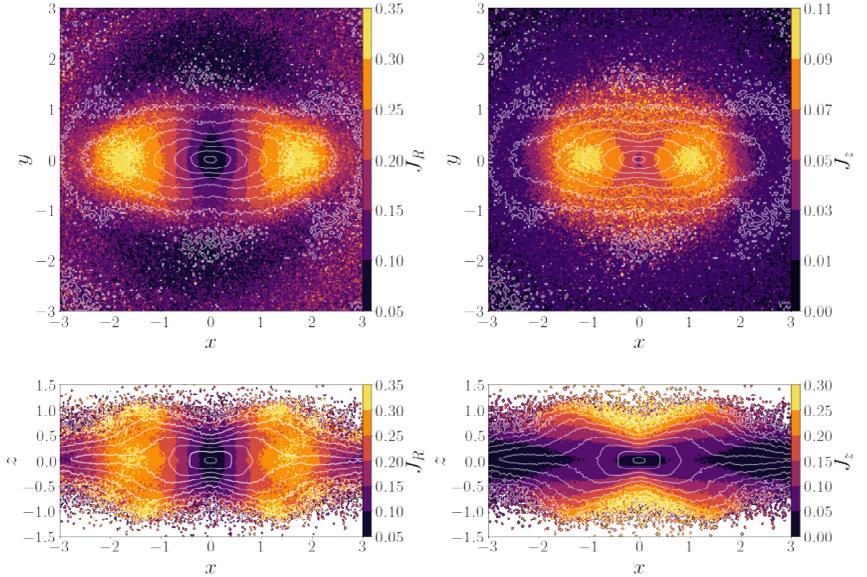


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для $t = 400$. Большая ось бара идет вдоль оси x

момент растет наружу и в начальный момент, и в последующие, поэтому карты для этой величины не приводятся. Карты J_R и J_z в начальный момент времени показывают другую тенденцию; J_R достигает пика на $R \approx 1$, а затем уменьшается к периферии. Уменьшение J_R объясняется тем, что на периферии орбиты становятся близкими к круговым. Действие J_z при $t = 0$ уменьшается от центра к периферии, при этом отличные от нуля значения J_z характерны для частиц на больших z .

При формировании бара потенциал галактики претерпевает сильные изменения, и перемные действия не сохраняются для отдельных частиц. Изменяется и распределение их средних значений по звездному диску. При $t = 400$ средние значения J_R и J_z не просто вытягиваются вдоль большой оси бара, но их максимальные значения достигаются ближе к концам В/PS балджа (толстой части бара, см. проекцию xz на рис. 2).

При этом в проекции xz сохраняется начальная слоистая структура распределения этих величин. Значения J_R структурированы по вертикальным срезам, а значения J_z — по горизонтальным.

Наиболее интересные особенности видны на карте J_R в проекции xz . Здесь вырезана полоска $|y| < 1$. Бар практически полностью укладывается в эту полоску, и усреднение величины J_R идет по частицам бара так, что внешние части диска при этом не участвуют. Таким образом, карта J_R в проекции xz описывает вертикальную структуру бара и ее особенности. Видно, что максимумы J_R приходятся не просто на концы толстой части бара, а частично идут вдоль лучей Х-структуры — наиболее яркой части В/PS балджа.

Обсуждение и выводы

Мы связали особенности структуры бара (B/PS балджа), возникающего в N -body модели, с особенностями распределения величины J_R . Вычисление действий на основе данных GAIA сейчас стало модной темой [2, 3]. По большей части эти данные используются для поиска резонансных орбит вблизи коротации и внешнего резонанса Линдблада. Полученные нами результаты можно использовать для уточнения структуры бара нашей Галактики, а именно для выделения X-структуры на фоне различных центральных компонент и определения ее протяженности в вертикальном направлении.

Библиографические ссылки

- [1] *Binney James*. Actions for axisymmetric potentials // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 426, № 2. — P. 1324–1327. 1207.4910.
- [2] *Trick Wilma H., Coronado Johanna, Rix Hans-Walter*. The Galactic disc in action space as seen by Gaia DR2 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 484, № 3. — P. 3291–3306. 1805.03653.
- [3] *Trick Wilma H., Fragkoudi Francesca, Hunt Jason A. S. et al*. Identifying resonances of the Galactic bar in Gaia DR2: I. Clues from action space // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — Vol. 500, № 2. — P. 2645–2665. 1906.04786.
- [4] *Smirnov Anton A., Sotnikova Natalia Ya*. What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 481, № 3. — P. 4058–4076. 1809.06167.
- [5] *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* The Structure of Cold Dark Matter Halos // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 462. — P. 563. astro-ph/9508025.
- [6] *McMillan P. J., Dehnen W.* Initial conditions for disc galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — Vol. 378. — P. 541–550. astro-ph/0703534.
- [7] *Dehnen W.* A Hierarchical $O(N)$ Force Calculation Algorithm // Journal of Computational Physics. — 2002. — Vol. 179. — P. 27–42. astro-ph/0202512.
- [8] *Vasiliev Eugene*. AGAMA: action-based galaxy modelling architecture // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 482, № 2. — P. 1525–1544. 1802.08239.
- [9] *Debatista Victor P., Liddicott David J., Khachatryan Tigran, Beraldo e Silva Leandro*. Box/peanut-shaped bulges in action space // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. — Vol. 498, № 3. — P. 3334–3350. 1911.01084.

АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПЕРЕМЕННОЙ HS 2231+2441

Е. П. Корчагина

Казанский (Приволжский) федеральный университет

В работе выполнены анализ фотометрических наблюдений и определение параметров молодой предкатаклизмической переменной с sdB-субкарликом, HS 2231+2441. При дифференциальной обработке наблюдений построены кривые блеска объекта в полосах V и R. Их модельный анализ проведен с применением моделей облучаемых звездных атмосфер при совместном учете эффектов отражения и несферичности компонент. В итоге оптимального описания наблюдаемых кривых блеска переопределена часть параметров системы: угол наклона и большая полуось орбиты, радиусы и массы компонент HS 2231+2441. Полученный набор параметров хорошо соответствует современным представлениям о характеристиках подобных систем.

ANALYSIS OF PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF THE VARIABLE HS 2231+2441

E. P. Korchagina

Kazan Federal University

The paper analyzes photometric observations and determines the parameters of a young precataclysmic variable with the subdwarf B, HS 2231+2441. During differential processing of observations, the light curves of the object in the V and R bands were constructed. Their model analysis was carried using models of irradiated stellar atmospheres with the combined consideration of the effects of reflection and nonsphericity of the components. As a result of the optimal description of the observed light curves, some of the parameters of the system were redefined: the inclination angle and semi-major axis of the orbit, the radii and masses of the components of HS 2231+2441. The resulting set of parameters is in good agreement with modern ideas about the characteristics of such systems.

Введение

HS2231+2441 — система типа HW Vir, главная компонента которой является sdB-субкарликом. Эта звезда средней массы, вышедшая на постгоризонтальную ветвь диаграммы Герцшпунга—Рессела и имеющая гелиевое ядро без ядерных реакций. Вторичная компонента — коричневый карлик. Набор параметров системы в работе [1] вызывает сомнения, так как оценка массы главной компоненты ($M_1 = 0.24 \pm 0.05 M_\odot$) много ниже типичных значений масс sdB-субкарликов ($M = 0.46\text{--}0.48 M_\odot$). Поэтому актуальной задачей является повторный анализ наблюдений системы и переопределение ее фундаментальных параметров.

Методика обработки и анализа наблюдений

Была проведена первичная обработка фотометрических наблюдений HS 2231+2441 в полосах фильтров V и R в программе Maxim DL 5. Наблюдения получены с помощью

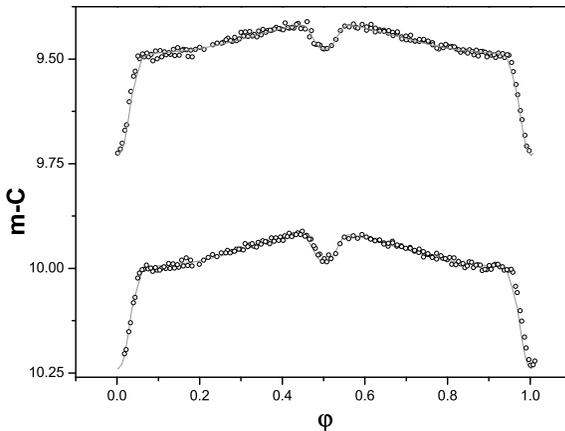
ПЗС-матрицы ANDOR на телескопе РТТ150 21 и 23 августа 2019 г. и охватывают несколько орбитальных периодов. В качестве рабочей области использовался участок матрицы размером 2048×400 пикселей. По итогам анализа вариаций блеска постоянных звезд поля было найдено, что ошибки дифференциальной фотометрии составили в полосе V $\sigma \approx 0.007^m$ и $\sigma \approx 0.009^m$ в полосе R. Далее наблюдаемые кривые блеска были переведены в шкалу гелиоцентрических юлианских дат HJD и далее в шкалу фаз φ с применением эфемериды из работы [1].

Полученные кривые блеска полностью соответствуют кривым для предкатаклизмической переменной типа HW Vir. В них выделяются главное ($\Delta m_{V,R} = 0.23^m$) и вторичное ($\Delta m_R = 0.066^m$, $\Delta m_V = 0.058^m$) затмения и участки внезатменных изменений блеска ($\Delta m_R = 0.087^m$, $\Delta m_V = 0.079^m$), обусловленных совместным действием умеренных эффектов отражения и несферичности компонент.

Расчет теоретических кривых блеска проводился с применением программного комплекса SPECTR [2], использующего модели облучаемых атмосфер звезд в ТДС с учетом эффектов несферичности и отражения. При их согласовании с наблюдениями варьировались радиусы компонент R_2 и R_1 и угол наклона орбиты i . Температура главной компоненты $T_{eff} = 28\,500$ К считалась фиксированной по итогам анализа спектров, а температура вторичной компоненты не влияла на кривые блеска. Значение большой полуоси системы $a = 0.79 R_\odot$ было заранее переопределено в предположении массы главной компоненты $M_1 = 0.47 M_\odot$.

Результаты и их обсуждение

Из наилучшего согласования теоретических и наблюдаемых кривых блеска HS 2231+2441 получены следующие значения ее параметров: $i = 78.7^\circ$, $R_1 = 0.206 R_\odot$ и $R_2 = 0.102 R_\odot$. Результат моделирования представлен на рисунке.



Кривые блеска HS 2231+2441 в полосе V (снизу) и R (сверху), где точками показаны данные наблюдений, а линиями — модельные кривые

Нами достигнуто корректное описание наблюдаемых кривых блеска в обеих полосах с точностью не хуже средних ошибок дифференциальной фотометрии ($\sigma m = 0.008^m$). Полученные параметры системы существенно отличаются от представленных в работе [1]. В частности, оценка радиуса коричневого карлика $R_2 = 0.102 R_\odot$ на 25–35 % превосходит значения $R_2 = 0.74\text{--}0.86 R_\odot$, найденные ранее в рамках чернотельных моделей с разными коэффициентами отражения. Соответствующий рост оценки радиуса главной компоненты $R_1 = 0.206 R_\odot$ варьируется в пределах 25–42 % по сравнению со значениями $R_1 = 0.144\text{--}0.206 R_\odot$ из [1].

Исправленная величина R_1 в целом позволяет решить проблему аномально низкой массы sdB-субкарлика в HS 2231+2441. Комбинируя использованные нами значения R_1 и M_1 , можно вычислить силу тяжести на поверхности субкарлика на уровне $\log g = 5.48$, что почти соответствует ее оценке, полученной из моделирования спектров $\log g = 5.40 \pm 0.05$ [1]. Оставшиеся различия могут быть обусловлены ошибками определения T_{eff} и $\log g$ sdB-субкарлика вследствие анализа всех спектров системы. В работах по изучению систем типа HW Vir ранее было показано, что спектры в максимуме блеска существенно искажаются эффектами отражения и непригодны для определения параметров атмосфер главных компонент. Поэтому в данный момент актуальной является задача повторного получения и анализа спектров системы в фазах минимума блеска без проявлений эффектов отражения.

Таким образом, все особенности затменной и внезатменной переменности HS 2231+2241 полностью соответствуют системам типа HW Vir, подтверждая ее принадлежность к данной группе объектов. Последующий анализ ее кривых блеска и спектров можно проводить на основе стандартных методик моделирования, применявшихся ранее при изучении подобных систем.

Библиографические ссылки

- [1] Almeida L. A., Daminieli A., Rodrigues C. V. et al. HS 2231+2441: an HW Vir system composed of a low-mass white dwarf and a brown dwarf? // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 472, № 3. — P. 3093–3100. 1708.04623.
- [2] Shimansky V. V., Borisov N. V., Shimanskaya N. N. The Impact of Reflection Effects on the Parameters of the Old Pre-Cataclysmic Variables MS Peg and LM Com // Astronomy Reports. — 2003. — Vol. 47, № 9. — P. 763–776.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСА СКОПЛЕНИЯ ПО РАДИАЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ ПЛОТНОСТИ

М. В. Кулеш, А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

Представлен численный метод определения радиуса звездного скопления с помощью радиального профиля поверхностной плотности. Метод реализует алгоритм глазомерной оценки, но минимизирует субъективность, его результаты хорошо согласуются с глазомерными оценками радиуса рассеянного скопления NGC 2516.

METHOD FOR DETERMINATION OF CLUSTER RADIUS FROM RADIAL DENSITY PROFILE

M. V. Kulesh, A. F. Seleznev
Ural Federal University

We propose the numerical method for determining the radius of a star cluster using its radial surface density profile. The method realizes the algorithm of an eye estimate but minimizes a subjectivity; its result is in a good agreement with the eye estimate of the radius for the open cluster NGC 2516.

Введение

Радиус рассеянного скопления сложно определить однозначно. Тем не менее его оценка нужна для целого ряда задач: для построения функции светимости, оценки вероятности принадлежности звезд к скоплению, исследования динамики скопления, построения численных моделей скопления и др.

В предположении о сферической симметрии распределения звезд скопления радиус можно оценить с помощью радиальных профилей плотности по методике [1]. Радиальный профиль плотности — это зависимость поверхностной плотности $F(r)$ от расстояния r от центра скопления (рис. 1).

Радиус скопления определяется как расстояние от центра скопления, на котором профиль выходит на уровень плотности фона, после чего меняется слабо. Критерием для этого в [1] было предложено использовать равенство площадей фигур, заключенных между профилем плотности и линией плотности фона выше и ниже этой линии. В работах [1–3] для определения радиуса скоплений применялась глазомерная оценка выполнения этого критерия. Целью настоящей работы являются разработка и проверка численного алгоритма, формализующего эту процедуру.

Описание алгоритма

Через каждую точку радиального профиля плотности ($r, F(r)$) проведем горизонтальную прямую. Оценим разницу между площадью, заключенной между профилем и этой

прямой в фигурах над прямой, и площадью, заключенной между профилем и этой прямой в фигурах под прямой, справа от точки r . Для этого посчитаем следующий интеграл:

$$I_{diff}(r) = \int_r^{r_{max}} |F(r) - F(r')| dr', \quad (1)$$

где $I_{diff}(r)$ — искомая интегральная разница; r_{max} — максимальное расстояние от центра скопления.

Фрагмент графика интегральной разницы показан на рис. 2.

Радиусом скопления мы называем первую точку, на которой этот интеграл достигает локального минимума со значением в точке минимума меньше задаваемого нами порогового значения ϵ .

После определения R_{cl} значение средней плотности фона задается как $F_b = F(R_{cl})$; ошибки определения параметров определяются с помощью пересечения прямых $r = R_{cl}$ и $F = F_b$ границ доверительного интервала радиального профиля.

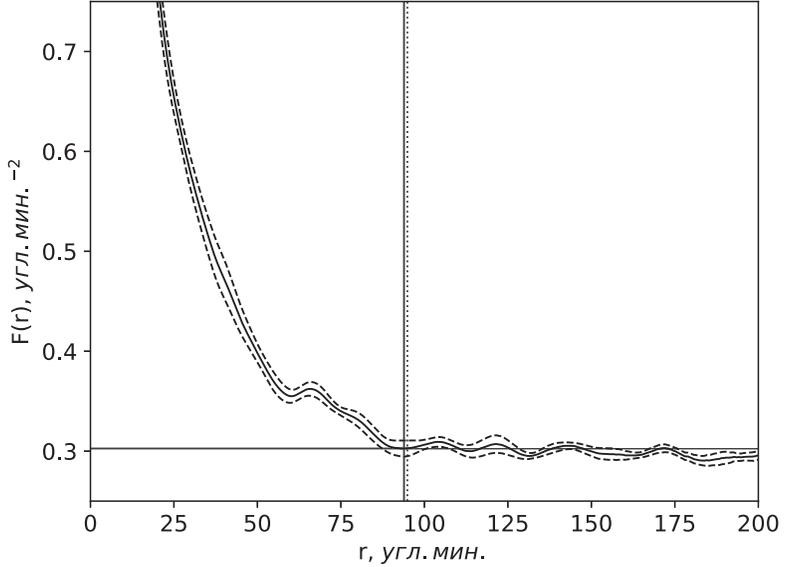


Рис. 1. Радиальный профиль скопления NGC 2516 (сплошная линия) и его доверительный интервал (штриховые линии). Горизонтальной прямой указан уровень фона $F_b = 0.30 \pm 0.01$, вертикальной сплошной прямой — значение радиуса $R_{cl} = 94 \pm 7'$, рассчитанного алгоритмом по первому локальному минимуму интеграла I_{diff} , который меньше $\epsilon = 1$, вертикальной пунктирной — значение радиуса $R_{cl} = 95 \pm 6'$, полученное с помощью глазомерной оценки, чтобы профиль над уровнем фона и под ним описывал примерно равную площадь

Алгоритм был реализован на языке Python, на его вход нужен таблично заданный радиальный профиль поверхностной плотности скопления вместе с границами доверительного

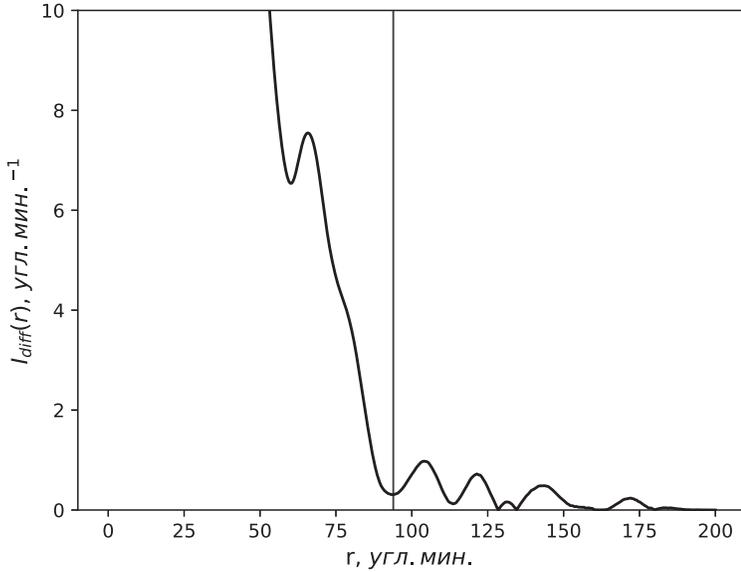


Рис. 2. Интегральная разность $I_{diff}(r)$: радиусом скопления (отмечен вертикальной прямой) считаем первый локальный минимум этой функции, который меньше выбранного нами порогового значения ε

интервала, на выходе получаются значения R_{cl} и F_b вместе с оценками ошибки их определения, а также график с соответствующим образом отмеченными прямыми, что позволяет визуально контролировать адекватность работы алгоритма. В рамках реализуемой программы $\varepsilon = 1$ при меньших параметрах R_{cl} слишком завышается по сравнению с глазомерными оценками.

Обсуждение и выводы

Как глазомерные оценки, так и предлагаемый численный метод основаны на сравнении площадей фигур, расположенных выше и ниже линии плотности фона и ограниченных линией профиля плотности [1]. Площадь фигуры может быть представлена как сумма площадей прямоугольников $\Delta r \cdot \Delta F = \Delta r \cdot (F(r) - F_b)$ при $\Delta r \rightarrow 0$. Таким образом, метод сравнения площадей аналогичен методу минимизации первой степени отклонения аппроксимируемой функции от модели (в данном случае от прямой линии). Согласно [4] минимизация степеней меньше 2 позволяет лучше выделить моду распределения в случае малых выборок и распределения минимизируемой величины, отличающегося от нормального, по сравнению с методом наименьших квадратов.

Работа предлагаемого численного метода была проверена на скоплении NGC 2516 с использованием данных Gaia DR2 [5, 6] до предельной величины $G = 18^m$. Это скопление было выбрано потому, что для него в работе [1] была получена глазомерная оценка радиуса

по данным каталога 2MASS [7], и потому, что на примере этого скопления авторы изучают различные методы выделения вероятных членов скопления.

Полученное с помощью предлагаемого алгоритма значение радиуса скопления NGC 2516 $R_{cl} = 94 \pm 7'$ в пределах ошибки неплохо соотносится со значениями $R_{cl} = 88-92'$, полученными для этого скопления в работе [1] для разных предельных величин по данным 2MASS, а также со значением $R_{cl} = 95 \pm 6'$, полученным для этого скопления с помощью глазомерной оценки по данным Gaia DR2 (см. рис. 1). Значение плотности фона для данных Gaia DR2, полученных с помощью глазомерной оценки и с помощью предлагаемого численного метода, не различается в пределах толщины линии на рис. 1.

Таким образом, предложенный в настоящей работе численный алгоритм для определения радиуса звездного скопления по его радиальному профилю поверхностной плотности хорошо воспроизводит результаты, полученные с помощью глазомерных оценок. При этом субъективный фактор сводится лишь к выбору порогового значения ϵ для минимума функции интегральной разницы.

Предложенный алгоритм можно использовать и в случае радиального профиля плотности, полученного в виде гистограммы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема No. FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Seleznev A. F.* Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 456, № 4. — P. 3757–3773.
- [2] *Yeh F. C., Carraro G., Montalto M., Seleznev A. F.* Ruprecht 147: A Paradigm of Dissolving Star Cluster // Astron. J. — 2019. — Vol. 157, № 3. — P. 115.
- [3] *Danilov V. M., Seleznev A. F.* On the motion of stars in the Pleiades according to Gaia DR2 data // Astrophysical Bulletin. — 2020. — Vol. 75, № 4. — P. 407–424.
- [4] *Loktin A. V.* Minimization of the small powers of deviations as one of the robust methods // Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires. — 1990. — Vol. 38. — P. 115–117.
- [5] *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J. H. J. et al.* The Gaia mission // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 595. — P. A1.
- [6] *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // Astron. Astrophys. — 2018. — Vol. 616. — P. A1.
- [7] *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // Astron. J. — 2006. — Vol. 131, № 2. — P. 1163–1183.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Д. Д. Лисицин, А. В. Кузин

Московский государственный университет

Нами разработана методика выделения комплексов звездообразования в других галактиках на основании анализа карт излучения в различных спектральных диапазонах. В 17 близких галактиках нами были отобраны кандидаты в комплексы звездообразования на основании трех критериев, а именно исходя из наличия излучения полициклических ароматических углеводородов, излучения холодной пыли и ультрафиолетового излучения молодых звезд. Сопоставив информацию, полученную с помощью этих критериев, мы составили выборку комплексов звездообразования для выявления корреляций между различными индикаторами звездообразования.

IDENTIFICATION OF EXTRAGALACTIC STAR FORMING COMPLEXES

D. D. Lisitsin, A. V. Kuzin

Moscow State University

We developed a technique for selecting star forming complexes in external galaxies based on an analysis of radiation maps in various spectral bands. Using this method, we identified star formation complex candidates in 17 nearby galaxies applying three criteria. These criteria are polycyclic aromatic hydrocarbon emission, dust emission, and ultraviolet young star emission. Relating the information derived from these criteria, we made a sample of star forming regions suitable for revealing correlations between various star formation tracers.

Существующие модели звездообразования в значительной степени опираются на данные об этом процессе, полученные для нашей Галактики. Однако в настоящее время есть возможность детально исследовать рождение звезд и во многих других галактиках. Одним из способов такого исследования является изучение областей активного звездообразования (комплексов звездообразования, КЗО) в других галактиках, включающее в себя сопоставление данных о КЗО в разных диапазонах электромагнитного спектра. Оно в том числе позволяет выявлять ситуации, когда кандидат в КЗО различим в диапазоне, характерном для излучения пыли, но не наблюдается в эмиссионных линиях CO и HI. Эта информация может способствовать подтверждению или опровержению некоторых моделей звездообразования. Для решения данной задачи необходимо тщательно подойти к процедуре выделения КЗО, которая осложняется существенными различиями наблюдательных данных в различных спектральных диапазонах (в первую очередь различным угловым разрешением). В данной работе мы анализируем возможные проблемы, возникающие при выделении КЗО в различных диапазонах.

Для выполнения анализа мы отобрали 17 близких галактик при помощи базы данных HyperLeda [1]. Критериями отбора служили: расстояние не более 15 Мпк (позволяющее выделять КЗО на картах с наилучшим угловым разрешением), принадлежность галактики к спиральному или иррегулярному морфологическому типу (т. е. к типу с активным звездообразованием), наклон плоскости галактики к картинной плоскости менее 45° , наличие качественных изображений галактики на длинах волн 8 и 160 мкм (данные телескопов “Spitzer” [2] и “Herschel” [3]), а также в ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (данные телескопа GALEX [4]).

Таблица 1. Распределение апертур по типам на длинах волн 8 и 160 мкм (апертуры на 160 мкм). Описание типов см. в тексте. Диаметры апертур на длине волны 8 мкм заключены в пределах от 3 до 14'' (FWHM_{8мкм} = 3''), на длине волны 160 мкм — от 12 до 28'' (FWHM_{160мкм} = 11'').

Галактика	Единичный тип	Групповой тип	Пустой тип	Неправильный тип	Всего
NGC 628	12	11	1	29	53
IC 2574	32	5	127	14	178
Holmberg II	6	0	63	9	78
NGC 3938	5	8	0	3	16
NGC 4736	1	2	0	5	8
NGC 5194	13	8	2	11	34
NGC 5457	5	0	2	26	33
UGC 5423	1	0	2	2	5
UGC 8201	1	0	6	3	10
Holmberg I	3	0	11	7	21
NGC 1291	9	1	15	14	39
NGC 3184	6	13	1	13	33
NGC 4254	7	15	4	9	25
NGC 4789A	4	0	18	4	26
NGC 5236	25	9	1	17	52
NGC 6946	24	10	5	20	59
UGC 4459	2	0	1	6	9

После отбора галактик в них были вручную выделены кандидаты в КЗО. Критерием для выделения служило наличие пика эмиссии в одном из трех рассматриваемых диапазонов: 8 мкм, 160 мкм и ближний УФ. Затем мы провели сравнительный анализ кандидатов, чтобы уточнить отбор.

Опишем кратко процесс выделения кандидатов в КЗО. Для первых трех галактик в табл. 1 работа с каждой картой выполнялась авторами статьи независимо. Исходя из углового разрешения снимка мы выделяли от 20 до 200 областей в виде круговых апертур. Затем две карты с выделенными областями накладывались друг на друга и в итоговом списке оставались лишь те области, которые присутствовали в обеих выборках.

Независимое выделение КЗО в трех галактиках различных морфологических типов показало, что в подавляющем большинстве случаев оба автора выделяли одни и те же области; расхождение выборок не превышало нескольких процентов. Поэтому для остальных галактик выделением потенциальных КЗО занимался один человек на галактику.

Чтобы проверить, является ли выделенная нами область единым объектом, мы разработали алгоритм сравнения карт в разных диапазонах. Допустим, мы рассматриваем карты одной галактики в двух различных фотометрических полосах. На обеих картах нами уже выделены апертуры, которые мы ассоциируем с КЗО. Каждой области на карте с худшим угловым разрешением (из двух рассматриваемых) разработанная нами программа приписывает один из типов (см. рисунок):

1. Единичный тип — область, причем единственная в окрестности, имеется на обеих картах. Мы считаем это наиболее надежным критерием отбора КЗО.
2. Групповой тип — одной области на первой карте соответствует несколько областей на второй карте. Мы считаем это антикритерием отбора КЗО, поскольку один КЗО, выделенный на карте с худшим разрешением, на самом деле включает в себя несколько КЗО, возможно, с разными параметрами, например, КЗО разных возрастов.
3. Пустой тип — область присутствует на одной карте, но отсутствует на другой (т. е. на нее не накладываются области со второй карты). Такую ситуацию мы считаем антикритерием отбора КЗО, однако отмечаем как заслуживающую дальнейшего исследования.

4. Неправильный тип — область, не вошедшая по критериям ни в один из вышеописанных типов.

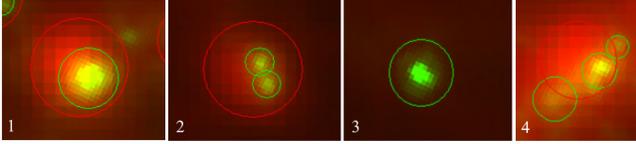


Иллюстрация типов, описанных в тексте. Красный цвет соответствует областям и апертурам на длине волны 160 мкм, зеленый — областям и апертурам на длине волны 8 мкм

Фактически для сопоставления различных индикаторов звездообразования и (или) состояния межзвездной среды непосредственно подходят только области единичного типа. Работая с такими областями, можно надеяться, что в данной области пространства находится ровно одна область звездообразования.

Если выделенная область принадлежит к групповому типу, это может означать, что мы имеем дело с одним КЗО, в котором находятся несколько областей звездообразования. Надо иметь в виду, что групповой тип может реализоваться и в случае наложения разных КЗО друг на друга, поэтому исследовать такие объекты надо с осторожностью.

Пустой тип соответствует случаю отсутствия излучения от области в одной или нескольких полосах. Такие области нетипичны, если исходить из теоретических предположений. Однако, согласно статистике, их не меньше, чем областей единичного типа. В дальнейших исследованиях необходимо объяснить значительную долю таких «нетипичных» областей.

Помимо этого во всех галактиках мы использовали карты излучения в полосе V, чтобы по возможности исключить из рассмотрения звезды переднего фона нашей Галактики. Для этого из итоговых списков были исключены области, которые не светятся в одном из рассматриваемых диапазонов (NUV, 160 мкм, 8 мкм), но видны в полосе V.

В табл. 1, 2 представлены результаты идентификации КЗО, прошедших все этапы отбора. Следует отметить, что анализ выявил наличие большого количества областей, в которых наблюдается эмиссия только в одном из исследуемых диапазонов. Как уже упоминалось, эти области заслуживают дальнейшего изучения. Можно видеть, что во всех галактиках существует много областей, светящихся и на 8 мкм, и на 160 мкм. Эти длины волн соответствуют излучению горячей и холодной пыли, поэтому такие области можно с большой вероятностью считать КЗО и исследовать их далее в работах, посвященных областям активного звездообразования.

Обратим внимание на первые две галактики в табл. 1. В спиральной галактике NGC 628 КЗО единичного типа почти втрое меньше, чем в галактике IC 2574 магелланова типа. Это может показаться неестественным, но дело в методе выделения кандидатов в КЗО. Выделяются лишь те объекты, что резко контрастируют с окружающим пространством, тогда как в спиральных галактиках звездообразование главным образом распределено сравнительно равномерно по протяженным структурам — рукавам. Таким образом, несмотря на интенсивный процесс звездообразования в спиральных галактиках, контрастных областей больше в иррегулярных. Это может сказаться на том, что наша выборка КЗО будет смещена в сторону галактик с распределенным звездообразованием.

Совместный анализ карт на 160 мкм и в полосе NUV показал плохую корреляцию между кандидатами в КЗО, отождествленными по этим картам. Мы приходим к заключению о нецелесообразности их сравнения в дальнейшем.

Результаты сравнения кандидатов в КЗО в диапазонах 8 мкм и NUV (табл. 2), напротив, говорят о высокой степени корреляции между этими индикаторами звездообразования.

Таблица 2. Распределение апертур по типам в ближнем ультрафиолете и на 8 мкм (апертуры в ближнем ультрафиолете). Диаметры апертур на длине волны 8 мкм заключены в пределах от 3 до 14'' (FWHM_{8мкм} = 3''), в ближнем УФ диапазоне — от 5 до 20'' (FWHM_{NUV} = 5'')

Галактика	Тесный тип	Пересекающийся тип	Пустой тип	Неправильный тип	Всего
NGC 628	29	16	38	7	90
IC 2574	14	4	17	2	37
Holmberg II	17	2	43	0	62
NGC 3938	22	10	29	6	67
NGC 4736	1	4	19	8	32
NGC 5194	21	15	17	34	87
NGC 5457	14	5	19	7	45
UGC 5423	2	0	0	2	4
UGC 8201	1	0	6	5	12
Holmberg I	7	1	42	0	50
NGC 1291	37	8	90	6	141
NGC 4254	13	23	28	17	81
NGC 4789A	8	0	49	0	57
NGC 5236	14	23	43	9	89
NGC 6946	12	22	29	8	71
UGC 4459	3	1	2	4	10

Для визуализации данных в табл. 2 мы разделили объекты на типы, слегка отличающиеся от типов в предыдущих таблицах. Дело в том, что разрешение снимков в полосе 160 мкм существенно хуже разрешения в полосах 8 мкм и NUV, поэтому выделенные на 160 мкм области, как правило, получаются намного больше геометрически. Разрешение же снимков на 8 мкм и NUV сравнимо, поэтому нам пришлось разработать систему, которая работала бы корректно при сравнении одинаковых по размеру областей. «Пустой» и «неправильный» типы остались прежними, но в дополнение к ним в данном случае мы ввели другие типы. Тесный тип — области, выделенные в разных диапазонах, пересекаются, причем расстояние между их центрами меньше их среднего радиуса. Пересекающийся тип: области пересекаются, но расстояние между их центрами больше их среднего радиуса.

Отметим, что большинство тесных КЗО, в отличие от табл. 1, приходится на спиральные галактики: NGC 628 и NGC 1291. Это отличие может быть объяснено неучтенной корреляцией излучения в диапазонах 8 мкм и NUV, а именно на длине волны 8 мкм, помимо излучения полициклических ароматических углеводородов, может присутствовать излучение звезд из длинноволнового хвоста распределения Планка. Звездное излучение на длине волны 160 мкм практически отсутствует.

Таким образом, имеет смысл отождествлять КЗО по сравнению двух пар карт: в диапазонах 8 мкм — NUV и диапазонах 8–160 мкм.

Библиографические ссылки

- [1] *Makarov D., Prugniel P., Terekhova N. et al.* HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 570. — P. A13.
- [2] *Werner M. W., Roellig T. L., Low F. J. et al.* The Spitzer Space Telescope Mission // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2004. — Vol. 154, № 1. — P. 1–9. [astro-ph/0406223](#).
- [3] *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
- [4] *Conti A., Bianchi L., Shiao B.* The GALEX public archive at MAST // *Astrophys. Space. Sci.* — 2011. — Vol. 335, № 1. — P. 329–331.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ С АККРЕЦИОННОЙ КОЛОНКОЙ

И. Д. Маркозов

Санкт-Петербургский государственный университет

В ходе работы промоделированы профили пульса излучения, приходящего от рентгеновских пульсаров с аккреционной колонкой. Были учтены гравитационное линзирование и красное смещение в метрике Шварцшильда, а также отражение света от поверхности нейтронной звезды. На основе полученных профилей пульса был проведен анализ возможных ошибок в измерениях истинных светимостей рентгеновских пульсаров, связанных с невозможностью наблюдателю корректно учесть анизотропию в излучении, исходящем от нейтронной звезды, а также углы между осью вращения пульсара, магнитной осью и лучом зрения.

MODELING PULSE PROFILES IN X-RAY PULSARS WITH ACCRETION COLUMN

I. D. Markozov

Saint Petersburg State University

The pulse profiles of the radiation coming from X-ray pulsars with an accretion column were modeled. Gravitational lensing and redshift in the Schwarzschild metric, as well as the reflection of X-Ray photons from the surface of a neutron star, were taken into account. On the basis of the obtained pulse profiles an analysis of possible errors in the measurements of the luminosities of X-ray pulsars associated with the inability of the observer to correctly take into account the anisotropy in the radiation emerging from the neutron star, as well as the angles between the pulsar's rotation axis, the magnetic axis and the line of sight, was carried out.

Введение

Рентгеновские пульсары представляют собой двойные системы, где один компонент является нейтронной звездой, на которую происходит аккреция вещества со стороны звезды-компаньона. Многие нейтронные звезды обладают чрезвычайно сильными магнитными полями порядка 10^{12} – 10^{13} Гс, а также периодами вращения порядка одной секунды, и ось вращения не совпадает с магнитной осью, что приводит к феномену рентгеновского пульсара. Аккрецирующее вещество стекает вдоль магнитно-силовых линий на полюса нейтронной звезды, при столкновении с поверхностью высвечивается кинетическая энергия падающего вещества. Так светятся полярные шапки нейтронных звезд. Однако при высоких темпах аккреции появляется радиационно-доминированная ударная волна, которая поднимается вверх от поверхности НЗ. Образуется аккреционная колонка над нейтронной звездой, и в этом случае светит уже именно она, а не полярная шапка. Это значит, что излучение выходит из цилиндрической области над поверхностью нейтронной звезды, а не из части поверхности на полюсе. Высота аккреционной колонки зависит от параметров аккреции и может достигать величин, сравнимых с размерами нейтронной звезды. Как в

случае полярной шапки, так и при аккреционной колонке излучение имеет анизотропную диаграмму направленности. В данной работе представлено моделирование профилей пульса от нейтронной звезды с аккреционной колонкой. При построении теоретической модели необходимо учитывать отражение излучения колонки от поверхности нейтронной звезды, а также эффекты общей теории относительности: гравитационное линзирование и красное смещение.

Результаты были применены для оценки возможных ошибок при определении светимостей нейтронных звезд. Дело в том, что наблюдатель не имеет возможности точно учесть анизотропию излучения нейтронной звезды, поэтому при определении светимости проводятся следующие действия: поток усредняется по профилю пульса и домножается на $4\pi D^2$, где D — расстояние до нейтронной звезды. То есть к усредненному потоку применяется процедура как к источнику изотропного излучения. Однако по причине анизотропии это неминуемо должно приводить к ошибкам в значениях светимостей. На основе модели построения профилей пульса, представленной в данной работе, были проведены оценки данных ошибок.

Описание методики

Задача была разбита на этапы. Первый: построение карты распределения энергии по полярному углу. На этом этапе рассчитывалась энергия, уходящая в единицу полярного угла. Угол отсчитывался от условно верхней колонки. Полная энергия одной колонки бралась за единицу. Колонка дробилась на большое число кусков малой длины dh каждый. От каждого куска запускались лучи, расходящиеся в равноотстоящие на величину $d\theta$ углы. Каждому лучу присваивалась энергия $g(h)f(\theta)dhd\theta$, где $g(h)$ — распределение энергии по высоте колонке, а $f(\theta)$ — по углу. Далее с учетом гравитационного линзирования рассчитывалось направление, куда попадет луч (на бесконечности или на поверхности НЗ). Далее считалось, что поверхность нейтронной звезды переизлучает всю упавшую на нее энергию, причем выходящее излучение принималось анизотропным по интенсивности. Энергия, уходящая в конкретное направление от поверхности нейтронной звезды, рассчитывалась аналогичным случаем с колонкой образом (запуск и отслеживание конечных направлений лучей, исходящих из элементов поверхности НЗ).

Функция распределения светимости по высоте [1] $g(h) \propto \frac{H-h}{R+h}$, функция распределения по углу [2]

$$f = \frac{3D^4}{7\pi\gamma} (1 + 2D \sin(\alpha) \cos(\phi)) \sin^2(\alpha) \cos(\phi), \quad (1)$$

где β — скорость стенок колонки в единицах скорости света; γ — лоренц-фактор. Метрика пространства-времени шварцшильдовская. Для учета линзирования была использована следующая аппроксимационная формула [3]:

$$x = (1 - u) y \left(1 + \frac{u^2 y^2}{112} - \frac{e}{100} u y \left[\ln \left(1 - \frac{y}{2} \right) + \frac{y}{2} \right] \right). \quad (2)$$

Здесь $x = 1 - \cos(\alpha)$; $y = 1 - \cos(\psi)$; α — угол между радиус-вектором точки испускания фотона и направлением начального пульса фотона; ψ — угол линзирования.

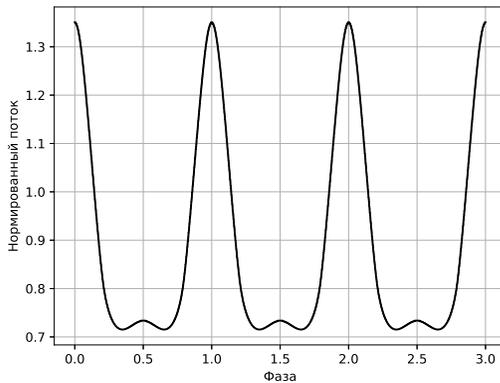
На втором этапе задачи из полученной карты распределения энергии по полярному углу строился профиль пульса для конкретного наблюдателя. Задавались углы между осью вращения нейтронной звезды и магнитной осью — θ_1 , между осью вращения и направлением на наблюдателя — θ_2 . В зависимости от фазового угла из геометрии высчитывалось, какой полярный угол будет иметь вектор направления на наблюдателя, и, исходя из этого,

на основе полученной на первом этапе карты распределения энергии получалась энергия, принимаемая наблюдателем при данном значении фазы.

На третьем этапе рассчитывались ошибки измерений истинной светимости. Наблюдаемая светимость определялась как светимость изотропного источника, дающего такой же поток излучения для конкретного наблюдателя, как и пробная НЗ. При этом учет красного смещения производился так, как если бы все фотоны излучались с поверхности нейтронной звезды. Принималось, что углы θ_1 и θ_2 являются равномерно распределенными случайными величинами. Исходя из этого вычислялись матожидание и дисперсия наблюдаемой светимости при фиксированных параметрах НЗ, а также вероятности ошибки в 10 раз.

Результаты

Моделирование проводилось для нейтронной звезды радиуса 12 км и массы 1.4 массы Солнца. Высота колонки принимала значения 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 км. Рассматривались два предельных случая: стенки колонки покоятся и движутся со скоростью свободного падения. Ниже представлен пример промоделированного профиля пульса для высоты колонки 4 км с движущимися стенками при угле между осью вращения и направлением на наблюдателя $\frac{\pi}{4}$, между осью вращения и магнитной осью — $\frac{\pi}{3}$. Главные максимумы располагаются в



Пример профиля пульса

данном случае при целых фазах, что соответствует минимальному углу между верхней колонкой и наблюдателем. Вторичные максимумы, наоборот, лежат в точках, где верхняя колонка максимально в затмении.

Для фиксированных параметров нейтронной звезды можно оценить характерные ошибки наблюдаемой светимости. Пусть H — высота колонки в километрах, β — скорость стенок колонки (0 для покоящихся, β для находящихся в свободном падении), L_{min} — минимально возможная светимость для наблюдателя, L_{max} — максимальная, \bar{L} — средняя, sd — корень из дисперсии для величины наблюдаемой светимости, P_{10} — вероятность завязнуть светимость в 10 раз. Истинная светимость равна 2.0, наблюдаемые величины рассчитываются при усреднении по профилю пульса в предположении об изотропии излучения, красное смещение при этом учитывается, как если бы весь свет шел с поверхности НЗ.

H	β	L_{min}	L_{max}	\bar{L}	sd	P_{10}
0.5	0	1.12	2.51	1.94	0.37	0.0
1	0	1.04	2.50	1.99	0.36	0.0
2	0	0.94	2.49	2.05	0.36	0.0
4	0	0.82	2.55	2.14	0.35	0.0
8	0	1.54	5.27	2.31	0.21	0.0
12	0	1.77	10.61	2.44	0.28	0.0
0.5	ff	1.91	2.33	2.04	0.11	0.0
1	ff	1.90	2.30	2.08	0.12	0.0
2	ff	1.89	2.44	2.16	0.14	0.0
4	ff	1.88	2.75	2.23	0.21	0.0
8	ff	1.86	15.76	2.45	0.57	0.0
12	ff	1.86	33.37	2.63	1.04	0.0005

Заключение

В работе представлены результаты моделирования профилей пульса нейтронной звезды с аккреционной колонкой и основанные на этом оценки по измерению ошибок в определении светимости таких объектов. Видно, что при небольших высотах колонки ошибки не являются существенными. С увеличением высоты колонки увеличивается и разброс возможной наблюдаемой светимости, в частности, становятся возможными ошибки на порядок. Это связано с тем, что для высоких колонок из-за линзирования вырастает отношение количества энергии, приходящей в малый телесный угол, к величине этого угла, в направлении магнитной оси. Однако вероятность таких ошибок крайне мала. Заметим, что в данной работе игнорировались неточности, связанные с определением масс, радиусов и расстояний до источников, однако в реальности они вносят существенный вклад в определение истинных светимостей.

Для построения профилей пульса использовались простейшие аппроксимации углового распределения излучения от колонки и атмосферы НЗ, а также пространственного распределения мощности по колонке. Для повышения качества расчетов необходимо включение более точных моделей колонки и атмосферы нейтронных звезд, что является предметом дальнейших исследований.

Библиографические ссылки

- [1] *Mushtukov A. A. et al.* On the maximum accretion luminosity of magnetized neutron stars: connecting X-ray pulsars and ultraluminous X-ray sources // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 454. — P. 2539–2548.
- [2] *Poutanen J. et al.* A reflection model for the cyclotron lines in the spectra of X-Ray pulsars // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 777. — P. 115.
- [3] *Poutanen Juri.* Accurate analytic formula for light bending in Schwarzschild metric // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 640. — P. A23.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ СЕТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ ПЫЛИ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

М. Г. Медведев, А. Б. Островский, А. И. Васюнин
Уральский федеральный университет

В рамках метода случайного блуждания на двумерной решетке с непрерывным временем мы реализовали стохастическую модель, оценивающую эффективность формирования молекулярного водорода в условиях, характерных для межзвездной среды. Метод позволяет рассматривать неоднородные по свойствам поверхности. Получены зависимости эффективности образования молекулярного водорода от температуры и от вариации энергии связи атомов с поверхностью. Дополнительно было рассмотрено влияние неопределенности значения отношения энергии диффузии к энергии десорбции на поверхности пылинки.

STOCHASTIC ON-LATTICE SIMULATION OF H₂ FORMATION ON INTERSTELLAR GRAINS

M. G. Medvedev, A. B. Ostrovskii, A. I. Vasyunin
Ural Federal University

We realized stochastic model evaluating efficiency of recombination H₂ in interstellar medium based on the approach of the continuous-time random walk on two-dimensional lattice. This method allows to model inhomogeneous surfaces. We estimate recombination efficiency as a function of model parameters. The influence of uncertainty of diffusion/desorption energy ratio on molecular hydrogen recombination was considered also.

Введение

Молекулярный водород является важнейшей молекулой для процессов в межзвездной среде (МЗС), поскольку он участвует в быстрых реакциях с обменом заряда, реакциях с космическими лучами, приводящих к образованию более сложных молекул и оказывает сильное влияние на процессы динамической эволюции облаков. Формирование молекулярного водорода в условиях МЗС протекает эффективно только на поверхности пылинок. Методы моделирования химической эволюции среды, основанные на балансных уравнениях, не позволяют учитывать особенности процессов на поверхности пылевой частицы, это может быть сделано с помощью методов стохастического моделирования, учитывающих структуру поверхности пылинки.

Цель данной работы — реализовать модель, основанную на методе случайных блужданий частиц по двумерной поверхности, для получения зависимостей эффективности образования молекулярного водорода от различных параметров модели.

Случайные блуждания с непрерывным временем

В соответствии с методом, описанным в [1], роль поверхности пылинки исполняет тетрагональная (четыре соседних узла) или гексагональная (шесть соседних узлов) решетка. В модели на текущий момент участвуют только атомы водорода и молекулы водорода. Атомы водорода могут осаждаться из газовой фазы на решетку и связываться с поверхностью слабыми силами физисорбции. Осаждение происходит в узлах, которым соответствуют потенциальные ямы, глубина которых зависит от материала и в случае неоднородной поверхности может отличаться от узла к узлу.

Атомы могут совершать прыжки на любые соседние узлы за счет тепловой диффузии, скорость протекания которой определяется энергией диффузионного барьера E_b . Все направления для прыжков равновероятны. В случае если узел в выбранном направлении занят другим атомом водорода, происходит реакция формирования молекулы. В реализованной модели молекула немедленно десорбирует в газ; считать маловероятным то, что молекула останется на поверхности, нам позволяет тот факт, что реакция образования H_2 экзотермическая и в ней выделяется энергия в 4.5 эВ, тогда как энергия связи молекулы с поверхностью около 0.03 эВ.

Образованию молекул водорода на поверхности пылинки противодействует десорбция атомов водорода с поверхности, происходящая посредством термического испарения. Энергия десорбции E_d выше энергии диффузионного барьера E_b . Как правило, считается, что отношение E_b/E_d постоянно, но точное значение неизвестно и в литературе варьируется от 0.3 до 0.77 [2]. В нашей модели рассматривается и тот случай, когда это отношение меняется от узла к узлу случайным образом в пределах этого диапазона.

В модели принимаются во внимание три типа пуассоновских процессов: осаждение, диффузия и десорбция. Интервалы времени между двумя последовательными событиями (далее — время ожидания события) таких процессов подчиняются экспоненциальному распределению [3]. Непрерывность времени понимается в том смысле, что следующее событие может произойти в любой момент — время в модели не дискретизировано.

На каждом шаге алгоритма происходит определение времени ожидания события WT_a для каждого процесса типа a по следующей формуле:

$$WT_a = -\frac{\ln X}{b_a}, \quad (1)$$

где X — равномерно распределенная случайная величина от 0 до 1; b_a — скорость протекания процесса a , c^{-1} .

После того как определены времена ожидания для события адсорбции, событий диффузии и десорбции для каждого из атомов, находящихся на решетке, из всех полученных времен выбирается наименьшее и в модели происходит событие, соответствующее этому времени, а время в модели увеличивается на это минимальное время ожидания. После выполнения некоторого числа итераций (зависящего от параметров модели) модель достигает стационарного состояния, для которого и находится эффективность рекомбинации. В процессе моделирования параметры модели остаются постоянными.

В случае неоднородной по энергии десорбции поверхности нам неизвестен вид распределения значений энергий десорбции по узлам. В нашей модели распределение считается экспоненциальным. Под этим подразумевается, что значение энергии на узле вычисляется следующим образом:

$$E_d = E_{d0} + \Delta E_d, \quad (2)$$

где E_{d0} — минимальное значение энергии десорбции; ΔE_d — экспоненциально распределенная положительная величина (отклонение от значения минимальной энергии десорбции).

Параметризовать экспоненциальное распределение можно через нормализованное отклонение $\sigma = \Delta E_d / E_d$ [1]. Задавая нормализованное отклонение и используя базовые значения энергий десорбции в качестве среднего, мы можем вычислить среднее значение отклонения ΔE_d и минимальное значение энергии десорбции E_{d0} , что затем позволяет нам получить экспоненциально распределенные значения энергий десорбции.

В расчетах моделировались оливинные и углеродные пылинки с тетрагональными и гексагональными решетками. Для оливинных пылинок базовое значение энергии десорбции — 373 К, энергии диффузии — 287 К. Для углеродных пылинок базовое значение энергии десорбции — 658 К, энергии диффузии — 511 К. Плотность среды 300 см^{-3} . Температурный диапазон от 5 до 30 К.

Результаты

Эффективность образования молекулярного водорода (далее — рекомбинации) определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{2N_{H_2}}{N_H}, \quad (3)$$

где $2N_{H_2}$ — число образовавшихся молекул водорода; N_H — число осажденных атомов водорода за один интервал времени.

На рис. 1 показано, что образование молекул водорода проходит эффективно лишь в узком диапазоне температур от 6 до 9 К для оливина и от 11 до 16 К для углерода, что согласуется и с результатами моделирования в [1]. Также здесь показано, что результаты для гексагональной и тетрагональной решеток отличаются мало, поэтому далее будем приводить результаты только для тетрагональной решетки.

При увеличении нормализованного отклонения, задающего разброс значений энергии десорбции, и при фиксированном отношении E_b/E_d диапазон температур, в котором образование молекулярного водорода проходит эффективно, увеличивается (рис. 2).

Характерные времена выхода на стационарное состояние моделями составляют от 10^6 до 10^7 с (для плотности газа в среде $n_H = 300 \text{ см}^{-3}$), при этом моделям с высокой степенью неоднородности поверхности необходимо большее время, чем моделям с низкой степенью неоднородности.

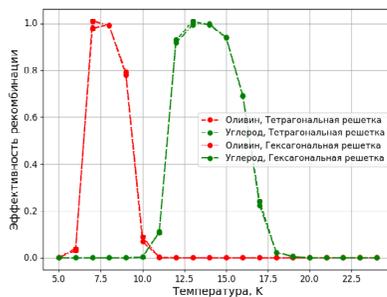


Рис. 1. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для однородных оливинной и углеродной пылинок для решеток тетрагонального и гексагонального типа

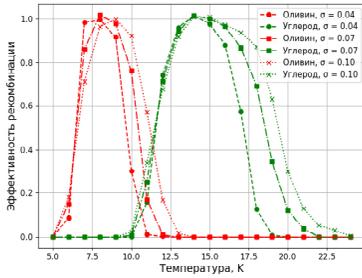


Рис. 2. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для неоднородных оливиновой и углеродной пылинок при различных значениях нормализованного отклонения

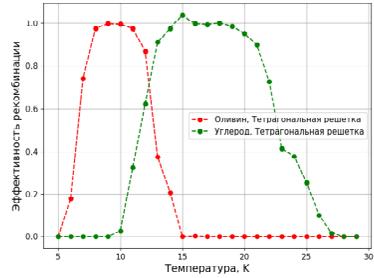


Рис. 3. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для неоднородных оливиновой и углеродной пылинок при нормализованном отклонении $\sigma = 0.1$ с равномерно распределенным случайным значением E_b/E_d на узлах

На рис. 3 приведен результат моделирования при случайном равномерно распределенном в пределах от 0.3 до 0.77 значении отношения E_b/E_d в узлах со случайным экспоненциально распределенным значением энергии десорбции при нормализованном отклонении $\sigma = 0.1$. С такими параметрами рекомбинация становится эффективной на еще более широком диапазоне температур: от 6 до 14 К для оливина и от 11 до 25 К для углерода.

Заключение

Полученные с помощью моделирования результаты очень хорошо согласуются с результатами в [1], где реализуется аналогичный метод, что позволяет нам говорить о том, что описанный подход реализован верно.

Приведенные зависимости эффективности рекомбинации от температуры для различных параметров говорят о том, что чем больше неоднородность поверхности, тем более эффективна в целом рекомбинация. Причем расширение интервала происходит за счет сдвига правой границы, т. е. за счет того, что десорбция атомов с поверхности становится менее эффективной.

АИВ благодарит за поддержку проект Государственного задания FEUZ-2020-0038.

Библиографические ссылки

- [1] *Chang Q., Cuppen H. M., Herbst E.* Continuous-time random-walk simulation of H_2 formation on interstellar grains // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 434, № 2. — P. 599–611.
- [2] *Vasyunin A. I., Herbst Eric.* A Unified Monte Carlo Treatment of Gas-Grain Chemistry for Large Reaction Networks. II. A Multiphase Gas-surface-layered Bulk Model // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 762, № 2. — P. 86. 1211. 3025.
- [3] *Gillespie Daniel T.* A General Method for Numerically Simulating the Stochastic Time Evolution of Coupled Chemical Reactions // *Journal of Computational Physics.* — 1976. — Vol. 22, № 4. — P. 403–434.

ПОСТРОЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 28-СМ ТЕЛЕСКОПА СКАС КФУ ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДА И ЭКСТИНКЦИИ

И. Н. Никоноров, Р. Я. Жучков

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Данная работа посвящена нахождению уравнений перехода от фотометрической системы B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} телескопа ШК-280, установленного на СКАС КФУ, в стандартную B_J , V_J , R_C систему Джонсона—Казинса с применением современных численных методов. Были проведены наблюдения стандартов Ландольта поля SA110. Выполнена абсолютная фотометрия избранных звезд, оценена погрешность измерений. Построена модель перехода от заатмосферных звездных величин в стандартной системе к наблюдаемым инструментальным. С помощью метода Монте-Карло с марковскими цепями совместно определены средние за период наблюдений коэффициенты атмосферной экстинкции (0.276, 0.205, 0.159 для B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} соответственно) и коэффициенты уравнений перехода между системами (цветовые коэффициенты 0.165, -0.120 , -0.378 для B_J^0 , V_J^0 , R_C^0 в зависимости от $(B - G)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$ соответственно).

PHOTOMETRIC CALIBRATION OF 28-cm TELESCOPE OF NCAS KFU BY JOINTLY MODELING EQUATIONS OF TRANSFORMATIONS AND THE EXTINCTION

I. N. Nikonorov, R. Ya. Zhuchkov

Kazan (Volga region) Federal University

This work is devoted to study of transformations equations between B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} photometric system of 28-cm Schmidt-Cassegrain telescope mounted in NCAS KFU to standard Johnson—Cousins B_J , V_J , R_C using modern numerical methods. Observations of Landold Standards at the SA110 region were performed. Absolute photometry of selected stars was obtained with estimatiuon of observational errors. To transform the observational data into the standart system numerical model was built with the use of Markov Chain Monte Carlo sampling. So, we found average parameters of transformations between systems (color reduction coefficients are 0.165, -0.120 , -0.378 for B_J^0 , V_J^0 , R_C^0 in dependence of $(B - G)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$ respectively) and medium extinction at the observational period (0.276, 0.205, 0.159 for B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} respectively).

Важнейшим этапом получения данных является переход к стандартным заатмосферным звездным величинам. При этом зачастую наличие стандартных $B_J V_J R_C$ -фильтров системы Джонсона—Казинса кажется панацеей. Но очевидно, что использование современных приемников с различной кривой реакции делает построение уравнений перехода необходимым этапом инструментальных калибровок. С другой стороны, при наличии квалифицированно проведенной редукции и полученных уравнениях перехода даже нестандартные фильтры могут давать точность после перевода в международную систему не хуже традиционно используемых.

Кроме того, в последнее время получило развитие множество численных методов, которые упрощают построение уравнений перехода и делают его методически более правильными. Таким образом, основной задачей данной работы было как построение уравнений перехода к стандартной фотометрической системе, так и отработка алгоритмов и написание

программы, применимой для калибровки подобных инструментов (в частности, РТТ-150 и телескопов АОЭ КФУ). Весь программный код в данной работе выполнен на языке Python с использованием подключаемых пакетов.

В качестве стандартной была выбрана система, построенная Ландольтом [1]. Она отлично зарекомендовала себя за десятки лет с момента первого построения, все ее систематические неточности хорошо изучены, кроме того, периодически проводятся новые наблюдения для корректировок. Звездные величины из инструментальной системы B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} было решено переводить в B_J , V_J , R_C .

Проведены наблюдения части поля SA110 в июне—июле 2018 г. Были выбраны стандарты 496, 497, 499, 503, 504, 506, 507: они имеют заатмосферные звездные величины 14.2—11.3 в полосе V_J , показатели цвета $(B - V)_J^0$ (верхний индекс 0 в работе обозначает заатмосферную величину) в подходящем для построения системы диапазоне 0.56—1.25, во время наблюдений находились на воздушных массах 1.4—2.2. Атмосфера была достаточно прозрачной для осуществления абсолютной фотометрии 1, 5 и 7 июля, за эти ночи были получены 19 кадров в фильтре B_{instr} и по 20 в G_{instr} и R_{instr} с выдержками 120—180 с. SNR составило ≈ 80 —300.

Редукция проводилась в пакете `ccdproc` [2]. Проведены стандартные коррекции, также из-за гетерогенности фотометрических рядов все кадры были приведены к единицам электронов, пришедшим в пиксель матрицы за секунду; кроме того, найдены неопределенности значения в каждом из пикселей. Для регистрации смещений кадров относительно друг друга по ярким звездам был использован пакет `Astroalign` [3]. Осуществлена апертурная абсолютная фотометрия избранных звезд с помощью пакета `photutils` [4]. Погрешность суммы (S) внутри апертуры считалась по алгоритмам пакета. Звездная величина в инструментальной системе и ее погрешность определялись по формулам 1:

$$m_{instr} = -2.5lg(S), \quad \Delta m_{instr} = \frac{2.5}{\ln(10)} \frac{\Delta S}{S}, \quad [S] = \frac{e^-}{c}. \quad (1)$$

Ключевой частью модели являются уравнения перехода между фотометрическими системами. Они составлялись по ставшей классической работе Харди [5], их вид приведен в системе 2, все $C(=const)$ — параметры модели. Для модели использовался обратный переход, получаемый решением системы относительно B_{instr}^0 , G_{instr}^0 и R_{instr}^0 .

$$\begin{cases} B_J^0 &= B_{instr}^0 + C_B + C_{B,B-G} \cdot (B - G)_{instr}^0, \\ V_J^0 &= G_{instr}^0 + C_V + C_{V,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0, \\ R_C^0 &= R_{instr}^0 + C_R + C_{R,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0. \end{cases} \quad (2)$$

Атмосферная экстинкция учитывалась также в соответствии с работой [5]. Уравнения для нее — система 3, где $k(=const)$ — параметры модели; $X(z)$ — воздушная масса (была рассчитана на времена экспозиции с помощью пакета `Astropy` [6], [7]).

$$\begin{cases} B_{instr} &= B_{instr}^0 + [k_B + k_{B,B-G} \cdot (B - G)_{instr}^0] \cdot X(z), \\ G_{instr} &= G_{instr}^0 + [k_G + k_{G,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0] \cdot X(z), \\ R_{instr} &= R_{instr}^0 + [k_R + k_{R,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0] \cdot X(z). \end{cases} \quad (3)$$

Для оценки параметров модели как целого применены методы байесовской статистики. Их использование обусловлено легкостью поиска корреляции между параметрами модели и обоснованностью постановки задачи напрямую аксиомами вероятности. Параметры

C и k считались априори распределенными равномерно по фазовому пространству. Было учтено, что звездные величины и показатели цвета в системе Ландольта имеют некоторые случайные погрешности, указанные в статье [1]. Они были включены в параметры модели и считались априори распределенными нормально с известными дисперсиями и независимо. Функция правдоподобия также строилась в предположении, что невязки распределены нормально и независимо. За дисперсию их распределения полагались неопределенности, оцененные при абсолютной фотометрии. Прямое вычисление модели происходило с помощью класса моделирования, используемого в пакете *george* [8] (только из соображений удобства, гауссовский процесс в работе на данный момент не рассматривается), для семплинга плотности апостериорного распределения параметров в фазовом пространстве применялся аффинно-инвариантный семплер *emcee* [9]. Из семплов апостериорного распределения путем маргинализации по звездным величинам и показателям цвета в стандартной системе получены оценки коэффициентов экстинкции и перехода (см. таблицу и рис. 1).

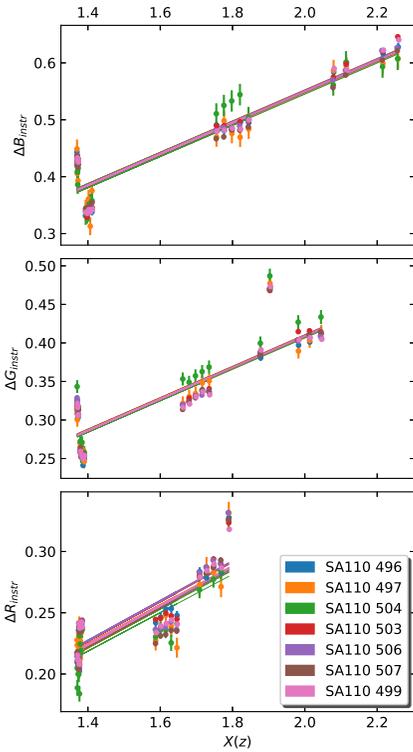


Рис. 1. Ослабления блеска избранных звезд в полосах инструментальной системы в зависимости от воздушной массы

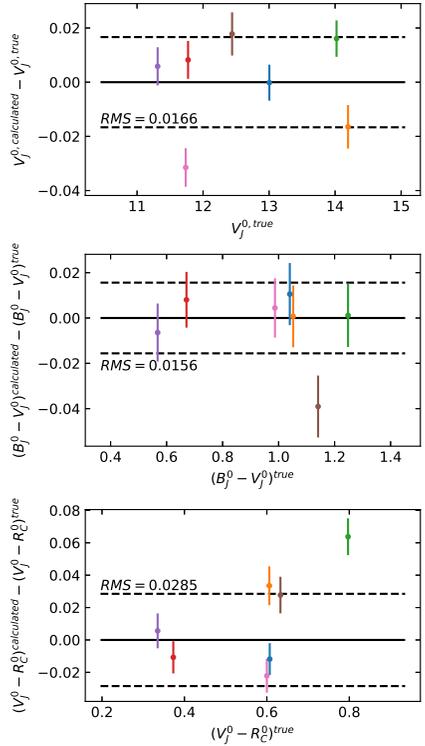


Рис. 2. Невязки перехода от B_{instr}^0 , G_{instr}^0 , R_{instr}^0 к B_J^0 , V_J^0 , R_C^0 в результате независимой подстановки в финальные уравнения перехода.

Примечание. Легенду см. на рис. 1

Также можно заметить, что экстинкция в фильтрах не зависит от цвета звезды в рассмотренных условиях с реализованной точностью.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
C_B	21.0612 ± 0.0056	k_B	0.2758 ± 0.0020
$C_{B,B-G}$	0.1651 ± 0.0130	$k_{B,B-G}$	-0.0037 ± 0.0051
C_V	20.7355 ± 0.0020	k_G	0.2049 ± 0.0012
$C_{V,G-R}$	-0.1199 ± 0.0123	$k_{G,G-R}$	0.0054 ± 0.0073
C_R	20.1309 ± 0.0038	k_R	0.1586 ± 0.0017
$C_{R,G-R}$	-0.3781 ± 0.0246	$k_{R,G-R}$	-0.0110 ± 0.0109

Путем независимой подстановки B_{instr}^0 , G_{instr}^0 , R_{instr}^0 избранных звезд в финальные уравнения перехода была выполнена проверка его линейности. Проверка показала, что уравнения линейны с заявленной точностью в указанном диапазоне цветов (невязки см. на рис. 2). Кроме того, поскольку обычно погрешность дифференциальной фотометрии на инструменте порядка нескольких сотых величины, можно утверждать, что использование полученных уравнений перехода не будет значительно влиять на ее результат.

Таким образом, несмотря на традиционное недоверие к фильтрам, отличным от стандартной системы пропускания, и распространенному тезису, что именно стандартные фильтры являются залогом существования стандартной фотометрической системы инструмента, использование близких по характеристикам полос пропускания при выполнении должной калибровки не снижает точности полученных данных.

Библиографические ссылки

- [1] *Landolt Arlo U.* UBVRI Photometric Standard Stars Around the Celestial Equator: Updates and Additions // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 137, № 5. — P. 4186–4269. 0904.0638.
- [2] *Craig M. W., Crawford S. M., Deil Christoph et al.* ccdproc: CCD data reduction software. — 2015. 1510.007.
- [3] *Beroiz M., Cabral J. B., Sanchez B.* Astroalign: A Python module for astronomical image registration // *Astronomy and Computing.* — 2020. — Vol. 32. — P. 100384.
- [4] *Bradley Larry, Sipöcz Brigitta, Robitaille Thomas et al.* astropy/photutils: 1.0.0. — 2020.
- [5] *Hardie Robert H.* Photoelectric Reductions, ed. by William A. Hiltner. — 1964. — P. 178.
- [6] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A community Python package for astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A33. 1307.6212.
- [7] *Astropy Collaboration, Price-Whelan A. M., SipHocz B. M. et al.* The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package // *Astron. J.* — 2018. — Vol. 156, № 3. — P. 123. 1801.02634.
- [8] *Ambikasaran S., Foreman-Mackey D., Greengard L. et al.* Fast Direct Methods for Gaussian Processes. — 2014.
- [9] *Foreman-Mackey Daniel, Hogg David W., Lang Dustin, Goodman Jonathan.* emcee: The MCMC Hammer // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2013. — Vol. 125, № 925. — P. 306. 1202.3665.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧНОСТЕЙ ЗВЕЗД РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА LAMOST

Т. А. Пермякова, А. В. Локтин
Уральский федеральный университет

В ходе работы были изучены возможности каталога LAMOST для статистических исследований спектров звезд рассеянных звездных скоплений (РЗС). Были рассмотрены скопления Плеяды и Ясли. Для членов этих скоплений рассмотрены зависимости абсолютная звездная величина — металличность. Вопреки ожиданиям у звезд главных последовательностей исследуемых скоплений обнаружена заметная зависимость металличности от абсолютной звездной величины, которая может быть связана с систематическими ошибками измерения металличностей для визуально слабых звезд.

STUDY OF POSSIBLE REGULARITIES OF THE METALLIC DISTRIBUTION OF OPEN CLUSTER STARS ACCORDING TO THE LAMOST CATALOG

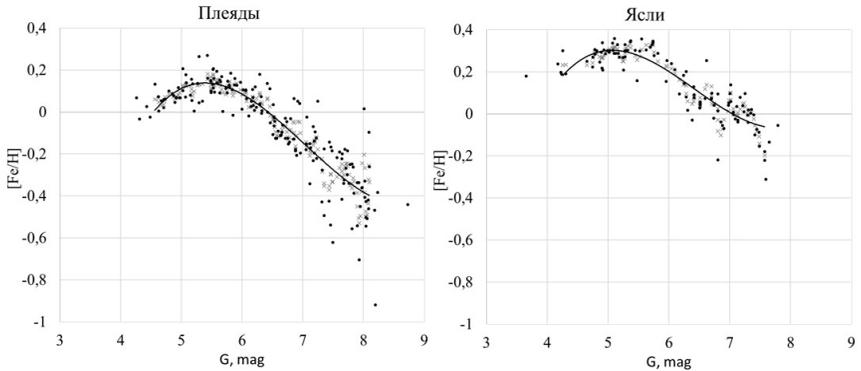
T. A. Permyakova, A. V. Loktin
Ural Federal University

In this study were discussed the LAMOST catalog opportunities in the statistical studies of the spectra of stars in open star clusters (OSC). We considered the Pleiades and Praesepe clusters. We examined the absolute stellar magnitude — metallicity relationships for the members of these clusters. Contrary to expectations, a noticeable dependence of the metallicity on the absolute magnitude of the stars in the main sequences of the studied clusters was found, which may be associated with systematic errors in measuring the metallicities for visually faint stars.

В работе изучены возможности каталога LAMOST [1] для исследования закономерностей металличности звезд рассеянных звездных скоплений на примере Плеяд и Яслей. Для этой цели использовался каталог пятого релиза данных LAMOST, в который включена информация о металличностях звезд спектральных классов A, F, G и K. Указанные выше скопления были выбраны из-за их относительно близкого к Солнцу расположения и большого количества звезд. К задачам работы относятся определение средних металличностей скоплений по данным каталога LAMOST DR5 и сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными.

Выделение членов скоплений проводится по данным каталога GAIA DR2 [2] с использованием астрометрических и фотометрических данных. Для нахождения звезд — членов скоплений, у которых известны металличности и спектральные индексы, проводится сопоставление для рассматриваемых областей каталогов LAMOST и GAIA в программе TOPCAT [3] по склонению и прямому восхождению звезд. Звезды из каталогов считались тождественными, если отклонение их экваториальных координат составляет не более $1''$.

Далее строились графики зависимости металличности $[Fe/H]$ от абсолютной звездной величины в полосе G (фотометрическая система телескопа GAIA), проводились сглаживание зависимости симметричным нерекурсивным девятичленным цифровым фильтром и аппроксимация результата полиномом третьей степени, полученным методом наименьших квадратов (соответствующие зависимости для скоплений показаны на рисунке).



Диаграммы абсолютная звездная величина — металличность. Черные точки — значение металличности для звезд скопления, серые — сглаженные, сплошная линия — аппроксимация

Ожидалось, что металличность звезд скопления не будет зависеть от абсолютной звездной величины, так как члены РЗС формируются из одного облака межзвездного газа, а в звездах рассматриваемых типов тяжелые элементы либо не производятся, либо не выносятся на поверхности звезд.

Однако у исследуемых скоплений обнаружена некоторая зависимость металличности от абсолютной звездной величины: наблюдается небольшой максимум вблизи 11^m видимой звездной величины (абсолютная звездная величина $5,5^m$ для Плеяд и Яслей) с последующим уменьшением значения металличности с увеличением звездной величины. Наибольший разброс значений металличности наблюдается у Плеяд. При этом среднее значение металличности Яслей, определенное по данным LAMOST, совпадает с данными, приведенными на странице скопления в WEBDA (каталог: 0.14, по данным LAMOST: 0.14 ± 0.29), в скоплении Плеяды полученная оценка оказалась немного меньше, чем в каталоге Chen L. и др. (-0.03 и -0.07 ± 0.31 соответственно).

Скорее всего наличие зависимости металличности от звездной величины обусловлено систематическими ошибками измерения данной величины для визуально слабых звезд.

Металличности скоплений, определенные по спектрам низкого разрешения LAMOST DR5, подходят для предварительной оценки значений этого параметра, но при этом нужно учитывать их низкую точность.

Библиографические ссылки

- [1] *Luo A. L. et al.* VizieR Online Data Catalog: каталоги LAMOST DR5 // VizieR On-line Data Catalog: V/164. — 2019.
- [2] *Gaia Collaboration (Babusiaux C. et al.).* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // Astronomy & Astrophysics. — 2018. — Vol. 616.
- [3] *Taylor M. B.* TOPCAT & STIL: Starlink Table/ VOTable Processing Software // Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV ASP Conference Series. — 2005. — Vol. 347.

ДОЛЯ ДЕЙТЕРИЯ В ХОЛОДНЫХ ПЛОТНЫХ ЯДРАХ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ L1688

И. В. Петрашкевич, А. Ф. Пуанова
Уральский федеральный университет

В работе изучена доля дейтерия в холодных плотных ядрах в области маломассивного звездообразования L1688. Для изучения доли дейтерия и ее зависимости от физических параметров холодного плотного ядра построены наблюдательные карты трех пар соединений (N_2H^+ и N_2D^+ , NH_3 и NH_2D , $H^{13}CO^+$ и DCO^+) в направлении четырех холодных плотных ядер. Наблюдения выполнены на телескопе IRAM 30m (кроме данных NH_3 , взятых из обзора GAS по наблюдениям на GBT).

DEUTERIUM FRACTION IN COLD DENSE CORES IN THE STAR-FORMING REGION L1688

I. V. Petrashkevich, A. F. Puanova
Ural Federal University

The work presents a study of deuterium fraction in cold dense cores in the low mass star-forming region L1688. To study the deuterium fraction and its correlation with physical conditions in a cold dense core, we produced the observational maps of three pairs of species (N_2H^+ and N_2D^+ , NH_3 and NH_2D , $H^{13}CO^+$ and DCO^+) towards four cold dense cores. The observations were carried out with the IRAM 30m telescope (except for NH_3 data taken from the GAS survey based on observations with GBT).

Дозвездные ядра — первая стадия образования звезд, их изучение важно для понимания начальных условий звездообразования. Это образующиеся в молекулярных облаках холодные плотные сгустки газа и пыли с температурой $\simeq 10$ К и плотностью 10^4 – 10^7 см $^{-3}$, с преобладанием тепловых движений частиц газа. В таких условиях доля дейтерия по отношению к водороду в составе молекул и ионов значительно увеличивается (до 0.01–1 при общем отношении дейтерия к водороду $\simeq 1.5 \times 10^{-5}$). Благодаря этому высокая доля дейтерия в соединениях становится одним из индикаторов дозвездной фазы, а дейтерированные соединения — инструментом изучения холодного плотного газа дозвездных ядер.

Из-за химического фракционирования (превалирования в газе одних соединений над другими в зависимости от физических условий) разные соединения служат трассерами газа разной плотности и, следовательно, разных частей плотного ядра. Чтобы изучить, как доля дейтерия меняется в плотном ядре, мы построили наблюдательные карты (чтобы изучить пространственное распределение) трех пар соединений — трассеров газа разной плотности в направлении четырех плотных ядер одной области маломассивного звездообразования L1688. Мы использовали наблюдательные данные с телескопа IRAM 30m, а именно спектры переходов $N_2H^+(1-0)$, $N_2D^+(1-0)$, $N_2D^+(2-1)$, $NH_2D(1,1)$, $H^{13}CO^+(1-0)$, $H^{13}CO^+(2-1)$, $DCO^+(1-0)$, $DCO^+(2-1)$; также $NH_3(1,1)$ мы взяли из работы [1]. Азотсодержащие соединения являются трассерами плотных областей дозвездных ядер, а углеродсодержащие соединения являются трассерами менее плотного газа оболочки ядра. С помощью аппроксимации линий переходов мы построили карты параметров этих переходов: температуры возбуждения, оптической толщины, лучевой скорости и дисперсии скорости. Лучевые концентрации соединений были рассчитаны с использованием полученных параметров в предположении локального термодинамического равновесия. Подробнее метод

описан в работе [2], где опубликована часть представленных здесь результатов. Долю дейтерия считали как отношение лучевых концентраций дейтерированной к водородсодержащей молекуле. На рис. 1 и 2 представлены карты доли дейтерия наблюдаемых соединений. На картах отображены те пиксели, где значения доли дейтерия $>3\sigma$.

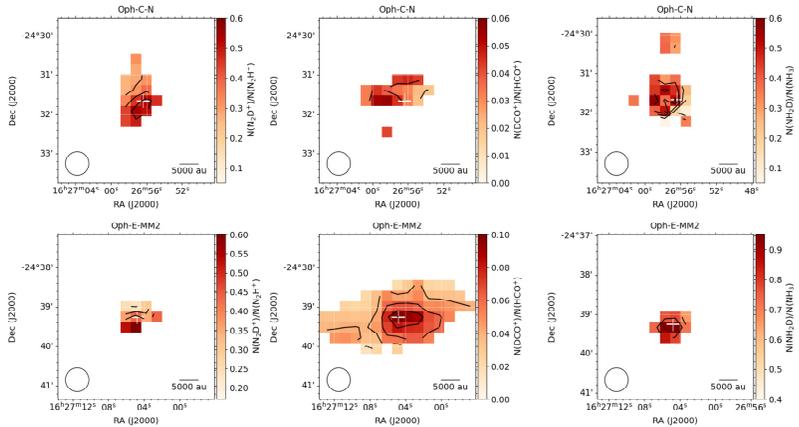


Рис. 1. Карты доли дейтерия соединений для ядер Oph-C-N и Oph-E-MM2: 1 — Oph-C-N, $R(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$: начальный контур 3σ , 0.19 с шагом контура 0.1; 2 — Oph-C-N, $R(\text{DCO}^+/\text{H}^{13}\text{CO}^+)$: начальный контур 3σ , 0.02 с шагом контура 0.02; 3 — Oph-C-N, $R(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$: начальный контур 3σ , 0.2 с шагом контура 0.2; 4 — Oph-E-MM2, $R(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$: начальный контур 3σ , 0.15 с шагом контура 0.09; 5 — Oph-E-MM2, $R(\text{DCO}^+/\text{H}^{13}\text{CO}^+)$: начальный контур 3σ , 0.02 с шагом контура 0.02; 6 — Oph-E-MM2, $R(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$: начальный контур 3σ , 0.4 с шагом контура 0.1. Размер луча показан в нижнем левом углу каждой карты

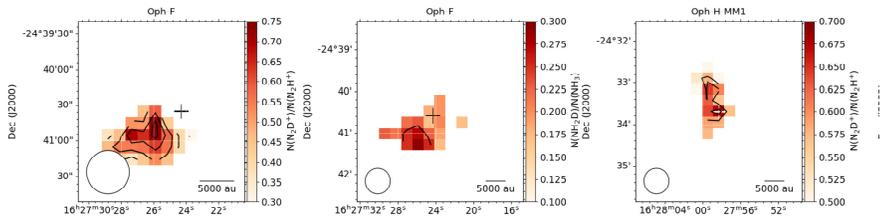


Рис. 2. Карты доли дейтерия соединений для ядер Oph-F и Oph-H-MM1: 1 — Oph-F, $R(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$: начальный контур 3σ , 0.3 с шагом контура 0.1; 2 — Oph-F, $R(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$: начальный контур 3σ , 0.12 с шагом контура 0.12; 3 — Oph-H-MM1, $R(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$: начальный контур 3σ , 0.55 с шагом контура 0.05. Размер луча показан в нижнем левом углу каждой карты

Мы попытались найти корреляцию значения доли дейтерия с физическими параметрами плотных ядер — температурой газа из работы [1], температурой пыли и лучевой концентрацией молекулярного водорода из работы [3], дисперсией скорости частиц газа (по нашим данным). На рис. 3 представлены зависимости доли дейтерия от физических параметров. Мы не нашли корреляции доли дейтерия с лучевой концентрацией водорода и

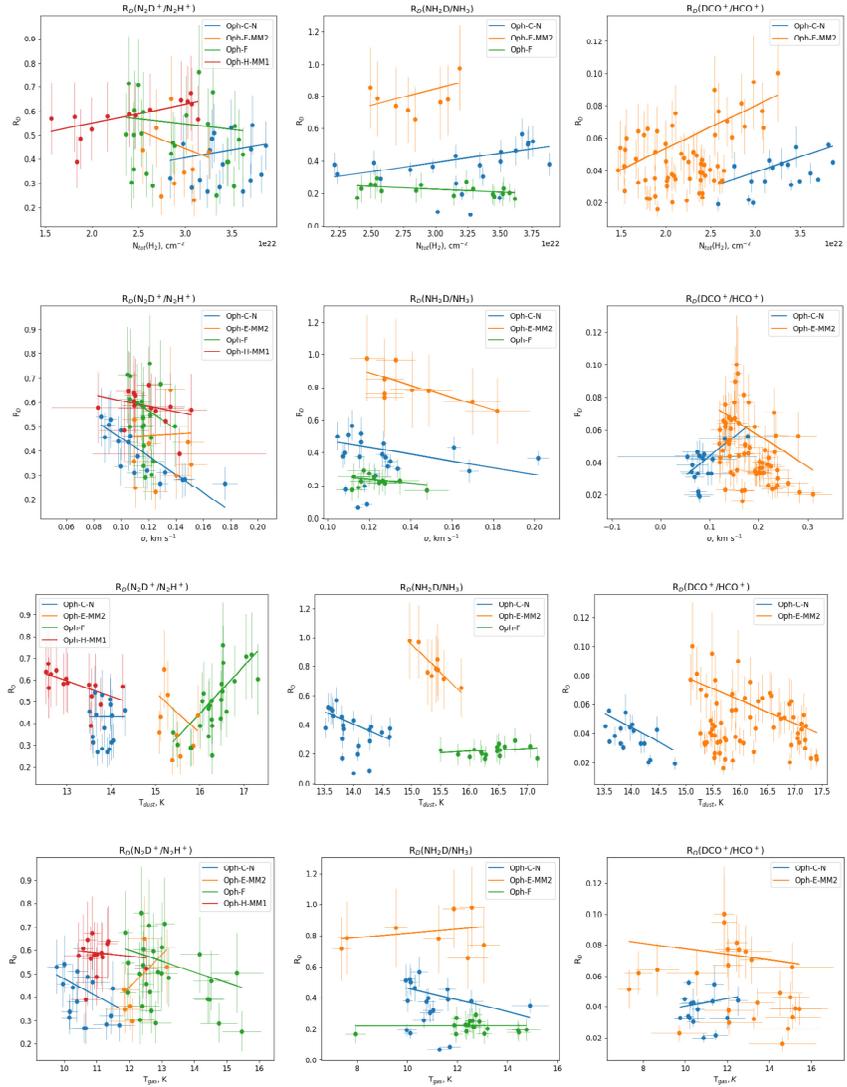


Рис. 3. Зависимости доли дейтерия от физических параметров среды. Для каждого ядра на графиках приведены линейные аппроксимации

температурой газа, возможно, из-за того, что эти величины варьируются в очень небольших диапазонах. Мы обнаружили, что доля дейтерия уменьшается с ростом температуры пыли и дисперсии скорости газа, что не противоречит теоретическим представлениям о процессе фракционирования дейтерия, однако, учитывая разброс значений доли дейтерия и бары ошибок, эти тренды нельзя считать значимыми.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 19-72-00064.

Библиографические ссылки

- [1] *Friesen Rachel K., Pineda Jaime E., co-PIs et al.* The Green Bank Ammonia Survey: First Results of NH₃ Mapping of the Gould Belt // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 843, № 1. — P. 63. 1704.06318.
- [2] *Petrashkevich I. V., Punanova A. F., Caselli P. et al.* Deuterium Fractionation in the Oph-H-MM1 Dense Core of the L1688 Low Mass Star-Forming Region // *Astronomy Reports.* — 2020. — Vol. 64, № 8. — P. 637–640.
- [3] *Ladjelate B., André Ph., Könyves V. et al.* The Herschel view of the dense core population in the Ophiuchus molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 638. — P. A74. 2001.11036.

АКТИВНЫЕ ЯДРА СРЕДИ ГАЛАКТИК С ПОЛЯРНЫМ КОЛЬЦОМ

Д. В. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет

Используя данные SDSS, исследована статистика ядерной активности галактик с полярным кольцом (ГПК). Построены и проанализированы BPT-диаграммы для выборок ГПК и выборок сравнения. Полученный результат говорит в пользу избытка активных ядер среди ГПК по сравнению с нормальными объектами. Приведена возможная трактовка наблюдаемого эффекта.

ACTIVE GALACTIC NUCLEI AMONG POLAR-RING GALAXIES

D. V. Smirnov

St. Petersburg State University

Based on SDSS data the nuclear activity statistics of the polar-ring galaxies (PRGs) was investigated. BPT-diagrams for PRGs and comparison samples were plotted and analyzed. Obtained results show evidence of excess of active galactic nuclei among PRGs compared to regular objects. Possible interpretation of such effect is discussed.

Введение

Галактики с полярным кольцом (ГПК) состоят из двух подсистем: центральной галактики и протяженного кольца или диска, расположенного почти перпендикулярно большой оси центрального объекта. В подавляющем большинстве случаев центральные объекты ГПК бедны газом и являются представителями поздних (E/S0) типов. Полярные структуры, наоборот, имеют голубые показатели цвета и богаты газом.

На данный момент предложено несколько сценариев формирования ГПК: слияние двух дисковых галактик, аккреция газа при близком пролете, захват и разрушение спутника. Подобные взаимодействия должны сопровождаться аккрецией газа на центральную галактику, например, численные симуляции показывают, что в случае слияния галактик (merging scenario [1]) около 10–20 % газа попадает в центральные области сформировавшегося объекта. Вековая эволюция полярных структур также может вызывать аккрецию газа к центру. Аккреция газа на центральный массивный объект в ядрах галактик является основным механизмом нетепловой ядерной активности. Учитывая особенности формирования и эволюции ГПК, возникает вопрос о ядерной активности ГПК.

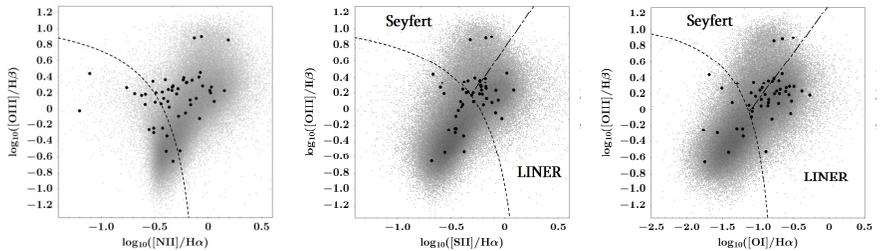
Данные и методика

В работе рассматривались галактики из каталога SPRC [2], в котором приведены данные о 275 кандидатах в ГПК, разделенных на четыре группы: лучшие кандидаты, хорошие кандидаты, связанные объекты и кольца, видимые плашмя. Спектральные наблюдения показывают, что большая часть первой группы — кинематически подтвержденные ГПК. Эта группа была дополнена объектами из работы [3], в ней описывается 31 галактика из SDSS (DR15 [4]), морфологически подобная первой группе из каталога SPRC.

Для всех вышеперечисленных объектов были получены необходимые фотометрические и спектральные данные из обзора SDSS (<https://www.sdss.org>). Фотометрические данные были исправлены за поглощение в Галактике и k -поправку. Спектральные данные были исправлены за поглощение с использованием бальмеровского декримета (истинное отношение было принято равным 2.86) и кривой межзвездного поглощения Калцетти. В дальнейшем при классификации галактик рассматривались только те объекты, для которых выполнялось условие $S/N > 3$ во всех эмиссионных линиях. Это ограничение оставило в рассмотрении 183 объекта.

Для каждой группы ГПК была составлена выборка сравнения, так чтобы распределения объектов в них по абсолютной величине в полосе r , показателю цвета $g - r$ и красному смещению были близки к наблюдаемым распределениям для ГПК. Для этого из обзора SDSS случайным образом извлекались галактики в соответствии с плотностями вероятности, задаваемыми наблюдаемыми распределениями характеристик ГПК. Объем выборок сравнения составил от 17 до 55 тыс. объектов.

Для классификации галактик были использованы классические BPT-диаграммы (Baldwin, Phillips & Telervich [5]). Они позволяют разделить объекты с разными источниками ионизации, сравнивая отношения потоков в разных эмиссионных линиях (см. рисунок). На диаграммы нанесены штриховые линии, отделяющие галактики со звездообразованием (они находятся ниже этой линии) от галактик с активным ядром (выше этой линии). Прямые отделяют сейфертовские (SyG) галактики от LINER (Low-Ionization Narrow Emission Region) галактик. В работе была использована классификационная схема из работы [6]. При анализе диаграмм мы считали, что галактика имеет активное ядро, если она расположена выше пунктирной линии на всех трех диаграммах. Таким образом, в категорию галактик с активным ядром попали Sy галактики, LINEAR галактики и так называемые галактики с составным ядром (подробнее см. [7]).



BPT-диаграммы для лучших кандидатов в ГПК (черные кружки) и выборки сравнения (серые кружки). Линиями обозначены границы для разных типов активных ядер согласно [6]

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного анализа даны в таблице, в скобках указано число объектов. Во избежание нежелательных статистических эффектов было рассмотрено 50 реализаций выборок сравнения, в таблице приведено усредненное значение, ошибки $\sim 0.01\%$ и в дальнейшем не указываются. Видно, что выборки ГПК и выборки сравнения показывают хорошее согласие в долях активных ядер. Однако у лучших кандидатов наблюдается некоторое превышение доли активных ядер по сравнению с соответствующей выборкой сравнения (50 против 40%). Среди лучших кандидатов выделено 6 сейфертовских галактик ($11.5 \pm 4.4\%$) и 16 LINEAR галактик ($30.8 \pm 6.4\%$), в выборке сравнения эти значения составляют 6.9

Выборка	ГПК	Выборка сравнения
Все ГПК	26± 3% (48)	25 %
Лучшие кандидаты + PM2019	50± 7% (26)	40 %
Хорошие кандидаты	12± 4% (10)	16 %
Связанные объекты	24± 8% (7)	29 %
Кольца плашмя	24± 9% (5)	26 %

и 23 % соответственно. То есть избыток активных ядер среди лучших кандидатов наблюдается и среди SyG, и среди LINEAR галактик. Детальное рассмотрение показывает, что при $M_r \leq -20^m$ доля активных ядер среди лучших кандидатов в ГПК примерно вдвое превышает долю активных ядер среди обычных галактик той же светимости. Этот факт в условиях скромной статистики может говорить в пользу существования наблюдаемого избытка активных ядер среди лучших кандидатов.

Для зажигания активного ядра необходимо (но недостаточно) наличие холодного газа в центральных областях галактики. Как уже говорилось выше, формирование ГПК может приводить к выпадению газа в центральные области ГПК. Однако на больших временах требуется постоянный приток газа к центральным областям для поддержания ядерной активности. Таким источником может служить взаимодействие полярного кольца и центральной галактики, приводящее к падению газа на последнюю. Признаки такого взаимодействия были обнаружены в некоторых ГПК [8]. Однако механизмы транспортировки этого газа к центральным областям остаются неизученными.

Заключение

На основе спектральных данных из обзора SDSS изучена встречаемость активных ядер среди галактик с полярным кольцом. Анализ ВРТ-диаграмм указывает на возможный избыток активных ядер среди лучших кандидатов в ГПК. Однако данный результат основан на небольшом числе известных объектов и нуждается в дальнейшем подтверждении.

Автор выражает благодарность В. П. Решетникову, под чьим руководством была выполнена данная работа. Более подробное описание этой работы можно найти в [7].

Библиографические ссылки

- [1] *Bournaud F., Combes F.* Formation of polar ring galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 401. — P. 817–833. astro-ph/0301391.
- [2] *Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P.* A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 418, № 1. — P. 244–257. 1107.1966.
- [3] *Reshetnikov V. P., Mosenkov A. V.* New candidates to polar-ring galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 483, № 2. — P. 1470–1480. 1811.10222.
- [4] *Aguado D. S., Ahumada R., Almeida A. et al.* The Fifteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release of MaNGA-derived Quantities, Data Visualization Tools, and Stellar Library // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2019. — Vol. 240, № 2. — P. 23. 1812.02759.

- [5] *Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 1981. — Vol. 93. — P. 5–19.
- [6] *Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T.* The host galaxies and classification of active galactic nuclei // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 372, № 3. — P. 961–976. [astro-ph/0605681](#).
- [7] *Smirnov D. V., Reshetnikov V. P.* Active Galactic Nuclei among Polar-Ring Galaxies // *Astronomy Letters.* — 2020. — Vol. 46, № 8. — P. 501–508. [2010.03349](#).
- [8] *Egorov O. V., Moiseev A. V.* Metallicity and ionization state of the gas in polar-ring galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 486, № 3. — P. 4186–4197. [1904.02513](#).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ, МАГНИТНОГО ПОЛЯ И АККРЕЦИИ ПОЛЯРА V379 VIR

М. В. Сусликов¹, А. И. Колбин^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН

В данной работе выполнено фотометрическое и спектральное исследование поляра V379 Vir. При определении параметров системы использовались метод моделирования ИК кривых блеска на основе модели точечного источника циклотронного излучения, метод синтетической фотометрии для описания наблюдаемого спектрального распределения энергии, а также метод моделирования магнитной кривой, полученной из величины зеемановского расщепления линии $H\beta$. Нам удалось оценить температуру белого карлика $T_{\text{eff}} = 11\,450$ К, массы и радиусы главной и вторичной компонент: $M_1 = 0.696 M_{\odot}$, $R_1 = 0.011 R_{\odot}$, $M_2 = 0.105 M_{\odot}$, $R_2 = 0.14 R_{\odot}$. Разделение компонент составило порядка 0.6 а. е., а наклонение орбитальной плоскости i лежит в диапазоне $47\text{--}60^{\circ}$.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF POLAR V379 VIR COMPONENTS, MAGNETIC FIELD AND ACCRETION

M. V. Suslikov¹, A. I. Kolbin^{1,2}

¹Kazan (Volga-region) Federal University, ²Special Astrophysical Observatory of RAS

In this work we performed a photometric and spectral study of the polar V379 Vir. We used the modeling of the IR light curves based on a simple model of cyclotron radiation source, the method of synthetic photometry to fit the observed spectral distribution of the energy, as well as the modeling of the magnetic curve obtained from Zeeman splitting of the $H\beta$ line to determine the parameters of the system. We managed to estimate the temperature of the white dwarf $T_{\text{eff}} = 11\,450$ K, the masses and radii of the primary and secondary components: $M_1 = 0.696 M_{\odot}$, $R_1 = 0.011 R_{\odot}$, $M_2 = 0.105 M_{\odot}$, $R_2 = 0.14 R_{\odot}$. The separation of the components was about 0.6 AU, and the inclination i lies in the range $47\text{--}60^{\circ}$.

Введение

Поляры (переменные типа AM Her) представляют собой тесные двойные системы, состоящие из сильно замагниченного белого карлика ($B \sim 10^7\text{--}10^8$ Гс) и холодной звезды главной последовательности, заполняющей свою полость Роша. Вещество вторичной компоненты аккрецирует на поверхность белого карлика через точку Лагранжа L_1 . При достижении аккреционной струей области, где давление магнитного поля $B^2/8\pi$ начинает доминировать над гидродинамическим давлением потока ρv^2 , происходит захват ионизованного вещества, которое начинает движение вдоль магнитных силовых линий. В результате вещество выпадает вблизи магнитного полюса белого карлика, образуя на его поверхности горячую ($T \sim 10$ кэВ) ударную область, являющуюся источником рентгеновского тормозного излучения и циклотронного излучения в оптическом диапазоне.

Первые исследования системы V379 Vir [1] отождествили ее с взаимодействующей короткопериодической переменной с магнитным белым карликом и коричневым карликом. В статье [2] было установлено наличие избыточного излучения в ближнем инфракрасном

диапазоне, что указывает на присутствие холодного коричневого карлика спектрального класса L5–L7 с температурой фотосферы менее 1700 К. Исследование системы в рентгеновской области [3] выявило слабый темп аккреции около $10^{-14} M_{\odot}/\text{год}$.

В нашей ранней работе [4] в спектре V379 Vir было обнаружено наличие четкого земаановского расщепления компонент линии H_{β} , а также их смещение в результате квадратичного эффекта Зеемана. Благодаря этому удалось оценить величину расщепления и на ее основе построить кривую изменения магнитного поля белого карлика, которая выявила периодическую переменность в интервале 4.5–7.5 МГц. В предположении белого карлика со смещенным диполем мы выполнили моделирование магнитной кривой.

Моделирование кривых блеска в ИК

Нами использовались JHK_s кривые блеска, полученные Debes и др. [2]. Моделирование кривых блеска проводилось на основе простой модели белого карлика с точечным источником циклотронного излучения и с дипольной структурой магнитного поля. Так же как и в [5], предполагалась однородность источника по температуре и плотности. Ориентация магнитного диполя определена путем моделирования магнитной кривой, а координаты источника циклотронного излучения находились описанием инфракрасных кривых блеска с использованием взвешенного метода наименьших квадратов и алгоритма оптимизации Нелдера–Мида. Сравнение наблюдаемых и теоретических ИК кривых блеска представлено на рис. 1. Отметим, что в ходе аппроксимации существует большая неоднозначность в определении параметров модели.

Спектральное распределение энергии

Имея фотометрические наблюдения V379 Vir в широком диапазоне, можно получить спектральное распределение энергии исследуемого источника, преобразовав звездные величины в абсолютные потоки на эффективной длине волны фильтра. С другой стороны, плотность потока вычисляется путем свертки теоретического спектра с кривой фотометрической полосы пропускания. В качестве теоретического спектра мы выбрали сетки моделей водородного белого карлика [6]. Для описания наблюдаемого распределения спектральной плотности потока использовался взвешенный МНК. В процессе минимизации определялись температура фотосферы белого карлика $T_{\text{eff}} = 11\,450 \pm 166$ К и его угловой радиус. Сравнение полученных наблюдаемых и синтетических потоков на рис. 2 показывает наличие избытка излучения в ИК, обусловленного вкладом излучения коричневого карлика. Поскольку в данной системе наблюдается слабый темп аккреции, а в спектрах отсутствуют характерные эмиссии, вклад газовой составляющей в интегральный поток излучения оказывается незначительным. Ошибки определения потоков рассчитывались на основе метода Монте-Карло.

Определение параметров V379 Vir

По полученному угловому радиусу V379 Vir и параллаксу из каталога GAIA мы определили радиус белого карлика $R_1 = 0.0113 \pm 0.0002 R_{\odot}$. Решая численным методом известное соотношение между радиусом и массой для белых карликов [7], можно получить $M_1 = 0.696 \pm 0.018 M_{\odot}$. В работе [1] из кривой лучевых скоростей получена оценка полуамплитуды K'_2 для пятна коричневого карлика. Учитывая поправку перехода к центру вторичной компоненты, нами получено $K_2 = 346.8 \pm 21.3$ км/с. На основе уточненного нами в [4] орбитального периода P_{orb} и K_2 можно вычислить функцию масс главной компоненты:

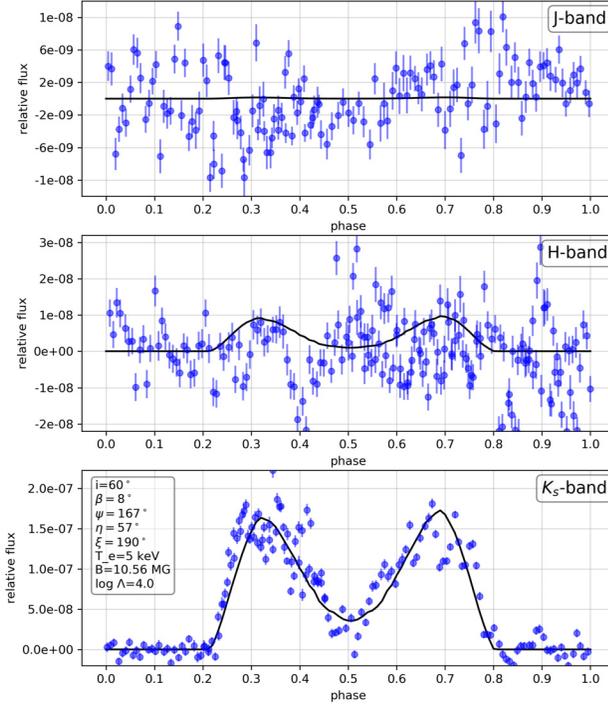


Рис. 1. Сравнение модельных и наблюдаемых кривых блеска V379 Vir в J -, H -, K_s -полосах. Параметры модели указаны на графике

$$f(M_1) = 1.0385 \cdot 10^{-7} P_{orb} K_2^3, \quad (1)$$

с другой стороны,

$$f(M_1) = \frac{M_1^3}{(M_1 + M_2)^2} \sin^3 i. \quad (2)$$

Из условия заполнения коричневым карликом полости Роша и эволюционной связью между радиусом вторичной компоненты и ее массой из эволюционных треков [8] $R_2(M_2) = R_L(M_2, M_1)$, решая совместно уравнение (2), мы определили угол наклона плоскости орбиты в диапазоне $47\text{--}60^\circ$. Таким образом, по формуле (2) получили, что $M_2 = 0.10471 \pm 0.00003 M_\odot$, $R_2 = 0.14040 \pm 0.00004 R_\odot$. Из третьего закона Кеплера мы вычислили разделение компонент $A = 0.609 \pm 0.004$ а. е.

На основании уточненного угла наклона орбитальной плоскости i было выполнено моделирование магнитной кривой аналогично [4]. Полученные параметры модели, описывающей наблюдения: угол наклона оси магнитного диполя $\beta = 29^\circ$, долгота магнитного полюса $\psi = 355^\circ$, напряженность на магнитном полюсе $B_m = 11.7$ МГс, смещение диполя $a = 0.15$.

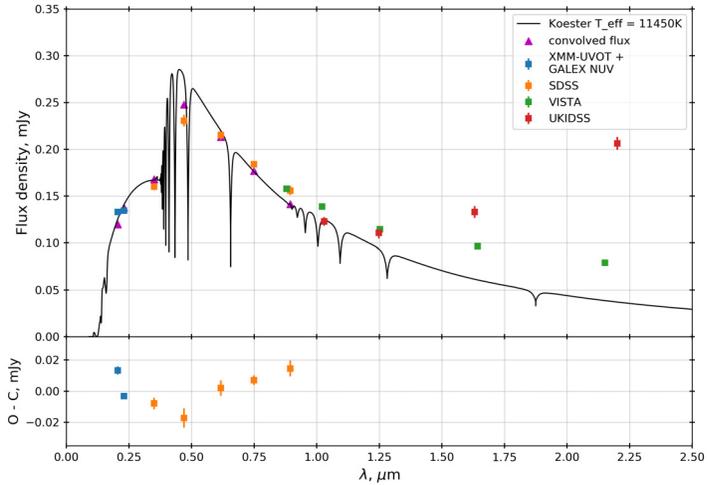


Рис. 2. Распределение спектральной плотности потока V379 Vir

Библиографические ссылки

- [1] *Schmidt G. D., Szkody P., Silvestri N. M. et al.* Discovery of a Magnetic White Dwarf/Probable Brown Dwarf Short-Period Binary // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 630. — P. 173–176.
- [2] *Debes J. H., Lopez-Morales M., Bonanos A. Z., Weinberger A. J.* Detection of a variable infrared excess around SDSS J121209.31+013627.7 // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 647. — P. 147–150.
- [3] *Stelzer B., Martino D. de, Casewell S. L. et al.* X-ray orbital modulation of a white dwarf accreting from an L dwarf. The system SDSS J121209.31+013627.7 // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. L6 5pp.
- [4] *Suslikov M. V., Kolbin A. I., Borisov N. V., Shimansky V. V.* Magnetic field study of the polar V379 Vir // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century* / ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev : Proceedings of the All-Russian Conference, Nizhnii Arkhyz 21–25 sep. 2020 y. — Nizhnii Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic : Special Astrophysical Observatory RAS, 2020. — P. 297.
- [5] *Kolbin A. I., Borisov N. V.* Картирование белых карликов в системах типа AM Her // *Письма в Астрон. журн.* — 2020. — Vol. 46. — P. 868–882.
- [6] *Koester D.* White dwarf spectra and atmosphere models // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* — 2010. — Vol. 81. — P. 921–931.
- [7] *Nauenberg M.* Analytic Approximations to the Mass-Radius Relation and Energy of Zero-Temperature Stars // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 175. — P. 417.
- [8] *Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C.* Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to $7 M_{\odot}$, and from $Z = 0.0004$ to 0.03 // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 141. — P. 371–383.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ СПУТНИКОВОЙ ДИНАМИКИ

Е. Е. Шмидт, М. А. Баныщикова, В. А. Авдюшев

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В данной работе представлены результаты исследования полной и внутренней нелинейностей применительно к далеким спутникам Юпитера, наблюдавшимся на короткой дуге. Выявлена взаимосвязь между нелинейностью и условиями спутниковых наблюдений. В частности, показано, что полная нелинейность очень сильная, когда период наблюдений меньше 0.1 от орбитального периода, в то время как внутренняя нелинейность достаточно слабая для всех спутников, что указывает на возможность применения нелинейных методов для адекватного моделирования их орбитальной неопределенности.

INVESTIGATION OF NONLINEARITY IN INVERSE PROBLEMS OF SATELLITE DYNAMICS

E. E. Shmidt, M. A. Banshchikova, V. A. Avduyshev

National Research Tomsk State University

The report presents the results of a study of the total and intrinsic nonlinearities as applied to the outer satellites of Jupiter observed on a short arc. The relationship between the nonlinearities and the conditions of satellite observations is revealed. In particular, it is shown that the total nonlinearity is very strong when the observation period is less than 0.1 of the orbital period, while the intrinsic nonlinearity is weak enough for all satellites, which indicates the possibility of using nonlinear methods for adequate modeling of their orbital uncertainty.

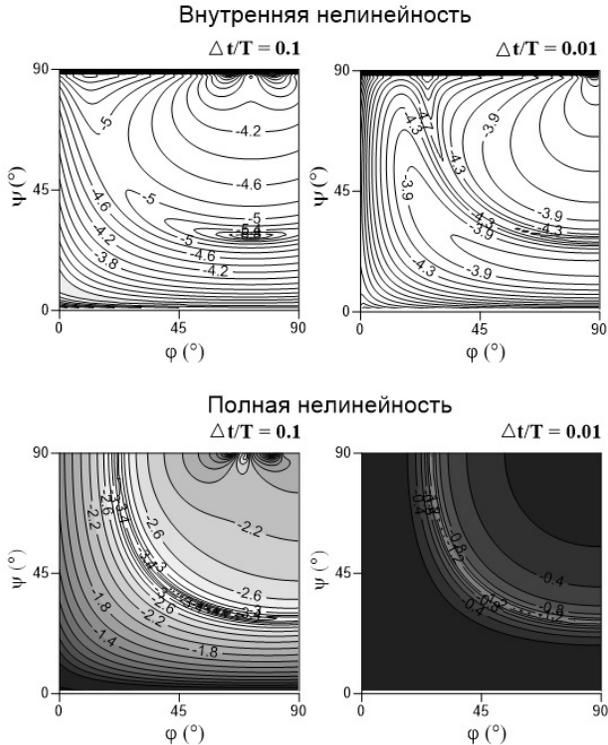
Введение

Большинство внешних спутников Юпитера было открыто в самом начале XXI столетия [1]. Между тем орбиты многих из них до сих пор плохо определены вследствие скудного состава их наблюдений, несмотря на то что со времени открытия спутников прошло уже почти два десятка лет. Для некоторых объектов орбиты определены настолько ненадежно, что даже не совсем ясно, являются ли они вообще спутниками или это астероиды, временно захваченные Юпитером. Ответить на этот вопрос можно, только исходя из вероятностных оценок, полученных на основе стохастического моделирования орбитальной неопределенности.

Поскольку для новых представителей спутниковой системы Юпитера неопределенность в орбитальных параметрах достаточно большая, подход к ее моделированию весьма деликатный. Исследователь становится перед выбором метода стохастического моделирования — линейного или нелинейного. Линейные методы очень простые, но грубые при сильной нелинейности обратной задачи, которая как раз сопряжена с большой орбитальной неопределенностью. Все нелинейные методы очень сложные и трудоемкие, но более точные. При этом всегда нужно иметь в виду, что адекватность нелинейных методов определяется так называемой внутренней нелинейностью. В своей работе мы поставили перед собой цель оценить нелинейность в обратных задачах орбитальной динамики для всех новых внешних спутников.

Внутренняя и полная нелинейность для внешних спутников Юпитера

Чтобы выявить взаимосвязь между нелинейностью и условиями спутниковых наблюдений, мы предварительно исследовали проблему на примере нормализованной круговой задачи двух тел. Мы оценивали полную κ и внутреннюю $\hat{\kappa}$ нелинейности [2] при четырех наблюдениях, распределенных на дугах $\Delta t/T = 10^{-1}$ и 10^{-2} , где Δt — временной интервал наблюдения, а $T = 2\pi$ — период обращения спутника. На рисунке показаны значения показателей нелинейности в зависимости от начального положения объекта, определяемого аномалией φ , и от угла между картиной и орбитальной плоскостями ψ . Заливка полутонами серого цвета применяется только к уровням показателей, превышающих критическое значение 10^{-3} [2].



Внутренняя $\lg \hat{\kappa}$ и полная $\lg \kappa$ нелинейности в модельной задаче

Как видно из рисунка, внутренняя нелинейность при всех обстоятельствах наблюдений довольно слабая, что является практическим основанием для применения нелинейных методов стохастического моделирования при исследовании орбитальной неопределенности. Полная нелинейность значительно сильнее, и ее показатели в большинстве случаев превышают критическое значение. Слабая полная нелинейность имеет место лишь при определенных обстоятельствах, когда $\Delta t/T = 10^{-1}$. На рисунке им соответствуют угловые ве-

Показатели нелинейности для далеких спутников Юпитера

№	Спутник	\varkappa	$\tilde{\varkappa}$	N	$\Delta t/T$	№	Спутник	\varkappa	$\tilde{\varkappa}$	N	$\Delta t/T$
1	Архе	0.0003	0.0000	31	0.64	15	S2003J17	0.0214	0.0006	12	0.07
2	Авгонео	0.0004	0.0000	33	0.96	16	S2003J15	0.0218	0.0004	12	0.08
3	S2003J13	0.0011	0.0002	22	0.61	17	S2003J11	0.0279	0.0001	17	0.43
4	Спюндее	0.0021	0.0001	16	0.59	18	S2003J23	0.0317	0.0011	16	0.04
5	Ортозие	0.0031	0.0001	23	0.75	19	Пазифее	0.0462	0.0036	17	0.62
6	Эванге	0.0035	0.0002	21	0.72	20	S2003J18	0.0563	0.0053	18	0.13
7	S2003J16	0.0036	0.0000	12	0.09	21	S2003J09	0.1600	0.0035	17	0.06
8	S2003J20	0.0036	0.0001	37	0.76	22	S2003J14	0.1800	0.0056	11	0.06
9	S2003J07	0.0046	0.0001	32	0.69	23	S2003J05	0.5800	0.0037	16	0.04
10	Гермиппе	0.0085	0.0002	30	0.83	24	S2003J03	0.7300	0.0095	15	0.05
11	S2003J06	0.0117	0.0014	33	0.51	25	S2003J12	0.8100	0.0018	11	0.05
12	Eukelade	0.0143	0.0012	18	0.11	26	S2003J02	0.9000	0.0114	8	0.03
13	S2003J19	0.0178	0.0001	10	0.07	27	S2003J10	0.9100	0.0047	11	0.04
14	S2003J22	0.0211	0.0001	22	0.77	28	S2003J04	1.0000	0.0008	11	0.05

личины около оврага, проходящего через значения $\varphi = 30^\circ$ & $\psi = 75^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ & $\psi = 45^\circ$, $\varphi = 75^\circ$ & $\psi = 30^\circ$.

В таблице представлены значения показателей нелинейности для далеких спутников Юпитера, у которых наблюдения покрывают дугу орбиты меньше одного оборота спутника. Здесь N — количество моментов наблюдений. Спутники отсортированы по возрастанию значения полной \varkappa нелинейности. Как видно из таблицы, спутники с номерами строк от 11 по 20 — с умеренной нелинейностью, а спутники с номерами строк от 21 по 28 — с сильной нелинейностью.

Из таблицы видно, что полная нелинейность, как и в модельной задаче, очень сильная, когда период наблюдений меньше 0.1 от орбитального периода. В то же время внутренняя нелинейность достаточно слабая для всех спутников, что указывает на возможность применения нелинейных методов для адекватного моделирования их орбитальной неопределенности.

Заключение

Таким образом, в работе выявлена взаимосвязь между нелинейностью и условиями спутниковых наблюдений. В частности, показано, что полная нелинейность очень сильная, когда период наблюдений меньше 0.1 от орбитального периода, в то время как внутренняя нелинейность достаточно слабая для всех спутников, что указывает на возможность применения нелинейных методов для адекватного моделирования их орбитальной неопределенности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Библиографические ссылки

- [1] Авдюшев В. А., Баньщикова М. А. Области возможных движений новых спутников Юпитера // Астрон. вестник. — 2011. — Т. 41. — С. 446—452.
- [2] Авдюшев В. А., Слюсина О. М., Тамаров В. А. Нелинейность в обратных задачах астероидной динамики // Астрон. вестник. — 2021. — Т. 55. — С. 1—13.

Научные сообщения



ОЦЕНКА НЕТЕПЛОВЫЙ ПОТЕРИ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ GJ 436b ЗА СЧЕТ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ H₂

А. А. Автаева^{1,2}, В. И. Шематович¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, ²ГАИШ МГУ, Москва

Оценен вклад процессов диссоциации молекулярного водорода жестким ультрафиолетовым (УФ) излучением и сопутствующим потоком фотоэлектронов в образование фракции надтеплого атомарного водорода в переходной H₂ → H области и формирование нетеплового потока убегания из протяженной верхней атмосферы экзопланеты — горячего непуна GJ 436b. Рассчитаны скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации H₂.

ESTIMATES OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC LOSS OF EXOPLANET GJ 436b DUE TO DISSOCIATION PROCESSES H₂

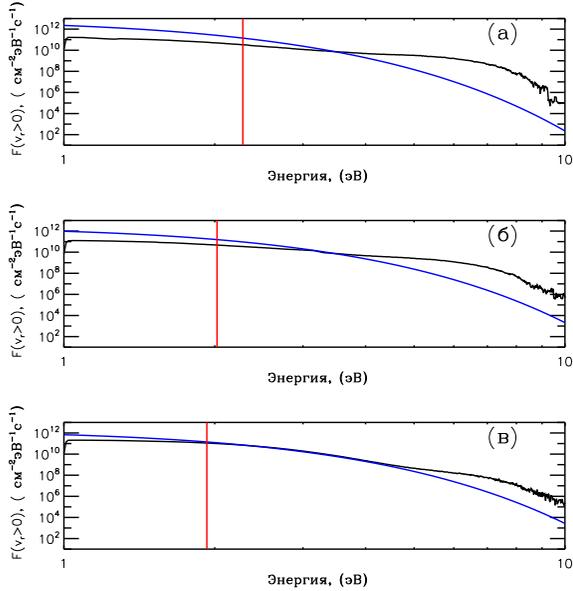
A. A. Avtaeva^{1,2}, V. I. Shematovich¹

¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, ²SAI MSU, Moscow

The contribution of the processes of dissociation of molecular hydrogen by hard ultraviolet (UV) radiation and the accompanying flux of photoelectrons to the formation of the fraction of suprathermal atomic hydrogen in the transition H₂ → H region and the formation of the non-thermal escape flux from the extended upper atmosphere of the exoplanet — hot neptune GJ 436b — is estimated. The rate of formation and the energy spectrum of hydrogen atoms formed with an excess of kinetic energy during the dissociation of H₂ are calculated.

Тепловой режим и скорость теплового убегания из атмосферы горячей экзопланеты существенно зависят от состава атмосферы. Более того, они тесно связаны через скорости нагрева и выхолаживания, как показывают аэрономические модели верхней атмосферы GJ 436b [1]. Процессы диссоциации, такие как фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциативная ионизация и др., — основные источники тепловых и надтепловых фрагментов молекул в состояниях электронного возбуждения в верхних атмосферах планет [2]. Молекула водорода является, с одной стороны, простейшей молекулой, однако ее диссоциация при поглощении звездного УФ-излучения и/или электронном ударе происходит посредством нескольких механизмов диссоциации. На длинах волны короче 845 Å прямое поглощение в континуумы состояний и электронного возбуждения является доминантным механизмом фотодиссоциации. Значения сечений для этих процессов достаточно высоки, и в результате диссоциации образуются атом водорода, в основном H(1s), и атом в возбужденном H(2s, 2p) состоянии. Из лабораторных исследований (Huebner et al., 1992) известно, что избыточные кинетические энергии атомов водорода, образующихся при фото- и ударной электронной диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода, характеризуются двумя пиками по энергии фрагментов — в области низких энергий 0–1 эВ (медленные продукты диссоциации) и в области относительно высоких энергий 4–6 эВ (быстрые продукты диссоциации). Данные избыточные энергии в модели рассчитывались как разница между энергией поглощенного УФ фотона, энергией возбужденного электронного состояния и энергией диссоциации или диссоциативной ионизации и выбирались из измеренных в лаборатории распределений. Фотоллиз богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды приводит к образованию

надтепловых частиц (т. е. частиц с избытком кинетической энергии) — надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации H_2 , которые могут вносить важный вклад в негепловую потерю атмосферы горячей экзопланеты [2].



Расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах $1.56 \cdot R_p$ (верхняя панель), $1.75 \cdot R_p$ (средняя панель) и $1.84 \cdot R_p$ (нижняя панель). Линиями синего цвета показаны потоки тепловых атомов H , рассчитанные для локально равновесного распределения атомарного водорода в соответствии с профилем температуры из модели [1]. Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах

Планета GJ 436b с массой $M_p = 0.07 M_{Jupiter}$ и радиусом $R_p = 0.38 R_{Jupiter}$ вращается вокруг красного карлика Gliese 436 на орбите с большой полуосью 0.028 а. е. Для звезды Gliese 436 использовался аппроксимированный спектр в спектральном диапазоне 10–912 Å, разбитом на десять интервалов. При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны [2, 3] исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере и рассчитан нетепловой поток убегания. Расчеты энергетических спектров восходящего потока надтепловых атомов водорода, представленные на рисунке, показывают, что процессы диссоциации $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$ молекулярного водорода сопровождаются образованием и переносом в самые верхние слои переходной $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$ области верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b движущихся вверх надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше локальной энергии убегания. Поток убегания оценен величиной $3.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для умеренного уровня звездной активности в УФ-излучении, что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации H_2 , равной $7.8 \cdot 10^8 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$. Расчетная величина входит в интервал полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне $\sim (3.7 \cdot 10^6 - 1.1 \cdot 10^9) \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ [4]. Полученная в

расчетах оценка скорости потери атмосферы экзопланетой GJ 436b за счет надтепловых атомов водорода может рассматриваться как среднее значение, так как расчеты проведены для условий умеренной звездной активности в УФ-излучении и для минимальных значений вероятностей преддиссоциации возбужденных электронных уровней молекулы H_2 . Данный источник надтепловых атомов водорода рекомендуется включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет.

Исследование выполнено в рамках проекта № 075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» Министерства науки и высшего образования РФ.

Библиографические ссылки

- [1] *Berezutsky A. G., Shaikhislamov I. F., Miroshnichenko I. B. et al.* Interaction of the Expanding Atmosphere with the Stellar Wind around Gliese 436b // *Solar System Research*. — 2019. — Vol. 53. — P. 138–145.
- [2] *Shematovich V. I.* Suprathermal hydrogen produced by the dissociation of molecular hydrogen in the extended atmosphere of exoplanet HD 209458b // *Solar System Research*. — 2010. — Vol. 44. — P. 96–103.
- [3] *Shematovich V. I.* Stochastic Models of Hot Planetary and Satellite Coronas // *Solar System Research*. — 2004. — Vol. 38, № 1. — P. 28–38.
- [4] *Kulow Jennifer R., France Kevin, Linsky Jeffery, Loyd R. O. Parke.* Ly α Transit Spectroscopy and the Neutral Hydrogen Tail of the Hot Neptune GJ 436b // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 786, № 2. — P. 132. 1403.6834.

АЛГОРИТМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДВУ- И ТРЕХМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Р. В. Балувев

Санкт-Петербургский государственный университет

Рассматривается задача поиска статистически значимых структур в распределении каких-либо астрономических объектов. Для этого используется метод вейвлет-анализа в дву- или трехмерном пространстве параметров. Алгоритм двумерного анализа полностью завершен и опубликован в виде открытого C++ кода стабильной версии, тогда как трехмерный алгоритм находится на экспериментальной стадии.

WAVELET ANALYSIS ALGORITHM FOR BI- AND TRIVARIATE STATISTICAL DISTRIBUTIONS

R. V. Baluev

Saint Petersburg State University

We consider the task of detecting statistically significant patterns in a distribution of some astronomical objects. For this goal we use the wavelet analysis method in bi- or trivariate parametric space. The bivariate analysis algorithm is finished and released as an open-source C++ code of a stable version, while the trivariate algorithm is at an experimental stage.

Введение

Вейвлет-анализ восходит к Гроссману и Морле [1] и представляет собой математический инструмент, способный представить какую-либо функцию через совокупность множества уровней разрешения. В настоящее время этот метод часто используется в различных областях науки, наиболее известным приложением являются анализ временных рядов (одномерный вейвлет-анализ) и обработка изображений (двумерный вейвлет-анализ).

Классический вейвлет-анализ нацелен на исследование функции $f(x)$ детерминированного аргумента x (возможно, многомерного). Сама функция может содержать случайный шум, но она определена на детерминированной области. В задачах такого типа измеряются значения $f_i = f(x_i)$, а затем к ним применяется дискретная версия вейвлет-преобразования. Шум в этой классической формулировке принимается обычно аддитивным, т. е. $f(x) = s(x) + n(x)$, где $s(x)$ — детерминированный сигнал; $n(x)$ — шум.

Здесь, однако, мы рассматриваем другую практическую задачу: анализ распределения случайной величины. В такой формулировке мы не можем измерять значения $f(x_i)$ напрямую. Вместо этого мы должны оценить плотность вероятности $f(x)$ или получить какие-либо научные знания об $f(x)$, основываясь на случайной выборке из N независимых случайных величин x_i . Тогда $f(x)$ определяется неявно как локальная плотность x_i в окрестности заданного x . Важно, что шум в такой оценке плотности не является аддитивным, поскольку возникает по причине случайных флуктуаций выборки. В этой задаче он представляет собой шум дробового типа. Таким образом, наша задача оказывается существенно отличной от того, что мы имеем в классическом вейвлет-анализе.

Хотя имеется обширная математическая литература по классическому вейвлет-анализу, эти результаты относятся в основном к анализу временных рядов или обработке изображений и предполагают аддитивный шум. Для задачи анализа распределений имеющаяся

литература все еще довольно скудна и до сих пор не позволяет построить самодостаточного алгоритма анализа, хотя первые попытки решения этой задачи (в применении к конкретным астрономическим приложениям) восходят к 1990-м [2, 3].

При ближайшем рассмотрении используемые методы включают существенные дефекты либо не учитывают важные аспекты задачи:

1. Вейвлет-преобразование часто применяется к бинированной выборке, что позволяет использовать далее теорию классического вейвлет-анализа (с небольшими модификациями). Однако такой подход приводит к потере мелких структур из-за бинирования и к дополнительным ошибкам интерполяционного типа.
2. Большой проблемой является фильтрация шума в вейвлет-преобразовании. Многие методы такой фильтрации были разработаны еще в 1990-х гг. [4], однако они не подходят для наших целей, поскольку не позволяют выразить статистическую значимость как таковую (через доверительную вероятность или подобную ей меру). В других работах, где пытались оценить значимость в нужном нам определении, не учитывался эффект множественного тестирования (одновременная проверка большого числа независимых вейвлет-коэффициентов). Пренебрежение этим эффектом [3] приводит к необоснованному завышению значимости и числа выявленных структур.
3. Другая проблема с фильтрацией шума возникает по причине того, что необходимые для этого уровни значимости оцениваются с помощью численного моделирования Монте-Карло. Это очень медленный и вычислительно затратный подход, потому очевидна необходимость более быстрых аналитических оценок.
4. До сих пор почти не уделялось внимание вопросу оптимальности применяемых вейвлетов, т. е. улучшению отношения сигнал/шум и соответственно улучшению чувствительности анализа к малоамплитудным структурам.

Метод

Основы разработанной нами методики представлены в работе [5], где описан самосогласованный алгоритм вейвлет-анализа одномерных статистических распределений. В дальнейшем он был обобщен на двумерный случай, т. е. для анализа распределения объектов на плоскости двух параметров [6], а сейчас ведется работа по расширению методики на три измерения. Повышение размерности ведет к усложнению некоторых формул, а также к резкому росту сложности вычислений, однако общая схема анализа остается примерно одинаковой.

Используется изотропная версия многомерного вейвлет-преобразования:

$$Y(a, \mathbf{b}) = \int_{\mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) \psi \left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{b}|}{a} \right) d\mathbf{x}, \quad (1)$$

где $f(\mathbf{x})$ — плотность вероятности вектора \mathbf{x} , а ψ — анализирующий вейвлет (см. ниже). Изотропная она потому, что вейвлет радиально симметричен (зависит только от модуля аргумента).

По общим требованиям вейвлет-анализа вейвлет ψ должен быть функцией, хорошо локализованной вместе со своим фурье-образом $\hat{\psi}$. Конкретная форма ψ определяется потребностями задачи. В нашем алгоритме ψ определяется как лапласиан

$$\psi = \Delta \varphi, \quad (2)$$

где φ — некоторая нормируемая функция колоколообразной формы. При таком выборе вейвлет-преобразование Y представляет собой сглаженный ядром φ лапласиан функции f , что позволяет придать функции Y интерпретацию, связанную со скоростью ухода f от локальной касательной плоскости. Большой лапласиан потенциально указывает на наличие локального максимума или минимума или как минимум на высокую кривизну графика $f(x)$, что является признаком сильной неоднородности распределения в окрестности заданной точки.

Однако мы не можем вычислить Y напрямую, поскольку оно определено через неизвестную нам f . Можно заметить, что (1) является математическим ожиданием случайной величины

$$y = \psi\left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{b}|}{a}\right). \quad (3)$$

Следовательно, мы можем построить статистическую *оценку* функции Y через выборочное среднее y :

$$\tilde{Y}(a, \mathbf{b}) = \langle y \rangle = \left\langle \psi\left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{b}|}{a}\right) \right\rangle, \quad (4)$$

где угловые скобки означают усреднение по выборке из N объектов, для каждого из которых задан параметрический вектор x_i . Аналогично можно построить оценку дисперсии \tilde{Y} как функцию $\tilde{D}(a, \mathbf{b})$ (по классическим формулам выборочной дисперсии для y_i).

Также необходимо задать нулевую гипотезу, т. е. модель сравнения $Y_0(a, \mathbf{b})$, соответствующую какой-то простой плотности распределения (можно выбрать $Y_0 \equiv 0$ или взять Y_0 на основе гауссовой аппроксимации $f(\mathbf{x})$). В итоге можно построить нормализованную величину, основную статистику, служащую для фильтрации шума:

$$z(a, \mathbf{b}) = \frac{Y(a, \mathbf{b}) - Y_0(a, \mathbf{b})}{\sqrt{\tilde{D}(a, \mathbf{b})}}. \quad (5)$$

Если модель Y_0 верна, то $z(a, \mathbf{b})$ должна оставаться небольшой по модулю, а большие значения указывают на наличие в данной точке (a, \mathbf{b}) статистически значимой структуры. Заметим, что функция $z(a, \mathbf{b})$ определена через случайную выборку, а значит, каждое ее значение является случайной величиной. Таким образом, сама $z(a, \mathbf{b})$ есть случайное поле. Критерий разделения значимых структур от незначимых требует вычисления функции распределения максимального отсчета этого случайного поля, что сделано в указанных выше работах.

Также в работе проводился поиск оптимальных вейвлетов, точнее — оптимальных производящих функций φ , которые позволили бы минимизировать возникающий в $z(a, \mathbf{b})$ шум (хотя z нормирована так, что дисперсия каждого ее значения всегда равна единице, дисперсия максимального отсчета зависит от корреляционных свойств поля, которые определяются формой вейвлета). Оптимальные вейвлеты получены для всех размерностей задачи от 1 до 3, при этом они существенно отличаются от широко распространенного классического МНАТ-вейвлета (лапласиана гауссианы).

Результаты

Алгоритм одно- и двумерного вейвлет-анализа распределений реализован в виде открытого C++ кода, который доступен по адресу: <https://sourceforge.net/projects/waveletstat/>.

Одномерный алгоритм применялся к исследованию распределений экзопланет [7]. Была найдена новая статистически значимая группа планет-гигантов с большой полуосью орбит

около 1 а. е. Она, вероятно, связана с эффектом ледяной аккумуляции в протопланетном диске, существование этого семейства планет подтверждает важность данного физического явления в планетообразовании.

Двумерный алгоритм анализа применялся в двух независимых задачах: поиск астероидных семейств Главного пояса [8] и поиск движущихся групп звезд солнечной окрестности по каталогу GAIA DR2 [9]. Основной итог по первой задаче: вейвлет-анализ позволил обнаружить лишь часть известных астероидных семейств, т. е. многие семейства, обнаруженные обычным здесь методом HCM (иерархический кластерный анализ), в рамках вейвлет-анализа оказываются статистически незначимы. Тем не менее это может быть эффектом проекции и наложения семейств, так как мы изучали фактически трехмерное распределение по его двумерным проекциям. Во второй задаче, наоборот, удалось найти около 20 ранее не известных движущихся групп звезд. Все они оказались высокоскоростными (в низкоскоростной зоне весьма силен эффект наложения и перекрытия известных групп).

Таким образом, применение двумерного алгоритма анализа к практическим задачам показало, что полноценное исследование требует обобщения методики на три измерения. Астероиды требуют полного исследования как минимум пространства собственных элементов $(a, e, \sin i)$, а звездное население — пространства скоростей (U, V, W) . Использование лишь двумерных проекций не позволяет сделать однозначных выводов о соответствующем трехмерном распределении, хотя иногда позволяет получить интересные результаты.

Обобщение нашего алгоритма на случай трех измерений в целом выполнено, первых результатов его применения к этим задачам можно ожидать в ближайшем будущем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

Библиографические ссылки

- [1] *Grossman A., Morlet J.* Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // *SIAM J. Math. Anal.* — 1984. — Vol. 15. — P. 723–736.
- [2] *Chereul E., Crézé M., Bienaymé O.* The distribution of nearby stars in phase space mapped by Hipparcos. II. Inhomogeneities among A-F type stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 340. — P. 384–396.
- [3] *Skuljan J., Hearnshaw J. B., Cottrell P. L.* Velocity distribution of stars in the solar neighbourhood // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1999. — Vol. 308. — P. 731–740.
- [4] *Abramovich Felix, Bailey Trevor C., Sapatinas Theofanis.* Wavelet Analysis and its Statistical Applications // *J. R. Stat. Soc. D (The Statistician)*. — 2000. — Vol. 49. — P. 1–29.
- [5] *Baluev Roman V.* Statistical detection of patterns in unidimensional distributions by continuous wavelet transforms // *Astron. Comput.* — 2018. — Vol. 23. — P. 151–165.
- [6] *Baluev R. V., Rodionov E. I., Shaidulin V. Sh.* Isotropic wavelet denoising algorithm for bivariate density analysis and estimation // preprint (submitted to *Appl. & Comput. Harmonic Anal.*) — 2020. — Vol. arXiv.org:1903.10167.
- [7] *Baluev Roman V., Shaidulin Vakhit Sh.* Fine-resolution wavelet analysis of exoplanetary distributions: hints of an overshooting iceline accumulation // *Astrophys. Space. Sci.* — 2018. — Vol. 363. — P. 192.
- [8] *Baluev R. V., Rodionov E. I.* Analysing the Main Belt asteroid distributions by wavelets // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* — 2020. — Vol. 132. — P. 34.
- [9] *Baluev R. V., Shaidulin V. Sh., Veselova A. V.* High-velocity moving groups in the Solar neighborhood in GAIA DR2 // *Acta Astron.* — 2020. — Vol. 70. — P. 141–168.

МАССОВЫЙ РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОУДАРЕНИЯ АСТЕРОИДОВ: МЕТОДЫ, ПОДВОДНЫЕ КАМНИ, СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

И. А. Баляев

Санкт-Петербургский государственный университет

В настоящем исследовании рассматривается проблема расчета вероятностей соударения большого числа астероидов. Сравнивается эффективность трех методов, основанных на методе Монте-Карло. Также результаты сравниваются с полученными методом LOV и опубликованными на сайте NASA.

MASS CALCULATION OF ASTEROID COLLISION PROBABILITIES: METHODS, PITFALLS, COMPARISON OF RESULTS

I. A. Balyaev

Saint Petersburg State University

In this study, we consider the problem of calculating impact probabilities for a large number of asteroids. The effectiveness of three methods based on Monte Carlo is compared. The results are also compared with those obtained by the LOV method and published on the NASA website.

На сегодня открыто более 24 000 околоземных астероидов, из них около 3 000 открыто за последний год и 2 500 — за предпоследний. Учитывая предстоящий запуск проекта LSST (первый свет ожидается в 2021 г.), вероятно дальнейшее ускорение. Оценка вероятностей соударения требует все больших вычислительных ресурсов. Около года назад на кафедре небесной механики СПбГУ был разработан высокооптимизированный алгоритм для расчета траекторий и сближений с планетами большого числа виртуальных астероидов по упрощенной модели движения. Несмотря на упрощение, тестирование на 200 околоземных астероидах показало хорошее согласие с результатами NASA для астероидов, орбита которых известна со средней точностью: 10^{-3} – 10^{-7} AU по большой полуоси. По-видимому, размер области неопределенности играет в этом случае значительно большую роль, чем неучтенные возмущения. Особенность новой программы — возможность расчета вероятности соударения сразу со всеми планетами Солнечной системы без заметного падения производительности.

Для массового расчета вероятностей соударения выбрано три метода, которые будут сравниваться между собой: простой метод Монте-Карло; модифицированный метод, использующий информацию о шестимерной структуре области неопределенности; модифицированный метод, использующий возможности машинного обучения. Преимуществом последнего является возможность эффективного использования графического процессора, однако надежность результата под наибольшим вопросом. Простой метод Монте-Карло самый честный, поэтому, хотя точность результата очень ограничена из-за распределения вычислительного ресурса на большое число астероидов, может использоваться в качестве контрольного. Наиболее вероятные соударения отлично видны даже при небольшом количестве виртуальных астероидов.

С осторожностью полученные результаты могут быть использованы непосредственно. Сделанные упрощения модели движения, допущения в отношении области неопределенности и погрешность самого метода легко могут дать неверное представление об опасности конкретного астероида. Тем не менее сравнение с результатами NASA не показывает

принципиальных отличий, за редким исключением. С использованием высокой производительности новой программы предполагается тестировать различные вариации методов, а в перспективе реализовать лучшие из них в более точной модели движения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-32-90149.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ УРАНА И НЕПТУНА НА ТЕЛЕСКОПАХ ГАО РАН И КРАО РАН В 2020 г.

Д. А. Биколова¹, С. В. Назаров², М. Ю. Ховричев³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН,

³Санкт-Петербургский государственный университет

В работе представлены результаты наблюдений спутников Урана и Нептуна, выполненных в 2020 г. с помощью метрового зеркального телескопа «Сатурн» (ГАО РАН) и 350-мм гида телескопа «Синтез» (КРАО РАН). Получено более 8 тыс. отдельных положений спутников Урана и Нептуна в системе каталога Gaia EDR3. Средние ошибки координат спутников по прямому восхождению и склонению, демонстрирующие внутреннюю сходимость результатов наблюдений, лежат в пределах 10–50 мас.

ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF URANIAN AND NEPTUNIAN SATELLITES WITH THE PULKOVO AND CRIMEAN OBSERVATORY TELESCOPES IN 2020

D. A. Bikulova¹, S. V. Nazarov², M. Yu. Khovritchev³

¹Pulkovo Observatory, ²Crimean astrophysical observatory, ³Saint Petersburg State University

The paper presents the results of observations of the Uranian and Neptunian satellites performed in 2020 with the 1-meter mirror telescope ‘Saturn’ (Pulkovo observatory) and the 350-mm guide telescope of the ‘Sintez’ telescope (Crimean observatory). More than 8 thousand separate positions of the satellites were obtained in the Gaia EDR3 catalog system. The average values of standard errors of the satellite normal place in right ascension and declination for the entire observation period, demonstrating the internal convergence of the observation results, lie within 10–50 mas.

Введение

Позиционные наблюдения с борта космических аппаратов, радиолокационные наблюдения с Земли, большие ряды наземных астрометрических наблюдений в настоящее время доступны для спутников Юпитера и Сатурна. Большой объем наблюдений и их высокая точность привели к значимому прогрессу в изучении динамики и внутреннего устройства самих планет и их спутников [1]. Для более далеких Урана и Нептуна космические миссии Вояджеров не обеспечили большой объем астрометрической информации. Поэтому сейчас и еще долгое время высокоточные наземные наблюдения спутников Урана и Нептуна будут оставаться актуальными [2]. В связи с этим на телескопах Пулковской и Крымской обсерваторий ведутся астрометрические наблюдения этих небесных тел. В настоящей статье дается представление о методике наблюдений, обработке данных и достигнутых результатах.

© Биколова Д. А., Назаров С. В., Ховричев М. Ю., 2021

Наблюдения

Наблюдения в ГАО РАН велись с помощью метрового зеркального телескопа «Сатурн» ($D = 1$ м, $F = 4$). Использовалась камера ZWO ASI1600 Pro, установленная в фокальной плоскости телескопа. Поле зрения составляет 13×10 угловых минут, масштаб 172 mas/pix. Были сняты длинные серии кадров (сотни штук) с экспозициями по несколько секунд (1–10). В 2020 г. наблюдения проводились с августа по декабрь. В общей сложности было получено более 8 тыс. отдельных наблюдений спутников Урана и Нептуна.

Наблюдения в КрАО РАН проводились при помощи телескопа системы Ньютона ($D = 350$ мм, $F = 1767$ мм), размещенного в павильоне с откатной крышей. Он снабжен самодельной полуавтоматической системой наведения. В качестве приемника использовалась камера QHY-9 на сенсоре KAF 8300M, размер пикселя 5,4 мкм, масштаб 630 mas/pix, рабочее поле $35 \times 26'$, время накопления составляло 45 с. Обзор изучаемых спутников в КрАО РАН велся с середины ноября по начало декабря и в общей сложности составил более 170 наблюдений спутников Нептуна и 500 — спутников Урана.

Обработка данных

Предварительная обработка кадров включала в себя процедуры определения WCS-параметров, выборки данных из каталога Gaia EDR3 и вычисления топоцентрических эфемерид спутников на центральный момент съемки. Все эти данные автоматически вписывались в ПЗС-кадры как отдельные HDU с помощью специального скрипта. Это обеспечило возможность более гибко настраивать процедуру астрометрической обработки: выделять области ПЗС-кадра, содержащие изображения опорных звезд и спутников планет.

Для измерения пиксельных координат объектов на ПЗС-кадре использовалась шейплет-декомпозиция изображений, хорошо показавшая себя в наших предыдущих работах [3, 4]. На первом этапе для звезд с величиной $\text{SNR} > 100$ (SNR — отношение сигнал/шум) вычислялись шейплет-коэффициенты и нормировались на единичный поток. Финальные значения шейплет-коэффициентов для PSF-снимка формировались как медианные из всего ансамбля. Далее построенные PSF использовались для аппроксимации изображений звезд и спутников и вычисления пиксельных координат. Варьировались значения координат фотоцентра, локального фона и потока.

Астрометрическая редукция производилась методом шести постоянных. Понятно, что реальная проекция с большой вероятностью не описывается линейной моделью. Поэтому для каждой звезды вычислялись остаточные разности координат в смысле (O–C). Осреднение поля остаточных разностей позволило получить картину искажений (обобщенную дисторсию) и параметризовать ее для вычисления поправок. Пример поля поправок для телескопа «Сатурн» показан на рис. 1. Как видно, в ряде случаев поправки могут достигать 100 mas. Эти поправки добавлялись к координатам спутников в зависимости от их положения на ПЗС-кадре.

Заключение

Таблица дает представление о количестве и качестве наблюдений и их анализа. Угловые разделения между планетой и спутниками Урана больше, чем для спутников Нептуна. Поэтому для Нептуна удалось надежно измерить только координаты Тритона (TRITON). У телескопа «Сатурн» меньше угловой масштаб и больше пропускание, чем у гида телескопа «Синтез». По этой причине на телескопе «Сатурн» эффективно наблюдались четыре спутника: Ариэль (ARIEL), Умбриэль (UMBRIEL), Титания (TITANIA) и Оберон (OBERON).

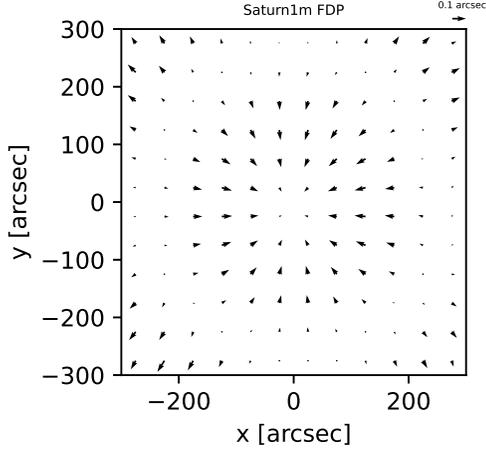


Рис. 1. Поле остаточной дисторсии для пулковского телескопа «Сатурн»

О-С для спутников Урана и Нептуна

Телескоп	Спутник	N	(O-C) _α mas	(O-C) _δ mas
«Сатурн»	ARIEL	831	-12±44	8±52
«Сатурн»	UMBRIEL	1029	-22±12	7±21
«Сатурн»	TITANIA	2218	-2±14	3±16
«Сатурн»	OVERON	2426	3±12	-1±11
«Сатурн»	TRITON	1476	10±37	5±56
«Синтез»	TITANIA	234	-34±61	8±68
«Синтез»	OVERON	271	-14±63	58±53
«Синтез»	TRITON	117	-21±67	47±73

По снимкам, полученным в КрАО, удалось адекватно измерить положения Титании и Оберона.

Выполнялось сравнение полученных координат с положениями, вычисленными для моментов наблюдений на основе комбинаций теорий движения EPM2017+Lainey для спутников Урана и EPM2017+Emelyanov&Samorodov для Тритона с помощью сервиса [5] (вычисление (O-C)). В двух последних колонках таблицы представлены средние значения (O-C) по обеим координатам и величины стандартных ошибок одного наблюдения. Величины (O-C)_α редуцированы с учетом $\cos \delta$. Точность полученных координат в основном лежит в пределах 10–50 mas. Средние значения разностей (O-C) свидетельствуют о хорошей сходимости результатов наблюдений с результатами вычислений, выполненных посредством современных планетных и «спутниковых» теорий.

Дополнительную информацию о качестве наблюдений несет пример поведения разностей (O-C) по склонению для спутника Урана Титании, приведенный на рис. 2. Этот рисунок построен по результатам наблюдений, выполненных на телескопе «Синтез» (КрАО РАН). Таким образом, в течение полчасовой серии наблюдений имеют место вариации раз-

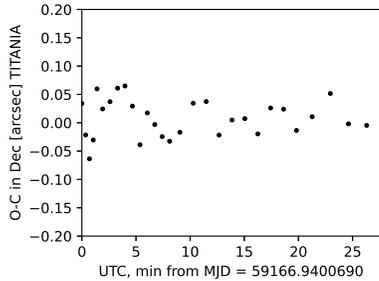


Рис. 2. Изменение О-С по склонению от времени для спутника Урана Титании по результатам наблюдений, выполненных на телескопе «Синтез» (КрАО РАН)

ностей с размахом ± 50 mas. С большой вероятностью эти вариации имеют систематический характер, что позволит в дальнейшем учесть их и повысить точность как в случайном, так и в систематическом отношении.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-32-90175.

Библиографические ссылки

- [1] *Lainey Valéry, Casajus Luis Gomez, Fuller Jim et al.* Resonance locking in giant planets indicated by the rapid orbital expansion of Titan // *Nature Astronomy*. — 2020. 2006.06854.
- [2] *Lainey V.* A new dynamical model for the Uranian satellites // *Planet. Space Sci.* — 2008. — Vol. 56, № 14. — P. 1766–1772.
- [3] *Khovrichiev M. Yu., Apetyan A. A., Roshchina E. A. et al.* Searching for Binary Systems Among Nearby Dwarfs Based on Pulkovo Observations and SDSS Data // *Astronomy Letters*. — 2018. — Vol. 44, № 2. — P. 103–118.
- [4] *Bikulova D. A.* Improvement of positional accuracy of Solar system bodies ground-based observations with CCD-imaging of close approaches of them with Gaia stars // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. — 2019. — Vol. 49, № 2. — P. 459–461.
- [5] *Emel'yanov N. V., Arlot J. E.* The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 487, № 2. — P. 759–765.

**ТРЕХФАЗНЫЙ АСТРОХИМИЧЕСКИЙ КОД:
МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА**

Е. В. Борщева

Институт астрономии Российской академии наук

Описана реализация трехфазной астрохимической модели (газ + поверхность льда + толща ледяной мантии) на основе двухфазного кода Presta (газ + поверхность пыли), представлены результаты моделирования химического состава молекулярного облака. Химический состав, получаемый в двух- и трехфазной моделях, существенно различен, в частности, содержание льда CO в трехфазной модели демонстрирует хорошее согласие с наблюдательными данными в отличие от двухфазной модели.

**THE THREE-PHASE ASTROCHEMICAL CODE:
MODELING OF THE MOLECULAR CLOUD COMPOSITION**

E. V. Borshcheva

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We describe the implementation of a three-phase astrochemical model (gas + ice surface + bulk) based on the two-phase Presta code (gas + dust surface) and provide results for calculating the molecular cloud composition. The two- and three-phase models produce significantly different chemical compositions. In particular, CO ice abundance in the three-phase model shows good agreement with the observational data, unlike the two-phase model.

Введение

Процесс звездообразования начинается со сжатия молекулярного облака, поэтому для понимания эволюции на более поздних фазах этого процесса важно корректно моделировать химический состав уже самих молекулярных облаков. По наблюдениям протозвездных объектов [1, 2] наибольшее содержание в ледяных мантиях пылинок имеет водяной лед ($g\text{H}_2\text{O}$, где «g» означает, что речь идет о поверхностных веществах); концентрации каждого из льдов $g\text{CO}$ и $g\text{CO}_2$ по отношению к концентрации водяного льда составляют порядка 10–30 %, а концентрация льда метанола ($g\text{CH}_3\text{OH}$) 3–4 %.

В работе [3], посвященной химическому моделированию вспышек светимости молодых солнцеподобных звезд, химический состав молекулярного облака рассчитывается с помощью астрохимического кода Presta, основанного на базе данных ALCHEMIS [4]. В этой двухфазной модели рассматриваются газофазные и поверхностные реакции наряду с процессами адсорбции вещества на пыль и десорбции из ледяных мантий пылинок. В настоящей работе описана реализация трехфазной модели на основе имеющейся двухфазной и представлены результаты моделирования химического состава молекулярного облака. Сетки газофазных и поверхностных реакций в трехфазной модели, а также формулы расчета скоростей этих реакций совпадают с таковыми в исходной модели Presta.

Трехфазная астрохимическая модель

В основе трехфазной астрохимической модели лежит двухфазная модель Presta [3], где численно решаются уравнения химической кинетики. Численные концентрации газофазных $n(i)$ и поверхностных $n_s(i)$ веществ (см^{-3}) подчиняются соотношениям

$$\frac{dn(i)}{dt} = \sum_{j,l} K_{jl}n(j)n(l) - n(i) \sum_j K_{ij}n(j) + \sum_j K_j^e n(j) - K_i^e n(i) - k_{ads}(i)n(i) + k_{des}(i)n_s(i), \quad (1)$$

$$\frac{dn_s(i)}{dt} = \sum_{j,l} k_{jl}n_s(j)n_s(l) - n_s(i) \sum_j k_{ij}n_s(j) + \sum_j k_j^e n_s(j) - k_i^e n_s(i) + k_{ads}(i)n(i) - k_{des}(i)n_s(i). \quad (2)$$

Здесь K_{ij} и k_{ij} — газофазные и поверхностные коэффициенты скорости реакций между веществами i и j , K_i^e и k_i^e — газофазные и поверхностные коэффициенты скорости реакций, обусловленных внешними факторами, $k_{ads}(i)$ и $k_{des}(i)$ — коэффициенты скорости реакций адсорбции на космическую пыль и десорбции с пыли для вещества i .

В трехфазной модели вещество на пыли разделяется на вещество поверхности пыли с концентрацией $n_s(i)$ и вещество толщи мантии с концентрацией $n_m(i)$. Численные концентрации вещества толщи мантии подчиняются уравнениям, аналогичным уравнению (2), однако без слагаемых, отвечающих за адсорбцию и десорбцию. Реакции в глубинных слоях мантии замедляются по сравнению с поверхностью; в нашей модели энергия диффузии вещества i в мантии связана с его энергией десорбции соотношением $E_{swap}(i) : E_{des}(i) = 0.7$ [5].

В случае увеличения общей концентрации вещества на поверхности пыли ($[dn_s/dt]_{chem} = \sum_i [dn_s(i)/dt]_{chem} > 0$) количество вещества, перераспределяемого с поверхности мантии в ее толщу [6], задается выражением

$$\left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{tran} = \alpha_{ads} \left[\frac{dn_s}{dt} \right]_{chem} \cdot \frac{n_s(i)}{n_s}, \quad (3)$$

где $[dn_s(i)/dt]_{chem}$ — изменение концентрации поверхностного вещества i в результате химических реакций и адсорбции/десорбции; $n_s = \sum_i n_s(i)$ — общая концентрация вещества на поверхности пыли; $\alpha_{ads} = N_s/N_{site}$ — отношение общего числа молекул на поверхности одной пылинки к среднему числу сайтов для адсорбции на пылинке.

При уменьшении общей концентрации вещества на поверхности пыли «перенос» вещества из толщи мантии на поверхность определяется выражением

$$\left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{tran} = \alpha_{des} \left[\frac{dn_s}{dt} \right]_{chem} \cdot \frac{n_m(i)}{n_m}, \quad (4)$$

где $n_m = \sum_i n_m(i)$ — концентрация вещества в толще льда; здесь $\alpha_{des} = \min(n_m/n_s, 1)$ [7].

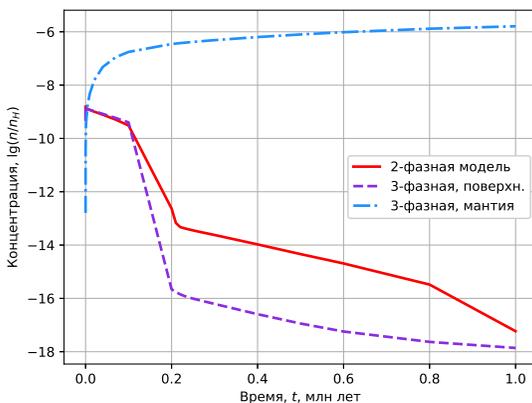
Возможен и физический обмен между веществом толщи мантии и поверхностью — диффузия [5]. Уменьшение концентрации вещества i в толще мантии посредством диффузии на поверхность рассчитывается как $R_{swap,m}(i) = N_m(i) \cdot k_{swap}(i) \cdot \min(N_s/N_m, 1)$, где $N_m = \sum_i N_m(i)$ — общее число молекул в толще мантии одной пылинки, а коэффициент диффузии дается формулой $k_{swap}(i) = \nu_0(i) \cdot \exp(-E_{swap}(i)/T_d)$, в которой $\nu_0(i)$ — характеристическая вибрационная частота гармонического осциллятора, T_d — температура пыли. Уменьшение концентрации вещества i в поверхностных слоях посредством диффузии в глубинные слои мантии рассчитывается как $R_{swap,s}(i) = N_s(i)/N_s \cdot \sum_j R_{swap,m}(j)$.

Таким образом, общее изменение численной концентрации вещества i на поверхности пыли $[dn_s(i)/dt]_{tot}$ и в толще мантии $[dn_m(i)/dt]_{tot}$ соответственно даются уравнениями

$$\left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{tot} = \left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{chem} - \left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{tran} - R_{swap,s}(i), \quad (5)$$

$$\left[\frac{dn_m(i)}{dt} \right]_{tot} = \left[\frac{dn_m(i)}{dt} \right]_{chem} + \left[\frac{dn_s(i)}{dt} \right]_{tran} - R_{swap,m}(i). \quad (6)$$

Разработанная трехфазная астрохимическая модель демонстрирует согласие в результатах с аналогичной трехфазной моделью [8]. Выбран «низкометаллический» начальный элементный состав [3], стадия молекулярного облака длится 10^6 лет, химическая эволюция рассчитывается для плотности газа 10^4 см^{-3} и температуры газа и пыли 10 К.



Поверхностная концентрация атомарного кислорода в двух- и трехфазной моделях

Результаты моделирования

В модельных физических условиях молекулярного облака около половины всех поверхностных веществ эффективно уходят в толщу мантии — в частности, O, CO, OH, H₂CO (прекурсор метанола). Разница концентраций одного и того же вещества на пыли в двух- и трехфазной моделях может превышать 10 порядков. Так, на временах порядка 10^5 лет убыль атомарного кислорода (см. рисунок) на поверхности пыли в двухфазной модели обусловлена в основном реакциями $gO + gHNO \rightarrow gNO + gOH$, $gO + gO_2 \rightarrow gO_3$ и $gH + gO \rightarrow gOH$. В трехфазной модели атомарный кислород эффективно уходит из поверхностных слоев в толщу мантии, где скорости упомянутых реакций на порядки ниже. Вместе с тем концентрации таких поверхностных веществ, как CO₂ или H₂O, практически совпадают с аналогичными двухфазными концентрациями на всем времени моделирования.

В отличие от исходной двухфазной модели, где $gCO : gH_2O = 10^{-4}$, в трехфазной концентрация CO на пыли по отношению к концентрации водяного льда находится в согласии с наблюдениями — $gCO : gH_2O = 0.29$. Для сравнения: в [2] $gCO : gH_2O$ составляет 0.29

для окрестностей маломассивных протозвезд и 0.31 для ядер облаков. Из-за ухода в толщу мантии CO не столь эффективно превращается в метанол, и концентрация метанола в трехфазной модели ниже, чем в двухфазной, — $g\text{CH}_3\text{OH} : g\text{H}_2\text{O} = 0.12$. Это выше, чем в большинстве наблюдаемых объектов (0.03–0.04), хотя в отдельных случаях содержание метанола во льду может превышать 10 % [2]. Имеет место недостаток CO₂ на пыли: по наблюдательным данным [1, 2] $g\text{CO}_2 : g\text{H}_2\text{O}$ составляет 0.2–0.3, а в нашей трехфазной модели 0.002. Отметим, что в настоящей работе моделируется молекулярное облако без звездообразования, а в наблюдаемых объектах [1, 2] процессы звездообразования имеют место.

При повышении температуры газа и пыли CO на поверхности пыли конвертируется в CO₂ более эффективно, а меньшая длительность стадии молекулярного облака способствует тому, что поверхностный CO не успевает перейти в метанол. К примеру, для температуры 16 K и длительности стадии молекулярного облака 2×10^5 лет получаем соотношения $g\text{H}_2\text{O} : g\text{CO} : g\text{CO}_2 : g\text{CH}_3\text{OH} = 100 : 23 : 23 : 1$, что близко к наблюдательным данным.

Заключение

Выделение глубинных слоев ледяной мантии в отдельную фазу приводит к существенным изменениям в концентрации поверхностных веществ и к согласию с наблюдениями CO на пыли. Повышение температуры в пределах допустимых для стадии молекулярного облака значений и сокращение времени химической эволюции способно приблизить поверхностные концентрации метанола и CO₂ на пыли к наблюдаемым в молекулярных облаках.

Автор признателен Правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку, грант 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

Библиографические ссылки

- [1] *Goto M., Bailey J. D., Hocuk S. et al.* The first frost in the Pipe Nebula // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 610. — P. A9.
- [2] *Öberg K. I., Boogert A. C. A., Pontoppidan K. M. et al.* The Spitzer ice legacy: ice evolution from cores to protostars // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 740, № 2. — P. 109.
- [3] *Wiebe D. S., Molyarova T. S., Akimkin V. V. et al.* Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 485, № 2. — P. 1843–1863.
- [4] *Semenov D., Wiebe D.* Chemical evolution of turbulent protoplanetary disks and the solar nebula // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 196, № 2. — P. 25.
- [5] *Garrod R. T.* A three-phase chemical model of hot cores: the formation of glycine // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 765, № 1. — P. 60.
- [6] *Hasegawa T. I., Herbst E.* Three-phase chemical models of dense interstellar clouds — gas dust particle mantles and dust particle surfaces // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1993. — Vol. 263. — P. 589.
- [7] *Garrod R. T., Pauly T.* On the formation of CO₂ and other interstellar ices // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 735, № 1. — P. 15.
- [8] *Vasyunin A. I., Caselli P., Dulieu F., Jiménez-Serra I.* Formation of complex molecules in prestellar cores: a multilayer approach // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 842, № 1. — P. 33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СЕМЕЙСТВА АСТЕРОИДОВ HOBSON

М. А. Васильева, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Обнаружено 11 новых членов семейства астероидов Hobson: (537249) 2015 HM190, 2007 EH116, 2007 HC54, 2008 WV149, 2010 GN203, 2011 SU302, 2015 FV225, 2015 HV138, 2015 OP104, 2015 PM156, 2019 PS30. Для всех астероидов семейства получены оценки скорости дрейфа большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского, радиусов сфер Хилла и вторых космических скоростей. Проведено моделирование динамической эволюции астероидов с учетом эффекта Ярковского. Получены оценки возраста пар астероидов, входящих в семейство, на основе результатов моделирования. Возраст семейства астероидов Hobson составляет около 400 тыс. лет.

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC EVOLUTION OF HOBSON ASTEROID FAMILY

M. A. Vasileva, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

We have found 11 new members of the Hobson asteroids family: (537249) 2015 HM190, 2007 EH116, 2007 HC54, 2008 WV149, 2010 GN203, 2011 SU302, 2015 FV225, 2015 HV138, 2015 OP104, 2015 PM156, 2019 PS30. We estimated the Yarkovsky semimajor axis drift rate, the Hill sphere's radii, and the escape velocity for all asteroids of the family. Simulation of the dynamic evolution of asteroids with allowance for the Yarkovsky effect has been carried out. Based on the simulation results, estimates of the asteroid pairs' age included in the family are obtained. The age of the Hobson asteroid family is about 400 kyr.

Введение

Семейство астероидов Hobson впервые было описано в работе Praves и Vokrouhlický в 2009 г. [1]. Они обнаружили пять астероидов с очень похожими гелиоцентрическими орбитами: (18777) Hobson, (57738) 2001 UZ160, (363118) 2001 NH14, (381414) 2008 JK37, (465404) 2008 HQ46 и оценили возраст семейства менее 500 тыс. лет. В дальнейшем Розаев и Плавалова обнаружили еще три члена семейства: (436620) 2011 LF12, (520394) 2014 JJ10, 2014 NN103. Они заключили, что наиболее вероятный возраст семейства Hobson составляет 365 ± 67 тыс. лет [2]. Praves и др. в работе [3] обнаружили дополнительно три новых астероида, принадлежащих семейству: (450571) 2006 JH35, 2014 OJ66, 2015 KA91. Интегрирование орбит назад по времени показало, что возраст семейства около 350 тыс. лет, причем нижняя граница возраста 280 тыс. лет, а верхняя определена менее четко. В работе [4] найден новый вероятный член семейства: 2017 SQ83.

Особенность семейства Hobson: в его состав входят два крупных астероида: (18777) Hobson и (57738) 2001 UZ160. В работе [3] обсуждаются два механизма формирования этого семейства: 1) в результате каскадного дробления и 2) в результате кратерирования.

Семейство астероидов Hobson находится в окрестности резонанса средних движений 3:1 с Юпитером и векового резонанса $g + g_5 - 2g_6$. Здесь g , g_5 , g_6 — аргументы перигетров орбит астероида, Юпитера и Сатурна соответственно.

Таблица 1. Физические и динамические параметры астероидов семейства Hobson

Астероид	D , км	R_{Hill} , км	v_2 , м/с	$ \dot{a}_{max} \cdot 10^4$, а. е./млн лет
(18777) Hobson	2.760	629.7	1.60	1.10
(57738) 2001 UZ160	2.460	561.5	1.43	1.23
(363118) 2001 NH14	1.008	230.2	0.58	3.01
(381414) 2008 JK37	0.984	224.6	0.57	3.08
(436620) 2011 LF12	1.080	246.2	0.63	2.82
(450571) 2006 JH35	0.870	198.4	0.50	3.49
(465404) 2008 HQ46	0.940	214.5	0.54	3.23
(520394) 2014 JJ10	0.707	161.3	0.41	4.30
(537249) 2015 HM190	0.911	207.6	0.53	3.34
2007 EH116	0.898	205.0	0.52	3.39
2007 HC54	0.985	224.7	0.57	3.09
2008 WV149	0.672	153.2	0.39	4.53
2010 GN203	0.707	161.2	0.41	4.30
2011 SU302	0.554	126.3	0.32	5.49
2014 HH103	0.747	170.5	0.43	4.07
2014 OJ66	0.494	112.7	0.29	6.14
2015 FV225	0.819	186.9	0.48	3.72
2015 HV138	0.472	107.5	0.27	6.45
2015 KA91	0.666	151.8	0.39	4.57
2015 OP104	0.651	148.4	0.38	4.67
2015 PM156	0.531	121.2	0.31	5.72
2017 SQ83	0.624	142.5	0.36	4.86
2019 PS30	0.485	110.5	0.28	6.28

В настоящей работе планируется оценить возраст семейства Hobson на основе анализа возрастов пар, образуемых астероидами семейства с двумя наиболее крупными астероидами: (18777) Hobson и (57738) 2001 UZ160. Динамическая эволюция астероидов семейства Hobson будет исследоваться численным методом.

Описание методики

Поиск новых членов семейства Hobson проводился путем вычисления метрик Холшевникова ϱ_2 и ϱ_5 [5] на основе оскулирующих элементов орбит на эпоху MJD 59 000, 0 (00^h00^m00^s 31.05.2020) из базы данных AstDyS. Критерием отбора служило одновременное выполнение двух условий: $\varrho_2 < 0.008$ а. е.^{1/2} и $\varrho_5 < 0.002$ а. е.^{1/2}. При выборе критериев использовались оценки максимальных значений метрики ϱ_5 для молодых семейств астероидов [6], которые были уменьшены в 3–5 раз для того, чтобы исключить ложноположительный результат при отборе. В результате было обнаружено 11 новых членов семейства Hobson: (537249) 2015 HM190, 2007 EH116, 2007 HC54, 2008 WV149, 2010 GN203, 2011 SU302, 2015 FV225, 2015 HV138, 2015 OP104, 2015 PM156, 2019 PS30.

Моделирование динамической эволюции астероидов семейства Hobson проводилось численным методом с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit на интервале 1 млн лет. Учитывались возмущения от больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и влияние эффекта Ярковского. Скорость дрейфа большой полуоси астероида оценивалась на основе известного значения скорости дрейфа большой полуоси астероида (101955) Веппи по методике, изложенной в работах [7, 8]. Получены оценки максимальных значений модуля скорости дрейфа больших полуосей астероидов $|\dot{a}_{max}|$, обусловленных влиянием эффекта Ярковского. Также для всех астероидов были выполнены оценки радиусов сфер Хилла R_{Hill} и вторых космических скоростей v_2 (табл. 1). Для оценки физических и динамических параметров астероидов использовался подход, изложенный в [9].

Таблица 2. Возраст пар относительно двух самых крупных астероидов семейства

Астероид	(18777) Hobson	(57738) 2001 UZ160
	Возраст пары, тыс. лет	Возраст пары, тыс. лет
(57738) 2001 UZ160	320 ± 100	—
(363118) 2001 NH14	220 ± 100	260 ± 35
(381414) 2008 JK37	430 ± 65	400 ± 110
(436620) 2011 LF12	310 ± 47	290 ± 140
(450571) 2006 JH35	330 ± 65	330 ± 85
(465404) 2008 HQ46	200 ± 97	320 ± 66
(520394) 2014 JJ10	315 ± 110	340 ± 38
(537249) 2015 HM190	190 ± 70	265 ± 59
2007 EH116	300 ± 60	265 ± 65
2007 HC54	440 ± 120	250 ± 68
2008 WV149	230 ± 85	270 ± 34
2010 GN203	70 ± 7	200 ± 25
2011 SU302	210 ± 100	315 ± 36
2014 HH103	190 ± 140	300 ± 88
2014 OJ66	240 ± 46	265 ± 55
2015 FV225	220 ± 54	300 ± 45
2015 HV138	520 ± 315	300 ± 270
2015 KA91	345 ± 45	300 ± 85
2015 OP104	250 ± 100	95 ± 30
2015 PM156	300 ± 80	250 ± 70
2017 SQ83	50 ± 15	230 ± 85
2019 PS30	230 ± 60	265 ± 42

Оценки возрастов пар астероидов и семейства Hobson

Для каждого астероида на основе номинальных элементов орбиты рассматривалось пять сценариев эволюции при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси, соответствующих различным углам φ наклона оси вращения астероида к плоскости его орбиты: $\dot{a} = 0$ при $\varphi = 90^\circ$ или 270° ; $\dot{a} = \pm|\dot{a}_{max}|$ при $\varphi = 0^\circ$ или 180° соответственно; $\dot{a} = \pm 1/2|\dot{a}_{max}|$ при $\varphi = 60^\circ$ или 240° соответственно.

Если предположить, что астероиды семейства формировались в результате дробления родительских тел в результате низкоскоростных соударений, то моменту образования пары должны соответствовать условия, когда расстояние между астероидами имеет тот же порядок, что и радиус сферы Хилла, а относительная скорость сравнима со второй космической скоростью. Среди значений относительного расстояния между астероидами отбирались те, которые удовлетворяют условию $\Delta r < 10R_{Hill}$ при относительной скорости $\Delta v < 5v_2$. Такие моменты сближений были обнаружены для всех пар «астероид (18777) Hobson — астероид семейства» и «астероид (57738) 2001 UZ160 — астероид семейства».

Для 25 вариантов эволюции каждой пары астероидов внутри семейства были найдены минимальные значения метрики ϱ_2 и соответствующие им моменты времени. Для последующего анализа были отобраны только те варианты, в которых значение метрики ϱ_2 не превышало $0.004 \text{ а. е.}^{1/2}$. Оценка возраста пары проводилась по среднему взвешенному значению времени, где за вес бралась величина, обратная метрике ϱ_2 . В качестве диапазона возможного значения возраста пары было взято среднеквадратическое отклонение. В табл. 2 представлен возраст пар относительно двух самых крупных астероидов семейства — (18777) Hobson и (57738) 2001 UZ160.

Затем были рассмотрены все 253 комбинации пар астероидов внутри семейства. Орбиты большинства из них сходятся менее чем 400 тыс. лет назад, что согласуется с оценками возраста семейства, полученными другими авторами менее 500 тыс. лет [1] и 365 ± 67 тыс. лет [2].

Обсуждение результатов и заключение

Полученные оценки возрастов пар имеют большие стандартные отклонения, так как рассматривались основные варианты динамической эволюции пар орбит с учетом влияния эффекта Ярковского, включающие как сближение орбит, так и их расхождение. Полученные оценки позволяют оценить возраст семейства в целом. Однако построить сценарий формирования семейства Hobson в результате каскадного дробления крупнейших астероидов семейства — (18777) Hobson и (57738) 2001 UZ160 — не представляется возможным.

Важным направлением дальнейших исследований должно стать определение скорости дрейфа большой полуоси или негравитационного ускорения A_2 , вызываемых влиянием эффекта Ярковского. Для этого можно использовать методы, обсуждаемые в работе [10].

После уточнения параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского, необходимо выполнить исследование вероятностной эволюции орбит астероидов семейства Hobson с учетом ошибок определения элементов орбит. Корректный учет влияния эффекта Ярковского при моделировании вероятностной эволюции позволит получить надежные оценки возрастов пар астероидов с учетом близости семейства к областям резонанса средних движений 3:1 с Юпитером и векового резонанса $g + g_5 - 2g_6$. На основе этих оценок будут строиться сценарии формирования семейства астероидов Hobson.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Библиографические ссылки

- [1] *Pravec P., Vokrouhlický D.* Significance analysis of asteroid pairs // *Icarus*. — 2009. — Vol. 204, № 2. — P. 580–588.
- [2] *Rosaev A., Plávalová E.* On the young family of 18777 Hobson // *Icarus*. — 2017. — Vol. 282. — P. 326–332.
- [3] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus*. — 2018. — Vol. 304. — P. 110–126.
- [4] *Kuznetsov E. D., Vasileva M. A.* On New Members of Asteroid Clusters Similar to Asteroid Pairs // 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society. — 2019. — Vol. 82. — P. 6192.
- [5] *Kholshchikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [6] *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. Space Sci.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
- [7] *Spoto F., Milani A., Knežević Z.* Asteroid family ages // *Icarus*. — 2015. — Vol. 257. — P. 275–289.
- [8] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61. 1805.05947.
- [9] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E. et al.* A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // *Solar System Research*. — 2020. — Vol. 54, № 3. — P. 236–252.
- [10] *Galushina T. Yu., Syusina O. M.* Comparative Analysis of Methods for Obtaining the Yarkovsky Effect Parameter from Observations // *Russian Physics Journal*. — 2020. — Vol. 63, № 3. — P. 420–425.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ ИЗБРАННЫХ АСЗ ПО ДАННЫМ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕРСКОЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Т. Ю. Галушина¹, П. А. Левкина^{1,2}, О. Н. Летнер¹

¹*Томский государственный университет,*

²*Институт астрономии РАН*

В работе обсуждаются результаты наблюдений астероидов в сентябре 2020 г. на телескопе «Цейсс-2000» Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория». Рассмотрено их влияние на точность определения орбиты и размер начальной доверительной области. Показано, что в большинстве случаев добавление полученных наблюдений уменьшает значение среднеквадратической ошибки представления наблюдений и размер доверительного эллипсоида.

THE PRECISION OF THE ORBIT FITTING FOR SELECTED NEAS FROM POSITIONAL OBSERVATIONS AT THE TERSKOL OBSERVATORY

T. Yu. Galushina¹, P. A. Levkina^{1,2}, O. N. Letner¹

¹*Tomsk State University,*

²*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences*

The paper deals with the results of asteroid observations in September 2020 with the Zeiss-2000 telescope of the Centre for collective use «Terskol observatory». We considered their influence on the precision of the orbit fitting and the size of the initial confidence region. It is shown that in most cases the addition of the obtained observations reduces the value of the mean square error and the size of the confidence region.

В сентябре 2020 г. авторами выполнены наблюдения некоторых астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) на уникальной научной установке «Цейсс-2000» Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» Института астрономии Российской академии наук. Одной из целей данного исследования является отработка методики наблюдений и обработки снимков, поэтому были выбраны как яркие объекты с хорошо определенной орбитой (3753 Cruithne и 3200 Phaethon), так и слабые, недавно открытые (2020 QK6, 2020 PR3, 2020 PC5, 2020 PF7).

Для обработки снимков использовались программы IzmCCD [1] и Астрометрика. Для оценки влияния наблюдений они включались в процесс улучшения орбиты, и сравнивались результаты, полученные с ними и без них. В качестве оцениваемых параметров рассматривались значения среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ , ошибки в векторе положения Δr и скорости Δv и объем доверительного эллипсоида в шестимерном пространстве V . В таблице представлены данные величины для изучаемых астероидов. В первой строке для каждого объекта показаны значения без учета наблюдений, полученных авторами, а во второй — с учетом.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что для большинства астероидов добавление наблюдений приводит к уменьшению размеров доверительной области. Исключением являются объекты 2020 PC5 и 2020 QK6. Можно предположить, что данный факт связан со сложными условиями наблюдений, в частности, с предельной звездной

Астероид	$\sigma, ''$	$\Delta r, \text{ а. е.}$	$\Delta v, \text{ а. е./сут.}$	V
3753 Cruithne	0.402	6.28E-07	4.74E-09	4.19E-09
	0.391	4.64E-07	4.02E-09	4.01E-09
3200 Phaethon	0.483	5.36E-08	2.37E-10	7.86E-10
	0.479	5.31E-08	2.56E-10	7.80E-10
2020 PC5	0.333	1.08E-06	1.40E-08	1.50E-08
	0.374	1.17E-06	1.52E-08	1.66E-08
2020 PR3	0.373	1.39E-05	4.40E-07	1.55E-08
	0.341	1.17E-05	3.72E-07	1.30E-08
2020 QK6	0.252	1.31E-06	7.16E-08	2.29E-08
	1.576	7.41E-06	4.07E-07	1.16E-07
2020 PF7	0.265	3.38E-06	7.99E-08	3.14E-08
	0.248	2.67E-06	6.27E-08	2.62E-08

величиной. Вопрос оценки точности данных наблюдений требует дополнительного исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Библиографические ссылки

- [1] *Izmailov I. S., Khovricheva M. L., Khovrichev M. Yu. et al.* Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory // *Astronomy Letters*. — 2010. — Vol. 36(5). — P. 349–354.

ЦИКЛИЧНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗАТМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ AM LEO

С. Ю. Горда

Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ

На основе обработки данных 14-летнего фотометрического мониторинга контактной затменной переменной звезды AM Leo типа W UMa, проводимого с 2007 по 2020 г. на телескопах Коуровской обсерватории УрФУ, были обнаружены циклические изменения блеска системы с периодом 7.6 ± 0.6 г., не связанные с явлением затмений или приливными деформациями компонентов, а также циклические малоамплитудные изменения орбитального периода системы с таким же значением периода. Сделан вывод, что малоамплитудные изменения блеска и периода системы обусловлены циклическим изменением магнитного поля компонентов контактной системы AM Leo, что проявляется в изменении средней поверхностной температуры общей оболочки системы из-за изменения площади холодных или горячих пятен на поверхности компонентов, а также влияния эффекта Эпплгейта на период системы.

CYCLICITY OF VARIATIONS OF THE MAGNETIC FIELD OF THE ECLIPSING VARIABLE AM LEO

S. Yu. Gorda

Kourovka astronomical observatory of Ural Federal University

Based on the 14-year photometric CCD monitoring of the contact eclipsing variable star AM Leo of type W UMa carried out author from 2007 to 2020 at the telescopes of the Kourovka observatory UrFU, the presence cyclic variations in brightness of the system with a period of 7.6 ± 0.6 years, not associated with the phenomena of eclipses and tidal deformations of the components, as well as low-amplitude cyclic variations of the orbital period with the same value of the oscillation period, were found. It was concluded that the low-amplitude variations of the brightness and period of the system are due to the cyclic changes of the magnetic field of the components of the AM Leo, which manifests itself in a change in the average surface temperature of the overall system shell due to changes in the area of cold or hot spots on the surface of the components, as well as the influence of the Applegate effect on the system period.

Затменно-переменная звезда AM Leo (BD+10°2234A) является ярким компонентом ($V = 9.1-9.7^m$) визуальной двойной системы ADS 8024 ($\rho = 11.4''$, $\theta = 270^\circ$). Визуальный компонент (BD+10°2234B) слабее AM Leo в максимуме ее блеска на 1.48^m в V цвете [1]. Первая фотоэлектрическая кривая блеска получена в 1956 г. Уорли и Эггеном [2]. Они определили фотометрические элементы переменной и классифицировали ее как затменную систему типа W UMa ($P = 0.3658^d$). Переменная неоднократно исследовалась фотометрически, с помощью фотоэлектрических приемников излучения были получены многочисленные кривые блеска.

Практически все авторы, изучавшие данную переменную, отмечают временные изменения кривых блеска AM Leo, выражающиеся в возрастании и ослаблении общего блеска системы, изменении глубин минимумов и появлении разрывы скорости максимумов, так называемого эффекта О'Коннела. Эти явления могут быть вызваны активностью на поверхности компонентов этой контактной тесной двойной системы, а именно появлением и

исчезновением ярких и темных областей (пятен), что характерно для звезд типа W UMa, обладающих магнитным полем [3]. Тем более что у системы AM Leo зарегистрировано очень слабое рентгеновское излучение [4], которое является индикатором хромосферной и коронарной активности.

Фотометрические наблюдения AM Leo проводились в период с марта 2007 по март 2020 г. на телескопах-рефлекторах АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F_{\text{Newton}} = 2.0$ м) и AstroSib RC-500 ($D = 0.5$ м, $F = 4.0$ м) системы Риччи–Кретьена астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Использовались ПЗС-камеры: Alta U6 фирмы Apogee с чипом Kodak KAF-1001E (1024×1024 , 24 мкм) и с 2015 г. PL A230 фирмы FLI с чипом E2V CCD230-42 (2048×2048 , 15 мкм).

Уже с самых первых ПЗС наблюдений AM Leo, проведенных в 2007 г., было отмечено изменение кривых блеска от ночи к ночи, что присуще звездам типа W UMa, характер которых был описан выше.

Исследование изменения со временем общего блеска системы AM Leo, не связанного с явлениями затмений и эффектами приливных деформаций компонентов, проводилось с использованием метода, применявшегося нами ранее для аналогичных целей при изучении изменений кривых блеска открытой в Коуровской обсерватории новой переменной звезды типа W UMa — GSC3599-2569 [5]. Суть метода заключается в вычислении среднего за ночь значения разности блеска между кривой (участка кривой) блеска, полученной в данную ночь, и реперной, теоретической кривой, синтезированной на основе достоверно установленных значений параметров затменной двойной системы ($\delta m = \Delta m_{\text{obs}} - \Delta m_{\text{teor}}$). В качестве реперной теоретической кривой блеска использовалась кривая, вычисленная на основе данных из работы [6].

Проверка на периодичность полученного нами ряда данных проводилась с использованием программы В. П. Горанского WINEFK, реализующей алгоритм Лафлера–Кинмана. Программа показала заметный, но достаточно широкий пик на частоте, соответствующей периоду 2776 дней $\simeq 7.6$ года. Поскольку в полученных данных явно прослеживается только один период, с целью его уточнения была произведена аппроксимация данных гармонической функцией синус. Результат аппроксимации данных функцией синус приведен на рис. 1, *a*. Здесь следует заметить, что изображенная на рисунке функция синус отражает лишь циклический характер изменений общего блеска системы и его период, но никак не форму изменения внезатменного блеска AM Leo. На рис. 1, *b*, *c* приведены также изменения блеска AM Leo относительно звезды сравнения в максимумах и минимумах кривой блеска за все время наблюдений $\Delta m = m_{\text{var}} - m_{\text{com}}$.

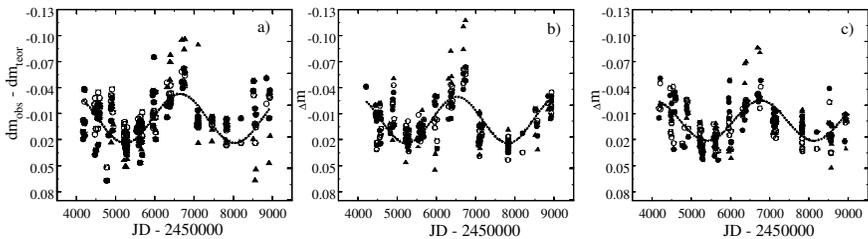


Рис. 1. Малоамплитудные изменения блеска AM Leo со временем: *a* — общий блеск; *b* — блеск в максимумах; *c* — блеск в минимумах кривой блеска после вычета линейных трендов; \blacktriangle — фильтр B; \bullet — фильтр V; \circ — фильтр R; пунктирная линия — аппроксимационная синусоида

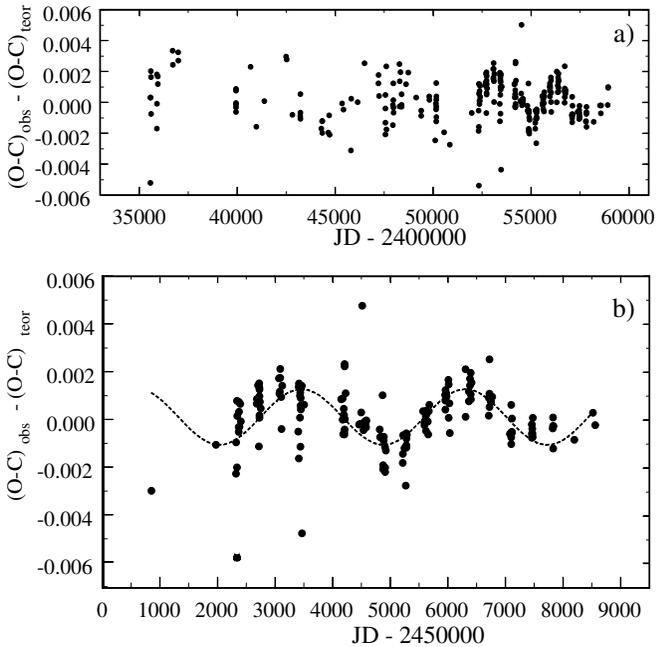


Рис. 2. Разности значений $O - C$ и световой кривой из работы [7]: a — для всех известных значений моментов минимумов; b — для моментов минимумов позднее JD 2 450 000; пунктирная линия — аппроксимационная синусоида

Как отмечено во многих работах, период AM Leo заметно изменяется, причиной этого является наличие третьего тела в системе. Время обращения AM Leo по взаимной орбите с третьим телом составляет порядка 50 лет [7]. В то же время, если обратить внимание на распределение разностей $O - C$ моментов минимумов, полученных за последние 20 лет, относительно новой световой кривой, приведенной в работе [7], можно заметить циклический характер этих изменений. Это хорошо видно на графике разностей моментов минимумов $(O - C)_{obs}$ и световой кривой $(O - C)_{teor}$ из работы [7], приведенном на рис. 2, a . На рисунке видно, что плотность точек моментов минимумов, полученных в последние годы, существенно выше, а их разброс меньше, чем в более ранние периоды наблюдений. Это является результатом автоматизации процесса наблюдений, массовым использованием ПЗС-камер и привязки времени к единой системе через Интернет. Вероятно, по этим причинам малоамплитудные изменения периода AM Leo, не связанные с влиянием третьего тела, стали заметны в последнее время. Период, найденный аппроксимацией таких разностей $(O - C)_{obs} - (O - C)_{teor}$ функцией синус (см. рис. 2, b), оказался практически таким же, как и найденный из фотометрических данных. Причем одинаковыми оказались и фа-

зы колебаний. Это обстоятельство указывает на то, что изменения внезатменного блеска AM Leo и малоамплитудные колебания ее периода обусловлены одним и тем же процессом.

Изменение магнитного поля конвективных оболочек компонентов этой ТДС вполне может быть таким процессом. В настоящее время именно этим механизмом чаще всего объясняют изменения блеска и периода ТДС типа W UMa. Магнитная активность на поверхности компонентов проявляется в увеличении или уменьшении числа холодных пятен или более ярких областей, например, факельных площадок на поверхности компонентов, что приводит к небольшим изменениям общей светимости звезды. В то же время эффект Эшпгейта [8], обусловленный перераспределением углового момента при перемещении конвективных потоков в изменяемом магнитном поле компонентов, приводит к изменениям периода системы малой амплитуды.

Таким образом, найденное в данном исследовании значение периода соответствует циклу изменения магнитного поля компонентов этой контактной затменно-переменной системы типа W UMa.

Более подробное описание результатов данной работы приведено в статье [9].

Библиографические ссылки

- [1] *Huller Mary E., Osborn Wayne, Terrell Dirk.* New Light Curves and Orbital Solution for AM Leonis // Public. Astron. Soc. Pacific. — 2004. — Vol. 116, № 818. — P. 337–344.
- [2] *Worley Charles E., Eggen Olin J.* A New Eclipsing Binary: BD +10.2234° (A) // Public. Astron. Soc. Pacific. — 1956. — Vol. 68, № 404. — P. 452–455.
- [3] *Djurašević G., Rovithis-Livaniou H., Rovithis P. et al.* A photometric study of the W UMa-type system U Pegasi // Astron. Astrophys. — 2001. — Vol. 367. — P. 840–847.
- [4] *Stępień K., Schmitt J. H. M. M., Voges W.* ROSAT all-sky survey of W Ursae Majoris stars and the problem of supersaturation // Astron. Astrophys. — 2001. — Vol. 370. — P. 157–169.
- [5] *Gorda S. Yu., Lyaptsev A. P., Sobolev A. M.* Spot activity of the new WUMa-type variable GSC3599-2569 // Astrophysical Bulletin. — 2015. — Vol. 70, № 1. — P. 109–116.
- [6] *Gorda S. Yu.* Spectrometric and photometric study of the eclipsing variable AM Leo // Astrophysical Bulletin. — 2016. — Vol. 71, № 1. — P. 64–74.
- [7] *Gorda S. Yu., Matveeva E. A.* New Light-Time Curve of Eclipsing Binary AM Leo // Information Bulletin on Variable Stars. — 2017. — Vol. 6227. — P. 1.
- [8] *Applegate James H.* A Mechanism for Orbital Period Modulation in Close Binaries // Astrophys. J. — 1992. — Vol. 385. — P. 621.
- [9] *Gorda S. Yu.* Cyclical Changes in the Extraeclipse Brightness and the Period of W UMa-TYPE Close Binary System AM Leo // Astronomy Reports. — 2020. — Vol. 64, № 11. — P. 922–935.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ SDSS J162256

Н. Р. Деминова¹, В. В. Шиманский¹, Н. В. Борисов², И. Ф. Бикмаев¹,
М. М. Габдеев²

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет,*

²*Специальная астрофизическая обсерватория РАН*

В работе исследовано оптическое излучение молодой предкатаклизмической переменной (ПП) SDSS J162256. Спектроскопические наблюдения выполнены на телескопе БТА САО РАН, фотометрические — на РТТ-150. Проведено численное моделирование теоретических кривых блеска и спектров. Измеренные наборы лучевых скоростей проанализированы с учетом возможного влияния эффектов отражения. На основе комплексного анализа наблюдательных данных определены фундаментальные параметры SDSS J162256. Полученные результаты подтверждают ранее сделанный вывод, что метод определения масс компонент ПП путем моделирования кривых лучевых скоростей эффективен только для систем со значительными эффектами отражения.

RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF THE CLOSE BINARY SYSTEM SDSS J162256

N. R. Deminova¹, V. V. Shimansky¹, N. V. Borisov², I. F. Bikmaev¹,
M. M. Gabdeev²

¹*Kazan (Volga region) Federal University,* ²*Special Astrophysical Observatory RAS*

In this work, the optical radiation of the young pre-cataclysmic variable (PV) SDSS J162256 was investigated. Spectroscopic observations were carried out at BTA SAO RAS, photometric observations were carried out at RTT-150 telescope. Numerical modeling of theoretical light curves and spectra was done. The measured sets of radial velocities were analyzed taking into account the possible influence of reflection effects. The fundamental parameters of SDSS J162256 were determined based on a comprehensive analysis of observational data. It was shown that the previously proposed method for determining the masses of the PV components by modeling of the radial-velocity curves is effective only for systems with significant reflection effects.

Введение

К предкатаклизмическим переменным (ПП) относят разделенные тесные двойные системы (ТДС), однократно прошедшие стадию общей оболочки; ПП были выделены в отдельную группу Риттером в 1986 г. [1]. Они делятся на три группы в зависимости от состояния главных компонент: молодые ПП с sdO-субкарликами ($t < 10^6$ лет), молодые ПП с sdB-субкарликами ($t < 10^7$ лет) и старые ПП ($t > 10^7$ лет) [2]. Группа молодых ПП с sdB-субкарликами (звезды типа HW Vir) в начале XXI в. оставалась слабо изученной из-за методических трудностей их обнаружения и анализа. Однако программы поиска двойных систем с sdB-субкарликами расширили ее до нескольких десятков объектов. В результате встал вопрос об их методически корректном изучении и определении характеристик. В данной работе исследована тесная двойная система SDSS J162256, принадлежащая к типу HW Vir [3]. Шаффенрот и др. [4] провели всесторонний анализ наблюдений SDSS J162256

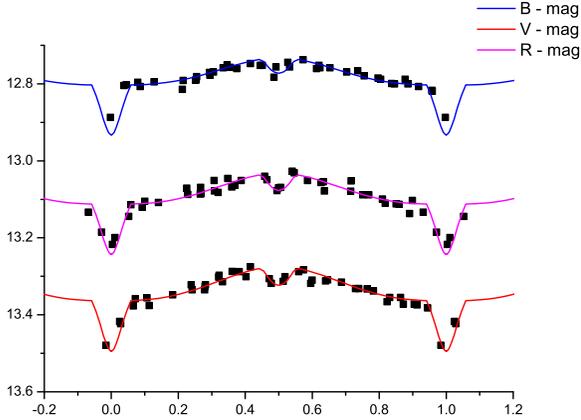
и определили ее параметры. Однако моделирование эффектов отражения в работе Шаффенрот и др. [4] выполнено в чернотельном приближении, что может привести к ошибкам параметров системы. Поэтому в нашей работе мы выполнили повторный анализ излучения SDSS J162256 с применением метода моделей атмосфер.

Наблюдения

Одновременные BVR фотометрические наблюдения SDSS J162256 проведены в 2017 г. на телескопе РТТ-150 с помощью прибора TFOSC и ПЗС-матрицы CCD-447. Для их обработки использовался компьютерный пакет Maxim DL. В качестве объектов сравнения выбирались вторичные стандарты близкой яркости и цвета на ПЗС-изображениях. Сравнение блеска звезд в поле матрицы показало, что ошибки дифференциальной фотометрии получились равными $dm \approx 0.01^m$ в В, R и V полосах. Спектроскопические наблюдения SDSS J162256 проводились в 2017 г. на БТА САО РАН с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO [5]. Мы использовали данные, полученные с гризмой VPHG1200g (1 200 штр./мм) и CCD-приемником EEV 42-40 ($2\,048 \times 2\,048$ пикс. размером 13.5×13.5 мкм), обеспечивающими спектральное разрешение $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ в интервале длин волн $\lambda\lambda 4\,050\text{--}5\,850 \text{ \AA}$. Данные наблюдения проведены при удовлетворительных астроклиматических условиях с размером изображений звезд $2.0''$, зенитные расстояния не превосходили 20° . Длительность экспозиций составила 300 с, что сделало возможным получение отношения сигнал/шум $S/N = 48$. Продолжительность наблюдений составила 102 мин и охватывала все фазы орбитального периода.

Моделирование и анализ кривых блеска и спектров

Полученные наблюдательные значения блеска SDSS J162256 относятся к разным фазам орбитального периода системы. Для перехода от шкалы гелиоцентрических юлианских дат наблюдений HJD к шкале фаз $\varphi \equiv E$ использовалась эфемериды SDSS J162256, предложенная в работе [4]. В орбитальных кривых блеска SDSS J162256 выделяются три участка переменности: главный минимум обусловлен затмением холодной звездой части поверхности sdB-субкарлика; внезатменное изменение блеска связано с изменением условий видимости горячего пятна на поверхности вторичной компоненты, а вторичное затмение отражает его частичное закрытие sdB-субкарликом. В спектрах наблюдаются линии H, HeI, HeII, CIII, NIII, OII, MgII, SiIII, SiIV, SIII. Данные абсорбционные линии относятся к излучению только sdB-субкарлика, т. е. главной компоненты. Отсутствие информации о собственном излучении вторичной компоненты затрудняет нахождение фундаментальных параметров. Однако совместный анализ кривых блеска, спектров и лучевых скоростей позволяет с достаточной точностью определить основные параметры системы. В целом качественный анализ оптического излучения SDSS J162256 подтверждает ее принадлежность к молодым III с sdB-субкарликами. Одновременное теоретическое моделирование кривых блеска и спектров SDSS J162256 проводилось на программном комплексе SPECTR с учетом эффектов отражения по методике Сахибуллина и Шиманского [6]. Параметры и химический состав атмосферы sdB-субкарлика получены при согласовании профилей линий H и HeI в теоретическом и наблюдаемом спектрах в фазах, близких к главному затмению. В результате найдены следующие значения: $T_{eff} = 30\,800 \text{ K}$, $\log g = 5.75$, $[He/H] = -0.62$. (В статье [4] вычислены следующие параметры: $T_{eff} = 29\,000 \text{ K}$, $\log g = 5.65$.) Данные параметры в целом характерны для умеренно горячих sdB-субкарликов с наличием эффектов стратификации в их атмосферах.



Наблюдаемые кривые блеска (черные квадратики) и теоретические кривые блеска в полосах B, V, R (сверху вниз)

Анализ лучевых скоростей и результаты

Наличие в спектрах SDSS J162256 абсорбционных линий sdB-субкарлика позволяет измерить лучевые скорости только его орбитального движения. Их определение выполнено с использованием метода кросс-корреляции. Аппроксимация кривых лучевых скоростей проводилась методом градиентного спуска для модели круговой орбиты с применением скрипта, написанного в программном пакете Origin. Полученные фазовые кривые лучевых скоростей по форме отличаются от синусоиды, характерной для круговой орбиты. Однако для III возможны искусственные искажения кривых лучевых скоростей из-за эффектов отражения и несферичности компонент. Найденные амплитуды изменений V_r по разным линиям HI составляют $K_1 = 48.6 \pm 0.3$ км/с, а по совокупности линий $K_1 = 48.3$ км/с. Совместный анализ кривых блеска систем типа HW Vir в полосах BVR позволяет одновременно найти пять параметров: температуры T_{eff} и радиусы R компонент, а также угол наклона орбиты i . Однако эффективная температура вторичной компоненты SDSS J162256 практически не влияет на кривые блеска, и мы зафиксировали ее как $T_{eff} = 3250$ К. Напротив, температура sdB-субкарлика оказывает главное влияние на амплитуду эффектов отражения. Поэтому для минимизации ошибок определения остальных параметров мы использовали ее значение $T_{eff} = 30800$ К, независимо полученное из анализа спектра (см. выше). В результате согласование модельных и наблюдаемых кривых блеска проводилось нами с варьированием радиусов компонент и угла наклона орбиты. При этом согласовании учитывалось, что амплитуда эффектов отражения определяется в основном радиусом вторичной компоненты, а амплитуды и ширина затмений — отношением R_1/R_2 и значением i . В результате достигнуто согласование кривых блеска во всех полосах при значениях: $i = 70.0 \pm 0.3^\circ$, $R_1 = 0.195 \pm 0.01R_\odot$, $R_2 = 0.093 \pm 0.01R_\odot$. Представленные ошибки параметров обусловлены ошибками наблюдений. На рисунке представлены кривые блеска с результатами моделирования в трех полосах.

Значения массы вторичной компоненты $M_2 = 0.065 \pm 0.001 M_\odot$ и большой полуоси орбиты $a = 0.580 \pm 0.01 R_\odot$ вычислены из найденной функции масс с принятием для главной компоненты оценки массы $M_1 = 0.47 M_\odot$, считающейся стандартной для всех sdV-субкарликов на постгоризонтальной ветви [7]. Анализируя условия применимости новой методики, Шиманский и др. [3] предположили, что она эффективна для систем с температурами главных компонент выше $T_{eff} = 32\,000$ К. Однако наш анализ излучения NSVS 14256825 [8] с горячей главной компонентой ($T_{eff} = 40\,000$ К) показал невозможность применения данной методики для систем со слабыми эффектами отражения ($\Delta m < 0.^m3$). Поэтому при исследовании последующих систем типа HW Vir и определении их параметров мы используем фиксированное значение массы главной компоненты $M_1 = 0.47 M_\odot$. Исследование [8] показало, что в этом случае анализ фотометрических и спектроскопических наблюдений таких систем позволяет однозначно найти остальные параметры и обеспечить методическую однородность их определения. Результаты данной работы полностью подтверждают предположения и выводы работы [8].

Работа В. В. Шиманского велась при финансовой поддержке РФФИ и Правительства РТ в рамках проекта 18-42-160003. Работа И. Ф. Бикмаева финансировалась за счет средств субсидии 671-2020-0052, выделенной КФУ для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Библиографические ссылки

- [1] *Ritter H.* Precataclysmic binaries // *Astron. Astrophys.* — 1986. — Vol. 169. — P. 139–148.
- [2] *Shimanskii V. V., Borisov N. V., Sakhibullin N. A., Surkov A. E.* The Nature of the Unique Precataclysmic Variable V664 Cas with Two-Peaked Balmer Lines in Its Spectrum // *Astron. Rep.* — 2004. — Vol. 48. — P. 563–576.
- [3] *Shimanskii V. V., Yakin D. G., Borisov N. V., Bikmaev I. F.* Analysis of reflection effects in HS 2333+3927 // *Astron. Rep.* — 2012. — Vol. 56. — P. 867–877.
- [4] *Schaffenroth V., Geier S., Heber U. et al.* Binaries discovered by the MUCHFUSS project. SDSS J162256.66+473051.1: An eclipsing subdwarf B binary with a brown dwarf companion // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 564. — P. A98.
- [5] *Afanasev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astron. Letters.* — 2005. — Vol. 31. — P. 194–204.
- [6] *Ivanova D. V., Sakhibullin N. A., Shimanskii V. V.* A Method for Modeling the Formation of CaII Lines in the Spectra of Irradiated Stellar Atmospheres // *Astron. Rep.* — 2002. — Vol. 46. — P. 390–405.
- [7] *Heber U.* Hot Subluminous Stars // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2016. — Vol. 128. — P. 082001.
- [8] *Deminova N. R., Shimansky V. V., Borisov N. V. et al.* Research of Precataclysmic Variables with Radius Excesses // *ASP Conf. Ser.* — 2017. — Vol. 510. — P. 420–423.

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Г. Н. Дремова¹, В. В. Дремов¹, А. В. Тутуков²
¹Российский федеральный ядерный центр, г. Снежинск,
²Институт астрономии РАН, г. Москва

Лекция посвящена изучению роли гравитационного рассеяния в эволюции планетных систем. В рамках этого механизма объясняется происхождение облака Оорта и свободных от родительской звезды астероидов, комет и планет (АКП).

INTERSTELLAR PLANETS

G. N. Dryomova¹, V. V. Dryomov¹, A. V. Tutukov²
¹Russian Federal Nuclear Centre, ²Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

The lecture is devoted to the study of the role of gravitational scattering in the evolution of planetary systems. This mechanism explains the origin of the Oort cloud and free asteroids, comets, and planets (ACPs) from the parent star.

Эра экзопланет

На рубеже XX и XXI вв. начался *ренессанс* в изучении планет благодаря таким инновациям в светочувствительной приемной аппаратуре, как адаптивная оптика, интегральные полевые спектрографы, интерферометры... Телескопы нового поколения позволили улавливать «шум» планет в «дрожании» лучевой скорости и/или блеска родительской звезды.

С обнаружения первой планеты вблизи *PSR1257 + 12* в 1992 г. [1] началась эра экзопланет, которая вывела концепцию планеты за границы Солнечной системы и изменила отношение к ним. Ранее ассоциируемое с ближним космосом, сегодня изучение планет несет космологический аспект: в событиях микролинзирования регистрируются межзвездные планеты как в Галактике, так и за ее пределами [2]. Чтобы понять причины выбросов планет из родительских звездных систем, обратимся к Солнечной системе.

Солнечная система

Знакомое с детства словосочетание «Солнечная система» сегодня как никогда представляет труднейшую загадку в вопросах ее происхождения, размеров и количественной оценки планетных тел. Ее сложно организованная структура включает главный пояс астероидов, пояс Койпера—Эджворта, рассеянный диск транснептуновых объектов, облако Оорта.

Все, за исключением последнего, наблюдательно подтверждены. Но другие звезды также имеют планетные диски и, возможно, свои экзосоветные облака, которые извне, может быть, «легче» наблюдать. Уже начата программа поиска ледяных экзосоветов по картам реликтового излучения, на которых мог быть запечатлен их тепловой сигнал [3].

Солнечная система формировалась в ходе долгой, сложной эволюции, определяемой балансом гравитации, момента вращения, магнитного поля, излучения звезды и ряда других факторов, например, гравитационного рассеяния. Этот процесс ответствен за структуру Солнечной системы и оказывается важным не только на стадии столкновительной аккумуляции планетезималей.

Гравитационное рассеяние

Механизм гравитационного рассеяния сопровождает все этапы планетной сборки — от пылинки до планет-гигантов. Одним из его следствий является орбитальный резонанс, в процессе которого стабилизируется часть планетной подсистемы, в то время как ее другая часть рассеивается, формируя периферию. Важную роль в этом рассеянии играют планеты-гиганты, которые при участии родительской звезды создают условия гравитационного маневра для системы своих спутников (АКП-объектов).

Границы устойчивости орбит оцениваются из анализа размеров сферы Хилла $R = 0.4 a \cdot (m/M)^{1/3}$, здесь m — масса планеты; M — масса звезды; da — разница больших полуосей соседних планет. При $m = 10^{-3}M$ орбиты соседних планет в пределах $da/a = 0.08$ будут неустойчивы. Теоретические оценки и наблюдаемое распределение планет по a дают условие устойчивости орбит соседних планет: $da/a = 0.25$ [4].

Условие выброса АКП-объекта при гравитационном взаимодействии с планетой массы m и радиусом r , находящейся на орбите с большой полуосью a около звезды с массой M : $m/r > 1/k^2 \cdot M/a$. Гравитационное ускорение, сообщаемое планетой АКП объекту Gm/r^2 , дает изменение скорости $\Delta v = k \cdot Gm/(rv)$, где k — константа, зависящая от геометрии столкновения; $v = (Gm/r)^{1/2}$. Для освобождения АКП Δv должно превышать параболическую скорость АКП-объекта на орбите планеты-ускорителя $(GM/a^{1/2})$.

АКП-объекты, не достигшие параболической скорости, становятся членами облака Оорта. Пример хаотического гравитационного рассеяния астероидов и комет демонстрирует система спутников Юпитера, имитирующих свое облако «Оорта». Аккумуляционную работу выполняют и планеты земной группы. Теоретические модели [5] предсказывают, что Земля также окружена облаком захваченных астероидов. Пока открыты две такие *минимумы*: 2006 RH120 и 2020 CD3 [6].

Актуальны наблюдения за метеорами, созданными земными до входа в атмосферу метеороидами. Изучение их орбит позволило установить, что до 30 % последних имеют ретроградные относительно Солнечной системы орбиты [7] и гиперболические для уровня орбиты Земли скорости [8], что позволяет сортировать их принадлежность к облаку Оорта и общему планетному полю нашей Галактики.

Моделирование АКП-рассеяния

Первые попытки численного моделирования образования облака Оорта на шкале 4 млрд лет были предприняты Дунканом и др. [9]. В данной же работе мы моделируем начальную стадию «разогрева» АКП-системы за счет взаимодействия с планетами-гигантами. Задается система Солнце, Юпитер и 10^4 АКП, однородно распределенных в торе с диаметром сечения 0.1 а. е. с дисперсией скоростей 10 % от кеплеровской скорости на орбите Юпитера (рис. 1, а). Предполагается, что АКП взаимодействуют только с Солнцем и Юпитером. При подлете к Юпитеру или Солнцу на расстояние, меньшее их радиуса, АКП исключается из счета. Прямое численное интегрирование движения АКП в гравитационном потенциале Солнце—Юпитер проводится в рамках алгоритма Верлета и Вейса [10].

Хаотизация АКП-орбит изучалась на шкале 10^5 лет, на которой проявилась динамика разлета системы. Например, при $t = 55\,000$ лет хорошо заметны два разрыва в планетном торе (рис. 1, б). Первый, в нижней части кольца, соответствует положению Юпитера, погруженного в АКП-облако. Второй, вверху кольца, — в точке орбиты Юпитера, противоположной его текущему положению. Его происхождение связано с эффектами вековой эволюции планетного тора. Гравитационное поле Солнце—Юпитер не обладает азимутальной симметрией, что приводит к нарастанию возмущений, которые становятся заметными

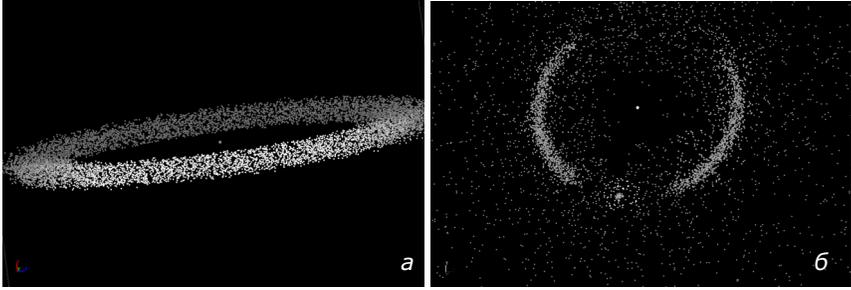


Рис. 1. Пространственная конфигурация АКП тора: $t = 0$ (а) и $t = 55\,000$ лет (б)

через тысячу оборотов Юпитера. С течением эволюции АКП стягиваются в дуги в окрестностях точек Лагранжа L_4 и L_5 , в местах обитания «троянцев» и «греков».

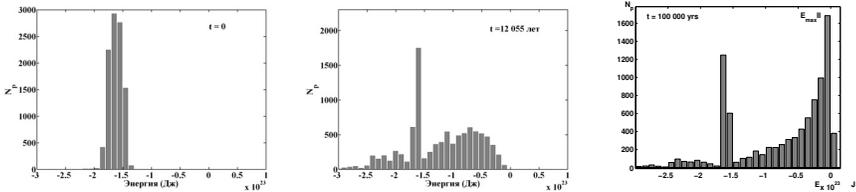


Рис. 2. АКП-распределение по величине полной энергии: а — $t = 0$; б — 12 055; в — 10^5 лет

На рис. 2 показаны распределения АКП-объектов по величине их полной энергии на разные моменты времени. На первом графике выделяется максимум, который соответствует начальному состоянию планетного тора. Со временем главный максимум расплывается, и начинает вырисовываться вторичный пик, в котором «скрыта» информация о формирующемся облаке Оорта. Постепенно вторичный пик смещается в сторону положительных значений энергии за счет подпитки новыми АКП-объектами из главного максимума.

Даже за этот небольшой интервал времени $\sim 10^5$ лет проявилась устойчивая тенденция эволюции планетного тора в АКП-облако и образования свободных АКП-объектов, пространственная скорость которых относительно Солнца 1—5 км/с (рис. 3, а). Гравитационное рассеяние не единственный способ генерации межзвездных планет. Их появление может быть вызвано возмущениями близко проходящих звезд поля. Но совершенно другой порядок скоростей выброса АКП реализуется в сценарии сближения планетной системы со сверхмассивной черной дырой.

АКП-сближение со сверхмассивной черной дырой

Моделируется сближение планетной системы (АКП-тор в системе Солнце—Юпитер) из бесконечности ($10^3 R_\odot$) в окрестности черной дыры с массой $10^6 M_\odot$ на расстоянии $100 R_\odot$. Начальная скорость задавалась ~ 60 км/с, орбитальный период ~ 3.55 года. Анализ модельных спектров скоростей позволяет заключить о возможности сверхскоростных выбросов АКП со скоростями 800—1 600 км/с (рис. 3, б). В дальнейшем представляет интерес изучение влияния геометрии сближений на деформацию планетного тора (рис. 3, в).

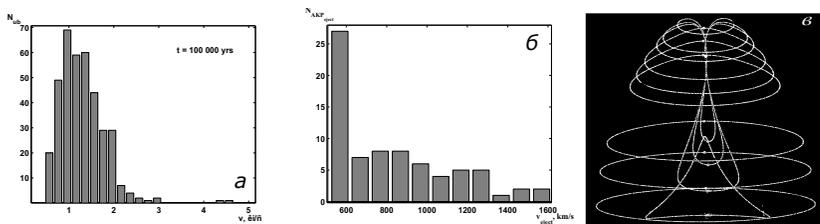


Рис. 3. Спектр скоростей межзвездных и сверхскоростных АКП и искажение планетного тора при прохождении окрестности СМЧД

Заключение

В коллективных системах, как показали результаты численного моделирования, существуют механизмы, способствующие освобождению части ее компонент, что позволяет утвердиться в выводе о существовании межзвездных планет. Обнаружение межзвездного астероида Oumuamua, комет Borisov и Leonard, а также околосолнечных свободных планет подтверждает наличие АКП компоненты, вероятно, у всех галактик [2].

Библиографические ссылки

- [1] *Wolszczan A., Frail D.* A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12 // *Nature*. — 1992. — Vol. 355. — P. 145–147.
- [2] *Bhatiani S., Dai X., Guerras E. et al.* Confirmation of planet-mass objects in extragalactic systems // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 855. — P. 77–85.
- [3] *Orlowski-Scherer J., Baxter E., Devlin M. et al.* Characterizing extra-solar Oort clouds with submillimeter-wave observations // *Bulletin of the AAS*. — 2019. — Vol. 51, iss. 3. — P. 349.
- [4] *Tutukov A.* Stars and planetary systems // *Soviet Astronomy*. — 1987. — Vol. 31. — P. 663–669.
- [5] *Fedorets G., Gravnik M., Jedicke R.* Orbit and size distributions for asteroids temporarily captured by the Earth-Moon system // *Icarus*.
- [6] *Fedorets G., Michelli M., Jedicke R.* Characterization of 2020 CD3, Earth’s Second Minimoons // *Bulletin of the AAS*. — 2020. — Vol. 52, № 6. — P. 415–418.
- [7] *Narzew M., Chebotarev R., Jopek T. et al.* IAU MDC meteor orbits database — A sample of radio-meteor data from the Hissar Observatory // *Planet. Space Sci.* — 2020. — Vol. 192.
- [8] *Siraj A., Loeb A.* Discovery of a Meteor of Interstellar Origin // *astro-ph/1904.07224*. — 2019.
- [9] *Duncan M., Quinn T., Tremaine S.* The formation and extent of the Solar System comet cloud // *Astron. J.* — 1987. — Vol. 94. — P. 1330–1338.
- [10] *Verlet L., Weis J. J.* Equilibrium Theory of Simple Liquids // *Phys. Rev.* — 1972. — Vol. 5. — P. 939–952.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМЕТ МЕТОДОМ АПЕРТУРНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Е. А. Жужулина, А. А. Савушкин, Д. В. Петров

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Важным источником информации о физических свойствах малых тел являются поляризационные характеристики света, рассеянного этими телами. Наиболее важной поляризационной характеристикой служит фазовая зависимость поляризации. В течение последующих двух лет были проведены наблюдения 18 комет. Для многих комет поляриметрические данные получены впервые. По результатам наблюдений была построена фазовая зависимость поляризации континуума комет.

STUDY OF POLARIZATION PROPERTIES OF COMETS BY THE METHOD OF APERTURE POLARIMETRY

E. A. Zhuzhulina, A. A. Savushkin, D. V. Petrov

Crimean Astrophysical Observatory RAS

An important source of information on the physical properties of small bodies is the polarization characteristics of the light scattered by these bodies. The most important polarization characteristic is the phase dependence of polarization. Over the next 2 years, 18 comets were observed. For many comets, polarimetric data have been obtained for the first time. Based on the results of observations, the phase dependence of the polarization of the comet continuum was plotted.

Введение

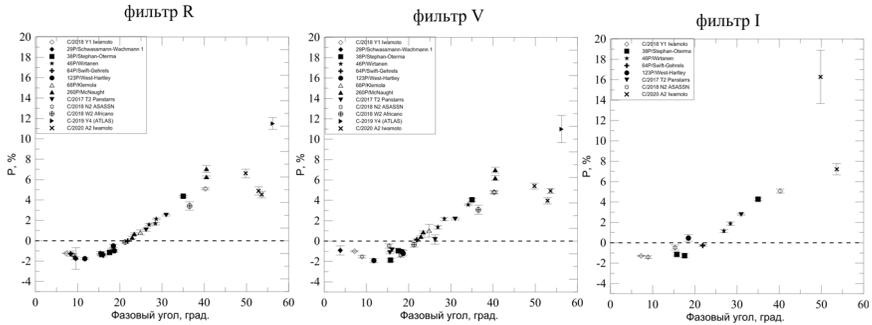
Изучение физических свойств малых тел Солнечной системы является крайне важным этапом для решения такой фундаментальной задачи, как происхождение и эволюция Солнечной системы. Важным источником информации о физических свойствах малых тел являются поляризационные характеристики света, рассеянного этими телами. Наиболее важной поляризационной характеристикой служит фазовая зависимость поляризации (ФЗП), она позволяет получить такие данные, как альbedo, примерный состав, размеры частиц, слагающих отражающую поверхность, и т. п.

Методика наблюдений

В настоящее время для изучения поляризации комет используются два метода — апертурная и панорамная поляриметрия. В 2018 г. в КраО и в обсерватории пик Терскол были введены в строй новые двухканальные фотоэлектрические поляриметры им. Н. М. Шаховского. Это позволило существенно расширить диапазон блеска наблюдаемых комет (до 15^m) и повысить точность получаемых результатов.

Результаты и обсуждение

В течение последующих двух лет были проведены наблюдения 18 комет — 8 короткопериодических и 10 долгопериодических, из которых одна межзвездная (2I/Borisov). Интегральный блеск комет находился в пределах $10-15^m$, а диапазон фазовых углов составил $1.4-103^\circ$. Для многих комет поляриметрические данные получены впервые. Наблюдения проводились в основном в фильтрах BVRI и частично в узкополосных кометных фильтрах, выделяющих области континуума и молекулярных эмиссий. На рисунке приведены фазовые зависимости степени линейной поляризации различных комет в трех фильтрах — R (левая панель), V (средняя панель) и I (правая панель).



Фазовая зависимость поляризации комет в R-, V- и I-фильтрах

Выводы

По результатам наблюдений была построена фазовая зависимость поляризации континуума комет. Проведено ее сопоставление с синтетической фазовой зависимостью поляризации комет, построенной по поляриметрической базе кометных данных (ПБКД). Показано, что новые данные в пределах точности наблюдений $\leq 0.2\%$ совпадают с данными ПБКД и дополняют их на недостающих фазовых углах.

О ТЕПЛОВОМ УБЕГАНИИ АТМОСФЕРЫ π MEN c

Е. С. Калиничева, В. И. Шематович, Я. Н. Павлюченков

Институт астрономии Российской академии наук

В данной работе представлены результаты моделирования верхней атмосферы экзопланеты π Men c, выполненные с помощью ранее разработанной одномерной самосогласованной аэрономической модели. Используемая модель учитывает вклад надтепловых частиц, что значительно уточняет функцию нагрева атмосферы. Получены высотные профили температуры, скорости и плотности, рассчитан темп потери атмосферы. Обнаружено присутствие двух шкал высоты в структуре атмосферы: первая отвечает относительно плотной стационарной атмосфере, вторая — более разреженной короне.

ON THE THERMAL ATMOSPHERIC ESCAPE OF π MEN c

E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, Ya. N. Pavlyuchenkov

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

In this work we present the results of the modeling of exoplanet π Men c upper atmosphere, produced using the previously developed one-dimensional self-consistent aeronomic model. The model used takes into account the contribution of suprathreshold particles, which significantly refines the heating function of the atmosphere. The height profiles of temperature, velocity and density were obtained, the atmospheric mass-loss rate was calculated. The presence of two height-scales in the structure of the atmosphere was found: the first corresponds to a relatively dense stationary atmosphere, the second to a more rarefied corona.

Введение

В настоящее время известно уже более четырех тысяч экзопланет. Особую группу среди них составляют планеты с протяженными водородгелиевыми атмосферами, многие из них находятся на очень низких орбитах (расположены очень близко к своей звезде), из-за чего их атмосферы подвержены воздействию больших потоков звездного излучения в диапазонах мягкого рентгена и жесткого ультрафиолета (XUV-излучения). Такое жесткое излучение нагревает атмосферу и вызывает у таких планет гидродинамический отток или убегание газовой оболочки, состоящей из легких элементов [1]. Описанное явление наблюдается посредством транзитной спектроскопии у нескольких близких систем с горячими юпитерами, суперземлями и субнептунами. Горячие юптеры — это внесолнечные планеты с массами и радиусами порядка соответствующих параметров планеты Юпитер в Солнечной системе, но находящиеся на гораздо более низких орбитах (до 0.1 а. е.). Аналогичным образом определяются горячие нептун (параметры порядка соответствующих значений для Нептуна из Солнечной системы). Суперземли — это планеты, чей радиус попадает в диапазон от 1.25 до 2 радиусов Земли. Температуры на уровне термосферы у горячих планет очень велики (до нескольких тысяч кельвин), это повышение температуры вызвано описанным выше поглощением потока излучения в диапазоне XUV от родительской звезды.

Несмотря на обнаружение большого числа внесолнечных юпитеров и суперземель на близких к родительской звезде орбитах, количество горячих непунов (0.6–18 масс Нептуна, орбитальный период меньше трех дней) оказалось очень незначительным. Соответствующая область на диаграмме масса—период названа «пустыней горячих непунов» или

пустыней короткопериодических непутов [2]. Общепринятое объяснение этому явлению состоит в том, что такие планеты не обладают достаточной массой, чтобы удержать свою газовую оболочку, которая теряется под действием XUV-излучения родительской звезды. В [3] был сделан вывод, что наличие пустыни горячих непутов не может объясняться только лишь потерей атмосферы за счет жесткого излучения родительской звезды. В исследовании был сделан вывод, что в случае относительно маломассивных горячих непутов оценка верхнего предела оттока массы совпадает с оценками [1] уровня фотониспарения атмосферы. В случае же более массивных горячих непутов подобный механизм не приводит к потере значительной доли атмосферы.

Первой экзопланетой, открытой с помощью спутника TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), стала небольшая планета у яркой звезды солнечного типа π Men (HD 39091), также имеющей планету-гиганта на удаленной орбите. Планета π Men с классифицируется как суперземля. Благодаря яркости звезды масса и радиус планеты были измерены с высокой точностью и равны соответственно $M = 4.52 \pm 0.81 M_{Earth}$ и $R = 2.06 \pm 0.03 R_{Earth}$ [4]. В [5] на основе архивных данных наблюдений ROSAT и Swift было показано, что в части мягкого рентгена и жесткого ультрафиолета спектр родительской звезды π Men повторяет солнечный, а также посчитан темп потери атмосферы π Men c. В [6] обсуждается вопрос о концентрации и роли водорода и более тяжелых элементов в атмосфере π Men c.

Описание модели

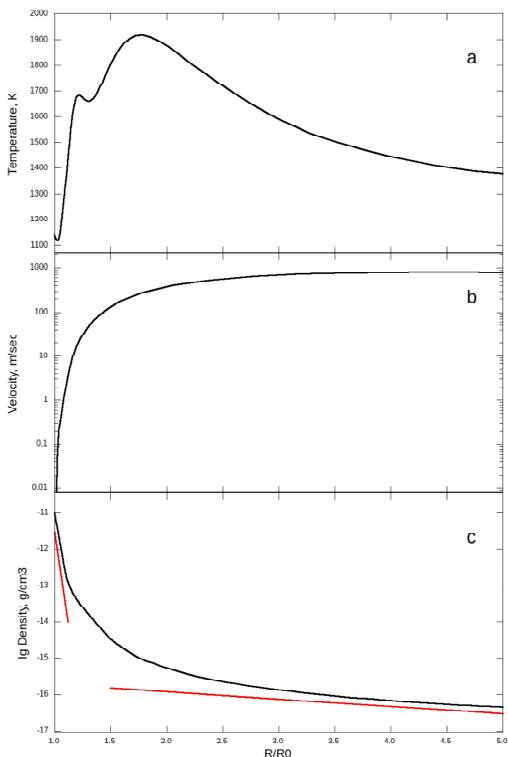
В данной работе с помощью самосогласованной одномерной астрономической модели водородгелиевой атмосферы, включающей надтепловые электроны [7], выполнено моделирование газовой оболочки планеты π Men c (HD 39091c). В сравнении с другими одномерными моделям данная модель имеет преимущество в виде учета вклада надтепловых частиц, что приводит к более аккуратному расчету уровня нагрева атмосферы и соответственно к уточнению темпа ее оттока. Наибольший вклад учета надтепловых частиц заметен при моделировании горячих экзопланет (расположенных очень близко к родительской звезде). Высокоэнергетичное излучение нагревает верхнюю атмосферу, ионизируя атомарный водород и гелий, часть энергии этого излучения переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. Обычно, если энергия образовавшегося фотоэлектрона превышает тепловую на несколько порядков величины (над- или сверхтепловая частица), то он может вступить во вторичную реакцию ионизации или возбуждения других частиц атмосферы. При этом кинетическая энергия, которую надтепловой электрон имел изначально, расходуется преимущественно на ионизацию и диссоциацию H_2 - H -He, а не на прямой нагрев атмосферного газа. Учет описанных процессов вносит существенный вклад в динамику и энергетику экзопланетной атмосферы [3, 7]. Расчеты велись в направлении на родительскую звезду. В качестве отправной точки была выбрана гидростатическая атмосфера из молекулярного водорода (85 %) и гелия (15 %) толщиной 0.4 фотометрических радиуса планеты ($R_0 = 2.06 \pm 0.03 R_{Earth}$) с постоянной температурой 1 147 K и экспоненциальным спадом плотности. Расчетная сетка состоит из 500 ячеек и имеет сгущение к внешнему краю, в качестве граничного условия выбрано постоянное давление на внешней ячейке, имитирующее давление ветра от родительской звезды.

Результаты

На рисунке приведены результаты расчетов — высотные профили температуры (a), скорости (b) и плотности (c) атмосферы π Men c. Как видно из приведенных графиков, максимум температуры достигает приблизительно 1900 K, а газодинамическая скорость не

превышает 1 км/с. Наиболее интересным является третий график, отражающий наличие двусоставной структуры атмосферы планеты. Нижние слои (1–1.2 R0) образуют относительно плотную стационарную атмосферу, в то время как верхние (> 1.5 R0) принадлежат протяженной экзопланетной короне, состоящей из куда более разреженного газа.

Также был посчитан темп оттока атмосферы, по нашим данным, он составляет около $\dot{M} = 1.9 \times 10^9$ г/с, что значительно меньше результатов, обсуждаемых в [5]. Этот результат является ожидаемым, так как учет вклада надтепловых частиц, реализованный в нашей модели, позволяет получить более аккуратный расчет нагрева атмосферы, уменьшенный по сравнению с результатами более простых моделей. Следует заметить, что в [5] подчеркивается, что темп оттока атмосферы π Мен с должен превосходить соответствующую величину для горячего нептона GJ 436 b. В [8] приведена оценка темпа оттока GJ 436 b, сделанная с помощью описанной в данной работе модели, она составила около $\dot{M} = 1.6 \times 10^9$ г/с. Таким образом, если сравнивать между собой оценки темпа потери атмосферы, сделанные с помощью одной и той же модели, учитывающей вклад надтепловых частиц, можно заключить, что по величине темпа потери массы суперземля π Мен с превосходит горячий нептун GJ 436 b.



Высотные профили температуры, скорости и плотности атмосферы π Мен с

Заключение

Первая подтвержденная экзопланета из миссии TESS, π Men c, — суперземля, вращающаяся вокруг яркой звезды солнечного типа. В данной работе представлены высотные профили температуры, скорости и плотности атмосферы этой планеты, полученные с помощью одномерной самосогласованной аэрономической модели с учетом вклада надтепловых частиц. Обнаружена двухуровневая структура атмосферы: небольшая стационарная часть и протяженная корона. Установлено, что темп потери массы, полученный в данной работе, существенно снижен по сравнению с работами других авторов.

Исследование Е. С. Калиничевой выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90149. Работа В. И. Шематовича выполнена в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875).

Библиографические ссылки

- [1] *Owen J. E.* Atmospheric Escape and the Evolution of Close-In Exoplanets // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2019. — Vol. 47.
- [2] *Mazeh T., Holczer T., Faigler S.* Dearth of short-period Neptunian exoplanets: A desert in period-mass and period-radius planes // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — Vol. 589.
- [3] *Ionov D. E., Pavlyuchenkov Ya. N., Shematovich V. I.* Survival of a planet in short-period Neptunian desert under effect of photo-evaporation // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Vol. 476.
- [4] *Gandolfi D., Barragán O., Livingston J. H. et al.* TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae // Astronomy & Astrophysics. — 2018. — Vol. 619.
- [5] *King G. W., Wheatley P. J., Bourrier V., Ehrenreich D.* The XUV irradiation and likely atmospheric escape of the super-Earth π Men c // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2019. — Vol. 484.
- [6] *Shaikhislamov I. F., Fossati L., Khodachenko M. L. et al.* Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: Comparison with Ly alpha transit observations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2020. — Vol. 639.
- [7] *Ionov D. E., Shematovich V. I., Pavlyuchenkov Ya. N.* Influence of Photoelectrons on the Structure and Dynamics of the Upper Atmosphere of a Hot Jupiter // Astronomy Reports. — 2017. — Vol. 61.
- [8] *Kalinicheva E., Shematovich V., Pavlyuchenkov Y.* About the Atmospheric Loss of Hot Neptune GJ 436b // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century : Proceedings of the All-Russian Conference, Nizhny Arkhyz, Russia, September 21–25, 2020. — Nizhny Arkhyz : Special Astrophysical Observatory (SAO RAS), 2020. — P. 4.

ОБРАЗОВАНИЕ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДИСКОВ В КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКАХ

Н. С. Каргальцева^{1,2}, А. Е. Дудоров^{1,2}, С. А. Хайбрахманов^{1,2}, С. Ю. Парфенов¹

¹Уральский федеральный университет, ²Челябинский государственный университет

С помощью двумерного численного МГД-кода ENLIL исследуются изотермические стадии коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков. Расчеты показывают, что в процессе изотермического коллапса образуется иерархическая структура: уплотненная оболочка облака, внутри которой находится первичный магнитостатический диск. Исследуется зависимость характеристик (размер, масса, угловой момент) первичного диска от начальных тепловой, магнитной и вращательной энергий. Для определения наблюдательных проявлений первичных дисков на основе результатов численного моделирования рассчитываются средние яркостные температуры облаков в линии NH₃ (2,2).

FORMATION AND OBSERVATIONAL FEATURES OF PRIMARY DISCS IN COLLAPSING PROTOSTELLAR CLOUDS

N. S. Kargaltseva^{1,2}, A. E. Dudorov^{1,2}, S. A. Khaibrahmanov^{1,2}, S. Yu. Parfenov¹

¹Ural Federal University, ²Chelyabinsk State University

We perform numerical MHD simulations of the isothermal collapse of magnetic rotating protostellar clouds to investigate initial conditions for protostellar disks formation. The simulations show that a hierarchical structure of the cloud is formed during the isothermal collapse: a flattened cloud envelope with a primary magnetostatic disk inside. The first core forms inside the primary disk further. We investigate the dependence of the characteristics (size, mass, angular momentum) of the envelope and primary disk on the initial thermal, magnetic, and rotational energies. Based on the results of numerical simulation the average brightness temperature in the NH₃ line (2,2) is under construction.

Введение

Современное звездообразование происходит в ядрах межзвездных молекулярных облаков (в протозвездных облаках, ПЗО). В своей основополагающей работе [1] Ларсон показал, что коллапс ПЗО имеет резко неоднородный характер с образованием маломассивного ядра — протозвезды. Под действием электромагнитных и/или центробежных сил коллапсирующие облака принимают сплюснутую относительно поля и оси вращения форму [2]. Галли и Шу [3], а также Томисака [4] отметили образование внутри коллапсирующего облака транзитных псевдодисков. Стадии аккреции оболочки на ядро облака, протозвезду, исследовались в работах [5, 6].

В настоящей работе исследуются изотермические стадии коллапса ПЗО до образования первого ядра. Численное моделирование выполняется с помощью двумерного МГД-кода Enlil [7]. При этом впервые показывается, что в центральной области коллапсирующего ПЗО формируются магнитостатические структуры — первичные диски (ПД) [8]. Важность исследования ПД обусловлена тем, что они существуют достаточно долго и могут являться предвестниками протозвездных дисков.

Ниже описываются основные результаты расчетов коллапса сферически симметричных ПЗО, находящихся в однородном магнитном поле, силовые линии которого параллельны оси

вращения. Облака имеют массу $M_0 = 10 M_\odot$ и температуру 20 К. Основными начальными параметрами модели являются отношение тепловой ε_t , магнитной ε_m и вращательной ε_w энергий к модулю гравитационной энергии. Производится сравнение характеристик динамического коллапса и квазистатического сжатия магнитных вращающихся облаков. На основе численных расчетов строятся спектры излучения молекулы аммиака для регистрации возможных наблюдаемых проявлений первичных дисков.

Динамика коллапса

В работе построены модели изотермического коллапса для сильно неравновесного облака, $\varepsilon_t = 0.3$, и облака, близкого к равновесию, $\varepsilon_t = 0.7$, с магнитным и вращательным параметрами $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$. Время измеряется в единицах динамической шкалы времени $t_{\text{fmsw}} = t_{\text{ff}}(1 - \varepsilon_m - \varepsilon_w)^{-1/2}$, где t_{ff} – время свободного сжатия.

Численное моделирование показывает, что коллапсирующие облака быстрее сжимаются вдоль силовых линий магнитного поля и оси вращения, образуя сплюснутую оболочку, внутри которой формируется магнитостатический ПД. На рис. 1 показана двумерная структура сильно неравновесного облака (а) и облака, близкого к равновесию (б) к моменту образования непрозрачной области. Верхние панели (I) показывают структуру оболочки облака, нижние (II) – структуру ПД. Граница оболочки облака (голубая линия) определяется как контактный разрыв с межзвездной средой. Граница ПД (зеленая линия) определяется по скачку в профилях скорости и плотности, на котором происходит резкое уменьшение скорости от сверхзвуковой практически до нуля. Панели II на рис. 1 показывают, что в случае сильно неравновесного облака образуется геометрически тонкий диск, в то время как в квазистатическом случае первичный диск является геометрически толстым во внешней части.

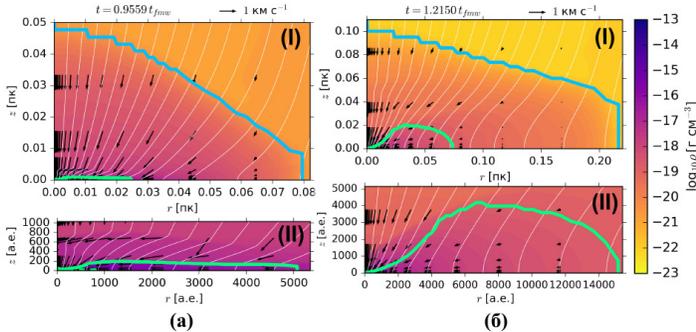


Рис. 1. Двумерное распределение плотности (цветная заливка), скорости (стрелки), магнитного поля (белые линии) коллапсирующего неравновесного облака $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$ (а) и ПЗО, близкого к равновесию, $\varepsilon_t = 0.7$, $\varepsilon_m = 0.2$, $\varepsilon_w = 0.01$ (б) в моменты образования непрозрачной области при $t = 0.9559 t_{\text{fmsw}}$ и $t = 1.2150 t_{\text{fmsw}}$ соответственно. Панели (I) – оболочка облака. Панели (II) – увеличенная центральная область. Голубая линия показывает границу оболочки облака, зеленая – границу первичного диска

Согласно нашему моделированию степень уплощения оболочки протозвездного облака уменьшается с ε_m как $\varepsilon_m^{-1/2}$, что соответствует найденной ранее степенной зависимости в статье [9]. Масса ПД увеличивается с 4 до 78 % массы ПЗО при изменении ε_m в диапазоне от 0.2 до 0.7. Магнитное торможение уменьшает угловой момент оболочки на 5–30 %

в зависимости от $\varepsilon_m = (0.1-0.7)$. Зависимость характеристик оболочки облака и ПД от вращательного параметра ε_w будет рассмотрена в дальнейшем.

Наблюдательные проявления первичных дисков

Для расчетов, показанных на рис. 1, определена средняя яркостная температура ПЗО в линии $\text{NH}_3(2,2)$ в разные моменты времени (рис. 2). Первый столбец панелей соответствует моменту времени до образования ПД, второй столбец панелей показывает начальную стадию формирования ПД, в третьем столбце панелей — ПЗО в момент окончания расчета.

Средние яркостные температуры были получены на основе расчетов переноса излучения с помощью программного кода LIME [10] с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия. Для расчетов использовались скорости радиативных переходов с учетом сверхтонкого расщепления из базы данных VASTEL (является частью пакета CASSIS [11]) и скорости столкновительных переходов из базы данных BASECOL [12].

В расчетах динамического коллапса скорости аккреции и вращения облака больше, чем в расчетах квазистатического сжатия, из-за чего профили линий на рис. 2, *a* заметно уширены по сравнению с профилями линий на рис. 2, *б*. В случае динамического коллапса излучение ПД вносит существенный вклад в среднюю яркостную температуру. На границе ПД и оболочки облака существует область с большим градиентом скорости, где газ резко меняет свое движение с вертикального (вдоль силовых линий магнитного поля) на горизонтальное (рис. 1, *a* П). Наличие этой области выражается в пониженной средней яркостной температуре на скоростях $\approx \pm 0.5$ км/с при малых углах наклона i (рис. 2, *a*). В случае квазистатического сжатия (рис. 2, *б*) градиенты скорости на границе ПД и оболочки облака небольшие, поэтому излучение ПД несущественно влияет на спектральные линии $\text{NH}_3(2,2)$. Нужно отметить, что уплощение в центральных областях облака в моделях с магнитным полем существенно влияет на профили линии еще до момента времени, когда, согласно нашему критерию, в облаке возникает ПД.

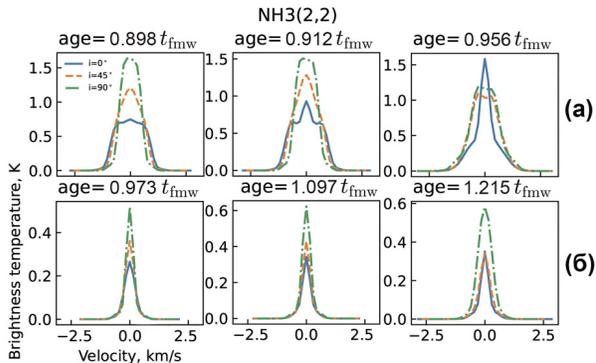


Рис. 2. Средняя яркостная температура в линии $\text{NH}_3(2,2)$ для разных углов наклона между лучом зрения и осью вращения облака, i , и разных этапов эволюции облака в долях t_{fmw} для расчетов на рис. 1

Закключение

Численные расчеты магнитных вращающихся ПЗО показывают, что степень сжатия оболочки уменьшается как $\varepsilon_m^{-1/2}$. При увеличении магнитного параметра ε_m от 0.2 до 0.7 масса ПД растет от 4 до 78 % массы ПЗО, полный угловой момент ПЗО уменьшается на 5–30 %. В процессе динамического коллапса формируются геометрически тонкие ПД, а в случае квазистатического сжатия — геометрически толстые ПД. Однако в квазистатическом случае в линии NH_3 (2,2) не наблюдаются проявления ПД из-за малой скорости движения вещества в облаке. В случае динамического коллапса наблюдается характерный трехгорбый спектр линии NH_3 (2,2) в экваториальном направлении. Можно сделать вывод, что на ранних стадиях звездообразования можно обнаружить проявление ПД в линиях NH_3 (2,2) в случае сильно неравновесных быстроколлапсирующих облаков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10012).

Библиографические ссылки

- [1] *Larson Richard B.* Numerical calculations of the dynamics of collapsing proto-star // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1969. — Vol. 145. — P. 271.
- [2] *Scott E. H., Black D. C.* Numerical calculations of the collapse of nonrotating, magnetic gas clouds // Astrophys. J. — 1980. — Vol. 239. — P. 166–172.
- [3] *Galli Daniele, Shu Frank H.* Collapse of Magnetized Molecular Cloud Cores. I. Semianalytical Solution // Astrophys. J. — 1993. — Vol. 417. — P. 220.
- [4] *Tomisaka Kohji.* Collapse of Rotating Magnetized Molecular Cloud Cores and Mass Outflows // Astrophys. J. — 2002. — Vol. 575, № 1. — P. 306–326. astro-ph/0105527.
- [5] *Hennebelle P., Fromang S.* Magnetic processes in a collapsing dense core. I. Accretion and ejection // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 477, № 1. — P. 9–24. 0709.2886.
- [6] *Zhao Bo, Caselli Paola, Li Zhi-Yun, Krasnopolsky Ruben.* Decoupling of magnetic fields in collapsing protostellar envelopes and disc formation and fragmentation // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 473, № 4. — P. 4868–4889. 1706.06504.
- [7] *Dudorov A. E., Zhilkin A. G., Kuznetsov O. A.* Numerical Simulations of the Astrophysical MHD Flows // Numerical Astrophysics / ed. by Shoken M. Miyama, Kohji Tomisaka, Tomoyuki Hanawa : Astrophysics and Space Science Library. — 1999. — Vol. 240. — P. 389.
- [8] *Khairbrakhmanov S. A., Dudorov A. E., Kargaltseva N. S., Zhilkin A. G.* Simulations of the isothermal collapse of magnetic protostellar clouds // In prep. — 2021.
- [9] *Dudorov A. E., Sazonov Iu. V.* Hydrodynamic collapse of interstellar clouds. 2. The role of magnetic fields. // Nauchnye Informatsii. — 1982. — Vol. 50. — P. 98–112.
- [10] *Brinch C., Hogerheijde M. R.* LIME - a flexible, non-LTE line excitation and radiation transfer method for millimeter and far-infrared wavelengths // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 523. — P. A25. 1008.1492.
- [11] *Vastel C., Bottinelli S., Caux E. et al.* CASSIS: a tool to visualize and analyse instrumental and synthetic spectra. // SF2A-2015: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. — 2015. — P. 313–316.
- [12] *Dubernet M. L., Alexander M. H., Ba Y. A. et al.* BASECOL2012: A collisional database repository and web service within the Virtual Atomic and Molecular Data Centre (VAMDC) // Astron. Astrophys. — 2013. — Vol. 553. — P. A50.

АНАЛИЗ ЯРКОГО БОЛИДА НАД ТУРЦИЕЙ 27 МАЯ 2020 И ПОИСК ВЕЩЕСТВА

Н. А. Кругликов^{1,2,3}, А. Ю. Пастухович¹, Г. А. Яковлев¹,
В. И. Гроховский¹, О. Унсалан⁴

¹Уральский федеральный университет, ²Институт физики металлов УрО РАН,

³Уральский государственный экономический университет,

⁴Эгейский университет, Измир, Турция

Яркий болид был зарегистрирован многими камерами наружного наблюдения и любительскими средствами видеофиксации в Турции, Армении, Грузии и южных регионах России (Краснодарский, Ставропольский край). По имеющимся данным удалось восстановить атмосферную траекторию болида и провести поиск метеоритного вещества в районе вероятного выпадения. Местные особенности (развитый рельеф и значительные уклоны) не позволили осмотреть всю территорию. Тем не менее поиск продолжали в течение лета 2020 г. несколько групп, но вещество обнаружено не было.

ANALYSIS OF THE BRIGHT FIREBALL OVER TURKEY ON MAY 27, 2020 FOLLOWED BY METEORITE RECOVERY CAMPAIGN

N. A. Kruglikov^{1,2,3}, A. Yu. Pastuhovich¹, G. A. Yakovlev¹,
V. I. Grokhovsky¹, O. Unsalan⁴

¹Ural Federal University, ²Institute of Metal Physics, UB of RAS,

³Ural State University of Economics, ⁴Ege University, Izmir, Turkey

Bright fireball on May 27, 2020 was imaged in a lot of points in Turkey, Georgia and Armenia, as well as from Stavropol Region (Russia). Based on these observations we present results on luminous trajectory reconstruction which led to several meteorite expeditions in next few months.

Определение атмосферной траектории яркого болида по данным наблюдений и последующее построение доатмосферной траектории является классической задачей [1]. При этом успешный поиск вещества метеорита позволяет уточнить начальную массу тела, скорректировать модель разрушения и уточнить критерии выпадения вещества [2, 3]. В отличие от ископаемого метеоритного вещества до сих пор зарегистрировано менее четырех десятков случаев, когда по данным фото- и видеосъемки удавалось обнаружить метеоритное вещество и определить параметры доатмосферной траектории [4, 5]. За последнее десятилетие количество таких падений увеличилось вдвое. Наша группа активно и довольно успешно занимается поиском свежих падений и для этого использует данные фото- и видеофиксации [6, 7]. Найденное вещество с низкой степенью выветривания является интересным объектом для различных областей научного знания. Хорошее средство повышения точности определения параметров траектории — построение болидных сетей [8, 9]. Использование таких сетей позволяет существенно улучшить точность определения траектории, автоматизировать расчеты, но не дает возможности отказаться от использования данных случайных наблюдателей. Количество случайных наблюдателей (камер видеонаблюдения) оказывается большим в густонаселенных районах, но регистрация болида при помощи специализированной камеры повышает шансы найти вещество. Даже в таком случае определение начальной

скорости метеороида оказывается не простой задачей и при определенных углах вхождения в атмосферу может быть связано с существенными ошибками [10]. Целью настоящей работы были анализ болида наблюдавшегося 27 мая 2020 г. в 17:30 (УТ) над южной частью турецкой провинции Артвин, недалеко от городка Юсуфели, и последующий поиск вещества.

Примечательной особенностью данного явления оказались отличные наблюдательные условия на значительной территории. Это позволило зарегистрировать болид из Ставрополя (расстояние около 500 км). Событие было зафиксировано стационарными камерами систем безопасности, автомобильными видеорегистраторами и камерами портативных устройств в нескольких десятках точек на территории Южного федерального округа России, Грузии, Армении и Турции. Кроме того, было много очевидцев. Сайт международной метеорной организации (ИМО) предоставлял несколько свидетельств события, которые не позволяли корректно определить параметры траектории. При этом болидной сети в Турции нет, а ближайшая камера в САО РАН оказалась в тумане.

В связи с пандемией Covid-19 и закрытием международных границ возможности коммуникации и поездок были сильно ограничены. Центр исследований околоземных объектов (CNEOS NASA JPL) опубликовал данные о событии, когда район поиска уже был установлен по видеоданным. Сайт CNEOS предлагает следующий набор данных: координаты вспышки 40.8N, 41.7E; полная энергия излучения 57 ГДж; вычисленная полная энергия удара 0.18 кт; высота вспышки 29.3 км; скорость тела при входе в атмосферу 14.9 км/с [11]. Возможности определения координат и времени системы CNEOS ограничены и имеют точность, недостаточную для дальнейшего поиска [12].

Расчет атмосферной траектории и зоны поиска по видеоданным проводили многократно по мере поступления новых записей по методике, аналогичной описанной в [6, 13]. Значительную часть видеозаписей удалось получить посредством запросов в ведущие университеты, расположенные в той же части Турции. Для сбора информации, определения атмосферной траектории и предположительного района падения была сформирована рабочая группа из сотрудников УрФУ, Эгейского Университета (Измир, Турция), Университета им. Ататюрка (г. Эрзурум, Турция), Караденизского технического университета (г. Трабзон, Турция), Университета Бингель (г. Бингель, Турция), Кавказского Университета (г. Карс, Турция). Удалось получить несколько видеозаписей приемлемого качества. На некоторых из них можно было видеть изображение ярких звезд, что позволило повысить точность определения направлений до 0.045° . Это при расстоянии от камеры до объекта в 100 км дает погрешность в определении положения около 80 м. Определение точного времени события все же вызывало сложности. В то же время погода в весенний период в районе, где наблюдался болид, довольно изменчива, с большим количеством осадков, что часто приводит к наводнениям. Поэтому первая попытка поиска была предпринята турецкой группой еще до завершения предварительных расчетов и снятия ограничений, связанных с пандемией. Всего с июня по август 2020 г. турецкие коллеги предприняли четыре безуспешные попытки поиска в расчетном районе. В конечном итоге удалось определить время с точностью до 1 с и координаты вспышки за счет взаимодействия с Восточно-Анатолийской обсерваторией [14]. Для дальнейшего увеличения точности определения азимутов (до 0.008° и 15 м соответственно) было решено изготовить ночные снимки при помощи чувствительной камеры высокого разрешения с двух точек недалеко от города Эрзурум во время экспедиции. Видеозапись еще с одной камеры была получена уже во время экспедиции благодаря помощи В. Богдановского. Таким образом, окончательный расчет траектории и определение района поиска были проведены уже в ходе экспедиции. Расчет поля рассеяния проводили многократно по методике, предложенной автором сервиса [15].

В период с 20.08.2020 по 02.09.2020 была организована поисковая экспедиция УрФУ. Сразу же после открытия международного авиасообщения группа сотрудников (А. Ю. Пас-



Зона поиска в районе наблюдения турецкого болида. Трапецией обозначена площадь, ограничивающая поле рассеяния, ломаная линия соответствует треку одного из участников

тухович, Н. А. Кругликов, Г. А. Яковлев) отправилась по маршруту Екатеринбург—Москва—Стамбул—Эрзурум и далее выдвинулась на арендованном автомобиле в п. Юсуфели. Поиск проводили с 22.08 по 01.09 в горах выше населенных пунктов Ишхан и Арпаджик визуально, планомерно прочесывая доступные для пешего передвижения склоны и проводя опросы местного населения. Протяженность ежедневных пеших маршрутов составила 10—15 км. Район поиска оказался на пересечении нескольких ущелий с обрывистыми склонами, имеющими большое количество вертикальных участков, протяженность которых достигает нескольких сотен метров. Таким образом, большая часть расчетной зоны вероятного выпадения метеоритного вещества была недоступна для поиска. Развитый рельеф замедляет поиск (скорость перемещения по склону с уклоном 45° не превышает 0.1 км/ч) и создает реальную угрозу безопасности участникам поиска. В то же время видимость в основном достаточная и комфортная для визуального поиска. На рисунке приведены расчетная зона предполагаемого выпадения фрагментов метеоритного вещества, а также треки одного из участников поискового отряда, наглядно демонстрирующие географию перемещений. Негативными факторами оказались значительные уклоны поверхностей ($20\text{--}40^\circ$), сложенных подвижными выветренными породами, с осыпями, значительные перепады высот (от 500 до 2000 м н.у.м.) и высокая (до 30°C) температура воздуха. Было собрано несколько образцов, резко отличавшихся по внешнему виду от местных пород. Лабораторный анализ их показал, что они не имеют отношения к болиду. Таким образом, метеоритное вещество не обнаружено, что может быть связано с особенностями района поиска и малым количеством выпавшего вещества.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Давление», № АААА-А18-118020190104-3 и Акта 211 Правительства Российской Федерации, Соглашения № 02.А03.21.0006. Авторы статьи выражают глубокую признательность автору сервиса Strenwify.com Дж. А. Гудоллу (James A. Goodall) и О. Шагиру (Onur Shatir) за помощь и поддержку.

Библиографические ссылки

- [1] Бредихин Ф. А. Этюды о метеорах. — М. : Издательство Академии наук СССР, 1954.

- [2] *Sansom Eleanor K., Gritsevich Maria, Devillepoix Hadrien A. R. et al.* Determining Fireball Fates Using the α - β Criterion // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 885, № 2. — P. 115.
- [3] *Moilanen Jarmo, Gritsevich Maria, Lyytinen Esko.* Determination of strewn fields for meteorite falls // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2021. — stab586. <https://academic.oup.com/mnras/advance-article-pdf/doi/10.1093/mnras/stab586/36422525/stab586.pdf>.
- [4] *Colas F., Zanda B., Bouley S. et al.* FRIPON: a worldwide network to track incoming meteoroids // *A&A.* — 2020. — Vol. 644. — P. A53.
- [5] *Meier M. M. M.* Meteorite orbits.info. — <https://www.meteoriteorbits.info/> : M. M. M. Meier, 2021.
- [6] *Trigo-Rodríguez Josep M., Lyytinen Esko, Gritsevich Maria et al.* Orbit and dynamic origin of the recently recovered Annama's H5 chondrite // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2015. — Vol. 449, № 2. — P. 2119–2127.
- [7] *Пастухович А. Ю., Яковлев Г. А., Петрова Е. В. и др.* Метеорит Озёрки: от падения до регистрации // *Минералы: строение, свойства, методы исследования.* — 2019. — Т. 10. — С. 185–187.
- [8] *Kruglikov N. A., Krushinsky V. V., Nazarov S. V. et al.* Towards Digital Russian Fireball Network for Meteorite Recovery // *81st Annual Meeting of the Meteoritical Society.* — 2018. — Vol. 81. — P. 6361.
- [9] *Кругликов Н. А., Рычков Д. А., Короткий С. А. и др.* Развитие техники наблюдений болидных явлений в России // *Минералы: строение, свойства, методы исследования.* — 2020. — Т. 11. — С. 145–148.
- [10] *Vida Denis, Brown Peter G., Campbell-Brown Margaret.* Modelling the measurement accuracy of pre-atmosphere velocities of meteoroids // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2018. — Vol. 479, № 4. — P. 4307–4319.
- [11] *JPL.* Center for NEO Studies. — <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> : NASA, 2020.
- [12] *Carbognani Albino.* The Great Chinese Fireball of December 22, 2020. — 2021. 2101.02457.
- [13] *Midtskogen S.* The Kola fireball: A dashcam analysis. — <http://norskmeteornettverk.no/wordpress/?p=1543> : Norsk Meteornettverk, 2014.
- [14] *Yeşilyaprak C., Keskin O.* Eastern Anatolia Observatory (DAG): the status in 2020 // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2020. — Vol. 11445. — P. 1144515.
- [15] *Goodall Jim.* StrewnLAB Software. — <https://www.strewnify.com/strewnlab/> : Strewnify, 2020.

ПАРЫ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

Э. Д. Кузнецов, О. М. Аль-Шиблави, В. Д. Гусев, Д. С. Устинов
Уральский федеральный университет

Выполнен поиск пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а. е. с использованием метрик Холшевникова в пространстве кеплеровых орбит. Обнаружено 27 пар с метриками менее $0.07 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, 22 пары, в которых один из компонентов является двойным, при значениях метрик менее $0.12 \text{ (а. е.)}^{1/2}$, и 11 пар двойных транснептуновых объектов при значениях метрик менее $0.3 \text{ (а. е.)}^{1/2}$. Сделан вывод, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ может быть самой молодой парой транснептуновых объектов из известных на сегодняшний день.

PAIRS OF TRANS-NEPTUNIAN OBJECTS WITH CLOSE ORBITS

E. D. Kuznetsov, O. M. Al-Shiblawi, V. D. Gusev, D. S. Ustinov
Ural Federal University

A search for pairs of dynamically correlated trans-Neptunian objects with semi-major axes of more than 30 au was performed. The Kholshvnikov metrics in the space of Keplerian orbits are used. Found 27 pairs with metrics less than $0.07 \text{ au}^{1/2}$, 22 pairs in which one of the components is binary, for metrics less than $0.12 \text{ au}^{1/2}$, and 11 pairs of binary trans-Neptunian objects with metrics less than $0.3 \text{ au}^{1/2}$. It is concluded that the pair 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ may be the youngest pair of trans-Neptunian objects known today.

Введение

После открытия Плутона и Харона первый транснептуновый объект (ТНО) был обнаружен в 1992 г. В настоящее время известно около 3 500 ТНО. Распределение орбит малых тел Солнечной системы является результатом различных процессов, протекающих длительное время (см., например, [1, 2]).

Как показано в [3], в главном поясе астероидов существует большое количество пар астероидов с близкими орбитами, имеющих общее происхождение. Исследование этих пар [4] подтвердило их статистическую значимость. Были обнаружены пары астероидов, не принадлежащие группам или семействам [5–7]. Одна пара была обнаружена среди объектов рассеянного диска [8]. Как правило, пары определяют скопления молодых астероидов [9, 10].

Образование пар или групп малых тел на близких орбитах может происходить в результате действия различных процессов: разрушения в результате столкновений, дробления вследствие вращения, распада двойных систем и др. (см., например, [11–13]). Вековые резонансы и резонансы средних движений также могут приводить к движению объектов по сходным орбитам (см., например, [14]).

Предположение о возможном существовании столкновительных семейств малых тел за орбитой Нептуна было высказано в [15]. Первое семейство, идентифицированное во внешней части Солнечной системы, было связано с карликовой планетой (136108) Науша [16]. Задача поиска столкновительных семейств ТНО рассматривалась в [17] и [18]. В работе [19]

© Кузнецов Э. Д., Аль-Шиблави О. М., Гусев В. Д., Устинов Д. С., 2021

выполнен систематический поиск статистически значимых пар и групп динамически коррелированных объектов с большими полуосями орбит более 25 а. е. Для выделения пар ТНО анализировались положения полюсов орбит и перигелиев совместно с разностями времени прохождения перигелия. Было подтверждено существование пары 2000 FC₈ — 2000 GX₁₄₆, указанной в [15]. Были выделены кандидаты в четыре новых столкновительных семейства ТНО, связанных с парами (134860) 2000 OJ₆₇ — 2001 UP₁₈, 2003 UT₂₉₁ — 2004 VB₁₃₁, 2002 CU₁₅₄ — 2005 CE₈₁ и 2003 HF₅₇ — 2013 GG₁₃₇. Также были найдены несколько пар ТНО, которые могут иметь общее происхождение: (135571) 2002 GG₃₂ — (160148) 2001 KV₇₆ и 2005 GX₂₀₆ — 2015 BD₅₁₉.

В данной работе выполняется поиск пар динамически коррелированных ТНО с большими полуосями орбит более 30 а. е. с использованием метрик Холшевникова [20, 21] в пространстве кеплеровых орбит.

Описание методики

Для поиска пар ТНО на близких орбитах использовались метрики Холшевникова ϱ_2 и ϱ_5 [20, 21]. Метрика ϱ_2 определена в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите). Метрика ϱ_5 определена в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i) как минимальное значение ϱ_2 при всех возможных положениях узлов и перигелиев орбит.

Анализ этих метрик позволяет выделить кандидатов в молодые пары ТНО, для которых положения линий узлов и линий асид должны быть близки, а следовательно, $\varrho_2 \approx \varrho_5$. Для поиска пар мы использовали каталоги элементов орбит Asteroids Dynamic Site — AstDyS (<https://newton.spacedys.com/astdys/>) для нумерованных объектов и объектов, наблюдавшихся в нескольких оппозициях, на эпохи MJD 58400 (00^h 00^m 00.000^s BDT 09.10.2018) и MJD 58800 (00^h 00^m 00.000^s BDT 13.11.2019). Использовались следующие критерии отбора кандидатов в молодые пары ТНО: $\rho_2 < 0.07$ (а. е.)^{1/2}, $\rho_5 < 0.07$ (а. е.)^{1/2} и $\rho_2 - \rho_5 < 0.015$ (а. е.)^{1/2}. Также отбирались пары, включающие двойные ТНО, при $\rho_2 < 0.12$ (а. е.)^{1/2} и пары, в которых оба ТНО двойные: $\rho_2 < 0.3$ (а. е.)^{1/2}.

Результаты поиска пар транснептуновых объектов

В результате поиска пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а. е. обнаружено 27 пар ТНО с метрикой $\rho_2 < 0.07$ (а. е.)^{1/2}, 22 пары, в которых один из ТНО является двойным ($\rho_2 < 0.12$ (а. е.)^{1/2}), и 11 пар двойных ТНО ($\rho_2 < 0.3$ (а. е.)^{1/2}).

В таблице приведены пары транснептуновых объектов с метриками $\varrho_2 \leq 0.0632$ (а. е.)^{1/2} ($\varrho_2^2 \leq 0.0040$ а. е. = 6.0×10^5 км). Возможно, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ с минимальными метриками ρ_2 и ρ_5 является самой молодой парой ТНО из известных на сегодняшний день.

Анализ элементов орбит ТНО, входящих в пары (см. таблицу), показал, что все объекты можно отнести к холодным классическим объектам пояса Койпера. Максимальные эксцентриситеты орбит наблюдаются у ТНО, входящих в пару 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁, и составляют 0.0937 и 0.0945 соответственно. Максимальные наклоны орбит достигают 5° для ТНО пары (500839) 2013 GW₁₃₇ — 2015 GZ₅₈.

Особый интерес представляют случаи, когда возможно расположение ТНО пары по разные стороны зон резонансов средних движений (с учетом ошибок определения больших полуосей орбит). Пары ТНО 2003 QL₉₁ — 2015 VA₁₇₃, 2013 SD₁₀₁ — 2015 VY₁₇₀, (88268) 2001 KK₇₆ — 2015 GV₅₈, 2003 QD₉₁ — 2015 VC₁₇₃, 2000 ON₆₇ — 2013 UN₁₇ расположены в

Пара ТНО		$\rho_2, (\text{a. e.})^{1/2}$	$\rho_5, (\text{a. e.})^{1/2}$
2004 VA ₁₃₁	2004 VU ₁₃₁	0.0195	0.0054
1999 HV ₁₁	2015 VF ₁₇₂	0.0348	0.0316
2003 QL ₉₁	2015 VA ₁₇₃	0.0366	0.0331
2013 SD ₁₀₁	2015 VY ₁₇₀	0.0438	0.0392
2002 CY ₁₅₄	2005 EW ₃₁₈	0.0461	0.0377
(88268) 2001 KK ₇₆	2015 GV ₅₈	0.0542	0.0432
2000 PW ₂₉	2015 GL ₅₈	0.0587	0.0286
(468422) 2000 FA ₈	2000 YV ₁	0.0591	0.0420
2003 QD ₉₁	2015 VC ₁₇₃	0.0592	0.0387
2000 ON ₆₇	2013 UN ₁₇	0.0597	0.0457
2002 FW ₃₆	2015 VF ₁₇₀	0.0600	0.0239
(500839) 2013 GW ₁₃₇	2015 GZ ₅₈	0.0602	0.0182
(88268) 2001 KK ₇₆	2013 UL ₁₇	0.0620	0.0445
2013 UR ₁₇	2015 GY ₅₈	0.0632	0.0518

окрестности резонанса 7:12 ($a_{res} = 43.1$ а. е.). Пары 2000 PW₂₉ — 2015 GL₅₈ и 2013 UR₁₇ — 2015 GY₅₈ — в окрестности резонанса 5 : 9 ($a_{res} = 44.5$ а. е.).

Обсуждение результатов и заключение

Проверка вывода, что пара 2004 VA₁₃₁ — 2004 VU₁₃₁ является самой молодой парой ТНО из известных на сегодняшний день, требует исследования вероятностной эволюции. Результаты численного моделирования с помощью комплексов программ Orbit9 и Mercury на основе номинальных орбит ТНО 2004 VA₁₃₁ и 2004 VU₁₃₁ из каталога AstDyS на эпоху MJD 58800 показывают, что ближайшее к современной эпохе низкоскоростное сближение на расстояние менее радиуса Хилла при скорости, меньшей второй космической, могло реализоваться 15.6 года назад.

По современным представлениям, большая часть холодных классических объектов пояса Койпера сформировалась в виде двойных объектов. Наблюдаемые пары ТНО на близких орбитах могут быть результатом распада этих двойных систем вследствие неустойчивости, развивающейся под действием внешних возмущающих факторов.

Проведенное исследование является начальным этапом изучения динамических свойств пар ТНО на близких орбитах. В дальнейшем предполагается исследование вероятностной эволюции пар ТНО с целью уточнения их возраста. Отдельно будут исследоваться пары, в которые входят двойные ТНО. Эти пары представляют особый интерес, так как они могли образоваться в результате распада кратных ТНО.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Библиографические ссылки

- [1] *Deienno R., Gomes R. S., Walsh K. J. et al.* Is the Grand Tack model compatible with the orbital distribution of main belt asteroids? // *Icarus*. — 2016. — Vol. 272. — P. 114–124. 1701.02775.

- [2] *Granvik M., Morbidelli A., Vokrouhlický D. et al.* Escape of asteroids from the main belt // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. A52.
- [3] *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136, № 1. — P. 280–290.
- [4] *Pravec P., Vokrouhlický D.* Significance analysis of asteroid pairs // *Icarus.* — 2009. — Vol. 204, № 2. — P. 580–588.
- [5] *Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D. et al.* Formation of asteroid pairs by rotational fission // *Nature.* — 2010. — Vol. 466, № 7310. — P. 1085–1088. 1009.2770.
- [6] *Jacobson S. A.* Multiple origins of asteroid pairs // *Asteroids: New Observations, New Models* / ed. by S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, D. Farnocchia : IAU Symposium. — 2016. — Vol. 318. — P. 55–65. 1511.00566.
- [7] *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. Space Sci.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
- [8] *Rabinowitz D., Schwamb M. E., Hadjijska E. et al.* A Tale of Two TNOs // *EPSC-DPS Joint Meeting 2011.* — 2011. — Vol. 2011. — P. 1642.
- [9] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus.* — 2018. — Vol. 304. — P. 110–126.
- [10] *Kuznetsov E. D., Vasileva M. A.* On New Members of Asteroid Clusters Similar to Asteroid Pairs // *82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society.* — 2019. — Vol. 82. — P. 6192.
- [11] *Benz W., Asphaug E.* Catastrophic Disruptions Revisited // *Icarus.* — 1999. — Vol. 142, № 1. — P. 5–20. [astro-ph/9907117](#).
- [12] *Boehnhardt H.* Split comets // *Comets II* / ed. by Michel C. Festou, H. Uwe Keller, Harold A. Weaver. — 2004. — P. 301.
- [13] *Jacobson S. A., Scheeres D. J.* Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems // *Icarus.* — 2011. — Vol. 214, № 1. — P. 161–178. 1404.0801.
- [14] *Fuente Marcos C. de la, Fuente Marcos R. de la.* Far from random: dynamical groupings among the NEO population // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 456, № 3. — P. 2946–2956. 1512.02139.
- [15] *Chiang E. I.* A Collisional Family in the Classical Kuiper Belt // *Astrophys. J. Lett.* — 2002. — Vol. 573, № 1. — P. L65–L68. [astro-ph/0205275](#).
- [16] *Brown M. E., Barkume K. M., Ragozzine D., Schaller E. L.* A collisional family of icy objects in the Kuiper belt // *Nature.* — 2007. — Vol. 446, № 7133. — P. 294–296.
- [17] *Chiang E. I., Lovering J. R., Millis R. L. et al.* Resonant and Secular Families of the Kuiper Belt // *Earth Moon and Planets.* — 2003. — Vol. 92, № 1. — P. 49–62.
- [18] *Marcus R. A., Ragozzine D., Murray-Clay R. A., Holman M. J.* Identifying Collisional Families in the Kuiper Belt // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 733, № 1. — P. 40.
- [19] *Fuente Marcos C. de la, Fuente Marcos R. de la.* Dynamically correlated minor bodies in the outer Solar system // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 474, № 1. — P. 838–846. 1710.07610.
- [20] *Kholshchikov K. V., Kokhirova G. L., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [21] *Kholshchikov K. V., Shchepalova A. S., Jazmati M. S.* On a quotient space of keplerian orbits // *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics.* — 2020. — Vol. 53, № 1. — P. 108–114.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

А. Д. Лаврухина¹, К. Л. Маланчев^{2,3}

¹*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет космических исследований,* ²*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,* ³*Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign*

Астрономия входит в эпоху больших обзоров переменного неба, таких как Zwicky Transient Facility и грядущий Legacy Survey of Space and Time. Эти обзоры предназначены для мониторинга всей видимой части неба за несколько ночей. Для эффективной работы с такими объемами данных требуется автоматическое извлечение признаков кривых блеска для дальнейшего их использования в задачах классификации и определения физических параметров переменных источников. В данной работе мы представляем новую библиотеку на языке Python, предназначенную для извлечения 25 признаков кривых блеска переменных астрономических источников.

LIGHT CURVE FEATURES EXTRACTION FROM ASTRONOMICAL SOURCE

A. D. Lavrukhina¹, K. L. Malanchev^{2,3}

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research,* ²*Lomonosov Moscow State University, Sternberg astronomical institute,* ³*Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign*

Astronomy is entering the era of large surveys of the variable sky such as Zwicky Transient Facility and forthcoming Legacy Survey of Space and Time. These surveys are dedicated to observe the apparent celestial sphere in several days. The usage of an automatic extraction of light curve features is required to work effectively with such amount of data, especially in problems of classification and characterisation of variable sources. In this work, we present the new Python library for extraction of 25 light curve features of variable astronomic sources.

Современные астрономические обзоры содержат информацию о сотнях миллионов кривых блеска переменных астрономических источников, например, релиз данных Zwicky Transient Facility Data Release 3 (ZTF DR3) содержит миллиарды кривых блеска. При решении задач классификации [1] или поиска аномалий [2] в таких больших объемах данных используются методы машинного обучения. Обычно кривые блеска не используются напрямую, вместо этого каждый источник представляется набором признаков, которые наилучшим образом описывают свойства его переменности. В данной работе мы представляем новую библиотеку на языке Python, предназначенную для извлечения признаков из кривых блеска переменных астрономических источников.

Пусть кривая блеска задана набором из N наблюдений $\{t_i, m_i, \delta_i\}$, где t_i — время наблюдения; m_i — наблюдаемая звездная величина; δ_i — ошибка наблюдения звездной величины.

Нами рассмотрены следующие признаки (мы придерживаемся терминологии оригинальных статей и других библиотек, таких как Feets [3]):

- Amplitude — полуамплитуда кривой блеска.

- Anderson–Darling test — статистика теста Андерсона–Дарлинга для нормального распределения.
- Beyond n std — доля наблюдений, отклонившихся от среднего значения звездной величины более чем на n среднеквадратических отклонений [4].

- Cusum — размах частичных сумм вида $S_j \equiv \frac{1}{N\sigma_m} \sum_{i=0}^j (m_i - \langle m \rangle)$ [1].

- Von Neuman η [5]

$$\eta \equiv \frac{1}{(N-1)\sigma_m^2} \sum_{i=0}^{N-2} (m_{i+1} - m_i)^2.$$

- η^e — обобщение коэффициента η для неравномерных временных рядов [1]

$$\eta^e \equiv \frac{(t_{N-1} - t_0)^2}{(N-1)^3} \frac{\sum_{i=0}^{N-2} \left(\frac{m_{i+1} - m_i}{t_{i+1} - t_i} \right)^2}{\sigma_m^2}.$$

- Excess variance — коэффициент изменчивости амплитуды звездной величины [6]

$$\frac{\sigma_m^2 - \langle \delta^2 \rangle}{\langle m \rangle^2},$$

где $\langle \delta^2 \rangle$ — среднее квадрата ошибки; σ_m — среднеквадратическое отклонение звездной величины; $\langle m \rangle$ — среднее значение звездной величины.

- Inter-percentile range — интерпроцентильный размах (частный случай — интерквартильный размах).
- Kurtosis — коэффициент эксцесса.
- Linear fit — линейная аппроксимация данных с учетом известных ошибок наблюдений.
- Linear trend — линейная аппроксимация данных в предположении о шуме с неизвестной, но постоянной дисперсией.
- Magnitude percentage ratio [4]

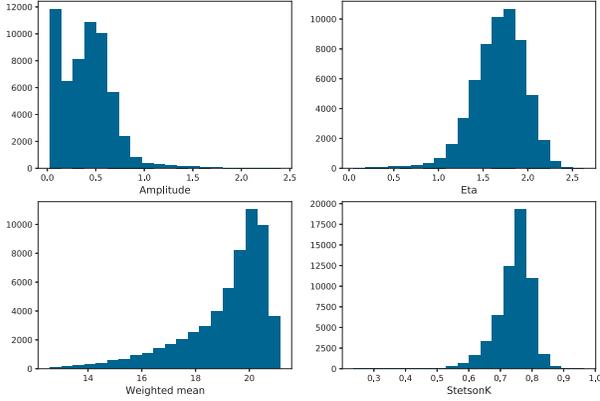
$$\frac{Q(1-n) - Q(n)}{Q(1-d) - Q(d)},$$

где $Q(n)$ и $Q(d)$ — n -й и d -й квантили выборки звездных величин.

- Maximum slope — максимальный коэффициент наклона прямой между двумя наблюдениями звездной величины

$$\max_{i=0 \dots N-2} \left| \frac{m_{i+1} - m_i}{t_{i+1} - t_i} \right|.$$

- Mean — среднее значение звездной величины.
- Mean variance — отношение среднеквадратического отклонения звездной величины к ее среднему значению.
- Median — медианное значение звездной величины.



Гистограммы распределения значений признаков для выборки кривых блеска ZTF DR3

- Median absolute deviation — медианное значение отклонений звездной величины от ее медианы [4]

$$\text{Median}(|m_i - \text{Median}(m)|).$$

- Median buffer range percentage — доля наблюдений, попавшая в интервал $\text{Median}(m) \pm q \times (\max(m) - \min(m))/2$ [4].
- Percent amplitude — максимальное значение отклонений звездной величины от ее медианы [4].
- Percent difference magnitude percentile — отношение p -го интерперцентильного размаха к медианному значению [4]

$$\frac{Q(1-p) - Q(p)}{\text{Median}(m)}.$$

- Reduced chi-squared — редуцированная статистика критерия χ^2 Пирсона для нормального распределения.
- Skew — коэффициент асимметрии звездной величины.
- Standard deviation — среднеквадратическое отклонение звездной величины.
- Stetson K — коэффициент Стетсона K [7]

$$\frac{\sum_i \left| \frac{m_i - \bar{m}}{\delta_i} \right|}{\sqrt{N} \chi^2}.$$

- Weighted Mean — взвешенное среднее звездной величины с учетом ошибок измерений.

На рисунке показаны гистограммы распределения амплитуды, коэффициента η , взвешенного среднего и коэффициента Стетсона K для тестового набора данных из 57 546 кривых блеска ZTF DR3 в фильтре zr из поля 695.

В дальнейшем мы планируем реализовать функции для извлечения других признаков, таких как период кривой блеска, а также разработать новые признаки, подходящие для

задач классификации. Кроме того, в планах — валидация признаков при помощи решения тестовых задач классификации с помощью машинного обучения.

Репозиторий библиотеки: <https://github.com/anlava/light-curve/tree/dev>

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00779, при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Библиографические ссылки

- [1] *Kim Dae-Won, Protopapas Pavlos, Bailer-Jones Coryn A. L. et al.* The EPOCH Project // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — Vol. 566. — P. A43.
- [2] *Malanchev K. L., Pruzhinskaya M. V., Korolev V. S. et al.* Anomaly detection in the Zwicky Transient Facility DR3 // *arXiv e-prints*. — 2020. — P. arXiv:2012.01419. 2012.01419.
- [3] *Cabral J. B., Sánchez B., Ramos F. et al.* From FATS to feets: Further improvements to an astronomical feature extraction tool based on machine learning // *Astronomy and Computing*. — 2018.
- [4] *D’Isanto A., Cavuoti S., Brescia M. et al.* An analysis of feature relevance in the classification of astronomical transients with machine learning methods // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 457, № 3. — P. 3119–3132. <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/457/3/3119/8001547/stw157.pdf>.
- [5] *Neumann John von.* Distribution of the Ratio of the Mean Square Successive Difference to the Variance // *Ann. Math. Statist.* — 1941. — Vol. 12, № 4. — P. 367–395.
- [6] *Sánchez P., Lira P., Cartier R. et al.* Near-infrared Variability of Obscured and Unobscured X-Ray-selected AGNs in the COSMOS Field // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 849, № 2. — P. 110.
- [7] *Stetson Peter B.* On the Automatic Determination of Light-Curve Parameters for Cepheid Variables // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1996. — Vol. 108. — P. 851.

МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ МОЛЕКУЛЫ СО С ПОМОЩЬЮ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. А. Ладейщиков

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

В настоящей работе исследованы особенности анализа профилей линий молекулы СО в гигантских молекулярных облаках (ГМО). С помощью различных инструментов анализа разработана методика, позволяющая в рамках локального термодинамического равновесия использовать несколько линий излучения молекулы СО для построения и оптимизации модели и определения физических параметров ГМО. Методика включает выделение сгустков с помощью алгоритма GAUSSCLUMP, а также автоматизированное построение многослойной модели переноса излучения для сгустков с использованием методов оптимизации и Монте-Карло. Методика применена на практике для анализа крупномасштабного картографирования комплекса звездообразования S231-S235 в четырех различных линиях СО.

A TECHNIQUE FOR DESCRIBING LINE PROFILES OF THE CO MOLECULE USING A MULTI-COMPONENT RADIATION TRANSFER MODEL

D. A. Ladeyschikov

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

In this work, we investigated the features of the analysis of complex CO line profiles in giant molecular clouds (GMCs). A technique has been developed to use several emission lines of the CO molecule to build a model and determine GMCs physical parameters within the local thermodynamic equilibrium framework. The technique includes clumps extraction using the GAUSSCLUMP algorithm and constructing a multilayer radiation transfer model for clumps using optimization and Monte Carlo methods. The technique was applied to analyze large-scale mapping of the S231-S235 star formation complex in four different CO lines.

Молекула СО является основным инструментом для исследования молекулярного газа в межзвездной среде. Зачастую наблюдаются сразу несколько линий молекулы СО, в частности, изотопические разновидности ^{13}CO и C^{18}O , а также различные вращательные переходы молекулы СО, в том числе (1-0), (2-1), (3-2) и др. Возникает вопрос: каким образом использовать данные для построения модели, которая согласуется со всеми имеющимися наблюдениями молекулы СО?

Вариантом решения поставленной задачи является использование многослойной модели переноса излучения в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Решение уравнения переноса в этом случае имеет следующий вид:

$$T_{R,v} = T_{R,v}^{\text{prev}} \exp(\tau_v) + T_0 \left(\frac{1}{\exp(T_0/T_{ex}) - 1} - \frac{1}{\exp(T_0/T_{bg}) - 1} \right) [1 - \exp(\tau_v)], \quad (1)$$

где $T_{R,v}^{\text{prev}}$ — яркостная температура на выходе из предыдущего слоя на лучевой скорости v (для первого слоя $T_{R,v}^{\text{prev}} = 0$); $T_0 = h\nu/k$; T_{ex} — температура возбуждения линии (едина для всех линий СО в случае ЛТР); T_{bg} — температура фонового излучения (~ 2.7 K); τ_v — профиль-фактор оптической толщины, который выражается как $\tau_v = \tau_0 \exp([v - v_0]^2/\sigma^2)$,

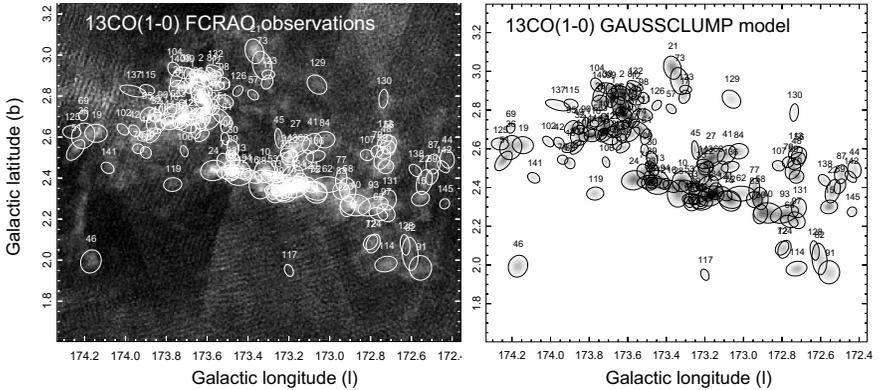


Рис. 1. Результат выделения сгустков методом GAUSSCLUMP в области звездообразования S231-235. Панель слева — нулевой момент карты излучения линии $^{13}\text{CO}(1-0)$ с телескопа FCRAO; панель справа — имитация исходной карты, построенная по данным из каталога GAUSSCLUMP

где τ_0 — оптическая толщина в центре линии; v_0 — лучевая скорость центра линии; σ — доплеровская ширина линии ($\sigma = \text{FWHM}/2.3548$).

Таким образом, модель имеет четыре свободных параметра: лучевая скорость центра линии (v_0), оптическая толщина в центре линии (τ_0), температура возбуждения (T_{ex}) и ширина линии (σ). Эти параметры в рамках ЛТР одинаковы для всех линий CO, кроме оптической толщины, которая меняется в соответствии с соотношением обилий изотопов. Малое число свободных параметров — одно из преимуществ данной модели по сравнению с не-ЛТР моделью, где число параметров больше и они различаются для разных переходов молекулы CO. Параметры модели в рамках ЛТР позволяют перейти к лучевой концентрации и массе газа по методике, подробно описанной в приложении 1 к работе Ладейщикова [1].

Наблюдаемая яркостная температура в модели рассчитывается по формуле 1 на выходе из каждого слоя и затем итерационно используется в качестве фона для последующего слоя. Таким образом, наблюдаемый профиль спектральной линии может быть описан с помощью отдельных компонент (соответствуют слоям в модели) даже в случае частичного их блендирования. Основная задача — найти такие параметры для каждого слоя, чтобы суммарный профиль линии по всем слоям согласовался с наблюдаемым профилем сразу по нескольким линиям CO.

Для отработки методики анализа были использованы данные крупномасштабного картографирования линий CO в области звездообразования S231-235. Набор данных включает четыре линии: $^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(1-0)$ с телескопа FCRAO [2] и $^{12}\text{CO}(2-1)$, $^{13}\text{CO}(2-1)$ с телескопа SMT [3].

В первую очередь с помощью алгоритма GAUSSCLUMP [4] были выделены все значимые сгустки, в которых присутствует излучение линии $^{13}\text{CO}(1-0)$. Данная линия была выбрана по той причине, что она является наиболее оптически тонкой из всего набора. В результате применения алгоритма было найдено 145 сгустков. Из анализа выделенных сгустков установлено, что значительная часть сгустков в проекции на картинную плоскость пересекается, а разделены они могут быть только по лучевой скорости (рис. 1). Важным преимуществом метода GAUSSCLUMP является возможность выделения сгустков, которые имеют пересечение, а также корректное описание градиента скорости для каждого сгустка.

Для каждого сгустка получено начальное приближение для расчета модели перено-

са излучения. Лучевая скорость для каждого густка установлена из каталога густков GAUSSCLUMP. Температура возбуждения рассчитана из антенной температуры линии $^{12}\text{CO}(1-0)$ в предположении, что данная линия является оптически толстой. Оптическая толщина рассчитана из уравнения переноса излучения при заданном значении температуры возбуждения и яркостной температуры линии $^{13}\text{CO}(1-0)$. Дисперсия скорости получена из ширины наблюдаемой линии $^{13}\text{CO}(2-1)$. Данное начальное приближение соответствует классическому подходу определения физических параметров по двум изотопам ^{12}CO и ^{13}CO , который часто используется в литературе.

Важно отметить, что в наблюдаемых спектрах молекулы CO отражается суммарное излучение от нескольких густков, которые попали в диаграмму направленности телескопа в выбранном направлении. Следовательно, при поиске оптимальных параметров модели следует учитывать не только модель единственного густка, в направлении на который извлечен спектр, а многослойную модель для всех густков, которые попали в диаграмму направленности телескопа в выбранном направлении. С помощью начального приближения для каждого густка M_i строится модельный профиль различных линий CO. Число слоев для модели N устанавливается в зависимости от числа густков GAUSSCLUMP, которые пересекают диаграмму направленности в направлении на центр густка M_i . Затем с помощью метода максимального правдоподобия ищутся уточненные значения параметров для густка M_i . При этом параметры модели для густка M_i варьируются, а параметры остальных густков фиксируются начальным приближением. Далее с помощью метода Монте-Карло (использована реализация итсее [5] на языке Python) происходят дальнейшее уточнение значений параметров густка M_i и оценка доверительного интервала.

Для перехода от одномерных спектров к модели распределения излучения в пространстве «положение—положение—лучевая скорость» предполагается, что для каждого густка значения температуры возбуждения и ширины линии не меняются в зависимости от положения. Меняются только оптическая толщина и лучевая скорость густка в зависимости от параметров источников из каталога GAUSSCLUMP. В центре каждого густка оптическая толщина и лучевая скорость соответствуют параметрам «одномерной» модели. При удалении от центра оптическая толщина уменьшается пропорционально размеру и позиционному углу рассматриваемого источника GAUSSCLUMP. Лучевая скорость меняется в соответствии с градиентом скорости, найденным при помощи GAUSSCLUMP. Таким образом, параметры «одномерной» модели каждого густка с привлечением данных из каталога GAUSSCLUMP позволяют построить «трехмерную» модель густка в любой разновидности линии CO.

Описанный подход позволяет получить параметры модели для каждого густка в отдельности даже в том случае, когда наблюдаемый профиль линии CO является суммой из нескольких компонент, которые в том числе могут блендироваться. Данная ситуация типична для линий молекулы CO, которые зачастую имеют сложный профиль. Многослойный подход позволяет также описать профили самопоглощения, когда в линии ^{13}CO имеется единственный пик, а в линии ^{12}CO — двойной пик. Это делается путем введения внешнего к наблюдателю слоя с относительно невысокой оптической толщиной и температурой возбуждения по отношению к основному слою. На рис. 2 представлены два характерных случая профилей молекулы CO и их модели: несколько отдельных компонент (густок № 18) и профиль самопоглощения (густок № 3). Таким образом, описанная процедура позволяет использовать сразу несколько линий молекулы CO для построения модели молекулярных облаков в предположении ЛТР. Более подробное описание методики, исходные коды и инструменты для анализа доступны по ссылкам https://github.com/DmityL/CO_model, <https://co-model.readthedocs.io>.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00917.

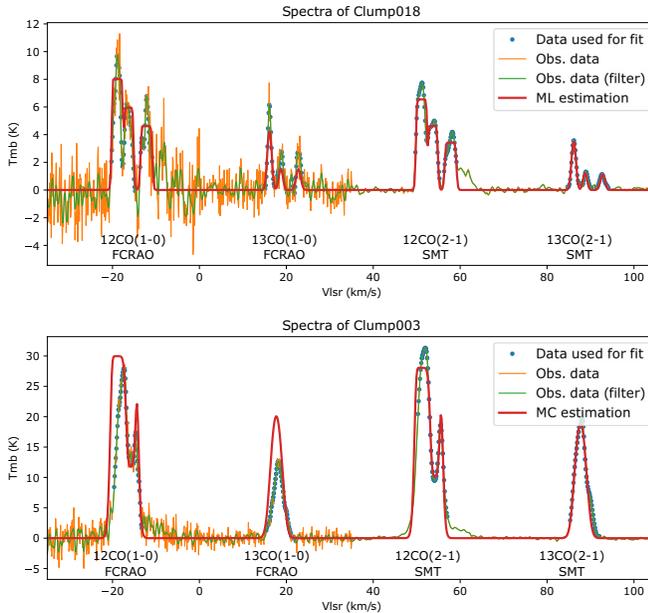


Рис. 2. Два характерных вида профилей линии CO в молекулярных облаках: № 18 — несколько изолированных компонент, № 3 — профиль самопоглощения. Оранжевым цветом показаны наблюдаемые спектры различных линий CO; зеленым — исходные спектры, сглаженные с помощью низкочастотного фильтра; точками отмечены значения, использованные для построения модели; красным цветом показана визуализация профилей спектральных линий CO в наилучшей найденной модели (ML — метод наибольшего правдоподобия, MC — метод Монте-Карло)

Библиографические ссылки

- [1] *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71, № 2. — P. 208–224. 1605.08917.
- [2] *Heyer Mark H., Brunt Christopher, Snell Ronald L. et al.* The Five College Radio Astronomy Observatory CO Survey of the Outer Galaxy // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 115, № 2. — P. 241–258.
- [3] *Bieging John H., Patel Saahil, Peters William L. et al.* The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ^{13}CO J=2-1, and CO J=3-2 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2016. — Vol. 226, № 1. — P. 13.
- [4] *Stutzki J.* GAUSSCLUMPS: Gaussian-shaped clumping from a spectral map. — 2014. 1406.018.
- [5] *Foreman-Mackey Daniel, Hogg David W., Lang Dustin, Goodman Jonathan.* emcee: The MCMC Hammer // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2013. — Vol. 125, № 925. — P. 306. 1202.3665.

ОНЛАЙН-БАЗА ДАННЫХ ВОДЯНЫХ МАЗЕРОВ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Д. А. Ладейщиков

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

Представлены первые результаты разработки базы данных водяных мазеров в областях звездообразования. База данных в настоящий момент доступна в режиме онлайн по адресу: <http://maserdb.net>. Степень покрытия базы данных на момент публикации составляет 84 % от всех регистраций водяных мазеров в областях звездообразования из доступной литературы. Выполнена первичная статистическая обработка данных и проведено совместное исследование водяных мазеров и источников излучения в континууме на 870 мкм по данным обзора ATLASGAL. При помощи обобщенной линейной модели получено соотношение, позволяющее оценить вероятность обнаружения водяного мазера в зависимости от физических параметров сгустков из каталога ATLASGAL. По оценке, в настоящий момент зарегистрировано лишь ~25 % от общего числа водяных мазеров в направлении на источники ATLASGAL.

ONLINE DATABASE OF WATER MASERS IN THE STAR-FORMING REGIONS: THE FIRST RESULTS

D. A. Ladeyschikov

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

The first results of developing a database of water masers in star-forming regions are presented. The database is stored online at the address <http://maserdb.net>. The coverage of the database at the time of publication is 84 % of all positive detections of water masers in star-forming regions from the available literature. Preliminary statistical analysis of the data and study of the association between water masers and ATLASGAL 870 μm sources was carried out. A relation was obtained from the generalized linear model to estimate water maser detection probability depending on the physical parameters of clumps from the ATLASGAL catalogue. According to estimates, only ~25 % of the total number of water masers towards ATLASGAL sources has been detected at the moment.

В настоящее время в астрономии накоплен большой массив данных наблюдений водяных мазерных источников. Однако существует проблема доступа к данным: они в настоящее время опубликованы независимо в текстах статей, а также в электронном текстовом формате и в системе VizieR. В таком виде невозможно произвести эффективный поиск по всем опубликованным данным наблюдений, а также трудно выполнить анализ в связи с разнородностью типов и форматов данных. Представленная в настоящей работе база данных водяных мазеров является решением проблемы доступа к данным и позволяет исследовать характеристики водяных мазерных источников в областях звездообразования при самом широком охвате их наблюдений.

Для сбора, хранения и анализа данных по мазерному излучению водяного пара использована информационная система *MaserDB.net*. Она позволяет хранить данные по мазерам любых молекул и уже используется для хранения данных по метанольным мазерам I и II класса в областях звездообразования [1, 2], а также по мазерам молекул H_2O , OH и SiO в преэволюционировавших звездах [3].

Данные по водяным мазерам введены в базу данных с помощью семантического анализа доступных к загрузке электронных текстовых материалов, а также при помощи распознавания текстов статей в формате PDF при помощи технологии *Optical Character Recognition* (OCR) при отсутствии данных в текстовом виде. Ввод данных произведен в полуавтоматическом режиме с помощью специально разработанной информационной системы, работающей в режиме онлайн. Информационная система максимально упрощает ввод данных в базу, но полностью автоматизировать этот процесс невозможно. В базу данных введены как данные одиночных антенн, так и данные интерферометров с сохранением всей необходимой сопутствующей информации о наблюдениях (размер диаграммы направленности, координаты, частота и т. д.).

При обработке текстов научных статей кроме табличных данных введены также изображения и текстовые описания мазерных источников. Дополнительно присоединена информация, отсутствующая в статьях, в том числе ассоциация и параметры источников из популярных астрономических каталогов Simbad, 2MASS, GLIMPSE, WISE, IRAS, Akari, ATLASGAL, Volocam, Hi-GAL, MSX, SDC и др., а также информация о регистрации мазеров других молекул, в том числе CH_3OH , OH и SiO. Все наблюдения водяных мазеров были объединены в группы источников с помощью алгоритма DBSCAN, что подробно было описано ранее в работе [2].

На текущий момент в базу данных включены 7 232 положительные регистрации и 14 102 отрицательные регистрации водяных мазеров из 102 статей. Из них 995 регистраций являются данными интерферометров, для которых доступна информация о мазерных пятнах. К 2 974 наблюдениям были добавлены изображения спектров в формате PNG из статей. Общее число групп источников с положительной регистрацией мазера составило 2 334, с отрицательной — 5 577. По оценке, покрытие базы данных по числу включенных положительных регистраций водяных мазеров составляет 84 %. Оценка получена на основании анализа списка всех статей по водяным мазерам, полученным с помощью SQL-запроса к системе NASA ADS по ключевым словам, связанным с водяными мазерами. Из списка были удалены статьи по наблюдениям водяных мазеров во внешних галактиках, а также в проволюционировавших звездах. Для каждой статьи было выписано число положительных регистраций, а процент готовности рассчитан как отношение суммы регистраций в добавленных статьях на сумму регистраций для не включенных в базу данных статей.

Интерфейс для работы с базой данных позволяет в режиме онлайн отбирать источники по различным критериям (см. рисунок), в том числе с помощью произвольных SQL-запросов с привлечением внешних данных из популярных астрономических каталогов. С помощью данного интерфейса можно получить ответы на следующие вопросы: какие объекты имеют мазеры определенного типа (H_2O , OH, SiO)? какие характеристики имеют связанные источники в популярных инфракрасных, миллиметровых и радиокаталогах? какие наиболее яркие водяные мазеры известны в настоящее время?.. Возможно также построение гистограмм и двумерных распределений любых параметров в режиме онлайн для быстрой проверки гипотез. Кроме того, интерфейс базы данных позволяет получить подробную информацию по отдельным объектам.

Для всех мазерных источников излучения в линии воды были найдены ассоциации с каталогом пылевых сгустков на 870 мкм из обзора ATLASGAL [4]. Данные были проанализированы с помощью обобщенной биномиальной линейной модели [5], из которой получено соотношение, позволяющее рассчитать вероятность обнаружения водяного мазера по физическим параметрам ассоциированных источников ATLASGAL. Данная модель впервые была предложена для оценки вероятности обнаружения водяных мазеров в работе [6], а затем улучшена в работе [7]. Как было отмечено в данных работах, качество модели напрямую зависит от объема исходной выборки данных и качества определения расстояния до источников. В настоящей работе используется максимальная выборка о всех известных в

Object list

Use this form to get list of objects with different criteria

Select molecule that should be detected in object.

- H₂O CH₃OH (Class I)
 OH CH₃OH (Class II)
 SiO

Select molecule that should be observed in object (even non-detected).

- H₂O CH₃OH (Class I)
 OH CH₃OH (Class II)
 SiO

Use OR instead of AND

Do not include sources near Galactic Center

Use interferometric data only for methanol masers

Display only sources that are bursting right now (experimental)

Display only sources with detection of H₂CO maser (experimental) ¹⁵⁰

Include information about H₂CO maser (experimental) ¹⁵⁰

We found **1080** objects observed in H₂O with filter: atlasgal is not null and lognh2 > 0 and m_fwhm > 0 (**688** is detected with detection rate **63.7%**)

SELECT count(*) from h2o_objects LEFT JOIN assoc ON h2o_objects.group_name = assoc.grp AND assoc.tbl = 'h2o_objects' LEFT JOIN atlasgal_par ON assoc.atlasgal=atlasgal_par.atlas_name WHERE (det like '%Y%' OR det like '%N%') AND (assoc.atlasgal is not null and lognh2 > 0 and m_fwhm > 0)

Put some criteria for source filtration:

Enable filtration (coordinates, velocity, distance, maser fluxes, IR and sub-mm fluxes)

atlasgal is not null and lognh2 > 0 and m_fwhm > 0

Show available columns description

[Get objects list](#)

[Get objects list \(in new window\)](#)

[Get objects statistics](#)

[Get objects statistics \(in new window\)](#)

Display associated data

- Simbad source
- Simbad parameters
- IRAS source
- IRAS flux density (F12,F25,F60,F100)
- 2MASS source
- 2MASS magnituded (J,H,K)
- Variable star
- Variable star parameters
- WISE source
- WISE magnitudes (w1, w2, w3, w4)
- GLIMPSE source
- GLIMPSE magnitudes (3.6, 4.5, 5.8, 8.0)
- Akari IRC source
- Akari IRC fluxes (S09, S18)
- Akari FIS source
- Akari FIS fluxes (S65, S90, S140, S160)
- EGO (Extended Green Object) source
- EGO parameters (Spitzer bands)
- Bolocam source
- Bolocam parameters (1.1 mm)
- ATLASGAL source
- ATLASGAL parameters (870 um)
- ATLASGAL physical parameters
- Hi-GAL source ¹⁵⁰
- Hi-GAL parameters (70-500 um)
- MSX source ¹⁵⁰
- MSX parameters (8-21 um)
- Spitzer Dark Cloud (SDC) source ¹⁵⁰
- SDC parameters

View images

- DSS (optical)
- 2MASS (JHK)
- WISE (4-22 um)
- IRAC (3-8 um)
- GLIMPSE 360 (3,6-4.5 um)
- PACS color (70-160 um)
- SPIRE color (250-500 um)
- AKARI color (60-160 um)
- ATLASGAL (870 um)
- ATLASGAL+Planck (870 um)
- Bolocam (1.1 mm)
- NVSS (1.4 GHz)
- SDSS (optical+NIR)

Image size: arcsec (default is 120 arcsec)

Страница выбора критериев для отбора объектов в системе MaserDB.net

литературе мазерных источниках, а оценка расстояния использована из каталога физических параметров густков ATLASGAL [8]. В качестве параметров модели были протестированы все физические параметры густков, доступные в работе [8]. После оптимизации модели оказалось, что следующие параметры густков ATLASGAL больше всего влияют на вероятность обнаружения водяных мазеров: пиковая плотность потока, интегральная плотность потока, расстояние, болометрическая светимость, радиус и масса густков. Получена следующая формула зависимости вероятности обнаружения мазера p от физических параметров густков ATLASGAL:

$$\log \frac{p}{1-p} = 0.02263 + 0.5821 \times F_{\text{peak}} - 0.04031 \times F_{\text{int}} + 0.05292 \times D + \quad (1)$$
$$+ 2.445 \times 10^{-6} \times L_{\text{bol}} - 2.433 \times r_{\text{FWHM}} + 5.248 \times 10^{-4} \times M_{\text{clump}},$$

где F_{peak} и F_{int} — пиковая и интегральная плотность потока в Ян; L_{bol} — болометрическая светимость в L_{\odot} ; r_{FWHM} — размер густка (в пк) на уровне половины интенсивности; M_{clump} — масса густка ((в M_{\odot}) на уровне половины интенсивности.

Применение модели (1) к выборке всех источников ATLASGAL, в которых есть наблюдения водяных мазеров и для которых определены значения физических параметров

(~ 1000 источников), приводит к тому, что для 70 % источников (761 из 1079) модель верно оценивает обнаружение водяного мазера при использовании порога вероятности более 50 % как возможное обнаружение. Сгустки, в которых модель неверно предсказывает наличие водяного мазера, имеют средние значения плотности потока и светимости, в два-три раза меньшие, чем в сгустках, в которых модель правильно определила наличие мазера: $\bar{L}_{\text{bol}}^{\text{true}}/\bar{L}_{\text{bol}}^{\text{false}} = 2.87$, $\bar{F}_{\text{peak}}^{\text{true}}/\bar{F}_{\text{peak}}^{\text{false}} = 2.25$. Таким образом, модель имеет тенденцию к завышению вероятности возникновения мазера в сгустках с низкой плотностью потока и светимостью. Данная особенность может быть связана с эффектом селекции из-за отсутствия значительного числа наблюдений для «слабых» по плотности потока и светимости сгустков. Для уточнения модели необходимо проведение большего числа наблюдений водяных мазеров в направлении на сгустки с низкой плотностью потока и светимостью. В настоящий момент послана соответствующая заявка для проведения таких наблюдений на интерферометре ATCA (код проекта C3413).

Применение модели (1) ко всем сгусткам из каталога [8], для которых определены необходимые физические параметры, показало, что в 2679 сгустках из 5335 (50.2 %) следует ожидать излучение водяного мазера. Из 5335 сгустков только в направлении на 1080 в настоящий момент проведены наблюдения водяных мазеров в доступной литературе. Излучение зарегистрировано в 687 сгустках (63.6 %). Таким образом, по оценке, в настоящий момент зарегистрировано лишь ~ 25 % от общего числа водяных мазеров в направлении на источники ATLASGAL. Это дает мотивацию для проведения дальнейших наблюдений водяных мазеров в направлении на сгустки из каталога ATLASGAL.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-72-00137.

Библиографические ссылки

- [1] *Ladeyschikov Dmitry A., Urquhart James S., Sobolev Andrey M. et al.* The Physical Parameters of Clumps Associated with Class I Methanol Masers // *Astron. J.* — 2020. — Vol. 160, № 5. — P. 213.
- [2] *Ladeyschikov Dmitry A., Bayandina Olga S., Sobolev Andrey M.* Online Database of Class I Methanol Masers // *Astron. J.* — 2019. — Vol. 158, № 6. — P. 233.
- [3] *Sobolev Andrey M., Ladeyschikov Dmitry A., Nakashima Jun-ichi.* Database of molecular masers and variable stars // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2019. — Vol. 19, № 3. — P. 034.
- [4] *Schuller F., Menten K. M., Contreras Y. et al.* ATLASGAL - The APEX telescope large area survey of the galaxy at $870 \mu\text{m}$ // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 504, № 2. — P. 415–427.
- [5] *McCullagh P., Nelder J. A.* Generalized Linear Models, Second Edition. Chapman and Hall/CRC Monographs on Statistics and Applied Probability Series. — Chapman & Hall, 1989.
- [6] *Breen S. L., Ellingsen S. P., Johnston-Hollitt M. et al.* A search for 22-GHz water masers within the giant molecular cloud associated with RCW 106 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 377, № 2. — P. 491–506.
- [7] *Breen S. L., Ellingsen S. P.* Constraining the properties of 1.2-mm dust clumps that contain luminous water masers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 416, № 1. — P. 178–204.
- [8] *Urquhart J. S., König C., Giannetti A. et al.* ATLASGAL - properties of a complete sample of Galactic clumps // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 473, № 1. — P. 1059–1102.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕЛЕСКОПА «СИНТЕЗ» В КРАО РАН

С. В. Назаров¹, А. С. Харченко², А. С. Кривенко¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, ²АО ЦНТЭЭ

В 1978 г. в Крымской астрофизической обсерватории был введен в строй передовой по тем временам телескоп «Синтез». Целью создания экспериментального телескопа была отработка технологий создания сегментированной оптики, а также системы контроля пространственного положения зеркал, в том числе и с возможностью компенсации турбулентности в земной атмосфере благодаря быстрым подвижкам каждого зеркала по двум осям.

В начале 2018 г. было принято решение о его восстановлении с созданием новой оптики и системы управления. В этой работе мы представляем подробное описание процесса восстановления, модернизации телескопа и первые результаты.

MODERNIZATION OF THE TELESCOPE "SINTEZ" AT THE CRAO RAS

S. V. Nazarov¹, A. S. Kharchenko², A. S. Krivenko¹

¹Crimean astrophysical observatory RAS, ²CNTEE

In 1978, at the Crimean Astrophysical Observatory, the «Sintez» telescope, was put into operation. The goal of creating of this experimental telescope was to develop technologies for creating segmented optics, as well as a system for controlling the spatial position of mirrors, including the ability to compensate for turbulence in the Earth's atmosphere thanks to the fast movements of each mirror along two axes.

At the beginning of 2018, a decision was made to restore it with the creation of a new optics and control system. In this work, we present a detailed description of the telescope restoration and upgrade process and the first results.

Введение

В 1978 г. в Крымской астрофизической обсерватории был введен в строй экспериментальный телескоп «Синтез» (он же АСТ-1200). Установлен он в павильоне с откатной крышей на экваториальной монтировке вилочного типа. Оптика выполнена по кассегеновской схеме с тонким ситалловым сегментированным главным зеркалом. Оно состоит из шести одинаковых подвижных шестиугольных сегментов и одного центрального неподвижного диаметрами по 40 см [1].

Цель эксперимента — выяснить принципиальную возможность постройки больших по диаметру зеркал, чем зеркало крупнейшего в мире (на тот момент) телескопа БТА в САО.

Основные цели строительства «Синтеза» перечислены ниже.

1. Отработка технологии создания сегментированной оптики для облегчения конструкции главного зеркала.
2. Создание системы высокоточного контроля пространственного положения зеркал, в том числе и с возможностью компенсации турбулентности в земной атмосфере благодаря быстрым подвижкам каждого зеркала по двум осям [2].

С середины 1980-х до 2018 г. телескоп находился на консервации. Анализ его состояния выявил хорошую сохранность и лишь незначительные повреждения, образовавшиеся за 35 лет хранения. Однако электронные системы управления монтировкой, сельсинами и позиционированием зеркал устарели и морально, и физически. Современные устройства точной установки сегментов превышают финансовые возможности, а их поставка затруднена в связи с санкциями. Опыт собственного производства подобной техники отсутствует.

В связи с этим было принято решение о создании фактически нового телескопа на базе существующей механической системы (павильон, вилка, приводы и труба). К началу 2021 г. удалось реализовать ряд технических и программных решений, позволивших начать эксплуатацию «Синтеза» на базе временного телескопа.

Научные задачи: фотометрия и астрометрия широкого круга объектов, алертные наблюдения (в частности, послесвечений гамма-всплесков), поисковые работы (новые и сверхновые, килоновые, транзиенты и др.).

Аппаратное устройство системы

Временный телескоп:

1. Рефлектор Ньютона 1765/350, гид 60 мм.
2. Две камеры (основная QHY9 и гидирующая QHY5).
3. Электрофокусер на базе Arduino.
4. Колесо фильтров Starlight Xpress 7x1.25”.

Монтировка телескопа «Синтез» экваториальная вилочная, два идентичных привода, в состав которых входят следующие компоненты:

1. Двигатель грубого движения, ДПТ 110 В, 750 Вт, 2500 об/мин, момент инерции $0.52 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.
2. Двигатель тонкого движения, ДПТ 110 В, 250 Вт, 3000 об/мин, момент инерции $0.098 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.
3. Шаговый двигатель часового ведения, 27 В, 6.3 А.
4. Электромагнитный тормоз вала двигателя грубого движения.
5. Сельсин-датчик грубого наведения, один оборот соответствует одному обороту телескопа.
6. Сельсин-датчик точного наведения, один оборот соответствует одному градусу перемещения телескопа.
7. Дополнительно на каждую ось установлен 12-битный абсолютный энкодер ЛИР ДА 119-А, который используется вместо грубого сельсина.

Для управления приводами и датчиками разработан модуль движения, состоящий

- из драйвера двигателя постоянного тока на 110 В, 10–15 А — 2 шт.;
- драйвера шагового двигателя на 27 В, 15 А, аналогичный драйверу ДПТ, — 1 шт.;
- контроллера движения на процессоре STM32F103, включающего в себя:

- два интерфейса RS-485 с гальванической развязкой;
- аналоговую часть для подключения сельсина;
- пять дискретных выходов изолированных;
- восемь дискретных входов изолированных;
- выходы для управления двигателями и входы датчиков тока;
- питание 18–36 В изолированное;
- встроенное ПО для управления по протоколу Modbus/RTU с автономным выполнением функции движения с заданной скоростью в заданную координату, разгона и торможения с учетом ограничений.

Программное обеспечение

При проектировании системы было решено использовать открытые и стандартные протоколы. В настоящее время общение астрономических программ с аппаратурой «Синтез» происходит по стандарту ASCOM при помощи драйверов собственной разработки. Также для ручного управления, настройки и отладки написана отдельная программа. В частности, с помощью этой программы задаются границы перемещений телескопа, параметры регулятора, управляющего двигателями монтировки, а также доступны для просмотра показания всех датчиков и внутренние переменные контроллера.

Для управления телескопом с любого из компьютеров локальной сети «Синтез» использована новая разработка ASCOM Remote, позволяющая организовать доступ к ASCOM-устройствам по сети с использованием протокола ASCOM Alpaсa.

В настоящее время наблюдения производятся следующим образом:

1. Открывается крыша (с помощью ASCOMPad или NINA).
2. Включается питание монтировки (ASCOMPad).
3. Телескоп распарковывается и наводится на произвольную точку на небе (NINA или Cartes du Ciel).
4. Включается часовое ведение.
5. Получается пробный кадр.
6. Делается астрометрия полученного кадра с помощью astrometry.net или локального солвера.
7. Выполняется синхронизация телескопа с полученными координатами.
8. Телескоп наводится на объект наблюдения.
9. Включается гидирование (PhD2).
10. Производится съемка наблюдаемого объекта (NINA).
11. Телескоп наводится на следующий объект.

Для управления двигателями монтировки разработан специальный программный регулятор, обеспечивающий точное позиционирование монтировки за небольшое время.

При эксплуатации системы было обнаружено, что углы поворота, измеренные энкодером и точным сельсином, отличаются на величину до 2°, что не позволяет однозначно

определять координаты телескопа. Предположительно источником ошибки является крепление энкодера на оси телескопа либо деформация самой оси. В настоящее время идет работа по подключению второго (грубого) сельсина и измерению положения телескопа с его помощью. Для компенсации ошибки наведения перед началом наблюдений производится астрометрия пробного кадра и вносятся поправки (с помощью функции синхронизации, реализованной в драйвере монтировки).

Первые наблюдения

Осенью 2020 г. в качестве пробной научной задачи была начата систематическая съемка по программе астрометрических наблюдений спутников Урана и Нептуна совместно с ГАО РАН. Приемником является камера QHY-9 на сенсоре KAF 8300M, размер пикселя 5.4 мкм, масштаб 630 mas/pix, рабочее поле $35 \times 26'$. Типичное время накопления 45 с.

Часть наблюдений проводилась с включенным в экспериментальном режиме автогидом на базе малого рефрактора 50/183 мм и камеры QHY5L-II-M. Автогидирование позволило компенсировать периодику по оси альфа на масштабах в 180 с.

К началу декабря 2020 г. удалось провести более 170 наблюдений спутников Нептуна и 500 спутников Урана. Проницание составило 19^m , астрометрические ошибки около 50 mas.

Перспективы

Планируется наладить работу колеса фотометрических фильтров, увеличить диапазон доступных выдержек, написать драйверы монтировки и крышки для распространенного стандарта INDI (Linux), определить области безопасных перемещений телескопа, отработать взаимодействие с погодной станцией, настроить автоматическую астрометрию кадров, сделать систему бесперебойного питания для всех устройств, реализовать автоматическое восстановление работоспособности системы при сбоях.

Ориентировочные сроки: полная автоматизация телескопа — 2022 г., создание нового метрового зеркала — 2023–2024 гг.

Предполагаемая оптическая система главного телескопа — цельное параболическое или гиперболическое главное зеркало с корректором и приемником в прямом фокусе с аберрациями, укладывающимися в пиксель 9 мкм на поле зрения не менее $30 \times 30'$.

Главным преимуществом этого инструмента станет полная автоматизация: начало и завершение наблюдений по сигналам от метеодатчиков, возможность работы как по заранее заданному списку задач и алертам, так и онлайн-взаимодействие с веб-интерфейсом для удаленного доступа к телескопу коллег из других организаций.

Библиографические ссылки

- [1] *Ustinov N. D., Vasilev A. S., Vysotskii Iu. P. et al.* AST-1200 astronomical telescope having a sectional main mirror // *Optiko Mekhanicheskaja Promyshlennost.* — 1985. — Vol. 52. — P. 22–25.
- [2] *Basov N. G., Dimov N. A., Gvozdev M. I. et al.* New Astronomical Telescope AST-1200 with a Segmented Actively Controlled Primary Mirror // *The MMT and the Future of Ground-Based Astronomy.* — 1979. — Vol. 385. — P. 185.

ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЙНИЕ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА КАК МЕХАНИЗМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КИЛОПАРСЕКОВЫХ ДЖЕТОВ КВАЗАРОВ

С. В. Назаров, М. С. Бутузова, А. Б. Пушкарев

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Уже около двадцати лет для интерпретации рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров широко используется обратное комптоновское рассеяние реликтового излучения. Однако недавний анализ данных наблюдений космического телескопа Fermi-LAT показал неприменимость указанного предположения для джетов нескольких квазаров. Мы рассматриваем обратное комптоновское рассеяние фотонов центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов для нескольких квазаров: PKS 0637–752, 3C 273, PKS 1510–089 и PKS 1045–188. Получены оценки угла с лучом зрения и скорости килопарсековых джетов. Предсказываемый поток излучения в гамма-диапазоне для всех объектов оказался ниже верхнего ограничения на поток от килопарсекового джета, полученного из данных наблюдений Fermi-LAT. Показано, что наше предположение о механизме образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов согласуется со всеми имеющимися к настоящему времени данными многоволновых наблюдений.

INVERSE COMPTON SCATTERING OF RADIATION OF THE CENTRAL SOURCE AS A MECHANISM FOR THE FORMATION OF X-RAY RADIATION FROM KILOPARSEC JETS OF QUASARS

S. V. Nazarov, M. S. Butuzova, A. B. Pushkarev

Crimean astrophysical observatory RAS

For the interpretation of X-ray radiation from kiloparsec jets of quasars, the inverse Compton scattering of the cosmic microwave background has been widely used for almost 20 years. A recent analysis of the Fermi-LAT observational data showed that this assumption is inapplicable for jets of several quasars. In this paper, we consider the inverse Compton scattering of photons from a central source as a possible mechanism for the formation of X-ray radiation from kiloparsec jets of the quasars PKS 0637–752, 3C 273, PKS 1510–089, and PKS 1045–188. Estimates of the angle between the line of sight and the velocity of kiloparsec jets are obtained. The predicted gamma-ray flux for all objects turned out to be below the upper limit on the flux from a kiloparsec jet obtained from the Fermi-LAT data. It is shown that our assumption about the mechanism of X-ray radiation from kiloparsec jets is consistent with all data of multiwavelength observations available to date.

Килопарсековые (кпк-) джеты активных ядер галактик наблюдаются с высоким угловым разрешением в рентгеновском диапазоне космической обсерваторией Chandra с 2000 г. [1]. Для джета квазара PKS 0637–752, так же как и для джетов других квазаров с доминирующими ядрами, поток излучения в рентгеновском диапазоне выше, чем ожидаемое значение из экстраполяции синхротронного радиооптического спектра на рентгеновские частоты [1, 2]. Это свидетельствует о разных процессах, генерирующих излучение в указанных диапазонах.

Для интерпретации рентгеновского излучения кпк-джетов квазаров широко используется обратное комптоновское рассеяние реликтового излучения. Однако анализ данных наблюдений космического телескопа Fermi-LAT показал неприменимость указанного предположения для джетов нескольких квазаров. Объекты выбраны по критериям:

- квазары с доминирующими ядрами;
- наблюдается спад рентгеновской интенсивности узлов вдоль кпк-джета, что указывает на возможность обратного комптоновского рассеяния центрального источника. При этом два и более узлов джетов наблюдаются как в радио-, так и в рентгеновском диапазонах;
- наличие данных наблюдений пк-джетов, из которых возможна оценка видимой сверхсветовой скорости компонентов и, следовательно, оценка скорости (в единицах скорости света) и угла пк-джета с лучом зрения.

Рассмотрено обратное комптоновское рассеяние фотонов центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения кпк-джетов для квазаров: PKS 0637–752, 3C 273, PKS 1510–089 и PKS 1045–188. Обратное комптоновское рассеяние центрального источника объясняет наблюдаемое уменьшение рентгеновской интенсивности узлов с удалением от активного ядра и позволяет при известном спектре центрального источника определить физические параметры узлов, угол с лучом зрения и скорость кпк-джета.

Мы получили адекватные оценки концентрации излучающих частиц и напряженность магнитного поля во всех исследуемых источниках. Если учесть умеренное релятивистское движение кпк-джетов, то в системе отсчета кпк-джета магнитное поле будет в несколько раз больше. Однако для всех источников здесь, так же как и для PKS 1127–145, условие равномерного распределения не выполняется: плотность энергии частиц больше плотности энергии магнитного поля. Неравенство становится еще сильнее, если предполагать присутствие других частиц в кпк-джете помимо электрон-позитронной плазмы. Экстремально высокая яркостная температура, превышающая максимально допустимое значение при условии равномерного распределения, исключает комптоновскую катастрофу, зарегистрирована наземно-космическим радиоинтерферометром «РадиоАстрон» для нескольких активных ядер, в том числе и для 3C 273. Этот результат может быть объяснен либо большим доплер-фактором пк-джетов, либо тем, что плотность энергии излучающих частиц больше плотности энергии магнитного поля уже на пк-масштабах. Поэтому, на наш взгляд, требование равномерного распределения энергии не может являться доминирующим при определении действующего в кпк-джетах квазаров механизма образования рентгеновского излучения.

В отличие от других моделей обратное комптоновское рассеяние центрального источника без ввода дополнительных предположений объясняет наблюдаемое уменьшение рентгеновской интенсивности узлов с удалением от центрального источника.

Предсказываемый поток излучения в гамма-диапазоне для всех объектов оказался ниже верхнего ограничения на поток от кпк-джета, полученного из данных наблюдений Fermi-LAT. Показано, что наше предположение о механизме образования рентгеновского излучения кпк-джетов согласуется со всеми данными многоволновых наблюдений.

Библиографические ссылки

- [1] *Tavecchio F., Maraschi L., Sambruna R. M., Urry C. M.* The X-Ray Jet of PKS 0637-752: Inverse Compton Radiation from the Cosmic Microwave Background? // *Astrophys. J. Lett.* — 2000. — Vol. 544, № 1. — P. L23–L26. [astro-ph/0007441](#).
- [2] *Celotti A., Ghisellini G., Chiaberge M.* Large-scale jets in active galactic nuclei: multiwavelength mapping // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2001. — Vol. 321, № 1. — P. L1–L5. [astro-ph/0008021](#).

10-МИКРОННАЯ ЭМИССИОННАЯ ОСОБЕННОСТЬ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ОЛИВИНА

Д. В. Петров, А. А. Савушкин, Е. А. Жужулина

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Многие астрономические объекты, начиная от комет и заканчивая околозвездными дисками, имеют в своем составе силикатные частицы. Спектр силикатов обладает набором эмиссионных особенностей, наиболее характерная из которых находится в спектральном диапазоне около 10 мкм и называется 10-микронной эмиссионной особенностью. Часто 10-микронная эмиссионная особенность изучается в предположении о сферичности рассеивающих частиц. В данной работе мы исследовали вклад несферических частиц (вытянутые и сплюснутые сфероиды) оливина в 10-микронную эмиссионную особенность. Показано, что несферические частицы достаточного большого размера (более 20 мкм) вызывают заметное повышение сечения рассеяния C_{sca} по сравнению со сферами. Таким образом, наблюдаемую 10-микронную эмиссионную особенность больших частиц можно объяснить несферичностью рассеивающих частиц.

10-MICRON EMISSION FEATURE OF NONSPHERICAL OLIVINE PARTICLES

D. V. Petrov, A. A. Savushkin, E. A. Zhuzhulina

Crimean Astrophysical Observatory

Many astronomical objects, from comets to circumstellar disks, contain silicate particles. The spectrum of silicates has a set of emission features, the most characteristic of which is in the spectral range of about 10 microns, and is called a 10-micron emission feature. The 10-micron emission feature is often studied under the assumption that the scattering particles are spherical. In this work, we investigated the contribution of nonspherical particles (elongated and oblate spheroids) of olivine to the 10-micron emission feature. It is shown that enough large non-spherical particles (whose size more than 20 microns) cause a noticeable increasing of scattering cross section C_{sca} in comparison with spheres. Thus, the observed 10-micron emission feature of large particles can be explained by the non-sphericity of the scattering particles.

Введение

Частицы силикатной пыли обнаружены во множестве астрономических объектов, таких как квазары [1], кометы [2], а также околозвездные диски, которые окружают молодые звезды [3]. Наиболее распространенными видами космической пыли являются соединения кремния, железа, магния, кислорода и углерода. Наличие силикатов в околозвездных дисках проявляется в виде набора спектральных особенностей. Наиболее заметная спектральная особенность состоит в увеличении интенсивности излучения в диапазоне длин волн 8–12 мкм и потому именуется 10-микронной эмиссионной особенностью. Физическая причина этой особенности состоит в наличии у силикатов колебательных энергетических уровней связей Si–O [2].

Основной вклад в формирование 10-микронной эмиссионной особенности вносит оливин [2]. В частности, в ходе лабораторных экспериментов с использованием спектрометра среднего ИК-диапазона были исследованы спектры больших (размером до 0.5 мм) частиц оливина неправильной формы в поисках 10-микронной эмиссионной особенности. Эта особенность была экспериментально обнаружена [4], хотя расчеты, проводимые в предположении о сферичности рассеивающих частиц, показали, что столь большие частицы проявлять данную особенность не должны. В то же самое время в работе [5] было изучено влияние несферичности на 10-микронную эмиссионную особенность кварца. Было показано, что несферичность рассеивающих частиц кварца оказывает заметное влияние на 10-микронную эмиссионную особенность. Потому интересно изучить вопрос, как отклонения от сферичности влияют на 10-микронную эмиссионную особенность оливина. Изучению данного вопроса и посвящена эта работа.

Методика вычислений

Для исследований потребовалось достаточно большое количество компьютерных вычислений, для которых была использована наиболее быстрая программа для вычисления рассеивающих свойств сфероидов, разработанная Михаилом Мищенко [6]. Вычислительный метод основан на методе Т-матриц [7] и оптимизирован для частиц, обладающих осью вращения, что максимально упрощает и ускоряет вычисления [8]. В качестве объекта изучения использовались сфериды (эллипсоиды вращения) с соотношением осей a/b . Здесь b — размер частицы вдоль оси вращения, a — размер оси, перпендикулярной оси вращения. Следовательно, при $a/b < 1$ получается сфероид, вытянутый вдоль оси вращения, при $a/b > 1$ получается сфероид, сплюснутый вдоль оси вращения, при $a/b = 1$ получается сферическая частица (рис. 1). В данной работе были изучены частицы с соотношением осей $a/b = 0.8$, $a/b = 1.0$ и $a/b = 1.2$.

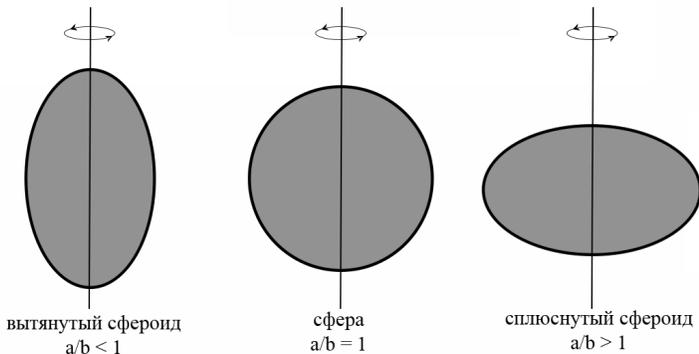


Рис. 1. Примеры изучаемых частиц: вытянутый сфероид, сфера, сплюснутый сфероид

Следует также отметить, что положение эмиссионной спектральной особенности сильно зависит от размера частицы R . В случае сферы под размером частицы подразумевается радиус сферы, а в случае вытянутого и сплюснутого сфероидов — радиус сферы эквивалентного объема. Основным параметром, определяющим свойства спектрально-эмиссионной особенности, является комплексный показатель преломления $m = n + i \cdot k$. Спектральная

зависимость действительной и мнимой частей показателя преломления оливина (рис. 2) взята из работы [9].

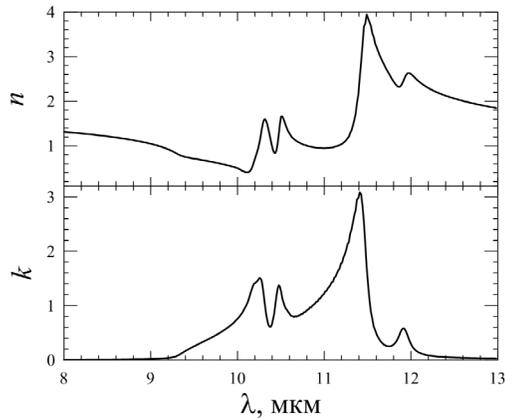


Рис. 2. Спектральная зависимость действительной (верхняя панель) и мнимой (нижняя панель) частей показателя преломления оливина

Результаты и обсуждение

Одной из важнейших характеристик рассеяния света является сечение рассеяния C_{sca} . Эта физическая величина показывает, насколько эффективно перерассеивает свет рассеивающий объект. Мы рассчитали C_{sca} света, рассеянного на вытянутых и сплюснутых частицах оливина, для разных длин волн и размеров рассеивающей частицы. Из рис. 3, где демонстрируется карта разности сечений рассеяния, видно, что в спектральном диапазоне от 9 до 12 мкм при достаточно больших размерах рассеивающих частиц (выше 20 мкм) проявляется заметное повышение сечения рассеяния C_{sca} несферических частиц по сравнению со сферами. Таким образом, наблюдаемую 10-микронную эмиссионную особенность больших частиц можно объяснить несферичностью рассеивающих частиц.

Выводы

В данной работе было изучено влияние отклонения от сферической формы рассеивающих частиц оливина на формирование 10-микронной эмиссионной особенности. Показано, что несферические частицы достаточно больших размеров вызывают повышение интенсивности рассеянного света в спектральном диапазоне от 9 до 12 мкм. Таким образом, наблюдаемая 10-микронная эмиссионная особенность больших частиц оливина, которая не находит объяснения в рамках предположения о сферичности рассеивателя, может быть объяснена несферичностью рассеивающих частиц.

Библиографические ссылки

- [1] Hao Lei, Spoon H. W. W., Sloan G. C. et al. The Detection of Silicate Emission from Quasars at 10 and 18 Microns // *Astrophys. J. Lett.* — 2005. — Vol. 625, № 2. — P. L75–L78. [astro-ph/0504423](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504423).

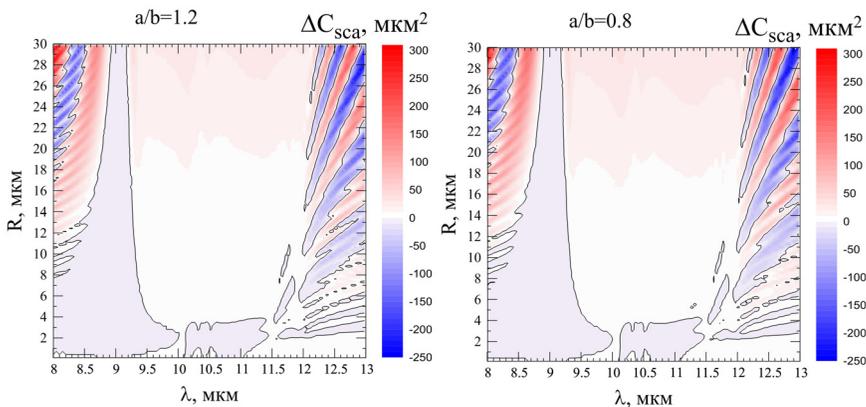


Рис. 3. Карта разности сечения рассеяния C_{sca} несферической ($a/b = 1.2$ для левой панели и $a/b = 0.8$ для правой панели) и сферической частицы в зависимости от размера (вертикальная шкала) и длины волны (горизонтальная шкала)

- [2] *Hanner M. S., Gehrz R. D., Harker D. E. et al.* Thermal Emission From The Dust Coma Of Comet Hale-Bopp And The Composition Of The Silicate Grains // *Earth Moon and Planets.* — 1997. — Vol. 79. — P. 247–264.
- [3] *Malfait K., Waelkens C., Waters L. B. F. M. et al.* The spectrum of the young star HD 100546 observed with the Infrared Space Observatory // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 332. — P. L25–L28.
- [4] *Chornaya Ekaterina, Zakharenko Alexander M., Zubko Evgenij et al.* Revisiting the particle-size constraint of the 10- μm silicate feature // *Icarus.* — 2020. — Vol. 350. — P. 113907.
- [5] *Петров Д. В., Жужулина Е. А., Савушкин А. А.* Влияние формы рассеивающих частиц на силикатную особенность SiO_2 // *Известия Крымской астрофизической обсерватории.* — 2020. — Т. 116. — С. 41–48.
- [6] *Mishchenko Michael I., Travis Larry D.* T-matrix computations of light scattering by large spheroidal particles // *Optics Communications.* — 1994. — Vol. 109, № 1–2. — P. 16–21.
- [7] *Mishchenko M. I., Travis L. D., Mackowski D. W.* T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 1996. — Vol. 55, № 5. — P. 535–575.
- [8] *Wieland Dingeman J., Mishchenko Michael I., Macke Andreas, Carlson Barbara E.* Improved T-matrix computations for large, nonabsorbing and weakly absorbing nonspherical particles and comparison with geometrical-optics approximation // *Applied Optics.* — 1997. — Vol. 36, № 18. — P. 4305–4313.
- [9] *Fabian D., Henning T., Jäger C. et al.* Steps toward interstellar silicate mineralogy. VI. Dependence of crystalline olivine IR spectra on iron content and particle shape // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 378. — P. 228–238.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРУСНОСТИ ГЕОСИНХРОННЫХ ОБЪЕКТОВ
ПО ПОЗИЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ
НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ**

**Н. А. Попандопуло¹, В. А. Авдюшев¹, Т. В. Бордовицына¹, И. Н. Чувашов¹,
П. А. Левкина²**

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет,*

²*Институт астрономии РАН*

Представлены результаты совместного определения элементов орбит и параметра парусности объекта $\gamma = A/m$ для группы геосинхронных фрагментов космического мусора на основании позиционных наблюдений, полученных на уникальной научной установке «Цейсс-2000» на Терскольской обсерватории Института астрономии РАН в период 11–25 сентября 2020 г.

**DETERMINATION OF AREA-TO-MASS RATIO OF GEOSYNCHRONOUS
OBJECTS USING POSITIONAL OBSERVATIONS
OBTAINED AT TERSKOL PIKE**

**N. A. Popandopulo¹, V. A. Avdyushev¹, T. V. Bordovitsyna¹, I. N. Chuvashov¹,
P. A. Levkina²**

¹*National Research Tomsk State University, ²Institute of Astronomy RAS*

The results of the joint determination of the orbital elements and the area-to-mass ratio of the object $\gamma = A/m$ for a group of geosynchronous fragments of space debris based on positional observations obtained at the unique scientific installation Zeiss-2000 at the Terskol Observatory of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences during September 11–25, 2020 are presented.

Световое давление при больших значениях парусности является вторым [1, 2] по величине после гравитационного поля фактором, влияющим на движение геосинхронных объектов (ГСО).

Целью настоящей работы было усовершенствование и тестирование разработанного ранее программного комплекса (ПК) «Численная модель движения систем ИСЗ» [3] для определения параметров движения и сил на основе обработки высокоточных позиционных наблюдений. Проверка работоспособности ПК осуществлялась на позиционных наблюдениях группы геосинхронных фрагментов космического мусора. Наблюдения получены на уникальной научной установке «Цейсс-2000» в ЦКП «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН в период 11–25 сентября 2020 г.

Численная модель основана на дифференциальных уравнениях (ДУ) движения, учитывающих как основные возмущающие факторы, так и тонкие эффекты. В усовершенствованном ПК ДУ интегрируются численно коллокационным методом высокого порядка с переменным шагом в арифметике с двойной точностью [4]. Принципиально изменена схема вычисления изохронных производных. Если в предыдущем программном комплексе они вычислялись приближенно с помощью разделенных разностей, то в данном программном комплексе они вычисляются путем интегрирования дифференциальных уравнений для изохронных производных. Это позволяет вычислять изохронные производные с той же точностью, что и вектор положения объекта, что дает возможность повысить точность сходимости процесса определения искомых параметров.

Данные о процессе улучшения орбит

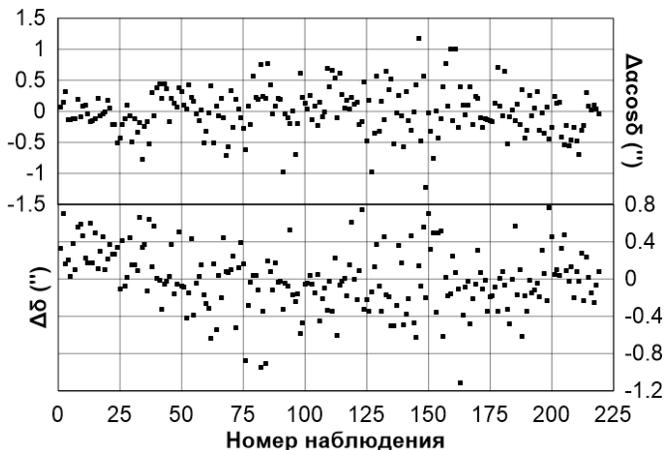
Номер объекта	Число наблюдений	σ , "	A/m , м ² /кг
90008	219	0.350	0.0102
90031	344	0.494	0.0083
97149	224	0.398	0.0142
90214	302	3.704	0.1008

В процессе улучшения орбиты по данным измерений определялись начальные координаты и скорости объектов в рамках задачи наименьших квадратов, которая решается итерационно с помощью метода Гаусса—Ньютона. В программном комплексе совместно с параметрами орбиты определяется коэффициент парусности $\gamma = A/m$ (где A — площадь миделевого сечения спутника, а m — его масса), определяющий величину влияния светового давления на динамику объекта.

Данные об особенностях процесса улучшения орбит приведены в таблице. Здесь номера объектов даны согласно динамической базе данных космических объектов Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН [5], σ — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений.

Как показывают данные, приведенные в таблице, элементы орбит трех из перечисленных выше объектов с номерами 90008, 90031 и 97149 определяются достаточно надежно. Распределение невязок этих объектов очень близко по своей структуре. Для примера на рисунке показано распределение невязок для объекта 90008.

В отличие от орбит трех указанных объектов орбита объекта с номером 90214 определяется с погрешностью, на порядок большей. Кроме того, коэффициент парусности $\gamma = A/m$, полученный по наблюдениям, также на порядок больше, чем у других объектов (см. таблицу).



Распределение невязок объекта № 90008 в зависимости от номера наблюдения

Таким образом, усовершенствованный ПК показал свою пригодность к определению параметров движения ГСО. Параметры орбит и светового давления трех из четырех рас-

смотренных объектов можно считать надежными. Динамика объекта 90214 требует дальнейшего исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Библиографические ссылки

- [1] *Кузнецов Э. Д.* О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов // *Астрономический вестник*. — 2011. — Т. 45. — С. 444–457.
- [2] *Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В. и др.* О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков // *Астрономический вестник*. — 2012. — Т. 46. — С. 480–488.
- [3] *Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // *Изв. вузов. Физика*. — 2017. — Т. 60. — С. 69–76.
- [4] *Авдюшев В. А.* Новый коллокационный интегратор для решения задач динамики. I. Теоретические основы // *Изв. вузов. Физика*. — 2020. — Т. 63. — С. 131–140.
- [5] *Малотов И. Е. [и др.]*. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. — 2020. — С. 17.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СГУСТКОВ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S254—S258

Е. А. Попова¹, Д. А. Ладейщиков¹, М. С. Кирсанова², А. М. Соболев¹

¹Уральский федеральный университет,

²Институт астрономии Российской академии наук

Работа посвящена исследованию физических параметров газопылевых сгустков в области звездообразования S254—S258. Были определены лучевые концентрации молекулярного газа, массы сгустков и оптические толщины линий-трассеров плотного газа. Для вычисления физических параметров использованы различные линии молекулы CO, излучение в континууме на 1.1 мм и карты поглощения в ближнем ИК-диапазоне. Дополнительно использованы данные по излучению молекул CS и HCO⁺, охватывающие часть изучаемой области. В работе сделаны выводы о распределении плотного газа в области звездообразования. Значения физических параметров, полученных в разных трассерах газа и пыли, имеют различия, причины которых рассмотрены в работе.

PHYSICAL PARAMETERS OF MOLECULAR CLUMPS IN THE S254—S258 STAR FORMATION REGION

E. A. Popova¹, D. A. Ladeyschikov¹, M. S. Kirsanova², A. M. Sobolev¹

¹Ural Federal University,

²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

This research is focusing on studying of physical parameters in the S254—S258 star-formation complex. The following parameters were derived: column densities, clump masses, and high-density tracers optical depth, including CS and HCO⁺ molecules. Different gas and dust tracers maps were used, including CO molecular lines, Bolocam 1.1 mm continuum emission and near-infrared extinction map. We also used the available CS and HCO⁺ data, which cover part of the S254-S258 region to make conclusions regarding the distribution of high-density gas. The resulted values of physical parameters obtained through different tracers are slightly different. The discussion about the possible reason for the difference is provided.

Размер исследуемой области звездообразования S254—S258 составляет 21' × 15'. В ней проявляются разнообразные структуры, среди которых присутствуют молекулярные сгустки, крупномасштабные волокна и диффузный газ. В работе проведен анализ карт различных трассеров газа и пыли, а также построенных по ним карт лучевых концентраций и масс на пиксель. Из последних также определены массы сгустков путем интегрирования по занимаемой ими площади.

На картах лучевой концентрации, полученных по данным со спутника Herschel [1], проявляются следующие яркие газопылевые сгустки в области звездообразования S254-S258: S258, G192.63+0.00, S255N, S256-south, G192.75-0.08 и G192.69-0.25. Сгустки выделены в тех областях, в которых присутствуют молодые звездные скопления по данным Spitzer. Сгусток G192.75-0.00, который не имеет выраженного излучения в данных Herschel, также был взят для рассмотрения, поскольку он содержит яркие пики в линиях CO и на карте поглощения. В рамках настоящей работы исследованы только те молекулярные сгустки, которые ассоциированы со скоплениями молодых звездных объектов (МЗО) из работы [2].

Границы сгустков определялись лучевой концентрацией молекулы H₂ по карте Herschel либо контурами численности МЗО на уровне пяти звезд пк⁻² в случае G192.75-0.00 в связи

со слабым излучением в этой карте. Расстояние до области S254-S258 принято равным 1.59 кпк.

Для оценки лучевой концентрации необходимо знание температуры возбуждения и оптической толщины, которые могут быть однозначно определены при использовании по крайней мере двух линий (основной и ее менее обильной изотопической разновидности). В случае с линиями трассеров высокоплотного газа $\text{CS}(2-1)$ и $\text{HCO}^+(1-0)$ расчеты были выполнены не для всех сгустков, а для пяти положений с доступными спектрами в линиях $\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$ и $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$. В работе также использовались данные трассирующих газ промежуточной плотности молекул ^{12}CO и ^{13}CO в переходах $(1-0)$ из работы [2] и $(2-1)$ из работы [3].

Оптическая толщина (в центре линии и интегральная) оценивались из следующих соотношений температур главного луча и соответственно интегральных температур по формулам (1):

$$\frac{T_{\text{mb[isotope]}}}{T_{\text{mb[main]}}} = \frac{1 - e^{-\tau_0/R}}{1 - e^{-\tau_0}}; \quad \frac{\int T_{\text{mb[isotope]}}}{\int T_{\text{mb[main]}}} = \frac{1 - e^{-\int \tau/R}}{1 - e^{-\int \tau}}, \quad (1)$$

здесь τ_0 — оптическая толщина в центре линии и $\int \tau$ — интегральная оптическая толщина. Отношение обилий принято равным $R(^{34}\text{S})/R(^{32}\text{S}) = 22$ и $R(^{12}\text{C})/R(^{13}\text{C}) = 80$.

Температура возбуждения была получена из численного решения уравнения переноса излучения: $T_{\text{mb}} = (J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}}))(1 - \exp(-\tau_0))$, где $J_\nu(T) = (h\nu/k)/(\exp(h\nu/[kT]) - 1)$ — модифицированная функция Планка и $T_{\text{bg}} = 2.7$ К для микроволнового фона.

Непосредственно лучевая концентрация рассчитывалась в предположении ЛТР с применением подхода, описанного в работе [4], с помощью такого выражения (2):

$$N = \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)} \frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2} \frac{Q_{\text{rot}}}{g_J} \frac{\exp(-\frac{E_{\text{tr}}}{kT_{\text{ex}}})}{\exp(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}) - 1} \frac{1}{f} \int \tau d\nu, \quad (2)$$

где $S = J^2/(J[2J+1])$ для CS и HCO^+ ; $S = J^2/([2J+1])$ для CO ; $g_J = 2J+1$; вращательная функция распределения $Q_{\text{rot}} \simeq kT_{\text{ex}}/h/B + 1/3$; фактор заполнения диаграммы принят равным $f = 1$.

Получившиеся значения лучевых концентраций CS и HCO^+ для этих направлений находятся в пределах $N = 0.10 - 6.31 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для внешних и внутренних частей скопления S255N соответственно. Для CO лучевую концентрацию считали по переходу $(1-0)$, поскольку его оптическая толщина меньше и он менее подвержен эффекту насыщения. С учетом соотношения обилий молекул $[\text{CO}]/[\text{H}_2] = 8 \times 10^{-5}$ вычисленные значения лучевой концентрации CO используются для определения $N(\text{H}_2)$.

Лучевая концентрация $N(\text{H}_2)$ рассчитывается также из теплового излучения *Voices* 1.1 мм согласно работе [5] по формуле $N(\text{H}_2) = 2.19 \times 10^{22} [e^{13.0/T_d} - 1] S_{1.1}$ (см^{-2}), где $S_{1.1}$ — плотность потока на 1.1 мм в Ян, а T_d — температура пыли. Таким образом, значение лучевой концентрации газа по данным *Voices* зависит от температуры пыли, которая меняется с положением.

Карты поглощения в ближнем ИК-диапазоне A_J , созданные при помощи метода NICEST [6] по фотометрии звезд из UKIDSS и 2MASS, тоже применены для расчета лучевой концентрации. Для этого было использовано следующее соотношение между поглощением в ИК-диапазоне и лучевой концентрацией: $N(2\text{H} + \text{H}_2)/A_V = 1.87 \times 10^{21} \text{ (см}^{-2}\text{mag}^{-1})$ [7]. Следует отметить, что в расчет лучевой концентрации из поглощения входят многие неопределенности, которые могут изменять коэффициент конверсии. Карты поглощения, как и данные *Herschel*, трассируют как ионизованный, так и молекулярный газ.

В свою очередь, для расчета массы, приходящейся на пиксель, из лучевых концентраций использовалась формула $M = N \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}} A$, где $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$ — средний молекулярный вес

Параметры сгустков в регионе S254–S258

Название	Масса сгустка, M_{\odot}					$N(H_2), \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$				
	Herschel		A _J	CO	Bolocam	Herschel		A _J	CO	Bolocam
	70–500 μm	160–500 μm	1–0	1–0	1.1 мм	70–500 μm	160–500 μm	1–0	1–0	1.1 мм
S255N	1285	2812	1700	2638	875	19.34	39.96	26.35	47.56	13.51
S256-south	1399	2158	2267	2669	170	12.12	17.56	19.41	23.64	1.45
G192.63-0.00	431	621	616	886	62	8.13	11.11	11.44	16.19	1.2
S258	218	399	445	524	117	8.31	14.31	16.35	18.94	4.59
G192.75-0.08	339	603	676	576	64	8.69	14.5	18.12	10.84	1.66
G192.69-0.25	117	219	135	117	15	7.23	12.81	8.44	9.27	0.96
G192.75-0.00	34	92	89	71	2	3.28	8.23	7.96	7.97	0.2

межзвездной среды; m_H — это масса атома водорода; A — размер пикселя карты в cm^2 . Параметры сгустков (массы и лучевые концентрации) по различным трассерам приведены в таблице и согласуются с данными в работах [3] и [2].

Все имеющиеся данные использовались для анализа распределения вещества в регионе. Мы разделили скопления на два основных типа: основное облако газа и изолированные сгустки. Скопления S258, G192.63-0.00, S255N и S256-south имеют газовые мосты, т. е. они непрерывно связаны между собой в линиях CO и картах поглощения, поэтому могут рассматриваться как различные части одного молекулярного облака. Скопления G192.75-0.08, G192.69-0.25 и G192.75-0.00 расположены на некотором расстоянии от основного облака и не имеют газовых мостов к основному облаку по всем доступным трассерам (мы не предполагаем данными по высокоплотному газу между ними). Их можно рассматривать как изолированные сгустки.

Проанализированы карты трассеров высокой плотности (карты в линиях $\text{HCO}^+(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$) для областей III S258, S256, S255, S257 и звездных скоплений G192.75-0.08, G192.63-0.00, S256-south. Они подтверждают наличие плотного газа в рассматриваемых областях. Кроме того, данные в линии HCO^+ показывают наличие непрерывной связи между скоплениями S255N и S256-south на уровне 6σ . Наличие газа высокой плотности в среде между сгустками говорит о том, что эти скопления могут быть физически и эволюционно связаны между собой. Между областями III S255 и S258 не зарегистрировано такой связи с достаточным уровнем сигнала, — эти регионы могут быть эволюционно не связаны друг с другом. Карта лучевой концентрации CO показывает диффузное излучение в среде между областями III S255 и S258. Однако это излучение может быть вызвано большой протяженностью газа вдоль луча зрения, что приводит к высоким значениям лучевой концентрации.

Из анализа масс и лучевых концентраций каждого скопления обнаружено, что во всех трассерах газа, за исключением Bolocam, они имеют значительную корреляцию. По данным Bolocam, лучевая концентрация занижена из-за влияния температуры холодных сгустков, входящей в расчеты. По карте Herschel наибольшие значения лучевой концентрации обнаружили в направлении сгустка S255N. Наиболее массивные сгустки — S255N ($1285 M_{\odot}$) и S256-south ($1399 M_{\odot}$). Они содержат 70 % от массы наших отобранных сгустков и 28 % массы всего изучаемого региона, содержащего все другие сгустки и среду между ними. При этом область, занимаемая сгустками, составляет только 12 % изучаемого региона.

Скопления S256-south и G192.75-0.08 проявляются на карте Bolocam на уровне $2-3\sigma$, но другие трассеры проявляют относительно яркое излучение, связанное с этими скоплениями. Слабое излучение Bolocam в скоплении S256-south и G192.75-0.08 можно объяснить низкой средней температурой пыли в этих областях ($13-16 \text{ K}$) по сравнению с другими областями ($19-20 \text{ K}$ для S255N и S258). Физическая интерпретация состоит в том, что карта Bolocam показывает нагретую пыль, которая определяет общую поступающую энергию от источников тепла. Излучение HCO^+ показывает области фотодиссоциации, т. е. обна-

руживает УФ-излучение от источников тепла. Интенсивность излучения $\text{HCO}^+(1-0)$ почти одинакова для регионов S258 и S256-south ($T_{\text{mb}} = 1.5$ К). Однако излучение Волосат ярче в S258. Поэтому можно сделать вывод, что источник нагрева в области НII S258 создает больше теплового излучения, чем в области НII S256, что может быть связано с различием спектральных классов источников нагрева либо с несколькими источниками нагрева в регионе НII S258. Скопление МЗО там может содержать несколько звезд, которые не продуцируют интенсивное УФ-излучение, а только нагревают окружающий газ. Это излучение может привести к более высокой температуре пыли в области S258 по сравнению с S256-south и более яркому излучению Волосат на 1.1 мм. Однако для прояснения ситуации требуется больше данных для регионов S258 и S256-south.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-02-00917.

Библиографические ссылки

- [1] *Marsh K. A., Whitworth A. P., Lomax O. et al.* Multitemperature mapping of dust structures throughout the Galactic Plane using the PPMAP tool with Herschel Hi-GAL data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 471, № 3. — P. 2730–2742. 1707.03808.
- [2] *Chavarría L. A., Allen L. E., Hora J. L. et al.* Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258: Structure and Evolution // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 682. — P. 445–462.
- [3] *Bieging J. H., Peters W. L., Vila Vilaro B. et al.* Sequential Star Formation in the Sh 254-258 Molecular Cloud: Heinrich Hertz Telescope Maps of CO J = 2-1 and 3-2 Emission // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 138. — P. 975–985.
- [4] *Mangum J. G., Shirley Y. L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2015. — Vol. 127. — P. 266.
- [5] *Bally J., Aguirre J., Battersby C. et al.* The Bolocam Galactic Plane Survey: $\lambda = 1.1$ and 0.35 mm Dust Continuum Emission in the Galactic Center Region // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 721. — P. 137–163.
- [6] *Juvela M., Montillaud J.* Near-infrared extinction with discretised stellar colours // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 585. — P. A78.
- [7] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from Lambda absorption measurements. II. // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 132–142.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ ПАР АСТЕРОИДОВ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ

А. Э. Потоскуев, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

Исследована динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах в окрестности резонансов средних движений с Юпитером (3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3). Использовались результаты численного интегрирования уравнений движений на интервале 1 млн лет в будущее. Неопределенность начальных элементов орбит и значений скорости дрейфа больших полуосей орбит, обусловленного эффектом Ярковского, существенно влияют на динамическую эволюцию, особенно при начальном расположении объектов в окрестности резонансов. Прохождение через резонанс, как правило, приводит к увеличению расстояния между орбитами.

DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROID PAIRS IN THE VICINITY OF RESONANCES

A. E. Potoskuev, E. D. Kuznetsov
Ural Federal University

Dynamical evolution of asteroid pairs in close orbits near Jovian mean motion resonances (3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3) has been researched by means of numerical integrations of the equations of motion over 1 Myr time interval in the future. Initial orbital elements' uncertainty and semi-major axis drift due to the Yarkovsky effect significantly affect orbit modification with time, especially for objects originally situated in the vicinity of resonances. Passing through a resonance generally leads to orbital distance growth.

Введение

Моделирование динамической эволюции орбит малых тел Солнечной системы является комплексной задачей, решение которой требует создания сложных динамических моделей, учитывающих основные возмущающие силы — как гравитационные, так и негравитационные. Важным фактором является близость орбиты рассматриваемого объекта к области резонансов средних движений с планетами (в первую очередь Юпитером и Сатурном). Эволюция орбиты астероида попавшего в резонансную зону, в общем случае носит хаотичный характер, поэтому изучение различных сценариев изменения орбит подобных объектов представляет особый интерес [1].

Пары астероидов, движущихся по близким орбитам, могут иметь общее происхождение [2]. Они могут быть образованы в результате протекания различных процессов: разрушения крупных астероидов при столкновениях с другими малыми телами, процесса дробления астероида под действием YORP-эффекта или распада двойных (кратных) систем астероидов, например, вследствие BYORP-эффекта. Для установления времени (и, возможно, механизма) образования исследуемой пары необходимо исследовать динамическую эволюцию орбит рассматриваемой пары в прошлом. Отметим, что в окрестности резонансов наблюдаются тесные пары, однако среди известных астероидов, сближающихся с Землей, тесных пар не наблюдается. Если взаимодействие с резонансом приведет к переходу пары

астероидов на орбиты, лежащие в области движения планет земной группы, то в дальнейшем гравитационное рассеяние будет способствовать расхождению орбит в результате тесных сближений с массивными планетами.

Целью данной работы является исследование динамической эволюции пар астероидов в окрестности областей резонансов средних движений с Юпитером (3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3). Парты астероидов вблизи областей резонансов были отобраны в работе [3] с использованием элементов орбит из базы AstDys [4]. Оценивались метрики Холшевникова [5], которые позволяют оценить близость их орбит в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит. Исследование эволюции метрик позволит оценить условия, при которых тесная пара сохраняется в окрестности резонанса и при прохождении через резонанс.

Моделирование динамической эволюции

Для исследования динамической эволюции орбит выбранных объектов использовался численный метод. Интегрирование уравнений движения производилось при помощи пакета REBOUND [6] с расширением REBOUNDx [7]. Использовался симплектический интегратор WHFast [8]. Интегрирование выполнялось на интервале 1 млн лет в будущее с шагом 0.02 года. В модели сил учтены возмущения от больших планет, а также от наиболее массивных малых тел — Цереры, Паллады и Весты. Астероиды представлены тестовыми частицами нулевой массы, начальные значения элементов орбит которых варьировались случайным образом в пределах ошибок определения.

В модели сил также учитываются негравитационные возмущения, обусловленные эффектом Ярковского [9]. Влияние суточного эффекта Ярковского проявляется в вековом дрейфе большой полуоси орбиты астероида. Оценка максимума модуля скорости дрейфа $(da/dt)_{max}$ осуществлялась путем нормировки физических и динамических параметров астероида к соответствующим параметрам астероида (101955) Bennu [10]:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{da}{dt}\right)_B \cdot \frac{\sqrt{a_B}(1 - e_B^2) D_B \rho_B \cos \phi}{\sqrt{a}(1 - e^2) D \rho \cos \phi_B} \frac{1 - A}{1 - A_B},$$

где e — эксцентриситет орбиты; D — диаметр астероида; ρ — его плотность; ϕ — наклон оси вращения к плоскости орбиты; A — альbedo Бонда. Величины с индексом B относятся к астероиду (101955) Bennu. В результате каждой тестовой частице случайным образом присваивалось значение дрейфа большой полуоси da/dt из интервала $[-(da/dt)_{max}, (da/dt)_{max}]$.

Список пар астероидов в окрестности резонансов 3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 33 представлен в таблице. Для каждой пары приведены оценки метрик Холшевникова [5]: q_2 — расстояние в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите), q_5 — расстояние в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i) как минимальное значение q_2 при всех возможных положениях узлов и перигетров орбит. В последнем столбце таблицы даны максимальные значения дрейфа больших полуосей орбит для каждого из астероидов пары.

Обсуждение результатов

В качестве примера рассмотрим орбитальную эволюцию пары (195807) 2002 QF17 — (243587) 1998 DU9, находящейся вблизи резонанса 4 : 1. Орбитальная эволюция астероида (195807) 2002 QF17 не показывает существенных различий при варьировании начальных значений элементов орбит и скорости дрейфа большой полуоси. Астероид (243587) 1998 DU9 располагается на границе резонансной зоны. При варьировании элементов орбиты характер эволюции существенно изменяется уже на интервалах 150–

Пары астероидов вблизи резонансов

Астероиды		ϱ_2 , (а. е.) ^{1/2}	ϱ_5 , (а. е.) ^{1/2}	$(da/dt)_{max}$, 10 ⁻⁴ а. е./млн лет
Окрестность резонанса 3 : 1				
(347020) 2010 EV20	(401423) 2013 CX82	0.070787	0.000672	4.63 5.83
(114610) 2003 DN8	2007 CS12	0.080443	0.000735	5.01 8.70
(381833) 2009 WL27	(463437) 2013 MO4	0.109126	0.000491	8.08 7.04
(119332) 2001 SA140	(156388) 2001 YE101	0.134450	0.000515	3.36 3.51
(307726) 2003 UM176	(398159) 2010 FU11	0.145184	0.000823	5.92 4.70
(34991) 4295T-3	(142610) 2002 TU132	0.239192	0.000936	2.20 7.38
Окрестность резонанса 4 : 1				
(184300) 2005 ED114	(422777) 2001 UU227	0.000888	0.000467	7.85 11.89
2015 FZ331	2017 DE15	0.120050	0.000929	10.41 8.27
(371832) 2007 VJ230	2015 KQ23	0.122719	0.000581	12.46 9.46
(218550) 2005 BQ26	(505010) 2011 OH15	0.155420	0.000506	5.29 13.85
(441313) 2008 AX83	(467916) 2011 OA14	0.199180	0.000872	7.55 8.67
(195807) 2002 QF17	(243587) 1998 DU9	0.825368	0.053712	9.99 11.20
Окрестность резонанса 5 : 2				
(388731) 2007 VY242	(468224) 2015 BG132	0.102627	0.000606	5.05 3.83
(55288) 2001 SZ30	(157663) 2005 YB53	0.106499	0.000843	2.02 4.23
(33153) 1998 DH15	(60524) 2000 EA40	0.224301	0.000627	1.25 1.75
2014 JK86	2015 TW218	0.226279	0.000828	4.82 5.06
(323994) 2005 UB234	2014 UE168	0.282895	0.000821	3.42 4.44
(261361) 2005 UF319	(446464) 2014 JK72	0.335230	0.000858	3.85 3.50
Окрестность резонанса 7 : 3				
(422509) 2014 TP5	2014 WX533	0.070337	0.000978	4.14 3.78
(97059) 1999 VU3	(260302) 2004 TK117	0.116597	0.000463	1.63 2.22
(15414) Pettrossi	(140739) 2001 UZ104	0.143784	0.000593	2.06 5.81
(76239) 2000 EF82	(273125) 2006 GR11	0.508237	0.000867	2.29 3.60
(117494) 2005 CU19	(140958) 2001 VT103	0.529204	0.000382	2.52 2.67
(408341) 2013 GR79	(467669) 2008 UH116	0.602428	0.000276	2.85 2.98

200 тыс. лет. Учет дрейфа большой полуоси может приводить к захвату в резонанс. В этом случае характер эволюции становится более регулярным. Подробное рассмотрение данного процесса требует иного подхода в моделировании негравитационных возмущений, обусловленных влиянием эффекта Ярковского, например, использования возмущающего ускорения A_2 [9] вместо скорости дрейфа большой полуоси орбиты.

Поскольку эта пара не является тесной ($\rho_2 \approx 0.8$ (а. е.)^{1/2}, $\rho_5 \approx 0.05$ (а. е.)^{1/2}), динамическая эволюция астероидов качественно отличается. Перигелийное расстояние орбиты астероида (243587) 1998 DU9 в среднем уменьшается (в большинстве случаев орбита астероида начинает пересекать орбиту Земли), в то время как перигелийное расстояние (195807) 2002 QF17, напротив, увеличивается. В результате, сохраняется тенденция к увеличению взаимных расстояний между орбитами при моделировании в будущее, свойственная большинству рассмотренных пар астероидов.

Заключение

В ходе исследования были рассмотрены пары астероидов в окрестности резонансов средних движений с Юпитером 3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3. Динамическая эволюция орбит астероидов в окрестности резонанса существенно зависит от значений начальных элементов орбиты, а

также от скорости и знака дрейфа большой полуоси вследствие эффекта Ярковского. Для большинства отобранных пар рассмотренный интервал 1 млн лет является недостаточным, чтобы сделать однозначные выводы о характере эволюции орбит, возможности сохранения тесной пары после прохождения резонанса и т. д. Анализ полученных результатов показывает, что при прохождении областей резонансов в среднем орбиты астероидов, входящих в тесные пары, удаляются друг от друга при моделировании в будущее.

Исследование вероятностей эволюции орбит астероидов, входящих в пары, с учетом ошибок начальных элементов орбит и неопределенности параметров, описывающих влияние эффекта. Для исследования прохождения астероидов через резонанс с учетом влияния эффекта Ярковского будет использоваться негравитационное возмущающее ускорение A_2 .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Xu Y. B., Zhou L. Y., Ip W. H.* Transit of asteroids across the 7/3 Kirkwood gap under the Yarkovsky effect // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 637. — P. A19. 2002.08794.
- [2] *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 280–290.
- [3] *Kuznetsov E. D., Potoskuev A. E., Safronova V. S., Ustinov D. S.* Dynamical evolution of asteroid pairs with close orbits // *AIP Conference Proceedings.* — 2019. — Vol. 2103, № 1. — P. 020008.
- [4] *Knezevic Z., Milani A.* Asteroids Dynamic Site-AstDyS // *IAU Joint Discussion.* — 2012. — P. P18.
- [5] *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 2275–2283.
- [6] *Rein H., Liu S. F.* REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 537. — P. A128. 1110.4876.
- [7] *Tamayo D., Rein H., Shi P., Hernandez D. M.* REBOUNDx: a library for adding conservative and dissipative forces to otherwise symplectic N-body integrations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 491, № 2. — P. 2885–2901. 1908.05634.
- [8] *Rein H., Tamayo D.* WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 452, № 1. — P. 376–388. 1506.01084.
- [9] *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al.* The Yarkovsky and YORP Effects / D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, S. R. Chesley et al. // *Asteroids IV* / ed. by Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke. — University of Arizona Press. — 2015. — P. 509–531.
- [10] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61.

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ОБЛАСТЯХ МАЛОМАССИВНОГО ЗВЕЗДОБРАЗОВАНИЯ

А. Ф. Пуанова, И. В. Петрашкевич

Уральский федеральный университет

В этой работе мы исследуем, как меняется доля дейтерия в зависимости от физических условий в холодных ядрах на примере молекулярных облаков Тельца, Персея и Змееносца. Результаты показывают, что доля дейтерия в холодных ядрах в среднем разная в разных областях звездообразования. В наиболее плотной и турбулентной из рассматриваемых областей L1688 в Змееносце доля дейтерия в соединениях в два раза выше, чем L1495 в Тельце и в B5 в Персее. В L1495 и L1688 доли дейтерия в центральных частях и оболочке ядер отличаются примерно в 10 раз, тогда как в B5 только в 2–3 раза.

DEUTERIUM FRACTIONATION IN LOW-MASS STAR-FORMING REGIONS

A. F. Puanova, I. V. Petrashkevich

Ural Federal University

In this work, we study how deuterium fraction changes depending on the physical conditions in cold cores embedded in the molecular clouds of Taurus, Perseus and Ophiuchus. The results show that the deuterium fraction in cold cores varies in different star-forming regions. In the densest and most turbulent of the studied regions, L1688 in Ophiuchus, the deuterium fraction is two times higher than that of L1495 in Taurus and B5 in Perseus. In L1495 and L1688, the deuterium fraction in the central parts of the cores and in their envelopes differ by a factor of 10, while in B5 only by a factor of 2–3.

Введение

Согласно современным представлениям образование звезд малых масс начинается в так называемых дозвездных ядрах — плотных ($> 10^5 \text{ см}^{-3}$) холодных ($\sim 10 \text{ K}$) сгустках внутри молекулярных облаков (см., например, [1]). Дозвездные ядра особенно ярко характеризуются двумя явлениями — «вымерзанием» (физической адсорбцией) молекул из газа на пыль и фракционированием изотопов химических элементов в молекулах. При температурах, характерных для дозвездных ядер ($\sim 10 \text{ K}$), эффективно физисорбируют все атомы и молекулы, за исключением молекулярного водорода и гелия. В частности, эффективно вымерзает молекула CO, образуя хорошо видимые в наблюдениях области с пониженным содержанием CO в газе в центральных областях дозвездных ядер. Фракционирование изотопов при химических реакциях в рамках физической химии объясняется особенностями термодинамики и кинетики реакций. Оно наиболее эффективно в случае водорода и дейтерия, поскольку отношение масс протона и дейтерия составляет 1 : 2 — значение, недостижимое для стабильных изотопов других химических элементов. Эффективное фракционирование дейтерия приводит к тому, что хотя число атомов дейтерия по отношению к числу атомов водорода (D/H) во Вселенной составляет около 1.5×10^{-5} [2], в холодных ($T \sim 10 \text{ K}$) дозвездных ядрах отношения содержаний дейтерированных и содержащих основной изотоп водорода молекул (например, отношение лучевых концентраций $N(\text{N}_2\text{D}^+)/N(\text{N}_2\text{H}^+)$) может достигать десятков процентов (см., например, [3]).

Дейтерий заменяет собой водород в результате следующей цепочки реакций. Реакция $\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2 + 230 \text{ K}$ протекает только слева направо в холодных ядрах и тем самым увеличивает количество иона H_2D^+ [4], далее распространяющего дейтерий в реакции с любой двухатомной молекулой A: $\text{H}_2\text{D}^+ + \text{A} \rightarrow \text{AD}^+ + \text{H}_2$ [5]. Процессы вымерзания CO и фракционирования дейтерия тесно связаны: CO, вторая по распространенности в молекулярных облаках, эффективно разрушает ион H_3^+ , необходимый для распространения дейтерия в водородсодержащих соединениях. С ростом плотности среды в холодном ядре вымерзание усиливается, а доля дейтерия в молекулах растет. Так высокая доля дейтерия становится одним из индикаторов дозвездной фазы, важной для изучения начальных условий образования звезд солнечного типа.

Объекты исследования

Ближайшие к нам области образования маломассивных звезд, молекулярные облака так называемого пояса Гулда, наиболее удобные для наблюдений, характеризуются различными темпами звездообразования. Для лучшего понимания этого процесса необходимо исследовать и учитывать локальные физические условия в облаке, т. е. окружение дозвездных ядер. Для нашего исследования мы выбрали 23 холодных ядра в трех областях звездообразования — в молекулярных облаках Тельца, Персея и Змееносца. Физические условия в трех исследуемых областях звездообразования очень разные. Область L1495 в Тельце наиболее спокойная, с минимальным, дозвуковым, уровнем турбулентности [6], низкой температурой газа (8–10 K [7]) и пыли (12–15 K [8]) и относительно низкой плотностью газа ($N(\text{H}_2) \sim 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$). Область B5 в Персее погружена в чуть более турбулентный газ, однако это первая область, у которой был обнаружен довольно резкий переход от сверхзвуковой к дозвуковой турбулентности [9]. B5 также характеризуется низкими температурами газа и пыли (10–13 K [9]) и относительно невысокой плотностью газа ($N(\text{H}_2) \sim 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Среди рассматриваемых областей L1688 в Змееносце наиболее турбулентная: тогда как в дозвездных ядрах турбулентность остается дозвуковой, в окружающем газе она превышает две скорости звука; температура газа (9–17 K) и пыли (10–20 K) здесь выше и имеет больший разброс внутри самой области; среда здесь также плотнее ($N(\text{H}_2) \sim 10^{23} \text{ см}^{-2}$) [10, 11].

Наблюдательные данные

Химическое фракционирование в холодных ядрах позволяет использовать различные молекулы и ионы (а также их энергетические переходы разных уровней) в качестве трассеров разных частей холодных ядер, а также изучать различные физические свойства среды. Так, углеродсодержащие молекулы (как CO) и генетически связанные с ними ионы (как HCO^+) рано образуются в молекулярном облаке и присутствуют в газе при довольно малых плотностях ($\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$), а в плотном газе их содержание снижается из-за вымерзания CO. А азотсодержащие соединения (как NH_3 или N_2H^+) становятся видны при больших плотностях (поскольку образуются в уже прореволюционировавшем, а значит, более плотном газе) и остаются в газе вплоть до $n > 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Чтобы наиболее полно изучить фракционирование дейтерия в холодных ядрах, мы пронаблюдали выбранные источники в линиях трех пар молекул и ионов: N_2H^+ и N_2D^+ , H^{13}CO^+ и DCO^+ , $p\text{-NH}_2\text{D}$ и $p\text{-NH}_3$. Все наблюдения выполнены нами в 2014–2018 гг. на телескопе IRAM 30m, за исключением наблюдений $p\text{-NH}_3$, выполненных на телескопе GBT в составе обзора GAS [11].

В этой работе будем считать, что H^{13}CO^+ и DCO^+ являются трассерами оболочки холодных ядер, а N_2H^+ , N_2D^+ , $p\text{-NH}_2\text{D}$ и $p\text{-NH}_3$ — трассерами центральных плотных частей.

Для измерения температуры пыли и лучевой концентрации молекулярного водорода мы использовали данные непрерывного излучения пыли с телескопа имени Гершеля в полосах 250, 350 и 500 мкм [8].

Результаты

Долю дейтерия считают как отношение лучевых концентраций дейтерированного и водородсодержащего изотополога одного и того же соединения, например, $R_D = N(\text{N}_2\text{D}^+)/N(\text{N}_2\text{H}^+)$. Расчет лучевых концентраций N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ , DCO^+ , $p\text{-NH}_3$ и $p\text{-NH}_2\text{D}$ выполнялся в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для расчета лучевой концентрации HCO^+ , обладающего большим содержанием в газе, мы использовали наблюдательные данные его более редкого изотополога H^{13}CO^+ , линии которого обладают небольшой оптической толщиной и позволяют исследовать весь газ на луче зрения. Фракционированием изотопов углерода в этом случае пренебрегают, и оно несущественно (нерегистрируемо) в пределах одного холодного ядра. Все выбранные для исследования линии обладают сложной сверхтонкой структурой, благодаря этому в предположении ЛТР можно достаточно надежно измерить их оптическую толщину и соответственно достаточно точно измерить лучевую концентрацию соединений. Обработка данных проводилась с помощью программных пакетов GILDAS, анализ спектров — с помощью пакета Ryspeckit [12]. Для корректности расчета и сравнения все полученные спектральные карты холодных ядер приводились к одинаковому (худшему) угловому разрешению, таким образом, угловое разрешение карт составило $\sim 32''$.

Доля дейтерия в соединениях в центральной части плотного ядра выше, чем во внешних частях. Это видно как из сравнения доли дейтерия в трассерах более плотного газа в центре ($R_D(\text{N}_2\text{H}^+, \text{NH}_3) \sim 0.2\text{--}0.5$) и менее плотного газа в оболочке ($R_D(\text{HCO}^+) \sim 0.05$), так и из зависимости доли дейтерия от расстояния до центра ядра. Уменьшение доли дейтерия с относительным расстоянием (нормированным на размер) до центра ядра заметно для ионов, N_2H^+ и DCO^+ , тогда как для нейтрального аммиака эта связь практически не прослеживается. Это может быть связано с различием химии ионов и молекул.

Область В5 представляет собой небольшое волокно с погруженным инфракрасным источником и несколькими плотными ядрами. Протозвезда разогрела окружающий газ, и доля дейтерия $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$ вблизи нее мала. С расстоянием от погруженного источника $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$ сначала увеличивается, а затем снова уменьшается уже в менее плотном газе. Результаты показывают, что доля дейтерия в дозвездных ядрах в среднем разная в разных областях звездообразования: в L1495 в Тельце $R_D \sim 0.2$ и 0.03 в центральных частях и в оболочке, тогда как в В5 в Персее $R_D \sim 0.25$ и 0.09, а в L1688 в Змееносце $R_D \sim 0.5$ и 0.05 в центральных частях и в оболочке соответственно. Область L1688 более плотная и турбулентная, чем L1495 и В5, с более высоким темпом звездообразования, за счет внешнего давления облака на ядра они становятся плотнее и доля дейтерия растет. В L1495 и L1688 доля дейтерия в центральных частях ($R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$) и оболочке ($R_D(\text{HCO}^+)$) отличается примерно в 10 раз. Однако в В5 различие в доле дейтерия между плотными частями, видимыми в N_2H^+ , и менее плотным газом в HCO^+ существенно меньше, только в 2—3 раза. Результаты этой работы частично опубликованы в [13], часть их (об L1688) более подробно обсуждается в работе И. В. Петрашкевича и А. Ф. Пунановой в этом же сборнике трудов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 19-72-00064.

Библиографические ссылки

- [1] *Ward-Thompson D., Motte F., Andre P.* The initial conditions of isolated star formation - III. Millimetre continuum mapping of pre-stellar cores // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1999. — Vol. 305. — P. 143–150.
- [2] *Linsky J. L., Draine B. T., Moos H. W. et al.* What Is the Total Deuterium Abundance in the Local Galactic Disk? // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 647. — P. 1106–1124. [astro-ph/0608308](#).
- [3] *Crapsi A., Caselli P., Walmsley C. M. et al.* Probing the Evolutionary Status of Starless Cores through N_2H^+ and N_2D^+ Observations // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 619. — P. 379–406. [astro-ph/0409529](#).
- [4] *Millar T. J., Bennett A., Herbst E.* Deuterium fractionation in dense interstellar clouds // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 340. — P. 906–920.
- [5] *Dalgarno A., Lepp S.* Deuterium fractionation mechanisms in interstellar clouds // *Astrophys. J. Lett.* — 1984. — Vol. 287. — P. L47–L50.
- [6] *Punanova A., Caselli P., Pineda J. E. et al.* Kinematics of dense gas in the L1495 filament // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A27. [1806.03354](#).
- [7] *Seo Y. M., Shirley Y. L., Goldsmith P. et al.* An Ammonia Spectral Map of the L1495-B218 Filaments in the Taurus Molecular Cloud. I. Physical Properties of Filaments and Dense Cores // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 805. — P. 185. [1503.05179](#).
- [8] *Palmeirim P., André P., Kirk J. et al.* Herschel view of the Taurus B211/3 filament and striations: evidence of filamentary growth? // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 550. — P. A38. [1211.6360](#).
- [9] *Pineda J. E., Goodman A. A., Arce H. G. et al.* Direct Observation of a Sharp Transition to Coherence in Dense Cores // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 712. — P. L116–L121. [1002.2946](#).
- [10] *Punanova A., Caselli P., Pon A. et al.* Deuterium fractionation in the Ophiuchus molecular cloud★ // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 587. — P. A118. [1512.02986](#).
- [11] *Friesen R. K., Pineda J. E., co-PIs et al.* The Green Bank Ammonia Survey: First Results of NH_3 Mapping of the Gould Belt // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 843. — P. 63. [1704.06318](#).
- [12] *Ginsburg A., Mirocha J.* PySpecKit: Python Spectroscopic Toolkit. — *Astrophysics Source Code Library.* — 2011. [1109.001](#).
- [13] *Petrashkevich I. V., Punanova A. F., Caselli P. et al.* Deuterium Fractionation in the Oph-H-MM1 Dense Core of the L1688 Low Mass Star-Forming Region // *Astronomy Reports.* — 2020. — Vol. 64, № 8. — P. 637–640.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД ХЕРБИГА

Е. Б. Рыспаева

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Проанализированы архивные рентгеновские наблюдения девяти звезд Хербига, полученные на спутнике XMM-Newton для проверки гипотез о формировании их рентгеновских спектров. Из анализа зависимостей характеристик рентгеновского излучения звезд Хербига от параметров звезд обнаружена тесная взаимосвязь магнитной активности и процессов генерации рентгеновского излучения звезд Хербига, а также возможное наличие нетепловой составляющей рентгеновских спектров.

X-RAY EMISSION FROM HERBIG STARS

Е. Б. Ryspaeva

Crimean Astrophysical observatory

The archived X-ray observations of 9 Ae/Be Herbig stars obtained on the XMM-Newton space observatory are analysed for checking the hypotheses of their X-rays formation. An analysis of the dependences of the X-ray radiation characteristics for Herbig stars on the parameters of the stars revealed a close relationship between the magnetic activity and the processes of generation of X-ray radiation from Herbig stars, as well as the possible presence of a non-thermal component of the X-ray spectra.

Введение

К звездам Хербига относятся звезды спектральных классов не позднее F промежуточной массы ($2-10 M_{\odot}$), еще не вышедшие на стадию главной последовательности. Вокруг звезд Хербига присутствуют плотные газопылевые диски. Рентгеновское излучение таких объектов может генерироваться либо в результате магнитосферной аккреции, либо в рамках модели ударной волны в звездном ветре, ограниченной магнитным полем (англ. Magnetic Confined Wind Shock model, MCWS), предложенной изначально для Ae/Be звезд Babel & Montmerle [1]. Однако, согласно недавним исследованиям звезд Хербига в рентгеновской части спектра с помощью орбитальной обсерватории «Chandra» (Stelzer et al. [2, 3]), температура плазмы, излучающей в рентгеновском диапазоне, оказалась весьма высока: $kT \sim 0.4-10$ кэВ. Похожий результат получен Hamaguchi et al. [4] из анализа наблюдений на спутнике ASCA. Авторы утверждали, что рентгеновское излучение рассмотренных ими 11 звезд Хербига исходит из областей плазмы, нагретой до $kT \sim 1-5$ кэВ.

Таким образом применение модели MCWS для описания процессов генерации рентгеновского излучения звезд Хербига вызывает сомнение, поскольку для большинства из таких объектов характерны слабые магнитные поля ($B_p < 1$ Гс) и медленные звездные ветры ($v_{\infty} < 600$ км \cdot с $^{-1}$). При указанных терминальных скоростях верхний предел температуры плазмы в рамках модели MCWS должен составлять ~ 0.43 кэВ (см. формулу (10) в статье [5]). Поэтому многие авторы предполагают, что модель MCWS вероятнее всего описывает только малую часть рентгеновских потоков от звезд Хербига, а основное рентгеновское излучение формируется либо в результате аккреции, либо звезды Хербига могут

иметь невидимые компоненты поздних спектральных классов, дающие существенный вклад в рентгеновское излучение.

В настоящей работе проанализированы архивные рентгеновские наблюдения девяти звезд Хербига, выполненные на спутнике XMM-Newton с целью проверки указанных выше гипотез. В подборке звезд присутствуют F звезда, 6 A звезд и 2 B звезды.

Анализ рентгеновских спектров звезд Хербига

Первичная обработка использованных в работе наблюдений и дальнейшее извлечение спектров звезд из изображений с камеры EPIC, установленной на спутнике XMM-Newton, были выполнены с помощью программного пакета SAS 17.0 с учетом рекомендаций группы SAS¹. Полученные спектры в диапазоне энергий 0.2–8 кэВ были аппроксимированы различными моделями с использованием пакета XSPEC 12.10.0². Для проверки применимости MCWS к изучаемым звездам Хербига их спектры были аппроксимированы двух- или трехтемпературными моделями APEC (Astrophysical Plasma Emission Code [6]) или MEKAL [7–9], описывающими излучение горячей плазмы, в которой атомы ионизируются электронным ударом. Для проверки гипотезы о формировании рентгеновского излучения звезд в результате аккреции на поверхность звезды использовалась сумма моделей APEC и PSHOCK [10] — модели ударной волны, описывающей нестационарное тепловое рентгеновское излучение. Дополнительно спектры были аппроксимированы моделью APEC с добавлением степенного компонента для выявления возможного нетеплового рентгеновского излучения звезд. О его наличии позволяют предположить прежде всего высокие температуры излучающей плазмы, а также присутствие околосредных дисков, взаимодействующих с магнитным полем. Примеры аппроксимаций спектра с покомпонентным разложением показаны на рис. 1.

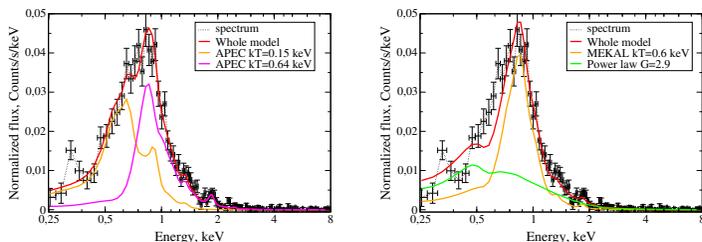


Рис. 1. Модельные спектры звезды HD 31293 с покомпонентным разложением. Красной пунктирной линией показан суммарный модельный спектр; оранжевыми и сиревыми линиями — вклады моделей APEC, MEKAL; зеленой линией — вклад степенной компоненты. Пик на 0.3 кэВ соответствует резонансной линии гелиеподобного иона CVI

В результате аппроксимаций рассмотренных спектров было установлено, что они могут быть достаточно точно описаны моделями APEC или MEKAL с $kT < 3$ кэВ, но при добавлении степенного закона температуры уменьшаются до 1 кэВ и ниже. При этом доли степенных компонент³ составляют от 20 до 70 %, а спектральный индекс $G \sim 2-3$. Спектры рассмотренных звезд Ae Хербига также удалось описать моделями APEC+PSHOCK.

¹www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

³Эти величины определялись как отношение интегрального потока степенного компонента к потоку, описываемому полным модельным спектром (см. формулу (4) в статье [11]).

Далее был выполнен регрессионный анализ возможных зависимостей найденных характеристик рентгеновского излучения звезд Хербига (светимость, жесткость [12], температура плазмы, спектральный индекс, доля степенной компоненты) от таких параметров звезд, как терминальные скорости звездного ветра, скорости аккреции, напряженности магнитного поля, массы звезд. Были выявлены корреляции, показанные на рис. 2. Доля степенной компоненты линейно увеличивается с ростом жесткости (коэффициент корреляции 0.76 ± 0.11), а жесткость спектров Ae звезд Хербига линейно убывает с увеличением напряженности магнитного поля (коэффициент корреляции -0.93 ± 0.6).

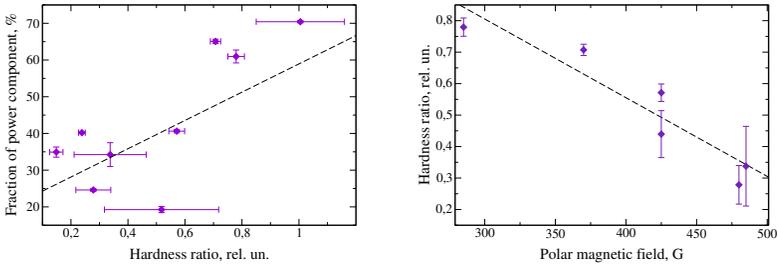


Рис. 2. Слева — зависимость доли степенной компоненты от жесткости (hardness ratio) спектров звезд Хербига; справа — зависимость жесткости от напряженности полярного магнитного поля для звезд Ae Хербига. Линейные аппроксимации показаны штриховыми линиями

Обсуждение результатов и общее заключение

В работах Ryspaeva & Kholtygin [11, 13] показано, что процессы, формирующие рентгеновое излучение звезд спектральных классов O и B, *не связаны с магнитной активностью звезд*. При этом температура излучающей плазмы OB звезд увеличивается с ростом жесткости спектров, а доля степенной компоненты линейно возрастает с увеличением температуры плазмы. У рассмотренных в данной статье звезд Хербига таких корреляций не было обнаружено. Эти результаты и найденные в данной работе зависимости позволяют заключить, что, в отличие от типичных OBA звезд, звезды Хербига генерируют рентгеновое излучение в результате процессов, в которых участвуют их магнитные поля. В то же время в работе Холтыгина и др. [14] было обнаружено, что звезды Ae/Be Хербига с высокими скоростями аккреции, возможно, имеют в среднем меньшие магнитные поля. В данной работе не удалось выявить корреляции между характеристиками рентгеновского излучения звезд Хербига и их скоростями аккреции, так как эта величина измерена только у шести из девяти рассмотренных объектов, а известные значения находились в узком диапазоне 0.6 dex. В то же время не было обнаружено зависимости между рентгеновскими светимостями и массами звезд Хербига, характерной для звезд типа T Тельца [15]. Следовательно, возможный механизм формирования рентгеновского излучения звезд Хербига в результате аккреции не является единственным. Обнаруженный нами факт, что при добавлении к рентгеновскому спектру степенного компонента температура плазмы уменьшается до приемлемых для звезд Хербига значений, указывает на наличие нетепловой составляющей рентгеновских спектров звезд Хербига.

Таким образом, полученные в представленной статье результаты позволяют сделать следующий вывод. Модель MCWS вероятнее всего неприменима к звездам Хербига в силу

меньшей величины их магнитного поля по сравнению с ВА звездами главной последовательности и малости скорости их звездного ветра. Рисунок 2 (справа) показывает, что чем больше напряженность магнитного поля, тем сильнее подавляется магнитосферная аккреция и уменьшается жесткость рентгеновского излучения. Природа возможной нетепловой компоненты рентгеновского излучения пока не ясна. Возможно, нетепловое излучение формируется в результате звездных вспышек в области локальных магнитных полей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00554 А, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Babel J., Montmerle T.* X-ray emission from Ap-Bp stars: a magnetically confined wind-shock model for IQ Aur. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 323. — P. 121–138.
- [2] *Stelzer B., Micela G., Hamaguchi K., Schmitt J. H. M. M.* On the origin of the X-ray emission from Herbig Ae/Be stars // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 457, № 1. — P. 223–235. [astro-ph/0605590](#).
- [3] *Stelzer B., Robrade J., Schmitt J. H. M. M., Bouvier J.* New X-ray detections of Herbig stars // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 493, № 3. — P. 1109–1119. [0810.1836](#).
- [4] *Hamaguchi Kenji, Yamauchi Shigeo, Koyama Katsuji.* X-Ray Study of Herbig Ae/Be Stars // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 618, № 1. — P. 360–384. [astro-ph/0406489](#).
- [5] *ud-Doula A., Owocki Stanley, Townsend Richard et al.* X-rays from magnetically confined wind shocks: effect of cooling-regulated shock retreat // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 441, № 4. — P. 3600–3614. [1404.5336](#).
- [6] *Smith Randall K., Brickhouse Nancy S., Liedahl Duane A., Raymond John C.* Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions // *Astrophys. J. Lett.* — 2001. — Vol. 556, № 2. — P. L91–L95. [astro-ph/0106478](#).
- [7] *Mewe R., Gronenschild E. H. B. M., Oord G. H. J. van den.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. V. // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 1985. — Vol. 62. — P. 197–254.
- [8] *Mewe R., Lemen J. R., Oord G. H. J. van den.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. VI - Improved calculations for continuum emission and approximation formulae for nonrelativistic average Gaunt factors. // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 1986. — Vol. 65. — P. 511–536.
- [9] *Liedahl Duane A., Osterheld Albert L., Goldstein William H.* New Calculations of Fe L-Shell X-Ray Spectra in High-Temperature Plasmas // *Astrophys. J. Lett.* — 1995. — Vol. 438. — P. L115.
- [10] *Borkowski Kazimierz J., Lyerly William J., Reynolds Stephen P.* Supernova Remnants in the Sedov Expansion Phase: Thermal X-Ray Emission // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 548, № 2. — P. 820–835. [astro-ph/0008066](#).
- [11] *Ryspaeva E. B., Kholtygin A. F.* Contribution of a Non-Thermal Component to the X-Ray Emission of OB Stars // *Astrophysical Bulletin.* — 2020. — Vol. 75, № 2. — P. 127–138.
- [12] *Nazé Yaël, Petit Véronique, Rinbrand Melanie et al.* X-ray emission from magnetic massive stars // 40th COSPAR Scientific Assembly. — 2014. — Vol. 40. — P. E1.3–15–14.
- [13] *Ryspaeva Elizaveta, Kholtygin Alexander.* Analysis of the X-ray emission from OB stars III: low-resolution spectra of OB stars // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2020. — Vol. 20, № 7. — P. 108.
- [14] *Kholtygin A. F., Tsiopa O. A., Doronina Ya. A. et al.* Accretion and magnetic fields of Ae/Be Herbig stars // *Astrophysics.* — 2021. — Vol. 64, № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКНА WB 673 В РАДИОЛИНИЯХ АММИАКА**О. Л. Рябухина, М. С. Кирсанова***Институт астрономии Российской академии наук*

Работа посвящена изучению молекулярного волокна WB 673, которое находится на расстоянии 1.8 кпк в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Были проведены наблюдения линий аммиака NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) в 2019 г. на телескопе обсерватории Эффельсберг (Германия). Определены параметры линий, получены карты интегральных интенсивностей аммиака в плотных сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Получены карты лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа. Проведен анализ аномалий сверхтонкой структуры линий NH_3 (1,1).

STUDY OF THE FILAMENT WB 673 IN AMMONIA RADIOLINES**O. L. Ryabukhina, M. S. Kirsanova***Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences*

We study the molecular filament WB 673 which is located at a distance of 1.8 kpc in the giant molecular cloud G174 + 2.5. Observations of ammonia radiolines NH_3 (1,1), (2,2) and (3,3) were carried out in 2019 at the Effelsberg observatory (Germany). The parameters of the lines were determined, maps of the integrated intensities of ammonia in dense clumps WB 668, WB 673, S233-IR and G173.57+2.43 were obtained. The column density of ammonia and the kinetic temperature of the gas were obtained. An analysis of the hyperfine structure anomalies of the NH_3 (1,1) lines was carried out.

Введение

Исследования последних лет неизменно показывают, что образование звезд происходит в наиболее плотных частях межзвездных молекулярных волокон [1]. Образование и уплотнение волокон происходит вследствие последовательного сжатия газовых облаков сверхзвуковыми волнами или оболочками [2]. Таким образом, плотные облака на границах расширяющихся зон ионизированного водорода H II являются подходящими лабораториями для проверки теоретических концепций механизмов образования звезд.

Исследуемое волокно WB 673 граничит с восточной стороны с областью H II S231, а также содержит компактную область H II S233. В самом волокне по картам излучения CO [3] выделяются плотные сгустки WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Все сгустки демонстрируют признаки активного звездообразования: в них наблюдаются мазеры водяного пара H_2O , а также точечные ИК-источники IRAS и MSX [4]. Наблюдения показывают, что центральные сгустки WB 673 и S233-IR находятся на более поздней эволюционной стадии, чем периферийные WB 668 и G173.57+2.43. Для проверки этого предположения мы планируем использовать метод химических часов, для которого требуется информация о температуре газа и содержании различных молекул. Обилия молекул CS, CO, N_2H^+ , HCN и HNC были получены в работе [5]. Для определения температуры газа было решено использовать линии аммиака, поскольку его нижние инверсионные переходы являются метастабильными и возбуждаются посредством столкновений. Приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР) адекватно описывает распределение населенности

уровней аммиака, что делает его надежным трассером температуры газа. Также по яркому излучению аммиака определяются местоположения плотных сгустков, поскольку он наблюдается в газовой фазе без вымораживания на пыль в плотных (до 10^5 см^{-3}) и холодных молекулярных облаках.

Наблюдательные данные

Наблюдения линий аммиака производились на 100-м телескопе Эффельсберг (Германия). Наблюдения проводились в режиме непрерывного картирования (On-the-Fly) с использованием 1.3 мм приемника SFK с полосой пропускания 500 МГц. Ширина диаграммы направленности на уровне половины интенсивности составляет $40''$.

Обработка данных осуществлялась с помощью пакета CLASS GILDAS <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>, многие вычисления производились на языке программирования Python с использованием пакетов Astropy и PySpecKit.

Результаты и анализ наблюдений

Для определения кинетической температуры и плотности аммиака были использованы инверсионные переходы (1,1) и (2,2). Эти линии имеют сверхтонкое расщепление, на спектрах перехода (1,1) выделяются пять компонент, разнесенных на расстояние нескольких мегагерц. В спектре линии (2,2) интенсивность сателлитных компонент не превышает уровень шума и видна только главная компонента. Приближая сверхтонкую структуру линий перехода (1,1) функцией Гаусса, мы получаем значение оптической толщины $\tau_{(1,1)}$. Зная оптическую толщину главной компоненты $\tau_{(1,1)m} = \tau_{(1,1)}/2$ и интенсивность линий перехода (1,1) $T_{B(1,1)}$ и (2,2) $T_{B(2,2)}$, мы можем рассчитать так называемую вращательную температуру аммиака [6]:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 \ln \left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)m}} \ln \left(1 - \frac{T_{B(2,2)}}{T_{B(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)m})) \right) \right)^{-1} \text{ (K)}. \quad (1)$$

Далее определяются лучевая концентрация аммиака в переходе (1,1) $N_{1,1}$ [7] и полная лучевая концентрация N_{NH_3} [6] в предположении ЛТР:

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)m} \Delta V_{(1,1)} \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (2)$$

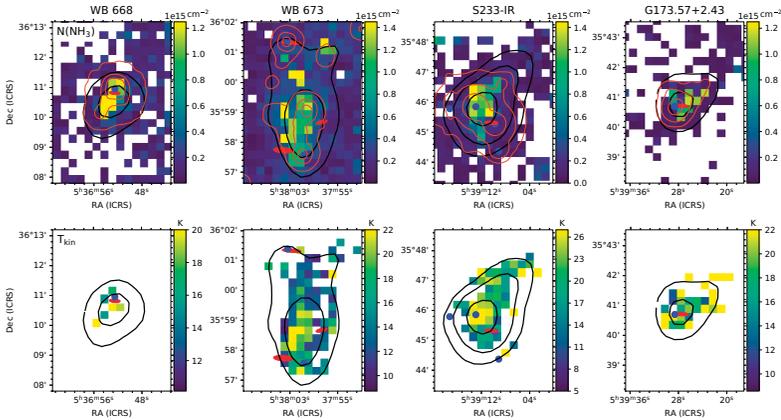
$$N_{\text{NH}_3} = N_{1,1} \left(\frac{\exp(21.3/T_{\text{rot}})}{3} + 1 + \frac{5 \exp(-41.2/T_{\text{rot}})}{3} + \frac{14 \exp(-99.4/T_{\text{rot}})}{3} \right) \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (3)$$

где $\nu_{(1,1)}$ — частота перехода NH_3 (1,1); $\Delta V_{(1,1)}$ — ширина линии. В тех пикселях полученных карт, где линия аммиака в переходе (1,1) оптически тонкая, расчет лучевой концентрации проводился исходя из интегральной интенсивности линии NH_3 (1,1) с учетом приближений из работы [8]:

$$N_{1,1} = 3.3 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \frac{\int T_{1,1} dV}{J(T_{\text{rot}}) - J(T_{\text{bg}})} \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (4)$$

где величина $J(T)$ — эквивалентная температура Рэля—Джинса. Кинетическая температура газа T_{kin} рассчитывается из величины T_{rot} следующим образом [6]:

$$T_{\text{kin}} = \frac{T_{\text{rot}}}{1 - \frac{T_{\text{rot}}}{42} \ln(1 + 1.1 \exp(\frac{-16}{T_{\text{rot}}}))} \text{ (K)}. \quad (5)$$



Карты лучевой концентрации аммиака (вверху) и кинетической температуры газа (внизу) в сгустках волокна WB 673. Черные контуры показывают излучение пыли на 1,1 мм (Bolocam), красные эллипсы — источники ИК-излучения IRAS (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки — источники MSX

Все сгустки имеют умеренную оптическую толщину $\tau_{(1,1)} < 2$, причем большая оптическая толщина излучения в линии аммиака найдена в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43, что может указывать на большее обилие аммиака в молекулярном газе либо на то, что область, где содержится аммиак, имеет большую протяженность вдоль луча зрения.

Карты лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 представлены на рисунке. В сгустке WB 673 наблюдаются две области с повышенной лучевой концентрацией аммиака: к востоку и северу от пика излучения пыли на 1.1 мм. В остальных сгустках максимум лучевой концентрации наблюдается в направлении пиков излучения пыли на 1.1 мм. Максимальные значения лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. В сгустках WB 673 и S233-IR температура газа T_{kin} повышается в центральных, наиболее плотных направлениях и достигает 27 и 30 К соответственно, в сгустке G173.57+2.43 температура, напротив, повышается на периферии.

В условиях ЛТР и без градиента лучевой скорости две внутренние и две внешние сателлитные линии перехода NH_3 (1,1) будут иметь одинаковую интенсивность. Однако в молекулярных облаках наблюдаются аномалии сверхтонкой структуры, при которых интенсивность сателлитных компонент изменяется [9]. Для обнаружения аномалий мы определили отношения интегральных интенсивностей внутренних (HIA_{IS}) и внешних (HIA_{OS}) сателлитных компонент, как это было сделано, например, в работе [10]. При отсутствии аномалий отношения $\text{HIA}_{\text{IS}} = 1$ и $\text{HIA}_{\text{OS}} = 1$. В WB 673 аномалии сверхтонкой структуры указывают на градиент лучевой скорости вдоль сгустка и его сжатие (HIA_{IS} и $\text{HIA}_{\text{OS}} < 1$), см., например, [10]. В сгустке S233-IR получены значения $\text{HIA}_{\text{IS}} < 1$ и $\text{HIA}_{\text{OS}} > 1$, что может быть интерпретировано в рамках модели сгустка, состоящего из нескольких небольших, неразрешенных пространственно составляющих, см. [9]. Эти отдельные фрагменты излучают в линиях аммиака с шириной линии, близкой к тепловой, а на выходе из-за переизлучения наблюдаются неодинаковые интенсивности сверхтонких компонент. В сгустках WB 668 и G173.57+2.43 показатели аномалий близки к единице.

Заключение

В этой работе представлены результаты наблюдений линий аммиака NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) в молекулярном волокне WB 673: получены карты интегральных интенсивностей линий аммиака в плотных сгустках волокна WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Построено распределение лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа в сгустках. Показано, что максимальные значения лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. Кинетическая температура газа увеличивается в направлении наиболее плотных центральных частей сгустков WB 673 и S233-IR, а в сгустке G173.57+2.43 температура, напротив, увеличивается к периферии. Аномалии сверхтонкой структуры линий аммиака в переходе (1,1) описываются моделью сжатия в центральном сгустке WB 673, а в сгустке S233-IR — моделью сгустка, состоящего из небольших фрагментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-32-90102.

Библиографические ссылки

- [1] *André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. et al.* From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 27–51. 1312.6232.
- [2] *Inutsuka Shu-ichiro, Inoue Tsuyoshi, Iwasaki Kazunari, Hosokawa Takashi.* The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A49. 1505.04696.
- [3] *Bieging John H., Patel Saahil, Peters William L. et al.* The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ^{13}CO J=2-1, and CO J=3-2 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2016. — Vol. 226, № 1. — P. 13.
- [4] *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71, № 2. — P. 208–224. 1605.08917.
- [5] *Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S.* Survey of Molecular Emission Lines in the WB 673 Interstellar Filament // *Astronomy Reports.* — 2020. — Vol. 64, № 5. — P. 394–405.
- [6] *Wienen M., Wyrowski F., Schuller F. et al.* Ammonia from cold high-mass clumps discovered in the inner Galactic disk by the ATLASGAL survey // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 544. — P. A146. 1208.4848.
- [7] *Mangum Jeffrey G., Wootten Alwyn, Mundy Lee G.* Synthesis Imaging of the DR 21 (OH) Cluster. II. Thermal Ammonia and Water Maser Emission // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 388. — P. 467.
- [8] *Mangum Jeffrey G., Shirley Yancy L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2015. — Vol. 127, № 949. — P. 266. 1501.01703.
- [9] *Stutzki J., Winnewisser G.* On the interpretation of hyperfine-structure intensity anomalies in the NH_3 (J, K) = (1,1) inversion transition // *Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 144. — P. 13–26.
- [10] *Zhou Dong-dong, Wu Gang, Esimbek Jarken et al.* NH_3 (1,1) hyperfine intensity anomalies in the Orion A molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 640. — P. A114. 2006.10709.

ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S255IR-SMA1

С. В. Салий

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

По радиolinиям метанола, наблюдавшимся на IRAM30m на 0.8 мм в области звездообразования S255IR-SMA1, проведена оценка физических условий. В приближении большого градиента скорости (LVG) оценены значения кинетической температуры газа (170 K), плотности молекулярного водорода ($3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$), удельной лучевой концентрации метанола ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}$), относительного обилия метанола (10^{-7}) и фактора заполнения диаграммы (10%). Значения параметров характерны для горячих плотных ядер. Показано, что объект S255IRR-SMA1 в рамках диаграммы направленности (7.5'') существенно неоднороден.

ESTIMATION OF PHYSICAL CONDITIONS IN STAR FORMATION REGION S255IR-SMA1

S. V. Salii

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

The physical conditions were estimated from the methanol radio lines observed at 0.8 mm with IRAM30m in the star-forming region S255IR-SMA1. In the approximation of a large velocity gradient (LVG), the values of the gas kinetic temperature (170 K), the number density of molecular hydrogen ($3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$), the specific column density of methanol ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}$), the relative abundance of methanol (10^{-7}) and the filling factor (10%). The parameter values are typical for hot dense cores. It is shown that the S255IR-SMA1 object is significantly inhomogeneous within the diagram (7.5'').

Молекула метанола является важнейшей составляющей межзвездного газа в областях звездообразования. Обилие молекул метанола по отношению к молекулярному водороду в областях образования массивных звезд может достигать 10^{-6} . Являясь слабоасимметричным волчком, молекула метанола имеет богатый спектр, что позволяет использовать эту молекулу для оценки физических условий.

S255IR — известная область образования массивных звезд, расположенная на расстоянии 1.78 ± 0.12 кпк, — состоит из нескольких плотных ядер. Наиболее интересным является вращающееся плотное ядро S255IR-SMA1, предположительно это диск вокруг массивного (около $20 M_{\odot}$) молодого звездного объекта (см. [1] и ссылки в ней).

В январе 2019 г. на 30-м радиотелескопе IRAM были проведены наблюдения S255IR-SMA1 ($\alpha = 06 : 12 : 54.010, \delta = +17 : 59 : 23.06$) в линиях метанола. Наблюдения проводились в четырех полосах с частотами 326.7–330.7, 329.5–334.5, 342.4–346.4 и 346.1–350.2 ГГц. На этих частотах размер диаграммы направленности (HPBW) составляет 7.5'', спектральное разрешение ~ 1.4 км/с. Уровень шума (2σ) составил около 0.03 K (за исключением полосы 326.7–328.5 ГГц, где шум существенно увеличивается к краю диапазона и достигает 0.5 K). Наблюдения выполнялись в режиме «wobbler switching mode» с помощью приемника EMIR. Антенная температура калибрована стандартным методом «chopper-wheel». Обработка полученных данных проводилась в программе CLASS пакета GILDAS (<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>).

Согласно каталогу Splatalogue (<http://www.cv.nrao.edu/php/splat/advanced.php>) в рассмотренные частотные диапазоны попадают 42 перехода метанола с энергиями верхних уровней до 1000 К и эйнштейновскими коэффициентами спонтанного перехода $A_E > 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Из этих переходов в S255IR уверенно (с интенсивностями $> 5\sigma$) отождествлены девять линий (табл. 1). В случаях блендирования переходов принимались во внимание значения эйнштейновских коэффициентов переходов и отождествление проводилось в пользу перехода с большими значениями A_E .

Для анализа физических параметров газа, при которых возбуждаются наблюдаемые линии, мы построили простую модель переноса излучения, которая использует приближение большого градиента скорости (LVG). В модели оценивались следующие параметры: кинетическая температура газа (T_{gas} , К), плотность молекулярного водорода (n_{H_2} , см^{-3}), удельная лучевая концентрация метанола ($N_{CH_3OH}/\Delta V$, $\text{см}^{-3}\text{с}$) и относительное обилие метанола ($\overline{N}_{CH_3OH}/N_{H_2}$). Поскольку фактор заполнения диаграммы направленности (f) неизвестен, оценка этого параметра также была включена в анализ. В модели не учитываются реальные профили линий, но используется некоторая усредненная ширина линий. Согласно наблюдениям большинство ярких линий имеют ширины не менее 5 км/с, поэтому при вычислениях использовалась фиксированная ширина линии 5 км/с. Более подробно метод описан, например, в работе [2]. В качестве оценок физических параметров принимался набор, при котором модельные значения интенсивностей линий метанола наиболее близки к наблюдаемым величинам (реализуется минимальное значение χ^2). Для оценки доверительных интервалов полученных параметров был применен байесовский анализ (см., например, [3]). Для этого с помощью базы населенностей энергетических уровней метанола [4] были вычислены модельные значения интенсивностей линий ($T_{m_i}(p)$) для регулярной 5-мерной сетки параметров:

$$p = (T_{gas}, N_{CH_3OH}/\Delta V, n_{H_2}, \overline{N}_{CH_3OH}/N_{H_2}, f).$$

Вероятность, что N наблюдавшихся линий с интенсивностями T_{o_i} , определенных с точностью σ_i , реализуется при некотором наборе параметров p , вычисляется как

$$P(T_o|p) = \prod_i^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T_{o_i}-T_{m_i}(p)}{\sigma_i}\right)^2}. \quad (1)$$

Интегрируя по каждому из параметров сетки, получаем распределение байесовской вероятности по выбранному параметру.

В результате моделирования было получено, что с вероятностью 95 % набор из 12 уверенно отождествленных линий мог быть сгенерирован при физических условиях, представленных в табл. 2.

Полученные значения параметров характерны для горячих плотных ядер и хорошо согласуются со значениями, определенными в работе [2]. Низкий фактор заполнения диаграммы направленности ($< 20\%$) свидетельствует о существенной неоднородности исследуемого источника. Сравнивая значения интенсивностей, соответствующие найденным условиям возбуждения (табл. 2), с наблюдаемыми интенсивностями, можно заметить, что не все линии приближаются хорошо (см. рисунок, слева). Факт, что невозможно в рамках одной модели приблизить все наблюдавшиеся линии с точностью до ошибок наблюдений, также свидетельствует о неоднородности объекта.

О неоднородности объекта можно судить и по спектральным профилям наиболее ярких линий (см. рисунок, справа). Профили линий на 331.502 и 342.729 ГГц существенно негауссовы. На них явно выделяется синее крыло (от -2 до 3 км/с), которое угадывается на профиле линии на 349.106 ГГц и практически отсутствует на профиле линии на 330.793 ГГц. Возможно, вклад в излучение в линиях на 331.502, 342.729 и 349.106 ГГц, помимо

Таблица 1. Отождествленные линии метанола в частотных полосах 326.7–334.5 и 342.4–350.2 ГГц

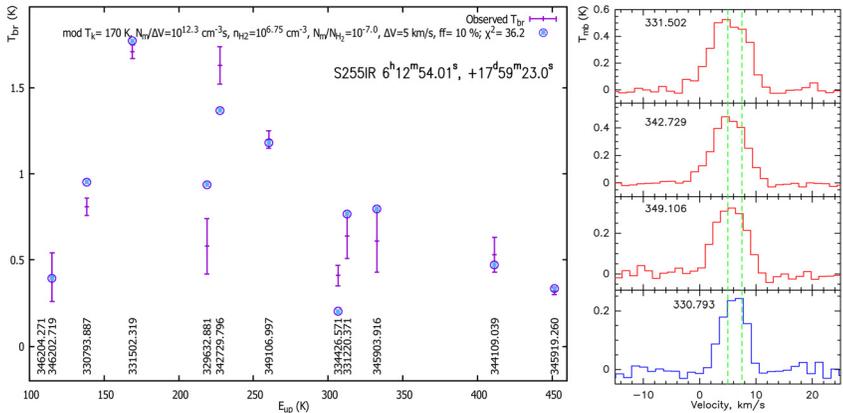
Частота, МГц	E_{up} , К	A_{ij} , c^{-1}	Переход	$\int T_a$, К-км/с	V_{lsr} , км/с	ΔV , км/с	T_a , К
326961.232	133.1	1.29E-4	$10_{-1} - 9_0 v_t 0 E$				<0.1
327317.253	218.7	5.88E-5	$12_2 - 11_3 v_t 0 A^{--}$				<0.1
327407.873	492.8	5.63E-5	$17_5 - 18_4 v_t 0 A^{++}$				<0.1
327440.644	492.8	5.63E-5	$17_5 - 18_4 v_t 0 A^{--}$				<0.1
327486.835	307.2	5.62E-5	$13_4 - 14_3 v_t 0 E$	1.56 ± 0.28	5.7 ± 0.2	2.9 ± 3.2	0.51 ± 0.07
327596.176	791.6	6.29E-5	$24_4 - 23_5 v_t 0 E$				<0.1
328468.853	536.9	6.31E-5	$20_3 - 19_4 v_t 0 A^{++}$	1.42 ± 0.49	4.2 ± 1.4	9.4 ± 4.7	0.14 ± 0.07
329632.881	218.8	6.00E-5	$12_2 - 11_3 v_t 0 A^{++}$	1.37 ± 0.22	5.9 ± 0.5	6.9 ± 1.4	0.19 ± 0.05
330172.526	810.7	4.19E-5	$11_3 - 12_4 v_t 0 A^{--}$				<0.05
330172.553	810.7	4.19E-5	$11_3 - 12_4 v_t 0 A^{++}$				<0.05
330355.512	537.0	6.42E-5	$20_3 - 19_4 v_t 0 A^{--}$				<0.05
330793.887	146.3	5.39E-5	$8_{-3} - 9_{-2} v_t 0 E$	1.35 ± 0.05	6.1 ± 0.1	4.8 ± 0.2	0.26 ± 0.04
331071.711	597.8	3.04E-8	$12_3 - 11_5 v_{t1} E$	<i>блендируется с линией CH₃CN на 331071.544 МГц</i>			
331220.371	320.6	5.24E-5	$16_{-1} - 15_{-2} v_t 0 E$	0.76 ± 0.10	5.8 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.21 ± 0.05
331502.319	169.0	1.96E-4	$11_1 - 11_0 v_t 0 A^{++}$	4.39 ± 0.06	5.2 ± 0.1	7.5 ± 0.1	0.55 ± 0.05
331755.099	823.9	1.27E-4	$15_{-5} - 16_{-6} v_t 0 E$				<0.05
331930.616	791.6	9.79E-6	$13_7 - 12_8 v_t 0 E$				<0.05
332505.432	299.6	4.05E-8	$15_1 - 15_{-1} v_t 0 E$	1.25 ± 0.09	7.0 ± 0.2	5.2 ± 0.5	0.22 ± 0.04
332996.563	614.5	6.33E-5	$22_{-2} - 21_{-3} v_t 0 E$	0.23 ± 0.07	5.3 ± 0.5	3.5 ± 1.1	0.06 ± 0.04
333864.722	125.5	8.04E-7	$9_1 - 8_{-2} v_t 0 E$				<0.04
334326.177	964.4	1.99E-5	$21_5 - 22_4 v_t 0 E$				<0.04
334426.571	314.5	5.55E-5	$3_0 - 2_1 v_t 0 E$	0.57 ± 0.06	5.4 ± 0.2	4.1 ± 0.4	0.13 ± 0.04
342726.474	979.0	6.75E-5	$20_{-6} - 19_{-7} v_t 0 E$	<i>блендируется с линией CH₃OH на 342729.796 МГц</i>			
342729.796	227.5	2.12E-4	$13_1 - 13_0 v_t 0 A^{++}$	3.53 ± 0.07	5.3 ± 0.1	6.8 ± 0.2	0.49 ± 0.03
343005.882	60.7	1.09E-7	$5_{-2} - 4_1 v_t 0 E$				<0.03
343599.019	624.0	3.58E-5	$13_{-1} - 14_{-2} v_t 0 E$	0.21 ± 0.09	5.5 ± 0.9	3.9 ± 2.5	0.05 ± 0.03
343687.066	902.3	3.89E-5	$20_3 - 20_2 v_t 0 E$				<0.03
344064.646	885.8	1.01E-6	$20_2 - 19_5 v_t 0 E$				<0.03
344109.039	419.4	6.81E-5	$18_2 - 17_3 v_t 0 E$	0.63 ± 0.07	5.7 ± 0.2	3.7 ± 0.5	0.16 ± 0.03
344312.267	491.9	1.77E-4	$10_{-2} - 11_{-3} v_t 0 E$	<i>блендируется с линией SO на 344310.612 МГц</i>			
344443.433	451.2	9.35E-5	$19_1 - 18_2 v_t 0 A^{++}$	0.56 ± 0.07	5.5 ± 0.2	4.2 ± 0.6	0.16 ± 0.03
344970.808	761.6	8.95E-5	$12_7 - 11_6 v_t 0 E$				<0.03
345903.916	332.7	9.03E-5	$16_1 - 15_2 v_t 0 A^{--}$	0.99 ± 0.18	6.0 ± 0.4	5.2 ± 1.0	0.18 ± 0.02
345919.260	459.4	7.30E-5	$18_{-3} - 17_{-4} v_t 0 E$	0.64 ± 0.03	5.9 ± 0.1	6.4 ± 0.3	0.09 ± 0.02
346202.719	115.2	2.18E-5	$5_4 - 6_3 v_t 0 A^{--}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
346204.271	115.2	2.18E-5	$5_4 - 6_3 v_t 0 A^{++}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
347445.285	856.3	4.04E-5	$19_3 - 19_2 v_t 0 E$	0.27 ± 0.07	5.8 ± 0.5	4.0 ± 1.6	0.06 ± 0.03
347507.451	57.1	1.76E-8	$5_2 - 5_{-1} v_t 0 E$				<0.03
347745.442	71.0	2.68E-8	$6_2 - 6_{-1} v_t 0 E$				<0.03
347918.109	791.6	1.66E-6	$24_4 - 25_1 v_t 0 E$				<0.03
348031.826	686.2	1.12E-5	$7_3 - 8_2 v_t 0 E$				<0.03
349106.997	260.2	2.20E-4	$14_1 - 14_0 v_t 0 A^{++}$	2.32 ± 0.07	5.4 ± 0.1	6.3 ± 0.2	0.35 ± 0.03

Таблица 2. Значения параметров, при которых реализуется минимум χ^2 для набора из 12 наиболее ярких линий метанола в частотных полосах 326.7–334.5 и 342.4–350.2 ГГц

Параметр	Граница диапазона	Значение параметра	95% Доверительный интервал
T_{gas} , К	10–600	170	160–180
n_{H_2} , cm^{-3}	$10^3 - 10^9$	3×10^6	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^7$
$N_{CH_3OH}/\Delta V$, $cm^{-3}c$	$3 \times 10^7 - 10^{14}$	2×10^{12}	$1.6 \times 10^{12} - 2.5 \times 10^{12}$
N_{CH_3OH}/N_{H_2}	$10^{-9} - 3 \times 10^{-6}$	10^{-7}	$3 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-7}$
f , %	10–100	10	< 20 %

известных [2] сгустков на скоростях ~ 4 и ~ 8 км/с (зеленый пунктир на рисунке справа), дает сгусток на скорости около 2 км/с, в котором зарегистрировано мазерное излучение на переходе на частоте 349.107 ГГц [1]. Но достоверно выделить его при имеющемся спектральном разрешении (1.4 км/с) не представляется возможным.

Для получения более точных оценок необходимы наблюдения с более высоким спектральным разрешением.



Слева — сопоставление наблюдаемых интенсивностей с модельными значениями, которые обеспечивают минимальное значение χ^2 . Приведены частоты линий в мегагерцах. Справа — спектры наиболее ярких линий метанола. Частоты линий указаны в ГГц. Зеленым пунктиром отмечены скорости известных сгустков

Оценки физических параметров выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00917.

Библиографические ссылки

- [1] Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N., Sobolev A. M. Detection of a new methanol maser line with ALMA // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 606. — P. L6. 1709.08889.
- [2] Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N. et al. The Disk-outflow System in the S2551R Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810, № 1. — P. 10. 1507.05642.
- [3] Ward J. S., Zmuidzinas J., Harris A. I., Isaak K. G. A ^{12}CO J=6–5 Map of M82: The Significance of Warm Molecular Gas // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 587. — P. 171–185.
- [4] Salii S., Parfenov S., Sobolev A. Updated Base of Methanol Energy Level Populations // *Modern Star Astronomy.* — 2018. — Vol. 1. — P. 276–279.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО НА ПРИМЕРЕ АСТЕРОИДА 1685 TORO (1948 OA)

Т. Н. Санникова

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

На примере 1685 Того получены вековые дрейфы орбитальных элементов и смещение от невозмущенного положения с помощью аналитического решения осредненных уравнений движения астероида в центральном поле тяготения и дополнительного возмущающего ускорения, обратно пропорционального квадрату расстояния от Солнца, в системе отсчета, связанной с радиусом-вектором. Компоненты этого ускорения вычислены на основе теплофизических характеристик 1685 Того в рамках линейной модели ускорения Ярковского для сферических астероидов.

ESTIMATION OF THE YARKOVSKY EFFECT ON THE EXAMPLE OF THE ASTEROID 1685 TORO (1948 OA)

T. N. Sannikova

Crimean Astrophysical Observatory of RAS

On the example of 1685 Toro, secular drifts of orbital elements and the displacement from the unperturbed position were obtained using the analytical solution of the averaged equations of motion of the asteroid in the central gravitational field and additional perturbing acceleration, inversely proportional to the square of the distance to the Sun, in the frame of reference associated with the radius vector. The components of this acceleration are calculated based on the thermophysical characteristics of 1685 Toro within the framework of the Yarkovsky acceleration linear model for spherical asteroids.

Введение

Эффект Ярковского — это негравитационное возмущение, которое определяется тепловым излучением вращающегося тела, имеющего ненулевую тепловую инерцию. Различают суточный и сезонный эффект. Суточная составляющая возникает вследствие вращения астероида вокруг оси, сезонная — из-за обращения вокруг Солнца.

Рассмотрим движение астероида \mathcal{A} под действием притяжения к Солнцу \mathcal{S} и ускорения Ярковского $\mathbf{P} = \mathbf{P}'/r^2$, где r — гелиоцентрическое расстояние. Введем орбитальную систему отсчета \mathcal{O} с началом \mathcal{S} и осями, направленными по радиусу-вектору, трансверсали и нормали к орбитальной плоскости. Компоненты S , T , W вектора \mathbf{P}' постоянны в системе \mathcal{O} и малы по сравнению с основным ускорением κ^2/r^2 , где κ^2 — произведение постоянной тяготения на массу \mathcal{S} .

Модель ускорения Ярковского

На основе линейной модели ускорения Ярковского для сферических астероидов [1] и уравнений [2, формулы (12)] для компонентов этого ускорения в системе \mathcal{O} мы получили

выражения для негравитационных параметров

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{\alpha \Phi(1 \text{ а. е.})}{9(1+\chi)} \{ [E_{R'_s} \exp(-i\delta_{R'_s}) + E_{R'_s} \exp(i\delta_{R'_s})] \sin^2 \gamma + \\
 &\quad + [E_{R'_d} \exp(-i\delta_{R'_d}) + E_{R'_d} \exp(i\delta_{R'_d})] (1 + \cos^2 \gamma) \}, \\
 A_2 &= \frac{\alpha \Phi(1 \text{ а. е.})}{9(1+\chi)} \{ i [E_{R'_s} \exp(-i\delta_{R'_s}) - E_{R'_s} \exp(i\delta_{R'_s})] \sin^2 \gamma - \\
 &\quad - 2i [E_{R'_d} \exp(-i\delta_{R'_d}) - E_{R'_d} \exp(i\delta_{R'_d})] \cos \gamma \}, \\
 A_3 &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

которые связаны с компонентами S, T, W соотношениями $A_1 = S/r_0^2$, $A_2 = T/r_0^2$ и $A_3 = W/r_0^2$, где $r_0 = 1$ а. е.

В (1) индекс s соответствует сезонному эффекту Ярковского; d – суточному; γ – наклон оси вращения астероида относительно нормали к плоскости его орбиты; $\alpha = 1 - A$ – коэффициент оптического поглощения; A – альбедо Бонда;

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}_* \pi R^2}{mc}; \quad \chi = \frac{\Theta_s}{\sqrt{2} R'_s}; \quad \Theta_s = \frac{\Gamma \sqrt{\omega_{rev}}}{\epsilon \sigma T_*^3}; \quad \Gamma = \sqrt{K \rho C}; \quad T_* = \left(\frac{\alpha \mathcal{E}_*}{\epsilon \sigma} \right)^{1/4};$$

Γ – тепловая инерция поверхности; T_* – температура подсолнечной точки; $\mathcal{E}_* = L_\odot / (4\pi a^2)$ – поток излучения Солнца на гелиоцентрическом расстоянии a ; $L_\odot = 3.86 \times 10^{26}$ Вт – светимость Солнца; $c = 299\,792\,458$ м/с – скорость света; $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$ Вт · м⁻² · К⁻⁴ – постоянная Стефана–Больцмана; $m, R, \rho, \epsilon, K, C$ – масса, радиус, объемная плотность, тепловая излучательная способность, теплопроводность и удельная теплоемкость астероида соответственно; $\Phi(1 \text{ а. е.})$ – коэффициент Ф, вычисленный для расстояния 1 а. е. Далее,

$$R'_s = \frac{R}{l_s}, \quad l_s = \frac{\Gamma}{\rho C \sqrt{\omega_{rev}}}, \quad \omega_{rev} = \frac{2\pi}{P_{rev}}, \quad R'_d = \frac{R}{l_d}, \quad l_d = l_s \sqrt{\frac{\omega_{rev}}{\omega_{rot}}}, \quad \omega_{rot} = \frac{2\pi}{P_{rot}},$$

где P_{rev} – период обращения астероида вокруг Солнца; P_{rot} – период вращения вокруг оси. Амплитуда $E_{R'} = E(\sqrt{2}R')$ и фаза $\delta_{R'} = \delta(\sqrt{2}R')$ определены, как и в [1], соотношениями

$$E_{R'} \exp(i\delta_{R'}) = \frac{A(x) + iB(x)}{C(x) + iD(x)}, \quad E_{R'} \exp(-i\delta_{R'}) = \frac{A(x) - iB(x)}{C(x) - iD(x)},$$

где $i = \sqrt{-1}$, $x = \sqrt{2}R'$ и вспомогательные функции

$$A(x) = -(x+2) - e^x[(x-2)\cos x - x\sin x]; \quad B(x) = -x - e^x[x\cos x + (x-2)\sin x];$$

$$C(x) = A(x) + \frac{\chi}{1+\chi} (3(x+2) + e^x[3(x-2)\cos x + x(x-3)\sin x]);$$

$$D(x) = B(x) + \frac{\chi}{1+\chi} (x(x+3) - e^x[x(x-3)\cos x - 3(x-2)\sin x]).$$

Уравнения движения

Для поставленной во введении задачи мы провели осредняющую процедуру уравнений движения типа Эйлера и получили уравнения движения в средних элементах в первом порядке малости [3], которые решены аналитически в общем и частных случаях в статье [4]. Поскольку в (1) $A_3 = 0$, то используем частное решение при $S, T \neq 0, W = 0$:

$$t = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left(\frac{\eta_0}{1-\eta_0} \right)^3 [f(\eta) - f(\eta_0)], \quad f(\eta) = 2 \ln \eta + \frac{1}{\eta} - \eta, \quad \eta = \sqrt{1-e^2}, \quad \eta_0 = \sqrt{1-e_0^2}, \tag{2}$$

$$a = a_0 \left[\frac{\eta_0(1-\eta)}{\eta(1-\eta_0)} \right]^2, \quad i = i_0, \quad \Omega = \Omega_0, \quad \omega = \omega_0, \quad M = M_0 + \frac{\varkappa^2 - 2S}{T} \left(\eta + \ln \frac{1-\eta}{1-\eta_0} - \eta_0 \right),$$

где a — большая полуось; e — эксцентриситет; i — наклон; Ω — долгота восходящего узла; ω — аргумент перигентра; M — средняя аномалия. Индексом 0 отмечены значения элементов в начальную эпоху $t_0 = t(e_0) = 0$.

Решение (2) определено на временах от $-t_1$ до ∞ при $T > 0$ и от $-\infty$ до $-t_1$ при $T < 0$, где

$$t_1 = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left(\frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \right)^3 f(\eta_0).$$

Орбитальная эволюция 1685 Того

Определим для астероида 1685 Того (1948 ОА) числовые значения параметров (1), а затем с помощью решения (2) найдем дрейф большой полуоси за 1 млн лет, а также смещение возмущенного за счет силы Ярковского положения относительно невозмущенного за 1 000 P_{rev} (1 600 лет).

При вычислениях будем использовать следующие константы: $\varkappa = 1.152 \times 10^{10} \text{ м}^{3/2} \cdot \text{с}^{-1}$, 1 а. е. = $1.495978707 \times 10^{11} \text{ м}$, 1 год = 365.25 сут., 1 сут. = 86 400 с. Элементы орбиты и теплофизические характеристики Торо приведены в табл. 1. Альbedo Бонда вычислим по формуле $A = p_V (0.290 + 0.684 G) = 0.04748 \pm 0.011$ [5], где p_V — геометрическое альbedo; G — наклонный параметр. Результаты вычислений приведены в табл. 2, получено хорошее согласие с другими работами.

Таблица 1. Элементы орбиты и теплофизические характеристики астероида 1685 Того

Параметр	Значение	Источник	Параметр	Значение	Источник
a	1.367586471667151а. е.	[6]	ρ	2500 кг·м ⁻³	[7]
e	0.4358371102560366	[6]	Γ	260^{+140}_{-110} Дж·м ⁻² с ^{-1/2} К ⁻¹	[7]
P_{rev}	584.1583930934321 сут	[6]	C	680 Дж·кг ⁻¹ К ⁻¹	[2]
P_{rot}	$10.19782 \pm 3 \times 10^{-5}$ ч	[7]	ϵ	0.9	[8]
γ	$161 \pm 6^\circ$	[7]	p_V	0.13 ± 0.03	[7]
R	1750^{+150}_{-200} м	[7]	G	0.11	[7]

Таблица 2. Параметры, дрейфы эксцентриситета и большой полуоси за 1 млн лет (Мл). Для сравнения: параметр A'_2 и дрейф большой полуоси da/dt' из различных источников

$10^{-15} A_1,$ а. е./сут. ²	$10^{-15} A_2,$ а. е./сут. ²	$10^{-13} A'_2,$ а. е./сут. ²	$ t_1 ,$ Мл	$de/dt \pm 1\sigma,$ 10^{-6} Мл ⁻¹	$da/dt \pm 1\sigma,$ 10^{-4} а. е./Мл	$da/dt' \pm 1\sigma,$ 10^{-4} а. е./Мл
$7.96229^{+2.72}_{-3.48}$	$-3.24047^{+0.42}_{-0.57}$	-2.95 ± 0.62 [9] -3.09965 ± 0.6952 [6] -3.76 ± 0.84 [11]	6754	$-9.86928710^{+1.74}_{-1.28}$	$-1.45^{+0.26}_{-0.19}$	-1.38 ± 0.32 [7] -1.57 ± 0.4 [10] -1.68 ± 0.38 [11]

Наличие возмущающего ускорения влияет также и на среднюю аномалию. С помощью последнего уравнения (2) мы нашли, что за 1 000 P_{rev} (1 600 лет) отклонение средней аномалии от невозмущенного значения составит от 2.50 до 3.28 угловых минут с учетом неопределенностей параметров A_1, A_2 , которые определялись путем варьирования теплофизических параметров в пределах их ошибок. В результате астероид отклонится от невозмущенного положения на расстояние от 143 до 188 тыс. км. За этот период эксцентриситет изменится на $de = (-1.578327374352^{+0.28}_{-0.21}) \times 10^{-8}$, а большая полуось — на $da = (-2.32^{+0.41}_{-0.30}) \times 10^{-7}$ а. е.

Заключение

Предлагается простой способ вычисления негравитационных параметров на основе линейной модели силы Ярковского для сферических астероидов [1] и уравнений [2, формулы (12)] для компонентов этой силы в системе отсчета, связанной с радиусом-вектором. Для астероида 1685 Toro (1948 OA) предложенным способом вычислены значения компонентов возмущающего ускорения Ярковского, используя теплофизические характеристики Торо.

Также для Торо найдены дрейфы эксцентриситета, большой полуоси и средней аномалии и оценено смещение относительно невозмущенного положения за 1 000 оборотов вокруг Солнца с помощью аналитического решения осредненных уравнений движения астероида в центральном поле тяготения при наличии возмущающего ускорения, обратно пропорционального квадрату расстояния от Солнца, в системе отсчета, связанной с радиусом-вектором.

Библиографические ссылки

- [1] *Vokrouhlický D.* A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astron. Astrophys.* — 1999. — Vol. 344. — P. 362–366.
- [2] *Xu Y.-B., Zhou L.-Y., Lhotka C., Ip W.-H.* Asteroid migration due to the Yarkovsky effect and the distribution of the Eos family // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 493, № 1. — P. 1447–1460.
- [3] *Санникова Т. Н., Холшевников К. В.* Осредненные уравнения движения при возмущающем ускорении, меняющемся по закону обратных квадратов // *Астрон. журн.* — 2019. — Т. 96, № 5. — С. 418–430.
- [4] *Санникова Т. Н., Холшевников К. В.* Движение в центральном поле при возмущающем ускорении, изменяющемся по закону обратных квадратов, в системе отсчета, связанной с радиусом-вектором // *Астрон. журн.* — 2020. — Т. 97, № 9. — С. 747–753.
- [5] *Muñonen K., Belskaya I. N., Cellino A. et al.* A three-parameter magnitude phase function for asteroids // *Icarus.* — 2010. — Vol. 209, № 2. — P. 542–555.
- [6] *NASA Jet Propulsion Laboratory.* JPL Small-Body Database Search Engine. — https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi (дата обращения: 05.11.2020).
- [7] *Ďurech J., Vokrouhlický D., Pravec P. et al.* YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 609. — P. A86.
- [8] *Ďurech J., Delbó M., Carry B. et al.* Asteroid shapes and thermal properties from combined optical and mid-infrared photometry inversion // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 604. — P. A27.
- [9] *Tardioli C., Farnocchia D., Rozitis B. et al.* Constraints on the near-Earth asteroid obliquity distribution from the Yarkovsky effect // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 608. — P. A61.
- [10] *Greenberg A. H., Margot J. L., Verma A. K. et al.* Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids // *Astron. J.* — 2020. — Vol. 159, № 3. — P. 92.
- [11] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61.

**ОЦЕНКА ВОЗРАСТА МОЛОДЫХ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ
ОРБИТАХ: ПАРА (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49**

В. С. Сафронова, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

Изложены основные идеи метода определения возраста молодых пар астероидов на близких орбитах по результатам анализа вероятностной эволюции орбит. В качестве примера получены оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49, которые составляют от 7.8 до 8.2 тыс. лет.

**AGE ESTIMATION OF YOUNG PAIRS OF ASTEROIDS IN CLOSE ORBITS:
PAIR (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49**

V. S. Safronova, E. D. Kuznetsov
Ural Federal University

The main ideas of the method for determining the age of young pairs of asteroids in close orbits based on the results of the analysis of the probabilistic evolution of orbits are presented. As an example, estimates of the age of the pair (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 were obtained, which range from 7.8 to 8.2 kyr.

Введение

Исследование динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах представляет особый интерес с точки зрения задачи поиска молодых объектов среди малых тел Солнечной системы. Образование пар астероидов может происходить в результате действия различных процессов: распада быстровращающегося родительского тела [1], вторичного деления образующихся при распаде тел [2], кратерообразующего столкновения с почти критически вращающимся родительским астероидом [3], каскадного разрушения родительского тела группы или семейства [4]. Современное состояние проблемы изучения молодых пар астероидов представлено в работе [5]. Новые фотометрические данные в целом подтверждают механизм образования пар, предложенный в [1].

Для оценки близости кеплеровых орбит удобно использовать метрики Холшевникова, определение и свойства которых детально изложены в работах [6, 7]. Совместный анализ метрик ϱ_2 и ϱ_5 позволяет выявлять кандидатов в молодые пары астероидов [8–10]. Метрика ϱ_2 определяет расстояние в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит: большой полуоси a , эксцентриситета e , наклона i , долготы восходящего узла Ω и аргумента перигентра g . Метрика ϱ_5 определяет расстояние в трехмерном фактор-пространстве позиционных элементов a , e , i . Близость этих метрик указывает на то, что орбиты близки не только по своим размерам и форме, но и имеют близкую ориентацию в пространстве. Это может указывать на молодость пары.

В работе [10] на основе анализа метрик ϱ_2 и ϱ_5 были выделены кандидаты в молодые пары астероидов. При выборе кандидатов использовались следующие критерии: $\varrho_2 < 0.001$ (а. е.)^{1/2}, $\varrho_5 < 0.001$ (а. е.)^{1/2} и $\varrho_2 - \varrho_5 < 0.0001$ (а. е.)^{1/2}. Последующий анализ результатов численного моделирования на основе номинальных орбит при варьировании

скорости дрейфа большой полуоси, обусловленной влиянием эффекта Ярковского, позволил выявить несколько молодых пар. Динамическая эволюция пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 исследована в [11], получены оценки возраста пары.

В настоящей работе обосновывается использование метода исследования вероятностной эволюции при получении оценок возраста молодых пар астероидов на примере пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49.

Описание методики исследования

При исследовании вероятностной эволюции для каждого астероида генерировалось 1000 клонов орбит на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений [12]. Этот метод заключается в записи ковариационной матрицы в виде $C = LL^T$, где L — нижняя треугольная матрица. Выборка из 1000 клонов генерируется на основе номинальных элементов ε_{0k} , где $1 \leq k \leq 6$, как $\varepsilon_k = \varepsilon_{0k} + r_j L_{kj}$. Здесь выполняется суммирование по повторяющемуся индексу j для $j \leq k$, а r_j — 6-мерный вектор с независимо генерируемыми компонентами на основе нормального распределения с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Моделирование динамической эволюции астероидов проводилось численным методом с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit. Учитывались возмущения от больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и влияние эффекта Ярковского. При учете эффекта Ярковского использовались оценки максимальной скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{max}$, полученные в [10] с использованием метода нормализации на основе параметров астероида (101955) Веппи [13, 14]. Для оценки скорости дрейфа большой полуоси необходимо знать наклон оси вращения астероида к плоскости его орбиты ϕ . Поскольку для исследуемых астероидов таких данных нет, мы получаем оценки возраста для нескольких фиксированных значений наклона каждого астероида: $da/dt = 0$ при $\phi = 90^\circ$ или 270° , $\pm 1/2 |da/dt|_{max}$ при $\phi = 60^\circ$ и 240° и $\pm |da/dt|_{max}$ при $\phi = 0^\circ$ и 180° . Затем рассматриваем разные комбинации этих наклонов и получаем свою оценку для каждой комбинации. На наш взгляд, это более информативный метод оценки, чем примененный в [15], где скорости дрейфа случайным образом варьировались вместе с элементами орбит. В нашем случае для данной пары наклонов осей вращения астероидов получается более точная оценка возраста. Появляется возможность исследовать зависимость оценок возраста от используемых наклонов во всем диапазоне их изменения и получить экстремальные оценки возраста. Интервал интегрирования выбран на основе оценок, полученных в [10], и составил 10 тыс. лет.

При оценке возраста молодых пар астероидов анализировались условия наступления низкоскоростных сближений астероидов между собой [5]: $\Delta r < 10R_{Hill}$, $v_{rel} < 5V_{esc}$, где Δr — относительное расстояние между астероидами; R_{Hill} — радиус сферы Хилла более массивного астероида; v_{rel} — относительная скорость астероидов; V_{esc} — вторая космическая скорость относительно более массивного астероида. Использовались оценки радиусов сфер Хилла R_{Hill} астероидов, полученные в [10]. Вторые космические скорости вычислялись для астероидоцентрических расстояний, соответствующих относительному расстоянию между астероидами во время сближения.

Результаты исследования вероятностной эволюции

К настоящему времени получены первые результаты исследования вероятностной эволюции пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49. Рассмотрены три варианта, различающиеся скоростью дрейфа большой полуоси орбиты da/dt астероида (87887) 2000 SS286:

$(da/dt)_{87887}$, а. е./млн лет	$(da/dt)_{415992}$, а. е./млн лет	t_r , годы	t_ϱ , годы	Варианты с низкоскоростными сближениями
$1.1 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	-8176 ± 41	-8360 ± 110	74 %
$5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	-8064 ± 40	-8260 ± 130	74 %
$-5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	-7850 ± 38	-8030 ± 130	68 %

1) $5.5 \cdot 10^{-5}$ а. е./млн лет; 2) $1.1 \cdot 10^{-4}$ а. е./млн лет; 3) $-5.5 \cdot 10^{-5}$ а. е./млн лет. Скорость дрейфа большой полуоси орбиты астероида (415992) 2002 AT49 полагалась равной $da/dt = 9.5 \cdot 10^{-5}$ а. е./млн лет. Для каждого астероида было промоделировано 1000 клонов орбит. Для каждого варианта рассматривалось 10^6 вариантов эволюции пары. В таблице приведены оценки возраста t_r и t_ϱ , соответствующие минимальным расстояниям между астероидами Δr и минимальным значениям метрики ϱ_2 . В последнем столбце таблицы дано количество вариантов, в которых $\Delta r < 10R_{Hill}$, $v_{rel} < 5V_{esc}$.

Обсуждение результатов и заключение

Полученные результаты показывают, что оценки возраста t_r и t_ϱ хотя и близки между собой, различаются существенно. Одна из причин — дискретность выдачи результатов интегрирования. В данном случае интервал времени между соседними точками составлял 0.1 года. Дополнительное интегрирование на этом интервале с более мелким шагом позволит получить более точные оценки минимальных расстояний Δr и увеличить количество вариантов, соответствующих условию низкоскоростных сближений.

Оценки возраста t_r и t_ϱ различаются между собой для данных вариантов примерно на 200 лет. Это связано с тем, что близость орбит не гарантирует сближения астероидов. Наиболее тесные сближения астероидов происходят, когда расстояние между орбитами (метрика ϱ_2) вблизи минимального значения, но не обязательно совпадает с ним.

Количество вариантов, соответствующих низкоскоростным сближениям, составляет от 68 до 74 %. На основании этого можно сделать вывод, что оценки времени t_r и t_ϱ , соответствующие минимальным расстояниям между астероидами Δr и минимальным значениям метрики ϱ_2 , можно использовать в качестве оценок возраста пары.

Рассмотренные варианты дают оценку возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 от 7.8 до 8.2 тыс. лет, что близко к оценке 7.4 ± 0.3 тыс. лет, полученной в работе [15]. Различия оценок связаны с отличиями в используемых наборах элементов орбит (разные начальные эпохи), интеграторах (Orbit9 и swift), применяемых моделях сил (в работе [15] учитывается влияние карликовой планеты Церера и массивных астероидов Паллада и Веста).

Для получения более точных оценок возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 необходимо выполнить моделирование для полного набора вариантов, различающихся скоростями дрейфа большой полуоси. Существенно повысить точность оценки возраста пары можно после получения оценки скоростей дрейфа больших полуосей орбит по результатам наблюдений. На оценку возраста пары также может влиять механизм образования пары, но это требует дополнительного исследования.

Полученные результаты показывают, что представленный метод оценки возраста молодой пары астероидов может быть успешно применен для решения данной задачи.

Библиографические ссылки

- [1] *Pravec P., Vokrouhlický D., Polishook D. et al.* Formation of asteroid pairs by rotational fission // *Nature*. — 2010. — Vol. 466, № 7310. — P. 1085–1088. 1009.2770.
- [2] *Jacobson S. A., Scheeres D. J.* Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems // *Icarus*. — 2011. — Vol. 214, № 1. — P. 161–178. 1404.0801.
- [3] *Vokrouhlický D., Pravec P., Durech J. et al.* The young Datura asteroid family. Spins, shapes, and population estimate // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. A91.
- [4] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Icarus*. — 2018. — Vol. 304. — P. 110–126.
- [5] *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid pairs: A complex picture // *Icarus*. — 2019. — Vol. 333. — P. 429–463. 1901.05492.
- [6] *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [7] *Kholshevnikov K. V., Shechepalova A. S., Jazmati M. S.* On a quotient space of keplerian orbits // *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*. — 2020. — Vol. 53, № 1. — P. 108–114.
- [8] *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. Space Sci.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
- [9] *Kuznetsov E. D., Vasileva M. A.* On New Members of Asteroid Clusters Similar to Asteroid Pairs // 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society. — 2019. — Vol. 82. — P. 6192.
- [10] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E. et al.* A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // *Solar System Research*. — 2020. — Vol. 54, № 3. — P. 236–252.
- [11] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plavalova E., Safronova V. S.* Age estimation of asteroid pair with close orbits (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 // *INASAN Science Reports*. — 2020. — Vol. 5. — P. 52–55.
- [12] *Пригарин С. М.* Численное моделирование многомерных гауссовских распределений. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2018.
- [13] *Spoto F., Milani A., Knežević Z.* Asteroid family ages // *Icarus*. — 2015. — Vol. 257. — P. 275–289.
- [14] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61. 1805.05947.
- [15] *Žižka J., Galád A., Vokrouhlický D. et al.* Asteroids 87887 — 415992: the youngest known asteroid pair? // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A20.

БОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ БЛЕСКА И ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА СВЕРХЪЯРКИХ СВЕРХНОВЫХ

Т. А. Семенихин¹, М. В. Пружинская², М. В. Корнилов²

¹*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет космических исследований,* ²*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга*

Цель работы состоит в получении болометрических кривых блеска сверхъярких сверхновых, используя данные Открытого каталога сверхновых звезд и векторные гауссовы процессы. С помощью теоретического и аналитического моделирования из полученных болометрических кривых блеска будут извлечены параметры взрыва сверхновых, такие как энергия взрыва и масса образовавшихся радиоактивных элементов.

BOLOMETRIC LIGHT CURVES AND PARAMETERS OF SUPERLUMINOUS SUPERNOVA EXPLOSIONS

Т. А. Semenikhin¹, М. V. Pruzhinskaya², М. V. Kornilov²

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research,* ²*Lomonosov Moscow State University, Sternberg astronomical institute*

The goal of this work is to obtain bolometric light curves of superluminous supernovae using data from the Open Supernova Catalog of and vector-valued Gaussian processes. With the help of theoretical and analytical simulations, parameters of supernova explosions, such as the explosion energy and the mass of the produced radioactive elements, will be extracted from the obtained bolometric light curves.

Задача предполагает работу с данными Открытого каталога сверхновых звезд (ОКС, <https://sne.space/>). В нем содержатся фотометрические наблюдения (кривые блеска) сверхновых звезд в разных полосах пропускания (фильтрах).

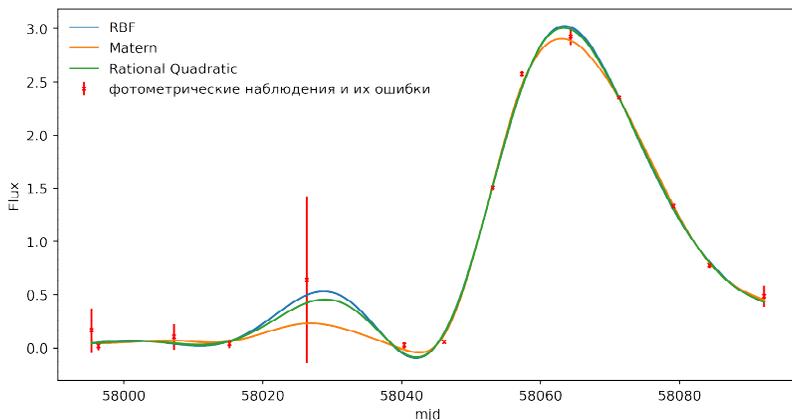
Максимально точно удастся определить параметры предсверхновых и параметры взрыва, анализируя так называемые болометрические кривые блеска, которые показывают, как поток от звезды, просуммированный по всему спектру излучения (по всем длинам волн), меняется со временем.

Представленные в каталоге ОКС многоцветные кривые блеска неоднородны по времени. Для получения квазиболометрической кривой блеска необходимо просуммировать потоки, измеренные в разных полосах. Поэтому имеющиеся кривые блеска нужно аппроксимировать. В данной задаче предлагается это сделать с помощью векторных гауссовых процессов (<https://gp.snad.space/>). Векторные гауссовы процессы позволяют скореллировать между собой многоцветные кривые блеска объекта. Таким образом, становится возможным восстановление отсутствующих частей кривой блеска в одной полосе пропускания по поведению кривых блеска в других полосах.

Далее, используя теоретические и аналитические модели, предполагается извлечь из болометрических кривых блеска информацию о параметрах предсверхновых и параметрах взрыва, что поможет лучше понять их астрофизическую природу.

На данный момент решена упрощенная задача: кривые блеска интерполируются (с учетом ошибок) с помощью гауссовых процессов только в одном фильтре, при этом

для каждой кривой рассмотрены три ядра (Radial basis function (RBF), Matern kernel и RationalQuadratic kernel). Для каждой сверхновой строится график с фотометрией, ее ошибками и тремя интерполяциями (каждая соответствует своему ядру). Пример графика для сверхновой DES17C1cqv — на рисунке.



Кривая блеска сверхновой DES17C1cqv и результат ее интерполяции гауссовыми процессами с разными ядрами

Было проинтерполировано 100 кривых блеска. Сравнивая значения этих кривых с тестовыми выборками, было получено, что Matern kernel лучше подходит для интерполяции в одном фильтре.

Следующим этапом работы будет интерполяция кривых блеска с помощью векторных гауссовых процессов с использованием двух фильтров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта № 21-52-15024, а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

ДРОБЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ПЫЛИ НА БОЛЬШИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЫСОТАХ

Е. Э. Сивкова, Д. З. Виеб

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

Рассматривается возможность дробления углистых пылевых частиц, выметаемых давлением излучения звезд в окологалактическое пространство вследствие относительного движения пылинок различных размеров. Распирена ранее разработанная модель движения пылинок различных размеров в Галактике под действием сил давления излучения, гравитации и сопротивления газа с учетом процессов разрушения. Рассматривается возможность выметания пыли с учетом ее столкновений с газом Галактики и с другими пылинками, а также уточняется диапазон размеров частиц, которые могут попасть в межгалактическое пространство благодаря описываемому механизму.

DUST DESTRUCTION AT HIGH GALACTIC ALTITUDE

E. E. Sivkova, D. Z. Wiebe

Institute of Astronomy of the RAS

The possibility of destruction carbonaceous dust particles swept out by the radiation pressure into near-galactic space due to the relative motion of dust particles of various sizes is considered. The earlier model of the motion of dust in the Galaxy under the action of radiation pressure, gravity, and gas resistance is expanded taking into account the destruction processes. The possibility of dust sweeping is considered taking into account its collisions with the gas of the Galaxy and with other dust particles. Also, we clarify the range of particle sizes that can get into intergalactic space due to the described mechanism.

Многочисленные наблюдения указывают на наличие пыли в окрестностях дисковых галактик [1–4], в том числе и Млечного Пути [5]. Выметание пыли из галактического диска, по всей видимости, происходит в большинстве дисковых галактик. На основе работы [6] разработана усовершенствованная динамическая модель выметания пылевых частиц из диска Галактики давлением излучения звезд. В модели динамика пыли определяется тремя силами: силой давления излучения, силой гравитационного притяжения и силой сопротивления межзвездного газа. В модель также включены процессы разрушения пыли, описанные в работах [7–9]. Ранее нами был детально исследован процесс выметания пылинок из нашей Галактики (Сивкова и др. // *Астрономический журнал*. В печати). Было показано, что наиболее эффективно из Галактики выметаются углистые пылинки средних размеров, а потеря массы в виде пыли составляет $0.03M_{\odot}/\text{год}$. С помощью динамической модели были рассчитаны распределения концентраций пылевых частиц по галактоцентрической высоте, необходимые для учета процесса дробления.

Проведенные нами расчеты показывают, что под действием давления излучения звезд Галактики пыль может двигаться с высокой скоростью, причем пылинки различных размеров и химического состава приобретают различные скорости как по величине, так и по направлению. В контексте данной работы рассматриваются пылевые частицы двух видов — графиты и ПАУ (полициклические ароматические углеводороды), которые отличаются плотностью вещества и оптическими свойствами. Различные сочетания этих параметров приводят к тому, что пылинки различных видов движутся друг относительно друга, причем наибольшую скорость развивают крупные пылевые частицы (радиусом 0.1 мкм).

Таким образом, мы получаем, что крупные пылинки, выметаемые из диска Галактики, испытывают высокоскоростные столкновения не только с газом, но и с мелкими пылинками.

Пылевые частицы в процессе выметания из диска Галактики могут полностью или частично (в зависимости от скорости столкновения) разрушаться за счет столкновений друг с другом. Процессы разрушения, включенные нами в модель, опираются на теоретическое описание дробления, представленное в работах [8, 10–12]. Согласно модели [13] большую часть всей массы межзвездной пыли составляют мелкие частицы, которые и вносят основной вклад в разрушение всех видов пылевых частиц.

Показано, что пылевые частицы разрушаются в процессе выметания из Галактики, однако крупные пылинки могут терять не всю свою массу и попадать в окологалактическое пространство в виде мелких пылевых частиц. Причем высоты, которых могут достигать мелкие пылинки без учета разрушения, оказываются значительно меньше, чем те, на которые попадают пылинки, испытавшие разрушение в процессе выметания из диска Галактики. Кроме того, нами показано, что в процессе выметания давлением излучения в окологалактическое пространство разрушение пылинок любых размеров и химического состава за счет столкновений с частицами газа Галактики не происходит.

Следует отметить, что использованный метод предполагает некоторые упрощения, поскольку в модели рассматривается динамика одной пылинки. Концентрация мелких пылинок не меняется в процессе столкновений с крупными частицами, поскольку считается, что при единичном столкновении мелкая пылинка уничтожается полностью, но фрагмент, отколовшийся от крупной пылинки, по размерам соответствует мелкой пыли. Кроме того, при столкновении двух крупных пылинок их размеры принимаются одинаковыми, поскольку в рамках моделей [8, 9] считается, что при столкновении двух пылинок разных размеров меньшая частица всегда разрушается полностью. В дальнейшем планируется переход от рассмотрения динамики одной пылинки к рассмотрению движения ансамбля пылевых частиц, а также к более точному определению распределения их концентраций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-72-20089.

Библиографические ссылки

- [1] *Hirashita H., Lin C.-Y.* Dust abundance and grain size in galaxy halos // ArXiv e-prints. — 2018. 1804.00848.
- [2] *Sethi S. K., Shchekinov Y., Nath B. B.* The Mysterious 6565 Å Absorption Feature of the Galactic Halo // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — Vol. 850. — P. L20. 1711.00476.
- [3] *Irwin J. A., Madden S. C.* Discovery of PAHs in the halo of NGC 5907 // *Astron. and Astrophys.* — 2006. — Vol. 445, № 1. — P. 123–141. astro-ph/0509726.
- [4] *Irwin J. A., Kennedy H., Parkin T., Madden S.* PAHs in the halo of NGC 5529 // *Astron. and Astrophys.* — 2007. — Vol. 474, № 2. — P. 461–472. 0708.3808.
- [5] *Planck Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R. et al.* Planck 2013 results. XI. All-sky model of thermal dust emission // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571. — P. A11. 1312.1300.
- [6] *Shustov B. M., Vibe D. Z.* The sweeping of dust out of the Galaxy // *Astronomy Reports.* — 1995. — Vol. 39. — P. 578–586.
- [7] *Murga M. S., Khoperskov S. A., Wiebe D. S.* Restructuring and destruction of hydrocarbon dust in the interstellar medium // *Astronomy Reports.* — 2016. — Vol. 60. — P. 233–251. 1612.00419.
- [8] *Hirashita Hiroyuki, Yan Huirong.* Shattering and coagulation of dust grains in interstellar turbulence // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 394, № 2. — P. 1061–1074. 0812.3451.

- [9] *Murga M. S., Wiebe D. S., Sivkova E. E., Akimkin V. V.* SHIVA: a dust destruction model // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 488, № 1. — P. 965–977. 1906.11308.
- [10] *Tielens A. G. G. M., McKee C. F., Seab C. G., Hollenbach D. J.* The physics of grain-grain collisions and gas-grain sputtering in interstellar shocks // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 431. — P. 321–340.
- [11] *Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J.* Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 469. — P. 740.
- [12] *Hirashita H.* Shattering by turbulence as a production source of very small grains // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 407. — P. L49–L53. 1006.2187.
- [13] *Jones A. P., Fanciullo L., Köhler M. et al.* The evolution of amorphous hydrocarbons in the ISM: dust modelling from a new vantage point // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A62. 1411.6293.

ПОИСК БЛИЗКИХ СБЛИЖЕНИЙ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИСКЕ ПО ДАННЫМ GAIA EDR3

М. Д. Сизова, С. В. Верещагин
Институт астрономии РАН

С помощью расчетов орбит звезд вокруг центра Галактики проведен поиск пар звезд, сближавшихся на интервале 5 млн лет как в прошлые, так и в будущие эпохи. Найдены пары звезд, минимальное расстояние между которыми может составлять менее 1 пк. Рассмотренный процесс важен для изучения происхождения межзвездных комет.

SEARCHING FOR CLOSE APPROACHES OF THE STARS IN THE GALACTIC DISK WITH GAIA EDR3 DATA

M. D. Sizova, S. V. Vereshchagin
Institute of Astronomy RAS

Using calculations of the orbital motion around the Galactic center we searched for approaching stars on 5 Myr in the past and the future. We provide stars that approached up to 1 pc to each other. Considered process is important for researching the interstellar small bodies origin.

Введение

В случае сближений звезд в процессе их движения в диске Галактики на достаточно малые расстояния вероятны потери объектов из их облаков Оорта. В результате могут появляться межзвездные кометы и астероиды. Этот эффект зависит от минимального расстояния сближения звезд. Расчеты сближений и их частоты проводились в [1–6]. Для Солнца частота сближений ориентировочно может составить одно за 10 млн лет. Формулы для оценки частоты сближений можно найти в [7].

В данной работе с помощью выборки звезд из каталога Gaia EDR3 [8], расположенных на расстоянии до 20 пк от Солнца, рассчитаны минимальное расстояние между звездами d_{min} и соответствующий момент времени t_{min} . Результаты представляют интерес для поиска межзвездных комет.

Описание методики и исходных данных

Из каталога Gaia EDR3 [8] мы выбрали звезды по следующим фильтрам: наличие радиальной скорости RV и параллакс $\rho_x > 50$ mas.

В результате получено 313 звезд с собственными движениями, параллаксами и лучевыми скоростями. Звезды распределены почти равномерно по небесной сфере, имеют нормальное распределение собственных движений, доля звезд с относительными ошибками RV больше 20 % невелика (рис. 1).

Расчет движения звезд в прошлые и будущие эпохи проведен с использованием пакета *galpy* для языка Python [9]. Далее выполнен расчет расстояния между каждой возможной парой звезд на каждом шаге интегрирования, для каждой пары найдены минимальное значение расстояния и соответствующий этому событию момент времени.

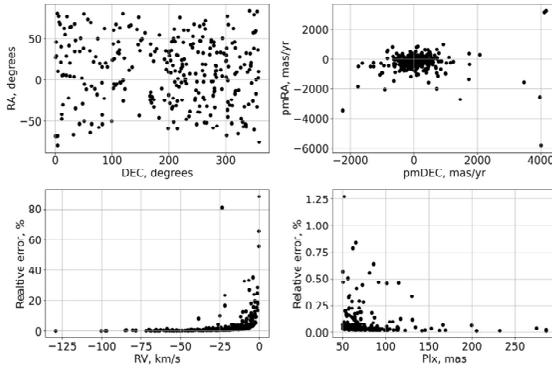


Рис. 1. Основные характеристики нашей выборки звезд. Распределение на небесной сфере, диаграмма собственных движений, относительные ошибки в зависимости от величины лучевой скорости и параллакса

Поиск парных сближений звезд

Расчет расстояний между звездами нашей выборки на настоящий момент времени показал, что 33 звезды находятся на расстоянии до 0.5 пк, что указывает на возможность существования кратных систем. Эти звезды были исключены из списка, и дальнейшие расчеты проводились для оставшихся звезд. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Оценим полноту выборки. Среднее расстояние между звездами в околосолнечной окрестности составляет 2.15 пк [10]. Взяв приблизительно плотность звезд 0.1 пк^{-3} , в пределах 20 пк окажется около 3 400 звезд, т. е. наша выборка охватывает около 10 % всех звезд.

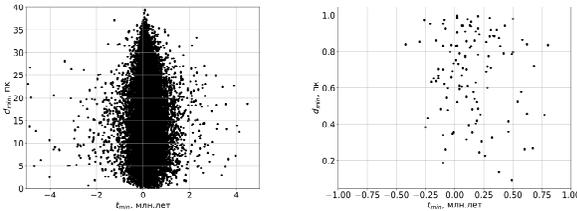


Рис. 2. Минимальное расстояние между парами звезд (левая панель) и для пар с $d_{min} < 1$ пк (правая панель)

Обсуждение результатов

За исследуемый промежуток времени насчитывается 232 сближения на расстоянии до 1 пк. Например, Gaia EDR3 1776317182780536064 и 3737308025029348608 имеют $d_{min} = 0.065 \pm 0.005$ пк, $t_{min} = 0.48 \pm 0.006$ млн лет, Gaia EDR3 778758492243661824 и 1510834911934401152 $d_{min} = 0.19 \pm 0.003$ пк, $t_{min} = -0.09 \pm 0.002$ млн лет. Кроме того,

следует отметить, что некоторые звезды испытывали более одного тесного сближения. Поскольку в нашей работе звезды при интегрировании представляют собой точечные объекты, их орбита остается неизменной после тесного сближения. Таким образом, малая часть полученных сближений является избыточной. Расстояния до 1 пк составляют тысячную долю всех событий сближений. Процесс сближения имеет вероятностный характер, и предельные значения получаемых параметров при интегрировании орбит рассчитываются с помощью многочисленного варьирования исходных данных в пределах их случайных ошибок. Подобная работа выполнена нами в [11], ошибка определения минимального расстояния составляет около 10 %.

В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, CDS, Страсбург, Франция, «Астрономическая база данных SIMBAD» [12], а также данные ESA миссии *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), представленные *Gaia* DPAC <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Авторы благодарны за полезные советы Дж. Бови из Департамента астрономии и астрофизики Университета Торонто, в частности, об использовании пакета *galpy*, и А. В. Тутукову за полезные обсуждения и советы. Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

Библиографические ссылки

- [1] *Torres S., Cai M. X., Brown A. G. A., Portegies Zwart S.* Galactic tide and local stellar perturbations on the Oort cloud: creation of interstellar comets // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 629. — P. A139. 1906.10617.
- [2] *Hoogerwerf R., Bruijne J. H. J. de, Zeeuw P. T. de.* The Origin of Runaway Stars // *Astrophys. J. Lett.* — 2000. — Vol. 544, № 2. — P. L133–L136. [astro-ph/0007436](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0007436).
- [3] *García-Sánchez Joan, Preston Robert A., Jones Dayton L. et al.* Stellar Encounters with the Oort Cloud Based on HIPPARCOS Data // *Astron. J.* — 1999. — Vol. 117, № 2. — P. 1042–1055.
- [4] *García-Sánchez J., Weissman P. R., Preston R. A. et al.* Stellar encounters with the solar system // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 379. — P. 634–659.
- [5] *Bobylev V. V.* Searching for stars closely encountering with the solar system // *Astronomy Letters.* — 2010. — Vol. 36, № 3. — P. 220–226. 1003.2160.
- [6] *Tutukov A. V., Sizova M. D., Vereshchagin S. V.* The evolution of the Solar comet spear in time // *Astronomy Reports.* — 2021. — Vol. 4.
- [7] *Rickman H.* Stellar Perturbations of Orbits of Long-period Comets and their Significance for Cometary Capture // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia.* — 1976. — Vol. 27. — P. 92.
- [8] *Gaia Collaboration.* VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2020. — P. I/350.
- [9] *Bovy Jo.* galpy: A python Library for Galactic Dynamics // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2015. — Vol. 216, № 2. — P. 29. 1412.3451.
- [10] *Ogorodnikov K. F.* *Dinamika zvezdnykh sistem.* — 1958.
- [11] *Sizova M. D., Vereshchagin S. V., Shustov B. M., Chupina N. V.* Solar System Encounters with Open Star Clusters // *Astronomy Reports.* — 2020. — Vol. 64, № 8. — P. 711–721.
- [12] *Wenger M., Ochsenbein F., Egret D. et al.* The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 143. — P. 9–22. [astro-ph/0002110](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002110).

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

О. М. Сюсина, Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

В данной работе на примере ряда астероидов с малыми перигелийными расстояниями приведено исследование влияния выбора состава наблюдений на получаемое значение эффекта Ярковского. Показано, что при исключении наблюдений, не превышающих точность «3 сигма», значение параметра данного эффекта меняется в пределах получаемой точности.

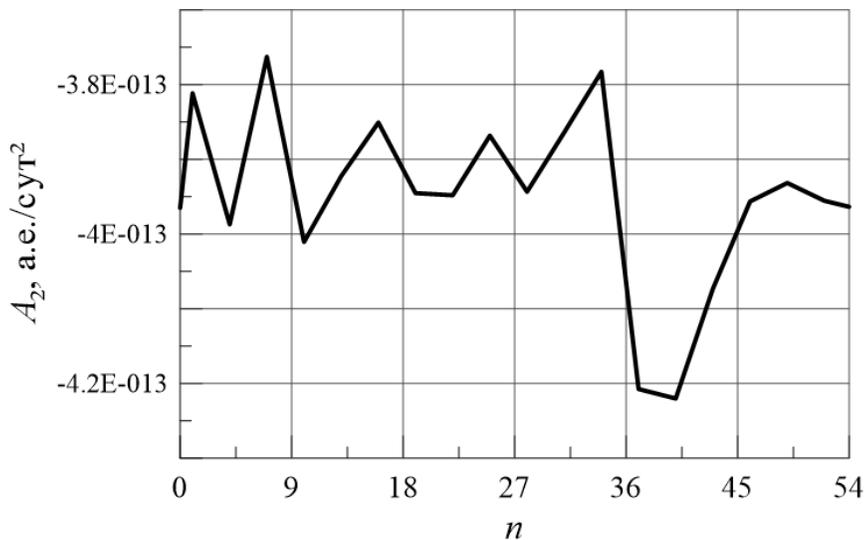
INFLUENCE OF THE SAMPLE OF OBSERVATIONS ON THE DETERMINATION OF THE YARKOVSKY EFFECT PARAMETER

O. M. Syusina, T. Yu. Galushina

Tomsk State University

The paper presents investigation of influence the sample of observations on the determination of the Yarkovsky effect parameter for some asteroids with small perihelion distances. It is shown that when excluding observations that do not exceed the precision of "3 sigma", the value of this effect changes within the obtained precision.

На ноябрь 2020 г. известно 50 астероидов с малыми перигелийными расстояниями (менее 0.15 а. е.). В рамках исследования астероидной опасности изучение данных объектов играет значительную роль вследствие того, что они могут подходить к Земле незаметно со стороны Солнца. Надежное построение начальных доверительных областей, на основе которых, как правило, считают вероятность столкновения объекта с Землей или другими планетами, зависит от точности модели движения. В связи с особенностью орбиты данных объектов на них значительное влияние может оказывать такое малое возмущение, как эффект Ярковского [1, 2]. Для большинства астероидов физические свойства и параметры вращения являются неизвестными, следовательно, определять данный параметр мы можем только из наблюдений. Одним из способов такого определения является включение его в число оцениваемых параметров вместе с координатами и компонентами скоростей [3]. В данной работе мы провели исследование влияния выбора состава наблюдений на полученное значение эффекта Ярковского. Для ряда объектов были получены значения параметра при полном наборе наблюдений, при отбраковке как одиночных наблюдений, так и группы наблюдений. В результате мы получили, что наблюдения, точность которых превышает значение «3 сигма», могут приводить к значительным изменениям получаемого значения. Так, например, для объекта 2018 GG5 исключение одного наблюдения привело к изменению значения параметра с $1.9 \cdot 10^{-9}$ а. е./сут² на $8.8 \cdot 10^{-10}$ а. е./сут², а для 2020 DD с $2.9 \cdot 10^{-10}$ а. е./сут² на $-3.5 \cdot 10^{-10}$ а. е./сут². При исключении наблюдений в пределах точности «3 сигма» значение параметра меняется незначительно, в пределах получаемой точности. Так, на рисунке приведены значения показателя Ярковского A_2 для астероида 2007 PR10 при последовательном исключении каждый раз только одного наблюдения из полной выборки (n — номер исключаемого наблюдения). Наблюдения взяты с сайта малых планет (<https://minorplanetcenter.net>). Значение параметра эффекта Ярковского для данного объекта по всем наблюдениям составляет $-3.96 \cdot 10^{-13} \pm 1.6 \cdot 10^{-13}$ а. е./сут². Таким образом, как видно из рисунка, значение параметра Ярковского в случае различных выборок наблюдений изменяется относительно значения, полученного по полной выборке, в пределах точности $\pm 1.6 \cdot 10^{-13}$ а. е./сут².



Значение параметра эффекта Ярковского для астероида 2007 PR10 в зависимости от состава наблюдений

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Библиографические ссылки

- [1] *Farnocchia D., Chesley S. R., Vokrouhlicky D. V. et al.* Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Icarus*. — 2013. — Vol. 224. — P. 1–3.
- [2] *Galushina T. Yu., Letner O. N.* Influence of the Yarkovsky effect on motion of asteroids with small perihelion distance // *Russian Physics Journal*. — 2020. — Vol. 63(1). — P. 71–78.
- [3] *Galushina T. Yu., Syusina O. M.* Comparative analysis of methods for obtaining the Yarkovsky effect parameter from observations // *Russian Physics Journal*. — 2020. — Vol. 63(3). — P. 420–425.

ИК КОЛЬЦЕВЫЕ ТУМАННОСТИ В ГАЛАКТИКАХ МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ И М33

А. П. Топчиева

Институт астрономии Российской академии наук

Изучение образования массивных звезд в нашей и других галактиках является одной из возможностей связать информацию, полученную для областей звездообразования в целом. В данной работе представлены статистические и теоретические данные по инфракрасным кольцевым туманностям (ИККТ) в Галактике и галактике М33, которая расположена недалеко от нас и в картинной плоскости удобна для выделения отдельных объектов.

В данной работе показаны сравнения потоков для 258 комплексов звездообразования в М33, внегалактических комплексов звездообразования и для ИККТ в нашей Галактике. Проведен теоретический расчет распределения полициклических ароматических углеводородов с использованием программы DustEM.

IR RING NEBULAE IN THE MILKY WAY AND M33 GALAXIES

A. P. Topchieva

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Studying the formation of massive stars in our Galaxy and in other galaxies is one of the possibilities to connect the information obtained for the regions of star formation in general. This study presents statistical and theoretical data on infrared ring nebulae (IRRN) in our Galaxy and the galaxy M33, which is located not far from us and in the plane of sky, which is convenient for selecting individual objects.

In this paper, comparisons of fluxes for 258 star-forming complexes in M33, extragalactic of star formation complexes, and for IRRN in our Galaxy are shown. A theoretical calculation of the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons using DustEM has been carried out.

Введение

Исследование звездообразования является одной из актуальнейших проблем современной астрофизики, особое место в ней занимает изучение образования массивных звезд. Мы все еще далеко не полностью представляем себе процесс формирования этих объектов, что в значительной степени связано с недостатком наблюдательных данных. Однако в последнее время совершенствование наземных и космических инструментов позволяет получать все более детальную информацию об областях образования массивных звезд. Одним из относительно недавних открытий стало обнаружение большого числа инфракрасных кольцевых туманностей (ИККТ), возникающих в результате взаимодействия молодых массивных звезд с веществом родительского молекулярного облака. Моделирование этих объектов, с одной стороны, открывает путь к выявлению основных закономерностей процесса образования массивных звезд, но, с другой стороны, требует учета большого количества физических процессов, происходящих в их окрестностях.

Сравнительно простая морфология ИККТ означает, что по крайней мере некоторые из них можно исследовать при помощи одномерных газодинамических моделей, однако

для детального сравнения результатов моделирования с данными наблюдений необходимы составление и анализ максимально широкой выборки «эталонных» туманностей, которые находились бы на разных эволюционных стадиях, создавались бы звездами разных спектральных классов и пр.

Помимо этого такие же объекты, как ИККТ, можно наблюдать как комплекс звездообразования (КЗО) массивных звезд в других галактиках. Сопоставление информации по ИККТ и КЗО поможет провести сравнение образования звезд и выявить общие законы, в том числе для эволюции межзвездного вещества.

В данной работе представлен краткий обзор статистических данных по инфракрасным наблюдениям для внегалактических КЗО и для ИККТ в нашей Галактике. Показаны результаты расчетов кода DustEM, которые представляют собой карты распределения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в КЗО NGC 604 галактики М33. Внутри практически всех колец или арок излучения на 8 мкм наблюдается излучение на 24 мкм. Это излучение обычно объясняется тепловым излучением пыли, так как в этом диапазоне нет сильных молекулярных линий. Традиционно считается, что в излучении на 8 мкм проявляют себя главным образом ПАУ, а в более длинноволновом диапазоне — крупная холодная пыль. Поэтому карты распределения пыли, в том числе и ПАУ, помогут понять, как пыль распределена в галактических и во внегалактических областях звездообразования.

Результаты расчетов ИК-потоков и ПАУ по нашей Галактике и М33

В ходе наблюдений на космических ИК-телескопах Spitzer, WISE, Akari и Herschel в нашей Галактике было открыто более 8 000 ИККТ [1–5], которые выглядят как замкнутые или разомкнутые кольцевые структуры и связаны с рождением массивных звезд классов O–B [1, 2]. Последние исследования других галактик, в частности М33, показали, что существуют КЗО, которые также связывают с объектами формирования звезд. Статистический анализ таких объектов может помочь выявить общие свойства в формировании звезд как в нашей, так и в других галактиках. За основу анализа данных были взяты инфракрасные потоки по данным космических телескопов для расчета потоков теплового излучения пыли в ИККТ и МЗО. ИК-потоки рассчитывались на длинах волн 8, 24, 70 и 160 мкм как для нашей галактики, так и для 258 КЗО в М33. Показано (рис. 1), что потоки согласуются с предсказанием согласно критериям [5] ($[F_{24}/F_8] < 1.0$, $[F_{70}/F_{24}] > 0.8$, $[F_{160}/F_{24}] > 0.8$, $[F_{160}/F_{70}] > -0.2$) и относятся к ИККТ, однако имеются и объекты, которые выходят за границу, предложенную в [5]. Это может быть связано с тем, что в выборке [5] присутствуют объекты, у которых плохо разрешается морфологическая структура.

Было проведено сравнение расчетов с работой [6] для внегалактических объектов и обнаружены отличия в показателях цвета $[F_{24}/F_8]$; $[F_{160}/F_{70}]$; $[F_{70}/F_8]$; $[F_{160}/F_{24}]$ (рис. 1, 6). У объектов из нашей выборки они оказываются существенно выше, чем в работе [6]. Эти отличия вызваны применением разных процедур вычитания фона в работах [6, 7] — процедура для точечного источника, поскольку внегалактические объекты пространственно неразрешимы в данной работе.

Помимо этого, на основе наблюдательных данных и рассчитанных потоков с использованием программного кода DustEM, были построены теоретические карты распределения ПАУ. Размер пылинок и их состав взяты из работ [8–10]. На рис. 2 представлены карты распределения излучения на 8 мкм, которое связывают с излучением ПАУ слева. Справа — распределение ПАУ в NGC 604 с учетом излучения на 24, 70 и 160 мкм (см. работу [8]).

В дальнейшем планируется применить отработанную методику для сравнения наблю-

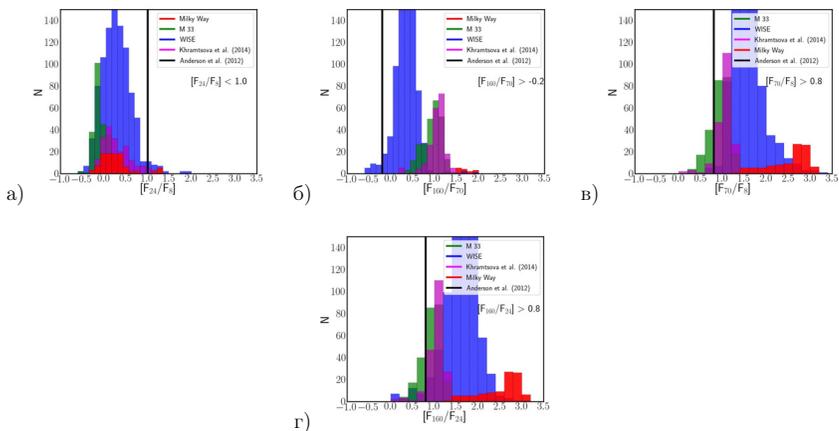


Рис. 1. Показатели цвета ИККТ. Фиолетовым цветом показаны данные для внегалактических КЗО [6]; красным цветом — данные для 99 объектов, представленных в нашей Галактике; зеленым — для 258 КЗО в М33; синим — для ИККТ из каталога WISE; вертикальными линиями — границы между областями ИИ и планетарными туманностями согласно [5]: а — $[F_{24}/F_8]$; б — $[F_{160}/F_{70}]$; в — $[F_{70}/F_8]$; г — $[F_{160}/F_{24}]$

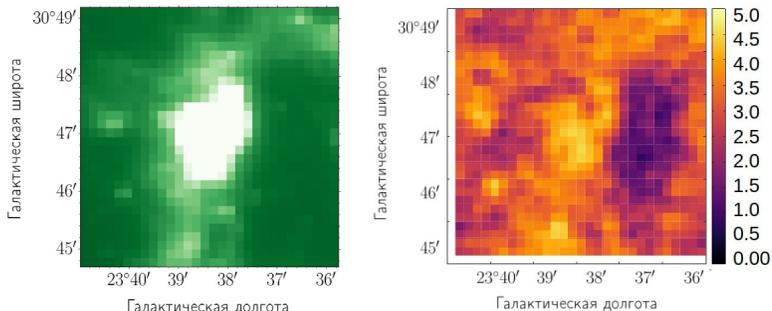


Рис. 2. Карта распределения инфракрасного излучения на 8 мкм (слева) и доля ПАУ (справа) в КЗО NGC 604 галактики М33

даемых параметров для ИККТ не только сферически-симметричной формы, но и для туманности S255, которая имеет сложную морфологию, но является комплексом звездообразования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-02-00643 А. Также данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Библиографические ссылки

- [1] *Churchwell E., Povich M. S., Allen D. et al.* The Bubbling Galactic Disk // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 649, № 2. — P. 759–778.
- [2] *Churchwell E., Watson D. F., Povich M. S. et al.* The Bubbling Galactic Disk. II. The Inner 20° // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 670, № 1. — P. 428–441.
- [3] *Anderson L. D., Bania T. M., Balser Dana S. et al.* The WISE Catalog of Galactic H II Regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2014. — Vol. 212, № 1. — P. 1. 1312.6202.
- [4] *Bufano F., Leto P., Carey D. et al.* First Extended Catalogue of Galactic bubble infrared fluxes from WISE and Herschel surveys // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 473, № 3. — P. 3671–3692. 1711.06263.
- [5] *Anderson L. D., Zavagno A., Deharvang L. et al.* The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A10. 1203.5721.
- [6] *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Ya. N.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 431, № 2. — P. 2006–2016. 1302.4837.
- [7] *Topchieva A. P., Wiebe D. S., Kirsanova M. S., Krushinskiĭ V. V.* Infrared Morphology of Regions of Ionized Hydrogen // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61, № 12. — P. 1015–1030. 1801.08204.
- [8] *Draine B. T., Li Aigen.* Infrared Emission from Interstellar Dust. IV. The Silicate-Graphite-PAH Model in the Post-Spitzer Era // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 657, № 2. — P. 810–837. astro-ph/0608003.
- [9] *Compiègne M., Verstraete L., Jones A. et al.* The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 525. — P. A103. 1010.2769.
- [10] *Compiègne M., Verstraete L., Jones A. et al.* DustEM: Dust extinction and emission modelling. — 2013. 1307.001.

**ПЕРВЫЕ ШАГИ К КАРТИРОВАНИЮ ЭКЗОПЛАНЕТ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ И ПОИСК
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИНФРАКРАСНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЯРКОСТИ**

А. А. Федотов¹, Г. М. Карелин²

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет,*

² *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН*

С целью обнаружения неоднородностей собственного излучения экзопланеты HD209458b по наблюдениям космического телескопа Spitzer проведены обработка и моделирование кривых блеска вторичных транзитов (затмений). Работа является основой для последующего картирования распределения температуры на дневной стороне этой внесолнечной планеты. Неравномерность яркости вызвана звездно-планетными взаимодействиями, а также климатическими механизмами. Глубина затмения составила $0.101 \pm 0.009\%$ от общего блеска системы и согласуется с результатами других работ.

**FIRST STEPS TO MAPPING OF EXOPLANETS: MODELING SECONDARY
ECLIPSES AND SEARCH INHOMOGENEITIES IN THE INFRARED
BRIGHTNESS PROFILES**

A. A. Fedotov¹, G. M. Karelin²

¹ *St. Petersburg State University, the Department of Celestial Mechanics,* ² *The Central
Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo*

To detect inhomogeneities in the thermal radiation of exoplanet HD209458b, based on observations of the Spitzer space telescope processing and modeling of the light curves of secondary transits (eclipses) were carried out. Current work is the basis for the mapping of the temperature distribution on the dayside of the exoplanet. Tidal and electromagnetic star-planet interactions, together with climate effects, lead to nonuniform heating of the surface. We obtained that the depth of the eclipse was $0.101 \pm 0.009\%$ of the total flux of the system and is consistent with the results of other works.

Введение

На сегодняшний день научному сообществу известно более 3300 транзитных экзопланет. Геометрия орбит большинства из них определяет наличие не только первичного транзита (прохождения), но и вторичного затмения, во время которого экзопланета проходит за звездой. Затмения позволяют уточнять элементы орбит уже обнаруженных внесолнечных планет и искать новые, — при определенных параметрах орбиты возможно наличие затмения при отсутствии транзита. Однако текущая фотометрическая точность делает детектирование затмений сложной задачей. Такой класс экзопланет, как горячие юпитеры, характеризуется большими размерами и высокой температурой, а следовательно, высокой светимостью. Поэтому подобные экзопланеты являются удобными кандидатами для наблюдений не только прохождений, но и затмений, проявляющихся как падения блеска. Заход планеты за звезду позволяет провести сканирование распределения яркости по ее диску для последующего построения карты. Нахождение планеты в приливном захвате со

звездой приводит к значительному нагреву ее дневной стороны. Из-за атмосферных механизмов наиболее нагретая область планеты (горячее пятно) смещается от направления на звезду из центра планеты. Основной задачей данного этапа работы является моделирование вторичного затмения с целью обнаружения смещения горячего пятна. В дальнейшем планируется построить карту температур на основе полученной информации.

Обработка наблюдательных данных

Поскольку температуры горячих юпитеров ниже звездных (хотя и могут превышать 1000 K), для проведения исследования был выбран инфракрасный диапазон, на который приходится максимум излучения подобных температур, а именно данные в полосе 3.6 мкм инструмента IRAC космического телескопа Spitzer. Кроме того, в связи с низкой отражательной способностью горячих юпитеров в этом диапазоне рассматривалось только собственное излучение нагретой планеты. Предобработанные данные (BCD; Basic Calibrated Data) телескопа Spitzer находятся в открытом доступе (<https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>) и включают в себя учет различных инструментальных эффектов, кадров темнового шума и плоского поля. Также данные уже привязаны к небесным координатам и значения на них переведены в единицы MJy/cr.

В качестве объекта исследования была выбрана экзопланета HD209458b, так как ее орбита является почти круговой, что упрощает моделирование. Для нее имеется 14 наблюдений затмений в полосе 3.6 мкм. В дальнейшем планируется рассмотреть другие системы.

Обработка данных производилась при помощи пакетов `astropy` [1] и `photutils` [2]. Для получения кривых блеска проводилась апертурная фотометрия. Основной принцип состоит в суммировании значений интенсивности пикселей внутри некоторой области. Часто область ограничивается окружностью из пикселей. Размер апертуры берется таким, чтобы уменьшить влияние ближайших деталей изображения и наиболее точно измерить яркость объекта наблюдения. Не весь свет объекта попадает в апертуру, так как профиль распределения яркости по кадру имеет протяженные крылья.

В имеющихся данных на кадре находится только одна яркая звезда. Поэтому делается предположение, что яркость звезды постоянна, а изменение потока связано лишь с затмением экзопланеты. Важно изменение яркости внутри только одного затмения. Предполагается, что функция рассеяния точки в пределах одной серии наблюдений неизменна, что для космического телескопа выглядит более правдоподобно, чем для наземного. Из полученного потока вычитается фон. Для него выбираются пиксели в некотором кольце вокруг звезды. Далее находится медиана значений пикселей в этой области и вычитается из апертуры с домножением на ее площадь.

Моделирование и используемые приближения

В основе использованной модели затмения лежит приближение равномерно светящегося диска из работы [3]. Модель описывает излучение объекта с учетом его частичного или полного закрытия от наблюдателя другим объектом. Яркость видимой части экзопланеты в этом случае пропорциональна площади диска, поток от которой не перекрыт.

Мы исходим из предположения, что во время затмения планета движется равномерно по прямой линии с некоторым прицельным параметром относительно центра диска звезды. Момент центра вторичного затмения, прицельный параметр, скорость движения планеты и отношения радиусов планеты и звезды рассчитывались при помощи данных из статьи [4].

Полная светимость системы складывалась из светимости экзопланеты и звезды. Наблюдаемая кривая блеска зависела от короткопериодической переменности и активности

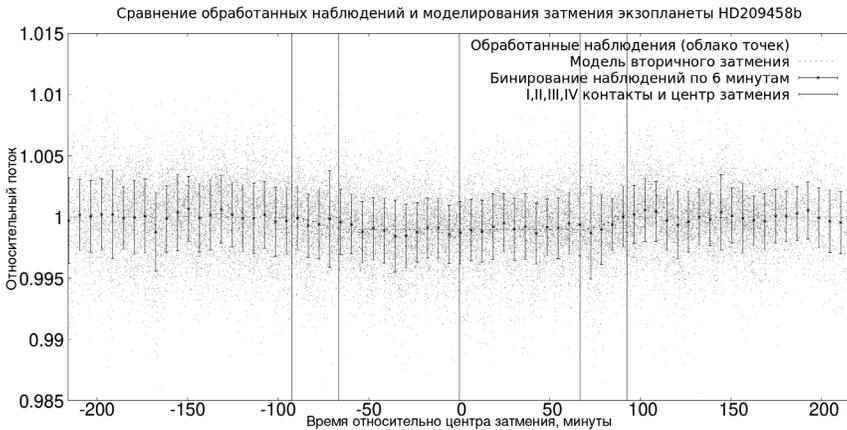
звезды. Для снижения их влияния временной ряд кривой блеска, включающий момент затмения, но существенно его превышающий, аппроксимируется многочленом пятой степени. После вычитания многочлена полученный временной ряд содержит шум звезды, шум приемника и искомый сигнал — падение блеска из-за затмения.

В связи с тем что поток от звезды в полосе 3.6 мкм на три порядка больше, чем от планеты [5], отношение потока планеты к потоку звезды можно заменить на отношение потока планеты к суммарному потоку.

Определение параметров модели проводится с использованием метода наименьших квадратов. Коэффициенты многочленов, моделирующих звездную активность, подбирались отдельно для каждого затмения, а доля потока от планеты в общем потоке и смещение центра затмения — относительно расчетного для всех. Решение этой задачи происходило по аналогии с работой [6]. Для реализации метода наименьших квадратов использовалась функция `optimize.curve_fit` из пакета `scipy` [7]. Периодическая компонента шума была убрана при помощи преобразования Фурье, оставшийся шум дополнительно сглажен бинированием.

Разработанный код, а также подробное описание алгоритмов моделирования и подбора параметров находятся в свободном доступе: <https://github.com/dosidicus-deprimas/HD209458b>

Заклучение



Графические результаты моделирования

Проведена фотометрия для 14 затмений HD209458b. По полученным данным была построена модель, включающая в себя моделирование всех обработанных наблюдений. В результате были получены смещение времени центра затмения (1.64 ± 1.29 мин) и отношение светимостей планеты и звезды ($0.101 \pm 0.009\%$). Погрешности оценок, вероятно, занижены, так как при их вычислении предполагалось, что шум является белым. Отношение яркостей согласуется с данными, полученными в статье [5].

В конечном итоге было проведено бинирование невязок модели. Оно показало, что существующих данных недостаточно для выявления использованным методом значительных

неоднородностей при затмении HD209458b. Зафиксированное отклонение момента центра затмения находится в пределах погрешности и может быть объяснено орбитальными характеристиками планеты. Данные других работ [8] свидетельствуют о том, что неоднородность может быть слишком мала, чтобы ее надежно зафиксировать при полученных погрешностях. Для продолжения работы и поиска неоднородностей во время захода планеты за диск звезды и выхода из-за него необходимы тщательное моделирование небелого (цветного) шума и дополнительные наблюдения.

Библиографические ссылки

- [1] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A Community Python Package for Astronomy. — Vol. 558. — P. A33.
- [2] *Bradley Larry, Sipocz Brigitta, Robitaille Thomas et al.* astropy/photutils: v0.6. — 2019.
- [3] *Baluev R. V., Shaidulin Vakhit Sh.* Analytic models of the Rossiter-McLaughlin effect for arbitrary eclipser/star size ratios and arbitrary multiline stellar spectra // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 454, № 4. — P. 4379–4399. 1506.01874.
- [4] *Bonomo A. S., Desidera S., Benatti S. et al.* The GAPS Programme with HARPS-N at TNG . XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 602. — P. A107. 1704.00373.
- [5] *Evans Thomas M., Aigrain Suzanne, Gibson Neale et al.* A uniform analysis of HD 209458b Spitzer/IRAC light curves with Gaussian process models // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — Vol. 451, № 1. — P. 680–694. 1504.05942.
- [6] *Baluev R. V., Sokov E. N., Hoyer S. et al.* WASP-4 transit timing variation from a comprehensive set of 129 transits // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. 2004.09109.
- [7] *Virtanen Pauli, Gommers Ralf, Oliphant Travis E. et al.* SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. — 2020. — Vol. 17. — P. 261–272.
- [8] *Burrows A., Rauscher E., Spiegel D. S., Menou K.* Photometric and Spectral Signatures of Three-dimensional Models of Transiting Giant Exoplanets // Astrophys. J. — 2010. — Vol. 719, № 1. — P. 341–350. 1005.0346.

**ПРОГРАММА LINEVIEWER ПАКЕТА ASTRO SPACE LOCATOR (ASL)
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ И ОБРАБОТКИ УСРЕДНЕННЫХ СПЕКТРОВ**

М. А. Щуров, А. Г. Рудницкий

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Представлены описание и демонстрация работы программы **LineViewer**, ориентированной на первичную обработку спектров галактических и внегалактических мазеров и визуализацию данных наблюдений, полученных с участием космического радиотелескопа SRT-10 (проект «Радиоастрон»). **LineViewer** написана на языке C++ и предназначена для корректировки полосы пропускания сигнала, построения и анализа усредненных по времени и частоте интерференции спектров мазерных источников и отождествления мазерных спектральных линий. Программа **LineViewer** позволяет быстро провести анализ промежуточного результата и его корректировку, чтобы получить релевантные параметры для улучшения или обнаружения корреляции в спектральных линиях.

**LINEVIEWER — PROGRAM OF THE ASTRO SPACE LOCATOR (ASL)
PACKAGE FOR CONSTRUCTING AND PROCESSING AVERAGED
SPECTRA**

M. A. Shchurov, A. G. Rudnitskiy

Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute

LineViewer program operation a description and demonstration is presented. It is focused on the galactic and extragalactic masers primary spectra processing and visualization of observational data obtained with the SRT-10 space radio telescope (the “Radioastron” project). **LineViewer** is written in C++ and is intended for correcting the signal bandwidth, constructing and analyzing the maser sources spectra averaged over time and fringe rate, and identifying maser spectral lines. The **LineViewer** software allows to analyze quickly the intermediate result and adjust it to obtain the relevant parameters for improving or detecting the correlation in spectral lines.

Представлено описание и демонстрация работы программы **LineViewer** [1], ориентированной на первичную обработку спектров галактических и внегалактических мазеров и визуализации данных наблюдений, полученных с участием космического радиотелескопа SRT — 10 м (проект «Радиоастрон», см. [2], <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>). Программа создана в рамках специального пакета ASL (Astro Space Locator) в числе подпрограмм, разработанных в АКЦ ФИАН с целью организации наиболее оптимальной работы собственного коррелятора, обслуживающего проект. **LineViewer** написана на языке C++ и предназначена:

- для корректировки полосы пропускания сигнала;
- построения и анализа усредненных по времени и частоте интерференции спектров мазерных источников;
- отождествления мазерных спектральных линий и поиска корреляции сигналов.

Необходимость корректировки полосы связана с тем, что в процессе корреляции именно мазерных наблюдений для ускорения процесса обработки важно иметь информацию о том, какую часть полосы следует коррелировать. Поскольку корреляционный отклик дает только та часть полосы, которая содержит мазерные линии, уширение полосы «шумовыми» данными ухудшает корреляционный отклик, что критично для наблюдений с низким соотношением «сигнал / шум» и характерно для 10-м орбитального радиотелескопа. Поиск «корреляционного лепестка» в мазерных данных значительно упрощается при выборе нужного участка полосы наблюдений. Для ускорения работы необходимо, чтобы соответствующая процедура проводилась быстро и наглядно, в удобном графическом интерфейсе, с использованием непосредственного визуального анализа корректности проведения этой процедуры в интерактивном режиме.

Программа **LineViewer** позволяет существенно оптимизировать процесс корреляции для сеансов мазерных интерферометрических наблюдений и, как следствие, ускорить предоставление доступа научному сообществу к наблюдательным данным. Корректировка формы полосы в рамках разработанной программы может производиться различными способами, например, при помощи шумового спектра или полинома заданной степени в указанном диапазоне частот. Для улучшения возможностей в отождествлении спектральных линий дополнительно выполняются нормировка спектра, аппроксимация спектральных линий суммой функций Гаусса в количестве, не более указанного максимального числа компонентов, и расчет скоростей спектральных линий на луче зрения V_{LSR} с точностью не хуже 60 м/с.

Для анализа усредненных спектров, т. е. скалярного и векторного усреднения спектров по частоте интерференции или времени, **LineViewer** предоставляет возможность производить поиск интерференционного отклика на двумерной диаграмме «Fringe Rate — Frequency» («Частота интерференции — частота») как визуально, так и программными методами. Можно выбрать на этой диаграмме область, для которой будет построен усредненный авто- или кросскорреляционный спектр для дальнейшего анализа. Важным достоинством и очевидным успехом использования данной программы стало существенное сокращение количества промежуточных циклов запуска коррелятора, что обеспечило более быстрый доступ пользователей к анализу астрофизических результатов. Она была успешно применена на практике при обработке сеансов наблюдений в рамках проекта «РадиоАстрон» на корреляторе АКЦ ФИАН, в ходе которой для ряда мазерных сеансов с ее помощью визуально оценивалось качество поправок, определялось соотношение «сигнал / шум», фаза сигнала (т. е. присутствие корреляции) и была найдена корреляция как на наземных, так и на наземно-космических базах.

Библиографические ссылки

- [1] *Шуров М. А., Авдеев В. Ю., Гурин И. А. и др.* Программа Lineviewer пакета Astro Space Locator (ASL) для построения и обработки усредненных спектров // Краткие сообщения по физике. — 2019. — № 4. — С. 38–45.
- [2] *Kardashev N. S., Khartov V. V., Abramov V. V. et al.* “RadioAstron”-A telescope with a size of 300 000 km: Main parameters and first observational results // Astronomy Reports. — 2013. — Vol. 57. — P. 153–194.

NGC 2071 В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ «РАДИОАСТРОН»: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАЗЕРНЫХ ПЯТЕН H₂O

М. А. Щуров, И. Е. Вальтц, Н. Н. Шахворостова

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

В рамках научной программы интерферометра «Радиоастрон» обработаны данные наблюдений мазера H₂O на частоте 22.2280 ГГц в туманности NGC 2071. В наблюдениях принимали участие космический радиотелескоп (КРТ — 10 м) и три радиотелескопа наземной сети: РТ — 32 м (Медицина, Италия), РТ — 32 м (Торунь, Польша) и РТ — 64 м (Калязин, РФ). Получена карта распределения мазерных пятен, где присутствуют 13 пространственных компонентов в интервале $V_{LSR} = (4.7–20.5)$ км/с. Зафиксирован компонент ($V_{LSR} = 14.3$ км/с), для которого на наземно-космических базах наблюдается корреляция. На основании анализа зависимости функции видности от величины проекции баз предложена двухкомпонентная модель пространственной структуры этого компонента с размерами протяженной и компактной составляющей 4 и 0.06 мс, т. е. 1.56 и 0.023 а. е. соответственно.

VLBI RESEARCH IN THE "RADIOASTRON" PROJECT: STRUCTURE OF THE H₂O MASER IN NGC 2071 IRS 1

М. А. Shchurov, I. E. Valtts, N. N. Shakhvorostova

Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute

Within the Radioastron interferometer scientific program, observational data of the H₂O maser at a frequency of 22.2280 GHz in the NGC 2071 nebula were processed. A space radio telescope (SRT — 10 m) and three radio telescopes of the ground network: RT — 32 m (Medicina, Italy), RT — 32 m (Torun, Poland) and RT — 64 m (Kalyazin, RF) took part in the observations. A map of the maser spot distribution has been obtained, where there are 13 spatial components with V_{LSR} in the range 4.7 — 20.5 km/s. Correlation is observed on ground-space baselines for the component on $V_{LSR} = 14.3$ km/s. Based on the visibility function dependence analysis from the baseline projection values, there was proposed a two-component model of this component spatial structure with the dimensions of the extended and compact constituent of 4 and 0.06 msec, i.e. 1.56 and 0.023 au, respectively.

Область звездообразования NGC 2071 в созвездии Ориона была одной из основных целей исследований межзвездных мазеров H₂O в рамках международной космической миссии РадиоАстрон (<http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>).

Два скопления вокруг молодых источников NGC 2071 IRS 1 (более развитый) и NGC 2071 IRS 3 (менее развитый) наблюдались ранее на частоте 22 ГГц в радиоконтинууме и в мазерном излучении воды между уровнями 6₁₆ — 5₂₃ вращательных переходов. Мазеры на молекулах воды, джеты, крупномасштабное истечение и предпологаемый компактный протозвездный диск прослеживаются в обоих источниках (см., например, [1] и ссылки в этой работе).

70-минутный сеанс наблюдений проводился 11 января 2014 г. с использованием 10-м космического радиотелескопа (КРТ) и наземной сети, состоящей из 64-м радиотелескопа в г. Калязин (Московская область, Россия), 32-м радиотелескопа в г. Торунь (Польша) и 32-м радиотелескопа в г. Медицина (Италия). Наблюдения проводились на частоте мазера H₂O 22.2280 ГГц с полосой регистрации 16 МГц (~215 км/с).

Наземно-космические базы интерферометра обеспечивали угловое разрешение 70 мкс (при максимальных проекциях баз ~ 2.9 ED, т. е. $\sim 40\,000$ км), синтезированная диаграмма направленности наземной части интерферометра составляла $0.006 \times 0.0006''$ для позиционного угла P.A. = -23 .

В качестве фазового центра использовались координаты источника NGC 2071 IRS 1: RA(2000) = $05^h 47^m 04^s.758$, DEC(2000) = $00^\circ 21' 42.700''$.

Первичная обработка данных с использованием экспресс-программы LineViewer проводилась на FX-корреляторе АКЦ ФИАН (Москва, РФ) в полосе 16 МГц (~ 215 км/с) с использованием 2048 каналов, что обеспечивало разрешение по частоте 7.81 кГц (0.11 км/с).

Лепестки обнаружены на всех наземных базах. Анализ структуры источника, наблюдаемой с помощью наземной сети (калибровка и построение изображений), был выполнен с помощью стандартных задач пакетов AIPS (Astronomical Image Processing System <http://www.aips.nrao.edu>) и для гауссовой аппроксимации профиля спектральных линий — CLASS (<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>). Калиброванные по амплитуде авто- и кросскорреляционные спектры были получены с помощью задачи ANTAB. Калибровка фазы проводилась с помощью задачи FRING относительно одной из самых сильных и наиболее удаленных от центральной части спектра детали на скорости на луче зрения 20.5 км/с. Получены изображения 13 мазерных пятен в шести спектральных деталях кросс-спектров (уровень надежности — 6σ).

Размер области, занимаемый этими компонентами, составляет $\sim 100 \times 100$ мс дуги, или $\sim 40 \times 40$ а. е. при расстоянии до туманности 390 пк, т. е. примерно размер Солнечной системы. Плотность коррелированного потока $F\nu$ варьируется от ~ 4 до ~ 29 Ян и для всех компонентов совпадает с величиной $F\nu/\text{beam}$, т. е. все компоненты точечные в пределах диаграммы. Интервал пространственных компонентов, для которых получены изображения, составляет 4.7–20.5 км/с при ширине спектральных деталей по половине мощности интенсивности 0.2–0.6 км/с.

Для обнаружения сверхкомпактных структур со сверхвысоким угловым разрешением, которое обеспечивается базами Космос–Земля, коррелированные данные были проанализированы с использованием программы PIMA (<http://astrogeo.org/pima/>) для поканального анализа. Корреляция на уровне надежности 6σ была обнаружена на космической базе (2.9 ED) между радиотелескопами SRT-Medicina и SRT-Torun и только для одной спектральной детали на $V_{LSR} = 14.3$ км/с.

Анализируя поведение функции видности в зависимости от проекций баз Космос–Земля и наземных баз для этого мазерного пятна на $V_{LSR} = 14.3$ км/с, было показано, что наилучшее приближение достигается в двухкомпонентной модели, состоящей из двух составляющих мазерного излучения — протяженной и компактной (в предположении сферически симметричной структуры пространственных компонентов). Получены оценки размеров этих составляющих соответственно 1.56 а. е. (что сопоставимо с размером орбиты Земли) с погрешностью 30 % и 0.023 а. е. (примерно размер небольших звезд типа Солнца) с погрешностью 50 %.

Библиографические ссылки

- [1] *Trinidad M. A., Rodríguez T., Rodríguez L. F.* Radio jets and disks in the intermediate-mass star-forming region NGC2071IR // The Astrophysical Journal. — 2009. — Vol. 706, № 1. — P. 244–251.

Список участников конференции



ФИО	Организация	E-mail
Šteinbergs Jāanis	VIRAC	janis.steinbergs@venta.lv
Аберфельдс Артис	VeA	artis.aberfelds@venta.lv
Авдошев Виктор Анатольевич	ТТУ	scharmn@mail.ru
Авгашева Анастасия Андреевна	ИНАСАН	nastyaaiv@gmail.com
Аль-Шиблави Омар Назих Мутлаг	УрФУ	themyth_24@yahoo.com
Балакина Елена Алексеевна	МГУ	elena@balakin.ru
Балуев Роман Владимирович	СПбГУ	r.baluev@spbu.ru
Балыев Иван Алексеевич	СПбГУ	balasteravan@yandex.ru
Баньдикова Мария Александровна	ТТУ	mba-tomsk@mail.ru
Бартая Нолари Вахтагович	ЧелГУ	nody.email@gmail.com
Биккулова Динара Александровна	ГАО РАН	rasi304@yandex.ru
Бордющица Татьяна Валентиновна	ТТУ	tvbord@sibmail.com
Борщова Екатерина Владимировна	ИНАСАН	kath@inasan.ru
Бражко Варвара Валерьевна	УрФУ	bragko12@mail.ru
Бутузова Марина Сергеевна	КрАО РАН	mbutuzova@cracrimera.ru
Вальц Ирина Евгеньевна	АКЦ ФИАН	ivalts@asc.rssi.ru
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	vasilyeva.maria@urfu.ru
Васонин Антон Иванович	УрФУ	anton.vasyunin@gmail.com
Вахитов Ринат Фаритович	ЧелГУ	R_T_X@mail.ru
Верещатин Сергей Викторович	ИНАСАН	svvs@ya.ru
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Галушина Татьяна Юрьевна	ТТУ	tanastra@ixt.ru
Гималиева Алина Дамировна	УрФУ	alina.gimalieva@mail.ru
Горбачев Марк Андреевич	КФУ	mark-gorbachev@rambler.ru
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	Stanislav.Gorda@urfu.ru
Гусев Владислав Денисович	УрФУ	Vlad06gusev@gmail.com
Демипова Наиля Рафаэлевна	КФУ	nellyrd@mail.ru
Дремов Владимир Владимирович	РФЯЦ—ВНИИТФ	V.V.Dryomov@vniitf.ru
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ—ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дроздов Сергей Александрович	АКЦ ФИАН	sai.drozhdov@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Ерохина Анастасия Ивановна	УрФУ	libknexter@mail.ru
Жу Жулина Елена Анатольевна	КрАО РАН	zhuzhulina.alena@yandex.ru
Жукович Глеб Сергеевич	УрФУ	zhuklevich.gleb@gmail.com
Жучиков Роман Яковлевич	КФУ	gjgalen@yandex.ru
Зозуля Виктор Дмитриевич	СПбГУ	viktor-zozulya@yandex.ru
Калинина Наталья Дмитриевна	УрФУ	natalia.kalinina@urfu.ru8
Калничева Евгения Сергеевна	ИНАСАН	good2jane@gmail.com
Каргальцева Наталья Сергеевна	ЧелГУ	kargaltseva@mail.ru
Карелин Георгий Михайлович	ГАО РАН	kaeregosh@yandex.ru
Карташова Анна Петровна	ИНАСАН	akartashova@inasan.ru
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Кискин Михаил Юрьевич	УрФУ	kiskin_m@mail.ru
Колесников Владимир Иванович	ГАОУКСО «УГТЭ»	vi_20@mail.ru
Корнева Галина Ивановна	УрФУ	gkor70@yandex.ru
Корнилов Матвей Александрович	ГАОУ ИШ МГУ	matwey@sai.msu.ru
Корогаева Марина Георгиевна	УрФУ	korotacvang@mail.ru
Корчагина Елена Павловна	КФУ	belkalenka2010@yandex.ru
Кривенко Александр Сергеевич	КрАО	krivenko86@yandex.ru
Кругилов Николай Александрович	АО УрФУ	nick@imp-uran.ru
Кузин Алексей Вячеславович	МГУ	alv.kuzin@gmail.com
Кузнецов Данила Александрович	УрФУ	ruskynets@mail.ru
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	УрФУ	eduard.kuznetsov@urfu.ru
Кузьмина Валентина Александровна	УрФУ	valekuzmina35@yandex.ru
Кулеп Максим Вячеславович	УрФУ	mv.kulesh@yandex.ru
Лаврухина Анастасия Дмитриевна	МГУ	lavruklima.ad@gmail.com
Ладейщиков Дмитрий Антонович	УрФУ	dmitry.ladeyschikov@urfu.ru
Левейская Татьяна Иосифовна	УрФУ	t.i.levitckaya@urfu.ru
Левкина Полина Анатольевна	ИНАСАН	ayvazovskaya@inasan.ru
Летнер Оксана Никитична	ТГУ	oksana.letner@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Лисин Данил Денисович	МГУ	Lisitsin_2000@mail.ru
Ляпина Дарья Леонидовна	УрФУ	darya.lyapina.1998@mail.ru
Макаров Константин Альбертович	УрФУ	kostyamakarov14@gmail.com
Маланчев Константин Леонидович	ГАИШ МГУ	malauchev@physics.msu.ru
Маркозов Иван Дмитриевич	СПбГУ	markozoviv@mail.ru
Медведев Михаил Геннадьевич	УрФУ	grammar.mihannik@gmail.com
Меджитов Руслан Айдарович	СевГУ	shift9009@gmail.com
Михайлова Елена Игоревна	ГБОУ «Бестужевская»	vareniktraven@gmail.com
Михайлова Мария Константиновна	УрФУ	marymich25@gmail.com
Михневич Варвара Олеговна	УрФУ	varvara.mikhnevich@gmail.com
Молярова Тамара Сергеевна	ИНАСАН	molyarova@inasan.ru
Назаров Сергей Валентинович	КраО РАН	astrotourist@gmail.com
Немтинова Александра Вячеславовна	УрФУ	aleksandra.nemtinova14@mail.ru
Никонов Игорь Николаевич	КФУ	igorNIKONOV.igor@yandex.ru
Островский Андрей Борисович	УрФУ	andrey.ostrovsky@urfu.ru
Парфенов Сергей Юрьевич	УрФУ	sergey.parfenov@urfu.ru
Пермякова Татьяна Александровна	УрФУ	tanya-permyakova-1998@yandex.ru
Петрашкевич Игорь Вячеславович	УрФУ	petra444555@gmail.com
Петров Дмитрий Владимирович	КраО РАН	dvp@cracrimia.ru
Петровская Юлия Станиславовна	УрФУ	dc.dc.20@mail.ru
Петрухин Николай Семенович	УрФУ	npetruhin@hse.ru
Подкова Анастасия Андреевна	УрФУ	nastya.podyukova@mail.ru
Получина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	tatyana.polushina@urfu.ru
Попандопуло Никита Андреевич	ТГУ	nikas.popandopoulos@gmail.com
Попова Елена Андреевна	УрФУ	elenapopova@urfu.ru
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.popova@urfu.ru
Потоскуев Александр Эдуардович	УрФУ	aleksander.potoskuev@gmail.com
Пружинская Мария Викторовна	ГАИШ МГУ	pruzhinskaya@gmail.com
Пушанова Анна Федоровна	УрФУ	anna.pushanova@urfu.ru
Пушкарев Александр Борисович	КраО РАН	contour@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Рогова Ольга Валентиновна	СевГУ	rogovaov@mail.ru
Рудницкий Алексей Георгиевич	АКЦ ФИАН	almax1024@gmail.com
Рыспаева Елизавета Борисовна	КрАО РАН	e.ryspaeva@yandex.ru
Рябухина Ольга Леонидовна	ИНАСАН	ryabukhina@ipfran.ru
Савушкин Александр Александрович	ФГБУН «КрАО РАН»	sharrakka@mail.ru
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	svetlana.salii@urfu.ru
Самарханова Александра Евгеньевна	УрФУ	samirhanova.aleksandra07@gmail.com
Санникова Татьяна Николаевна	ФГБУН «КрАО РАН»	tusannikova@crasoCrimea.ru
Сатонкин Николай Артемович	УрФУ	n.a.satonkin@urfu.ru
Сафронова Виктория Сергеевна	УрФУ	vika483@bk.ru
Селезнев Антон Федорович	УрФУ	anton.seleznev@urfu.ru
Семенхин Тимофей Александрович	МГУ	ofmafowo@gmail.com
Семерова Полина Васильевна	УрФУ	p.v.semerova@urfu.ru
Сивкова Евгения Эдуардовна	ИНАСАН	sivkova@gmail.com
Сизова Мария Дмитриевна	ИНАСАН	sizova@inasan.ru
Склянов Александр Сергеевич	КФУ	ssklyanov@yandex.ru
Смирнов Данил Владимирович	СПбГУ	dgirai@gmail.com
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashur@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	Andrej.Sobolev@urfu.ru
Соколова Валерия Алексеевна	УрФУ	valeria.sokolova@urfu.ru
Сусликов Михаил Викторович	КФУ	MVSuslikov@outlook.com
Сюсина Ольга Михайловна	ТГУ	olga_syusina@rambler.ru
Терешин Данил Дмитриевич	УрФУ	tereshin.dd@gmail.com
Теряева Марина Александровна	АО УрФУ	m.a.teriaeva@urfu.ru
Точичева Анастасия Павловна	ИНАСАН	ATopchieva@inasan.ru
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Устинов Денис Сергеевич	УрФУ	denisusti@gmail.com
Федотов Андрей Алексеевич	СПбГУ	andry.201452@gmail.com
Хайбрахманов Сергей Александрович	УрФУ	sergey.khaibrakhmanov@urfu.ru
Харченко Алексей Владимирович	АО «ЦНТЭЭ»	harchenko@cntee.com

ФИО	Организация	E-mail
Ховричев Максим Юрьевич	СПбГУ	gmymax@gmail.com
Хоперсков Сергей Александрович	ИНАСАН	sergey.khopenskov@gmail.com
Цивики Лис Николаевич	УрФУ	foxastrophys@gmail.com
Чазов Никита Андреевич	УрФУ	nikita.google@gmail.com
Чувалов Иван Николаевич	ТГУ	chuvashovim@gmail.com
Шагабудинов Андрей Альфатович	АО УрФУ	andreyshagabutdinov@urfu.ru
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	slvak@yaandex.ru
Шахворостова Надежда Николаевна	АКЦ ФИАН	nadya.shakh@gmail.com
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	shematov@inasan.ru
Шмидт Екатерина Евгеньевна	ТГУ	schmidt-katerina@mail.ru
Щустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@mail.ru
Щуров Михаил Аристовелевич	АКЦ ФИАН	shaddowman@mail.ru
Юдин Владислав Дмитриевич	УрФУ	AbiturentChel74@gmail.com

Содержание

Кузнецов Э. Д., Салий С. В., Полушина Т. С. Полина Евгеньевна Захарова	6
Соколов Л. Л., Шайдулин В. Ш. Памяти Константина Владиславовича Холшевникова	22
Студенческие доклады	26
Балакина Е. А., Пружинская М. В. Пекулярные скорости сверхновых звезд типа Ia в скоплениях галактик	27
Горбачев М. А., Бутузова М. С., Назаров С. В. Цветовые характеристики блазара S5 0716+714 в аспекте геометрического образования долговременной переменности	30
Зозуля В. Д. Галактические бары: взгляд с точки зрения переменных действия	34
Корчагина Е. П. Анализ фотометрических наблюдений переменной HS 2231+2441	39
Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Метод определения радиуса скопления по радиальному профилю плотности	42
Лисицин Д. Д., Кузин А. В. Идентификация внегалактических комплексов звездообразования	46
Маркозов И. Д. Моделирование профилей пульса рентгеновских пульсаров с аккреционной колонкой	50
Медведев М. Г., Островский А. Б., Васюнин А. И. Стохастическая сеточная модель формирования молекулярного водорода на поверхности пыли в межзвездной среде	54
Никоноров И. Н., Жучков Р. Я. Построение фотометрической системы 28-см телескопа СКАС КФУ путем совместного моделирования уравнений перехода и экстинкции	58
Пермякова Т. А., Локтин А. В. Исследование возможных закономерностей распределения металличности звезд рассеянных скоплений по данным каталога LAMOST	62
Петрашкевич И. В., Пуанова А. Ф. Доля дейтерия в холодных плотных ядрах в области звездообразования L1688	64
Смирнов Д. В. Активные ядра среди галактик с полярным кольцом	68
Сусликов М. В., Колбин А. И. Определение параметров компонент, магнитного поля и аккреции полярна V379 Vir	72
Шмидт Е. Е., Баныщикова М. А., Авдошев В. А. Исследование нелинейности в обратных задачах спутниковой динамики	76
Научные сообщения	79
Автаева А. А., Шематович В. И. Оценка нетепловой потери атмосферы экзопланеты GJ 436b за счет процессов диссоциации H ₂	80
Балуев Р. В. Алгоритм вейвлет-анализа дву- и трехмерных статистических распределений	83
Баляев И. А. Массовый расчет вероятностей соударения астероидов: методы, подводные камни, сравнение результатов	87
Бикулова Д. А., Назаров С. В., Ховричев М. Ю. Астрометрические наблюдения спутников Урана и Нептуна на телескопах GAO РАН и КрАО РАН в 2020 г.	89
Борщева Е. В. Трехфазный астрохимический код: моделирование состава молекулярного облака	93
Васильева М. А., Кузнецов Э. Д. Исследование динамической эволюции семейства астероидов Hobson	97
Галушина Т. Ю., Левкина П. А., Летнер О. Н. Точность определения орбит избранных АСЗ по данным позиционных наблюдений на Терскольской обсерватории	101
Горда С. Ю. Цикличность изменений магнитного поля затменной переменной AM Leo	103
Деминава Н. Р., Шиманский В. В., Борисов Н. В., Бикмаев И. Ф., Габделев М. М. Исследование характеристик тесной двойной системы SDSS J162256	107
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Межзвездные планеты	111
Жужулина Е. А., Савушкин А. А., Петров Д. В. Исследования поляризационных свойств комет методом апертурной поляриметрии	115
Калиничева Е. С., Шематович В. И., Павлюченков Я. Н. О тепловом убегании атмосферы π Men с	117

Каргальцева Н. С., Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А., Парфенов С. Ю.	
Образование и наблюдательные проявления первичных дисков в коллапсирующих протозвездных областях	121
Кругликов Н. А., Пастухович А. Ю., Яковлев Г. А., Гроховский В. И., Унсалан О.	
Анализ яркого болида над Турцией 27 мая 2020 и поиск вещества	125
Кузнецов Э. Д., Аль-Шиблави О. М., Гусев В. Д., Устинов Д. С.	
Пары транснептуновых объектов на близких орбитах	129
Лаврухина А. Д., Маланчев К. Л.	
Извлечение признаков из кривых блеска астрономических источников	133
Ладейщиков Д. А.	
Методика описания профилей линий молекулы CO с помощью многокомпонентной модели переноса излучения	137
Ладейщиков Д. А.	
Онлайн-база данных водных мазеров в областях звездообразования: первые результаты	141
Назаров С. В., Харченко А. С., Кривенко А. С.	
Модернизация телескопа «Синтез» в КРАО РАН	145
Назаров С. В., Бутузова М. С., Пушкарев А. Б.	
Обратное комптоновское рассеяние от центрального источника как механизм рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров	149
Петров Д. В., Савушкин А. А., Жужулина Е. А.	
10-микронная эмиссионная особенность несферических частиц оливина	151
Попандопуло Н. А., Авдошев В. А., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н., Левкина П. А.	
Определение парусности геосинхронных объектов по позиционным наблюдениям на пике Терскол	155
Попова Е. А., Ладейщиков Д. А., Кирсанова М. С., Соболев А. М.	
Физические параметры молекулярных сгустков в области звездообразования S254—S258	158
Потоскуев А. Э., Кузнецов Э. Д.	
Динамическая эволюция орбит пар астероидов в окрестности резонансов	162
Пунанова А. Ф., Петрашкевич И. В.	
Фракционирование дейтерия в областях маломассивного звездообразования	166
Рыспаева Е. Б.	
Рентгеновское излучение звезд Хербига	170
Рябухина О. Л., Кирсанова М. С.	
Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака	174
Салий С. В.	
Оценка физических условий в области звездообразования S255IR-SMA1	178
Санникова Т. Н.	
Оценка эффекта Ярковского на примере астероида 1685 Toro (1948 OA)	182
Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д.	
Оценка возраста молодых пар астероидов на близких орбитах: пара (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49	186
Семенихин Т. А., Пружинская М. В., Корнилов М. В.	
Болометрические кривые блеска и параметры взрыва сверхярких сверхновых	190
Сивкова Е. Э., Вибе Д. З.	
Дробление углеводородной пыли на больших галактических высотах	192
Сизова М. Д., Верещагин С. В.	
Поиск близких сближений звезд в галактическом диске по данным Gaia EDR3	195
Сюсина О. М., Галушина Т. Ю.	
Влияние состава наблюдений на определение параметра эффекта Ярковского	198
Топчиева А. П.	
ИК кольцевые туманности в галактиках Млечный Путь и M33	200
Федотов А. А., Карелин Г. М.	
Первые шаги к картированию экзопланет: моделирование вторичных затмений и поиск неоднородностей инфракрасных профилей яркости	204
Щуров М. А., Рудницкий А. Г.	
Программа lineviewer пакета astro space locator (asl) для построения и обработки усредненных спектров	208
Щуров М. А., Вальтц И. Е., Шахворостова Н. Н.	
NGC 2071 в космическом проекте «Радиоастрон»: пространственное распределение мазерных пятен H ₂ O	210

Contents

Kuznetsov E. D., Saliı S. V., Polushina T. S. Polina Evgenievna Zakharova	6
Sokolov L. L., Shaidulin V. Sh. In memory of Konstantin Vladislavovich Kholshchevnikov	22
Students talks	26
Balakina E. A., Pruzhinskaya M. V. Peculiar velocities of supernovae Ia in clusters of galaxies	27
Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Nazarov S. V. Color characteristics of the blazar S5 0716+714 under geometrical origin of the long-term variability	30
Zozulya V. D. Galactic bars: a look at the point of view of action variables	34
Korchagina E. P. Analysis of photometric observations of the variable HS 2231+2441	39
Kulesh M. V., Seleznev A. F. Method for determination of cluster radius from radial density profile	42
Lisitsin D. D., Kuzin A. V. Identification of extragalactic star forming complexes	46
Markozov I. D. Modeling pulse profiles in X-Ray pulsars with accretion column	50
Medvedev M. G., Ostrovskii A. B., Vasyunin A. I. Stochastic on-lattice simulation of H ₂ formation on interstellar grains	54
Nikonorov I. N., Zhuchkov R. Ya. Photometric calibration of 28-cm telescope of NCAS KFU by jointly modeling equations of transformations and the extinction	58
Permyakova T. A., Loktin A. V. Study of possible regularities of the metallic distribution of open cluster stars according to the LAMOST catalog	62
Petrashkevich I. V., Punanova A. F. Deuterium fraction in cold dense cores in the star-forming region L1688	64
Smirnov D. V. Active galactic nuclei among the polar-ring galaxies	68
Suslikov M. V., Kolbin A. I. Determination of the parameters of polar V379 Vir components, magnetic field and accretion	72
Shmidt E. E., Banshchikova M. A., Avduyshev V. A. Investigation of nonlinearity in inverse problems of satellite dynamics	76
Contributed talks	79
Avtayeva A. A., Shematovich V. I. Estimates of non-thermal atmospheric loss of exoplanet GJ 436b due to dissociation processes H ₂	80
Baluev R. V. Wavelet analysis algorithm for bi- and trivariate statistical distributions	83
Balyaev I. A. Mass calculation of asteroid collision probabilities: methods, pitfalls, comparison of results	87
Bikulova D. A., Nazarov S. V., Khovritchev M. Yu. Astrometric observations of Uranian and Neptunian satellites with the Pulkovo and Crimean observatory telescopes in 2020	89
Borshcheva E. V. The three-phase astrochemical code: modeling of the molecular cloud composition	93
Vasileva M. A., Kuznetsov E. D. Investigation of the dynamic evolution of Hobson asteroid family	97
Galushina T. Yu., Levkina P. A., Letner O. N. The precision of the orbit fitting for selected NEAs from positional observations at the Terskol Observatory	101
Gorda S. Yu. Cyclicity of variations of the magnetic field of the eclipsing variable AM Leo	103
Deminova N. R., Shimansky V. V., Borisov N. V., Bikmaev I. F., Gabdееv M. M. Research of the characteristics of the close binary system SDSS J162256	107
Dryomova G. N., Dryomov V. V., Tutukov A. V. Interstellar planets	111
Zhuzhulina E. A., Savushkin A. A., Petrov D. V. Study of polarization properties of comets by the method of aperture polarimetry	115
Kalinicheva E. S., Shematovich V. I., Pavlyuchenkov Ya. N. On the thermal atmospheric escape of π Men c	117

Kargaltseva N. S., Dudorov A. E., Khaibrahmanov S. A., Parfenov S. Yu. Formation and observational features of primary disks in collapsing protostellar clouds	121
Kruglikov N. A., Pastukhovich A. Yu., Yakovlev G. A., Grokhovsky V. I., Unsalan O. Analysis of the bright fireball over Turkey on may 27, 2020 followed by meteorite recovery campaign	125
Kuznetsov E. D., Al-Shiblawi O. M., Gusev V. D., Ustinov D. S. Pairs of Trans-Neptunian Objects with close orbits	129
Lavrukhina A. D., Malanchev K. L. Light curve feature extraction from astronomical source	133
Ladeyschikov D. A. A technique for describing line profiles of the CO molecule using a multi-component radiation transfer model	137
Ladeyschikov D. A. Online database of water masers in the star-forming regions: the first results	141
Nazarov S. V., Kharchenko A. V., Krivenko A. S. Modernization of the telescope "Sintez" at the CrAO RAS	145
Nazarov S. V., Butuzova M. S., Pushkarev A. B. Inverse Compton scattering of radiation of the central source as a mechanism for the formation of X-Ray radiation from kiloparsec jets of quasars	149
Petrov D. V., Savushkin A. A., Zhuzhulina E. A. 10-micron emission feature of non-spherical olivine particles	151
Popandopulo N. A., Avdyushev V. A., Bordovitsyna T. V., Chuvashov I. N., Levkina P. A. Determination of area-to-mass ratio of geosynchronous objects using positional observations obtained at Terskol pike	155
Popova E. A., Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Sobolev A. M. Physical parameters of molecular clumps in the S254—S258 star formation region	158
Potoskuev A. E., Kuznetsov E. D. Dynamical evolution of asteroid pairs in the vicinity of resonances	162
Punanova A. F., Petrashkevich I. V. Deuterium fractionation in low-mass star-forming regions	166
Ryspaeva E. B. X-ray emission from Herbig stars	170
Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S. Study of the filament WB 673 in ammonia radiolines	174
Salii S. V. Estimation of physical conditions in star formation region S255IR-SMA1	178
Sannikova T. N. Estimation of the Yarkovsky effect on the example of the asteroid 1685 Toro (1948 OA)	182
Safronova V. S., Kuznetsov E. D. Age estimation of young pairs of asteroids in close orbits: pair (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49	186
Semenikhin T. A., Pruzhinskaya M. V., Kornilov M. V. Bolometric light curves and parameters of superbright supernova explosions	190
Sivkova E. E., Wiebe D. S. Dust destruction at high galactic altitude	192
Sizova M. D., Vereshchagin S. V. Searching for close approaches of the stars pairs in the galactic disk with Gaia EDR3 data	195
Syusina O. M., Galushina T. Yu. Influence of the sample of observations on the determination of the Yarkovsky effect parameter	198
Topchieva A. P. IR ring nebulae in the Milky Way and M33 galaxies	200
Fedotov A. A., Karelin G. M. First steps to mapping of exoplanets: modeling secondary eclipses and search inhomogeneities in the infrared brightness profiles	204
Shchurov M. A., Rudnitskiy A. G. Lineviewer — program of the astro space locator (asl) package for constructing and processing averaged spectra	208
Shchurov M. A., Valts I. E., Shakhvorostova N. N. VLbi research in the "Radioastron" project: structure of the H ₂ O maser in NGC 2071 IRS 1	210

Научное издание

Астрономия и исследование космического пространства

Всероссийская с международным участием
научная конференция студентов и молодых ученых,
посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой,
(Екатеринбург, Россия, 1–5 февраля 2021 г.)
Сборник научных трудов

Ответственная за выпуск Д. Д. Залесова

Редактор Т. А. Федорова

Корректор Т. А. Федорова

Оригинал-макет — Д. З. Вибе, Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 25.05.2021. Формат 60 × 84 1/16.

Уч.-изд. л. 21,7.

Гарнитура Times.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург-83, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7(343) 358-93-06, 350-58-20

Факс: +7(343) 358-93-06

E-mail: press-urfu@mail.ru

<http://print.urfu.ru>

Данное электронное сетевое издание размещено
в электронном архиве УрФУ: elar.urfu.ru

ISBN 978-5-7996-3229-8



9 785799 632298