

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

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

**АСТРОНОМИЯ**  
**И**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ**  
**КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

**Препринты статей**  
**по докладам, включенным в программу**  
**Всероссийской с международным участием**  
**научной конференции**  
**студентов и молодых ученых,**  
**посвященной памяти Полины Евгеньевны Захаровой**  
**Екатеринбург, Россия**  
**1—5 февраля 2021 г.**

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2021



«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» (под руководством П. Е. Захаровой проведено 45 конференций), автора учебно-наглядного пособия «Календарь «Астрономия»» (осуществлено 20 выпусков календаря), 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). Polina Evgenievna was an inspirer and organizer All-Russian student scientific conferences "Physics of Space" (45 conferences were held under the leadership of P. E. Zakharova), she is the author of the teaching-visual aid calendar "Astronomy" (20 issues were published). Polina Evgenievna was a member of professional councils and societies, a person selflessly devoted to his 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?

*(здесь и далее стихи Н. Д. Калинин)*

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 движенье,

Упорство, воля и борьба, —

И безусловно достижение

Высокой цели. . .

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 делилась.

«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-м классе средней школы № 16 г. Серова, директор школы Иван Сидорович Марцюк, зная, что я увлекаюсь астрономией, познакомил меня с первым в моей жизни настоящим астрономом Игорем Генкиным, выпускником 16-й школы, в ту пору аспирантом Московского университета, ныне — доктором физико-математических наук<sup>1</sup>. 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 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 неодновременно. 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 году Полине Евгеньевне

---

<sup>1</sup> Игорь Львович Генкин (1931—2011), доктор физико-математических наук, профессор, член Международного астрономического союза, известный специалист в области динамики звездных систем.

присвоено ученое звание старшего научного сотрудника.

Полина Евгеньевна активно занималась научно-образовательной деятельностью. С 1984 по 1992 гг. она входила в состав рабочей группы «Скопления и ассоциации» проблемной международной комиссии «Физика и эволюция звезд». С 1980 по 2003 гг. 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 может 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 приумножить. Был создан и установлен 700-миллиметровый телескоп, современными приемниками излучения оснащены телескопы СБГ и АЗТ-3. В ходе выполнения работ по «Инновационно-образовательной программе УрГУ» в рамках национального проекта «Образование» в обсерватории установлены два новых телескопа — телескоп с диаметром зеркала 1.2 м и робот-телескоп «Мастер II».

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 корежит 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, знала все радости и горести 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), так 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, сейчас же приезжает уже маститым доктором наук. 45 из 49 прошедших школ прошли под руководством Полины Евгеньевны. Все отмечали особую, теплую, практически семейную атмосферу, царившую на школах, которая способствовала 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 KOUROVKA. А личный вклад Полины Евгеньевны в это нелегкое, но благородное дело, был отмечен присвоением малой планете № 4780 имени POLINA, в честь Полины Евгеньевны Захаровой.

Большое внимание Полина Евгеньевна уделяла организации и проведению на 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 ликвидировать 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 г. — Юбилейная медаль «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина»,
- 1983 г. — первая премия Уральского университета за научную работу (коллективная работа по комплексному исследованию РЗС),
- 1985 г. — серебряная медаль Главного комитета Выставки достижений народного хозяйства СССР,
- 1986 г. — 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 г. — премия имени А. Ф. Фиолетовой Астрономического совета АН СССР
- 1998 г. — первая премия Уральского университета за научную работу (коллективная работа по созданию 700-миллиметрового телескопа Коуровской обсерватории),
- 2001 г. — звание «Дочь города — дочь России»,
- 2004 г. — медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени,
- 2009 г. — благодарность Председателя Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации С. М. Миронова за большой вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов в области астрономии,
- 2011 г. — медаль Федеральной службы по техническому и экспортному контролю, за организацию и обеспечение в обсерватории бесперебойной работы по международной программе исследования глобального климата Земли АЭРОНЕТ,
- Почетные грамоты губернатора Свердловской области и мэра Екатеринбурга,
- 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

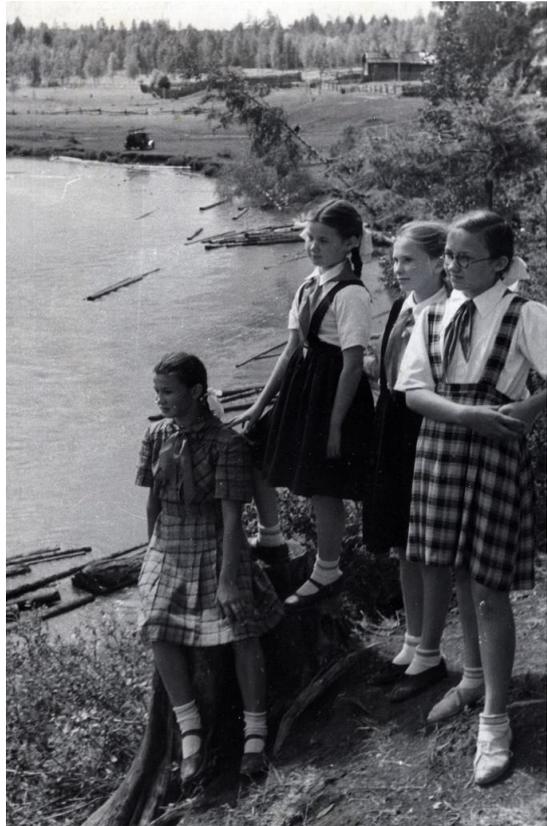
Пожалуй, через пару тысяч лет.

Мы будем ждать

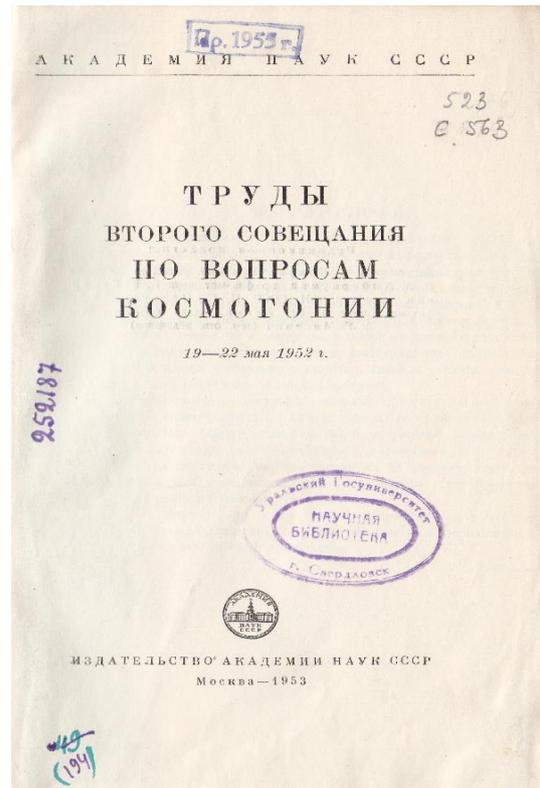
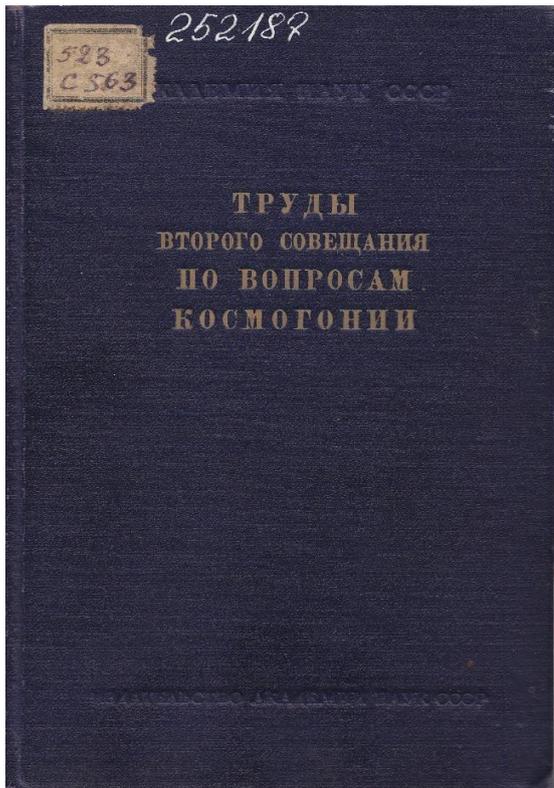
В Коуровке, на Млечном...



Евгений Константинович и Надежда Александровна Серовы, Полина Евгеньевна Серова, Анатолий Константинович Серов, Полина Денисовна Осипенко (сверху) Полина в школьной библиотеке (снизу)



Школьные годы



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Заседание 19 мая	
Выступительное слово М. А. Лаврентьева	7
Доклад В. А. Амбарцумяна «О происхождении и развитии звезд и звездных систем»	9
Утреннее заседание 20 мая	
Выступление Б. А. Вероницона-Вельяминова	81
Выступление А. И. Лебединского	120
Вечернее заседание 20 мая	
Выступление Г. А. Шайна	179
Выступление В. Ф. Газе	190
Выступление В. Г. Фесюнова	202
Выступление В. С. Сафронова	213
Выступление С. Б. Пикельнера	219
Выступление С. А. Казаня	221
Выступление Б. К. Харалдзе	225
Утреннее заседание 21 мая	
Выступление Л. Э. Гуревича	235
Выступление Б. Е. Маркаряна	275
Выступление К. П. Станюковича	204
Выступление В. Е. Львова	312
Вечернее заседание 21 мая	
Выступление В. А. Крата	325
Выступление П. П. Пареняго	334
Выступление Э. Р. Муселая	352
Выступление А. Б. Семиного	363
Выступление В. А. Домбровского	370
Выступление В. П. Соболева	378
Выступление Э. С. Бродской	383
Выступление И. М. Копылова	386
Выступление И. И. Исаунидзе	390
Выступление М. Е. Набокова	408

582

Содержание

Утреннее заседание 22 мая

Выступление Б. М. Келрова	417
Выступление В. К. Зовна	432
Выступление А. Г. Масевича	434
Выступление Г. И. Павла	448
Выступление А. А. Някитина	453
Выступление А. Н. Дебиа	455
Выступление Д. Я. Мартынова	458
Выступление Б. Ю. Левина	476
Выступление П. Н. Холодова	485
Выступление К. Ф. Огородникова	487
Выступление Л. А. Кубенского	493
Выступление Я. П. Терлецкого	507

Вечернее заседание 22 мая

Дополнительное выступление Л. Э. Гуревича	515
Дополнительное выступление А. И. Лебединского	517
Дополнительное выступление Б. А. Вероницона-Вельяминова	518
Выступление Е. В. Рыбка	530
Заключительное слово В. А. Амбарцумяна	521
Заключительное слово председательствующего Б. В. Кукаркина	529
Решение совещания	531

Тексты несостоявшихся выступлений

Т. А. Агекян	539
К. А. Бархатова	543
И. А. Курземянец	548
Г. А. Милова	552
П. В. Славянас	558
Р. В. Шапова	567
М. С. Эбгенсон	572

Книга, выписанная Полиной Евгеньевной по почте в 1953 г.



Полина Евгеньевна с мамой и со школьниками



Полина Евгеньевна с Клавдией Александровной Бархатовой на зимней астрономической школе и с коллегами на кафедре. Сидят: Людмила Петровна Шашкина, Ольга Пертровна Пыльская, Клавдия Александровна Бархатова, Полина Евгеньевна Захарова; стоят: Анатолий Ефимович Василевский, Борис Флегонтович Магуськин



Полина Евгеньевна в кругу коллег, на обсерватории и на кафедре



## ОФИЦИАЛЬНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО о присвоении имени малой планете

Институт теоретической астрономии  
Российской Академии наук (ИТА РАН),  
возглавляющий в России работы по изучению и каталогизации  
малых планет Солнечной Системы,  
от имени Международного Астрономического Союза (МАС)  
настоящим свидетельствует,  
что малая планета,  
зарегистрированная в международном каталоге малых планет  
под № 4780 и имевшая ранее предварительное обозначение 1979 HE5,  
получила имя

**POLINA**

в честь

**Полины Евгеньевны Захаровой**

### Официальное сообщение МАС

(4780) Polina = 1979 HE5  
Discovered 1979 Apr. 25 by  
N. S. Chernykh at the Crimean  
Astrophysical Observatory.

Named in honor of Polina Evgen'evna  
Zakharova, stellar astronomer and director  
of the Kourovka Astronomical Observatory  
of the Ural University.

Minor Planet Circular № 27127, 1996.

### Обоснование названия на русском языке

Малая планета 4780 Полина открыта  
25 апреля 1979 г. Н. С. Черных в  
Крымской астрофизической  
обсерватории.

Названа в честь Полины Евгеньевны  
Захаровой, специалиста в области  
звездной астрономии и директора  
Коуровской астрономической  
обсерватории.

Санкт-Петербург  
1 сентября 1996 г.



Директор ИТА РАН

А. Г. Сокольский



Полина Евгеньевна с Аркадием Михайловичем Чернецким, с Эдуардом Эргартовичем Росселем, Владимиром Евгеньевичем Третьяковым



*В. В. Путин* 8.03.2004

# Полина Евгеньевна ЗАХАРОВА

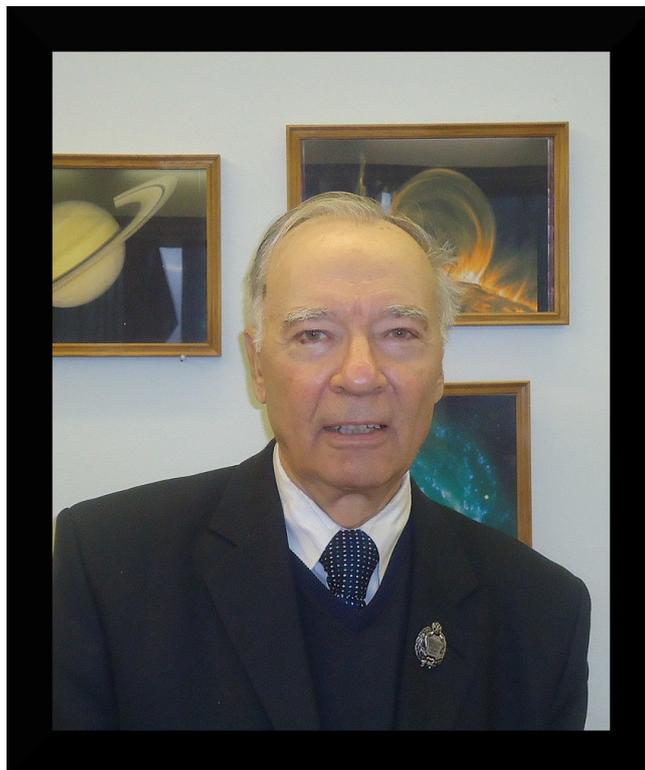


Полина Евгеньевна с Владимиром Владимировичем Путиным на вручении медали ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени. В центре — автограф В. В. Путина



«Мне в жизни очень повезло с учителями, к которым я отношу ... всех людей, с которыми меня столкнула жизнь ... Но самым великим учителем была и есть жизнь, порой очень жестокая, но чаще справедливая и добрая... »

## ПАМЯТИ КОНСТАНТИНА ВЛАДИСЛАВОВИЧА ХОЛШЕВНИКОВА



10 января 2021 года 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 году, затем закончил аспирантуру Университета, защитив кандидатскую диссертацию. Проходил научную стажировку в Италии. С 1970 года, после организации в ЛГУ факультета прикладной математики – процессов управления, в течение 50 лет Константин Владиславович беспрерывно заведует Кафедрой небесной механики СПбГУ (ЛГУ). Доктор физико-математических наук с 1972 года. 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, эйлерова 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 годы 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 небесномеханической 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 1970-80 годы 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 годах 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 совместно 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 с научными командировками. 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 году у Константина Владиславовича с соавторами вышло 6 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 являлся бесменным руководителем ежегодной Зимней студенческой научной конференции, проводимой на базе Уральского университета. Сегодня многие серьезные научные работники, бывшие на этой Зимней школе студентами, с благодарностью вспоминают Зимнюю школу и ее руководителя. 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 заслужен-

ных людей со сложившейся научной репутацией, как Вадим Анатольевич Антонов. Его сосредоточенность на науке была феноменальной, 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. Охоцимский, 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.

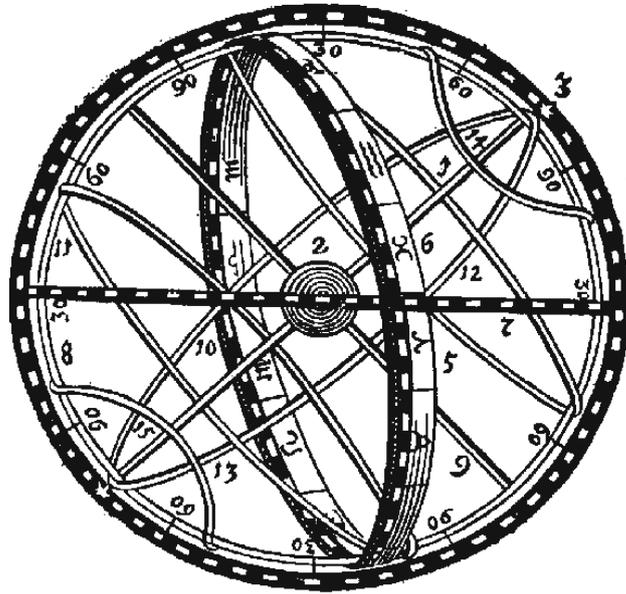
Константин Владиславович Холшевников — академик РАЕН, Академии космонавтики, член Нью-Йоркской Академии наук, был председателем совета по защите докторских и кандидатских диссертаций при СПбГУ, членом четырех ученых Советов. Кроме того, он член Международного астрономического союза, член редколлегии 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; присвоено 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» им. Академика И.Ф. Образцова, Общество «Знание» СПб и Л.О., 2008; Диплом №1 лауреата Главной премии за 2008 год 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 и 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, которые его знали. Мы навсегда сохраним о нем самые теплые воспоминания.

# Студенческие доклады



**Пекулярные скорости сверхновых звезд типа Ia в скоплениях галактик****Е. А. Балакина**<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>Физический факультет Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова, <sup>2</sup>Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова*

Наблюдения сверхновых Ia позволяют оценить значения космологических параметров при помощи диаграммы Хаббла. В первую очередь, такие наблюдения дают значение постоянной Хаббла, которое является одним из важнейших космологических параметров. Повышение точности измерений данной величины представляет важную задачу для современной космологии, поэтому необходимо учитывать влияние пекулярных скоростей сверхновых на измерение красного смещения, которое используется 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****E. A. Balakina**<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, <sup>2</sup>Lomonosov 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 an important problem 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, обусловленных движением родительской галактики в скоплении галактик, проводилось на космологической выборке СН PANTHEON. Данная выборка содержит сверхновые, обнаруженные различными обзорами, которые были собраны и взаимно откалиброваны. Среди сверхновых PANTHEON мы определили 297 СН на достаточно малых красных смещениях  $z < 0.15$ , для которых вклад пекулярных скоростей наиболее значимый [1] (см. Рис. 1). Для того чтобы идентифицировать сверхновые в скоплениях галактик, мы провели процедуру кросс-матча PANTHEON с каталогами скоплений, таких как MCXC [2] и Planck-SZ [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 стала выборка из 30 СН и соответствующих им скоплений. Следующим шагом мы определили дополнительные критерии сопоставления, чтобы учесть эффекты проекции. В итоговом списке надежных сверхновых типа Ia в скоплениях оказалось 25 СН, для которых необходимо учитывать пекулярные скорости родительских галактик: использовать красное смещение скопления вместо красного смещения

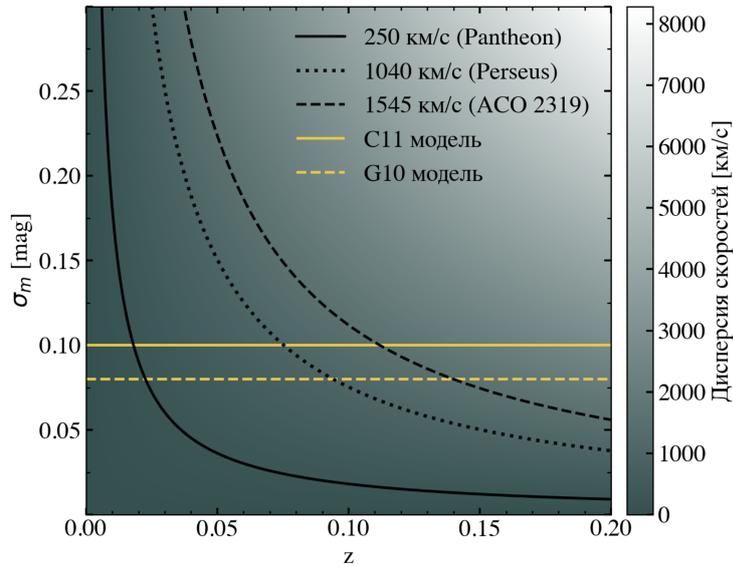


Рис. 1. Величина  $\sigma_m$  показывает дисперсию звездной величины, пересчитанную для различных значений дисперсии скоростей  $\sigma_v$ , для малых красных смещений. Желтые пунктирная и сплошная линии показывают принятое значение  $\sigma_m$  для двух моделей в PANTHEON.

родительской галактики в качестве космологического  $z$  на диаграмме Хаббла. Для каждого скопления, которое содержало родительскую галактику СН, на основе данных SDSS [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. Рис. 2 показывает разницу  $\Delta\mu$  теоретического модуля расстояния и модуля расстояния, рассчитанного с использованием исправленного красного смещения.

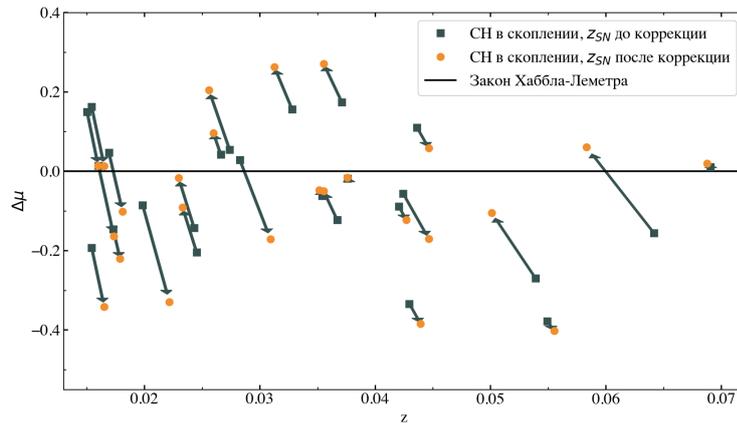


Рис. 2. Разность модуля расстояния  $\mu$  на диаграмме Хаббла до коррекции peculiar скорости (зеленые квадраты) и после нее (оранжевые кружки). Закон Хаббла-Леметра показан черной сплошной линией.

Таким образом, анализ показал, что peculiar скорости родительских галактик СН действительно влияют на измерение модуля расстояния сверхновых и представляют интерес для дальнейшего изучения и оценки значимости данного эффекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00522 и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

## Список литературы

- [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] *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.
- [3] *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.
- [4] *Boldt Elihu, 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.

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

М. А. Горбачев<sup>1,2</sup>, М. С. Бутузова<sup>2</sup>, С. В. Назаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, <sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Оптическое излучение блазара S5 0716+714 формируется в его ультрарелятивистском 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 В-, V-, R-, I- фотометрии блазара S5 0716+714 с 2002 по 2019 год. 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<sup>1,2</sup>, M. S. Butuzova<sup>2</sup>, S. V. Nazarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, <sup>2</sup>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. На радиокартах проявляется 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 магнитно 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 полагается, 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. Но, 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, выполненные 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  $\alpha$  — 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  $\alpha$  переменного компонента, если поток постоянного компонента находится на продолжении этих экспериментальных прямых (см., например, [3]). В нашем случае, спектр взятого таким образом постоянного компонента, не соответствует излучению никакой части АЯГ. Поэтому мы предполагаем, что точка, соответствующая постоянному компоненту, находится ниже прямых на рис. 1. Так как рассматриваемая нами область — часть джета, в котором могут происходить физические изменения, то и поток постоянного компонента может изменяться, только на более длительной временной шкале, чем изменения потока переменного компонента. Но в данной работе мы исследуем саму возможность объяснения изменения показателя цвета объекта при переменности за счет геометрических эффектов при вогнутом спектре излучающей области (рис. 2), поэтому для примера выбрали в качестве постоянного компонента точку с потоком  $F_R = 30$  мЯн при спектральном индексе  $\alpha^c = 1.5$ . Полагая, что наблюдаемый поток — это сумма потоков переменного и постоянного компонентов и что спектральный индекс переменного компонента  $\alpha^{\text{var}} \geq -2.5$ , с использованием экспериментальных прямых мы получили наблюдаемый спектр переменного компонента в зависимости от его потока (рис. 3).

На рис. 2. показаны частоты  $\nu'_I$  и  $\nu'_B$  в системе отсчета сопутствующей релятивистскому джету, которые соответствуют наблюдаемым частотам в фильтрах I и B:  $\nu_{I,B} = \delta_0 \nu'_{I,B} / (1 + z)$ , где  $\delta_0$  — 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 зре-

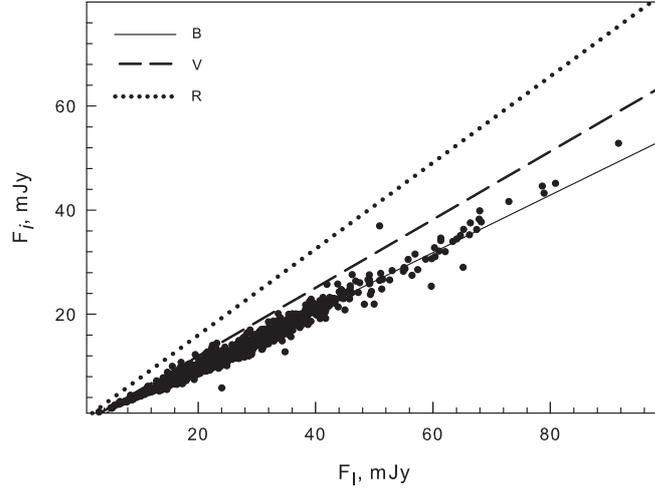


Рис. 1. Линейные аппроксимации наблюдаемого потока в фильтрах В, V, R относительно I по данным наблюдений АЗТ-8. Приведены точки данных для фильтра В, в котором они имеют наибольшие отклонения от линии аппроксимации.

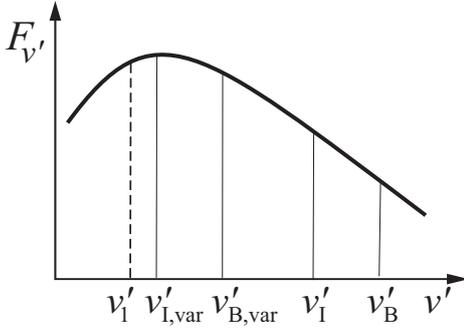


Рис. 2. Спектр излучающей области в системе отсчета, сопутствующей релятивистскому джету.

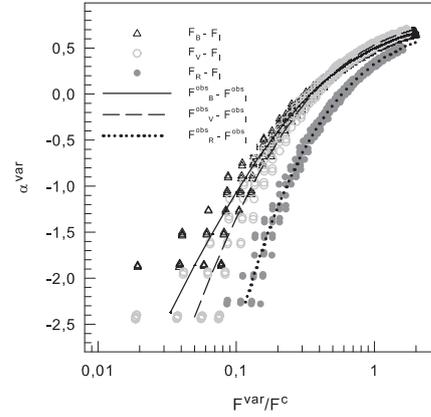


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $\alpha^{var}(F^{var})$  и соответствующие ей теоретические точки.

ния. Эту часть излучающей области мы рассматриваем в качестве переменного компонента. Тогда в поток на наблюдаемых частотах  $\nu_I$  и  $\nu_B$  вносит излучение, образованное на частотах  $\nu'_{I,var}$  и  $\nu'_{B,var}$  в системе отсчета источника. Как видно из рис. 2, 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

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

при подстановке соответствующих  $\delta$ ,  $\alpha$  и коэффициентов  $Q'$ . В формуле (1) индекс  $i$  обозначает, что величина относится к соответствующему фильтру из рассматриваемых,  $\nu'_1$  — частота, для которой оптическая толщина среды равна единице. Для каждого фильтра, зная поток постоянного компонента и вводя параметр  $D = Q'_{var}/Q'_c$ , нашли потоки переменного компонента, которые использовали для определения  $\alpha^{var}$ . При этом  $\delta_{var}$  изменяли

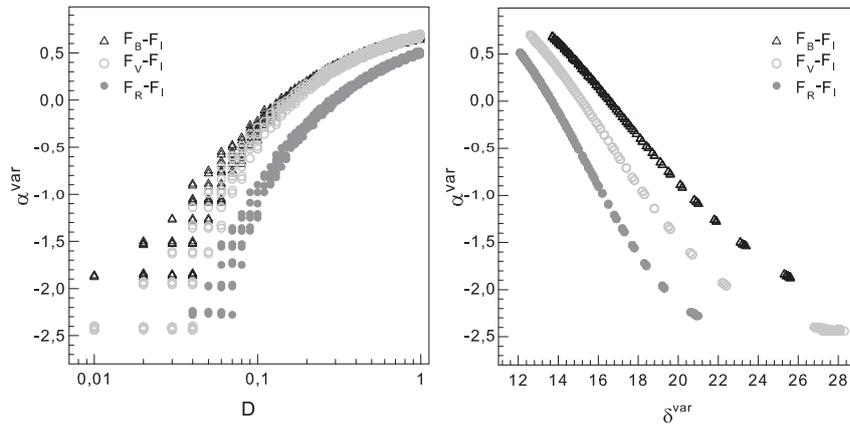


Рис. 4. Зависимость  $\alpha^{\text{var}}$  от  $D$  (слева) и от  $\delta_{\text{var}}$  (справа).

от 10 до 32 с шагом 0.1,  $\nu'_1$  — от  $10^{13}$  до  $9.5 \cdot 10^{13}$  с шагом  $0.5 \cdot 10^{13}$ . Так как мы подразумеваем, что есть одна излучающая область, а переменность образуется за счет увеличения доплер-фактора некоторой части этой области, то магнитное поле и концентрация релятивистских электронов, входящие в  $Q'_c$  и  $Q'_{\text{var}}$  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. 3). Получили, что значения  $\nu'_1$  находятся в интервале  $2 \cdot 10^{13} - 7 \cdot 10^{13}$ , максимальное количество точек приходится на  $\nu'_1 = 3.5 \cdot 10^{13}$ , которую взяли для построения зависимостей  $\alpha^{\text{var}}$  от  $D$  и от  $\delta_{\text{var}}$  (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 возникнуть 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 РФФ (грант 19-72-00105).

## Список литературы

- [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.
- [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 <sup>1</sup>,

<sup>1</sup>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 <sup>1</sup>,

<sup>1</sup>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  $J_\varphi$  (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 об их механизмах 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, становится применим 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  $t_u \approx 14$  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] до примерно 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 часов, тогда как с использованием приближения Штекеля эта процедура занимает всего 2 минуты. 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.

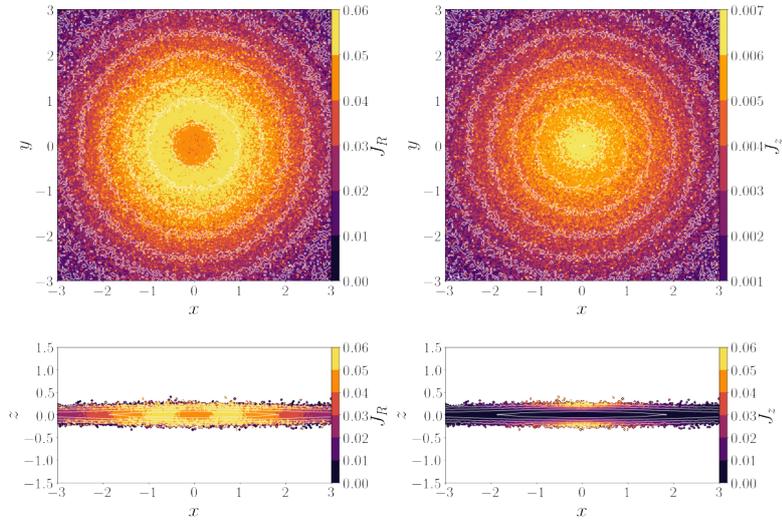


Рис. 1. Карты начального распределения действий  $J_R$  (слева) и  $J_z$  (справа). Вверху: плоскость  $xy$ ; внизу: на плоскости  $xz$  показаны средние значения переменных действия в полоске  $|y| < 1$ . Белые контуры — линии одинаковой поверхностной плотности.

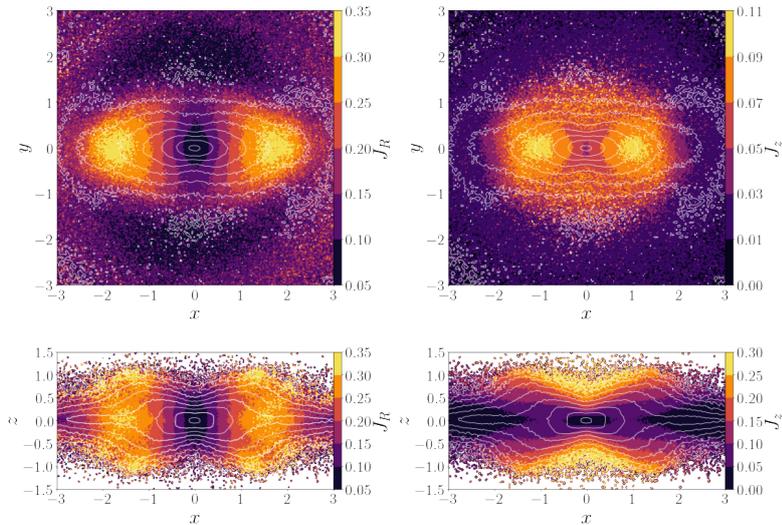


Рис. 2. То же, что и на Рис. 1, но для  $t = 400$ . Большая ось бара идет вдоль оси  $x$ .

*Результаты.* На Рис. 1 и 2 приведено распределение средних значений действий  $J_R$  и  $J_z$  в проекции на плоскости  $xy$  и  $xz$  на начальный момент времени на момент времени  $t = 400$ , когда сформировались и бар, и В/PS балдж, а скорость узора меняется уже медленно. Распределение среднего значения  $L_z$  тоже строилось, но поведение этой величины предсказуемо — угловой 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 переменные 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 бара ( $J_R$  на расстояниях, где заканчивается В/PS балдж в радиальном направлении, а  $J_z$  — немного ближе к центру). 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 X-структуры — наиболее яркой части В/PS балджа.

*Обсуждение и выводы.* Мы связали особенности структуры бара (В/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 выделения X-структуры на фоне различных центральных компонент и определения её протяженности в вертикальном направлении.

## Список литературы

- [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] *Debattista 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 выполнен 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, состоящая из главной компоненты — sdB-субкарлика. 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 ( $M = 0.46 - 0.48 M_\odot$ ). Поэтому актуальной задачей является повторный анализ наблюдаемых характеристик 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 года и охватывают несколько

орбитальных периодов. В качестве рабочей области использовался участок матрицы размером 2048x400 пикселей. По итогам анализа вариаций блеска постоянных звезд поля было найдено, что ошибки диф. фотометрии составили в полосе V  $\sigma \approx 0.^m007$  в полосе V и  $\sigma \approx 0.^m009$ , в полосе. Далее наблюдаемые кривые блеска были переведены в шкалу гелиоцентрических юлианских дат HJD и далее в шкалу фаз  $\varphi$  с применением эфемериды из работы [1].

Полученные кривые блеска полностью соответствуют кривым для III типа HW Vir. В них выделяются главное ( $\Delta m_{V,R} = 0.^m23$ ) и вторичное ( $\Delta m_R = 0.^m066$ ,  $\Delta m_V = 0.^m058$ ) затмения и участки внезатменных изменений блеска ( $\Delta m_R = 0.^m087$ ,  $\Delta m_V = 0.^m079$ ), обусловленных совместным действием с 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  $T_{eff} = 28500\text{K}$  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:  $i = 78.^{\circ}7$ ,  $R_1 = 0.206 R_\odot$  и  $R_2 = 0.102 R_\odot$ . Результат моделирования представлены на рис. 1.

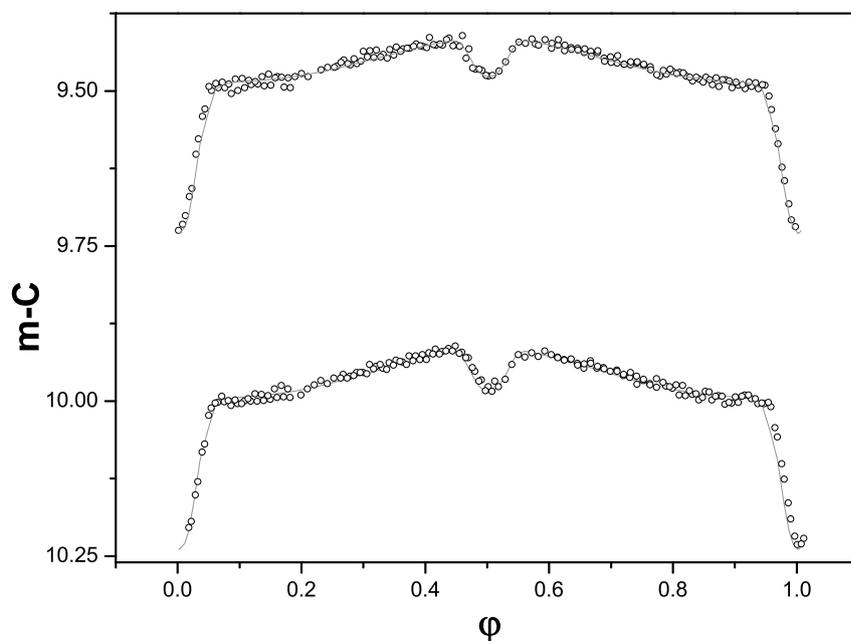


Рис. 1. Кривые блеска HS 2231+2441 в полосе V (снизу) и R (сверху), где точками показаны данные наблюдений, а линиями - модельные кривые.

Нами достигнуто корректное описание наблюдаемых кривых блеска в обеих полосах с

точностью не хуже средних ошибок дифференциальной фотометрии ( $\sigma m = 0.^m008$ ). Полученные параметры системы существенно отличаются от представленных в работе [?]. В частности оценка радиуса коричневого карлика  $R_2 = 0.102R_\odot$  на 25-35% превосходит значения  $R_2 = 0.74 - 0.86R_\odot$ , найденные ранее в рамках чернотельных моделей с разными коэффициентами отражения. Соответствующий рост оценки радиуса главной компоненты  $R_1 = 0.206R_\odot$  варьируется в пределах 25-42% по сравнению со значениями  $R_1 = 0.144 - 0.206R_\odot$  из [1].

Исправленная величина  $R_1$  в целом позволяет решить проблему anomalously низкой массы sdV-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  $\log g = 5.40 \pm 0.05$  [ССЫЛКА]. Оставшиеся различия могут быть обусловлены ошибками определения  $T_{eff}$  и  $\log g$  sdV-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 не пригодны 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+2441 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.

## Список литературы

- [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<sup>1</sup>, А. Ф. Селезнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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<sup>1</sup>, A. F. Seleznev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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, для оценки вероятности принадлежности звезд к скоплению, для исследования динамики скопления, для построения численных моделей скопления и других.

В предположении о сферической симметрии распределения звёзд 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 (см. 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 является 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  $\varepsilon$ .

После определения  $R_{cl}$ , значение средней плотности фона задаётся 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.

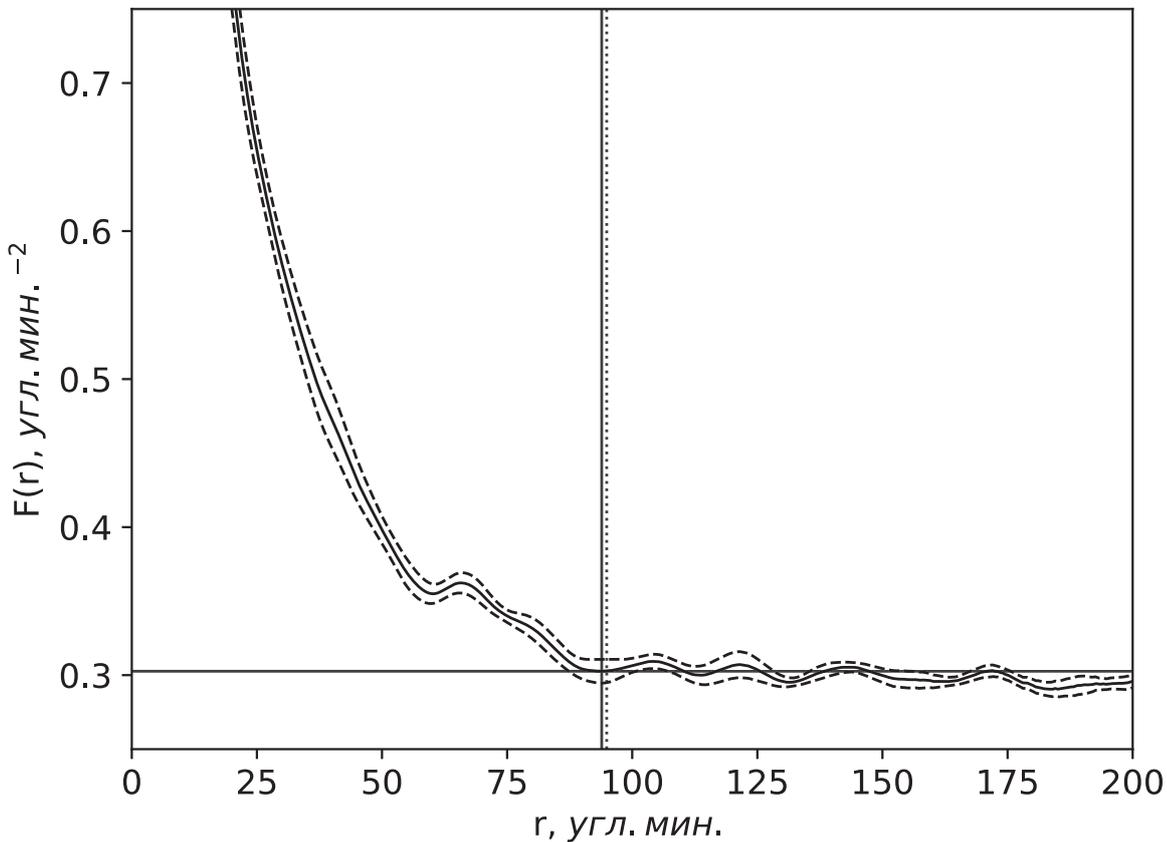


Рис. 1. Радиальный профиль скопления NGC 2516 (сплошная линия) и его доверительный интервал (штриховые линии), горизонтальной прямой указан уровень фона  $F_b = 0.30 \pm 0.01$ , вертикальной сплошной прямой указано значение радиуса  $R_{cl} = 94' \pm 7'$ , рассчитанного алгоритмом по первому локальному минимуму интеграла  $I_{diff}$ , который меньше  $\varepsilon = 1$ , 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

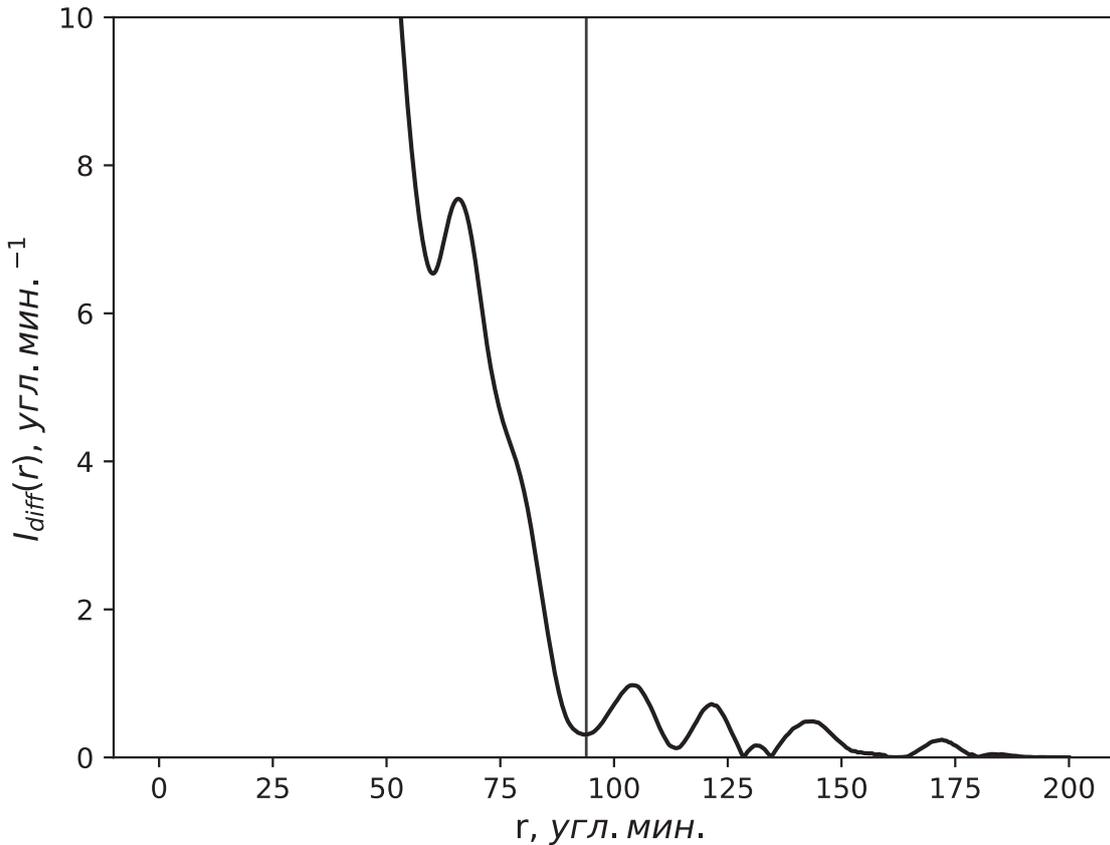


Рис. 2. Интегральная разница  $I_{diff}(r)$ : радиусом скопления (отмечен вертикальной прямой) считаем первый локальный минимум этой функции, который меньше выбранного нами порогового значения  $\varepsilon$

интервала, на выходе получают 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  $R_{cl} = 88' \div 92'$ , 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, полученные 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  $\varepsilon$  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.

## Список литературы

- [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.

## КОРРЕЛЯЦИЯ ОСНОВНЫХ МАРКЕРОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ

Д. Д. Лисицин <sup>1</sup>, А. В. Кузин <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет*

Работа посвящена определению степени корреляции между основными критериями звездообразования в галактиках. В девятнадцати близких галактиках были отождествлены комплексы звездообразования тремя независимыми методами, а именно, исходя из наличия ПАУ, пыли и ультрафиолетового излучения. Сопоставив информацию, полученную с помощью этих методов, мы сделали вывод о степени корреляции между обозначенными индикаторами.

## CORRELATIONS BETWEEN MAIN STAR FORMATION TRACERS IN GALAXIES

D. D. Lisitsin <sup>1</sup>, A. V. Kuzin <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow State University*

We determined there is correlation between the main star formation indicators in galaxies. For this reason, star formation regions in 19 nearby galaxies are identified independently according to three criteria. These criteria are emission of PAH and dust, ultraviolet radiation. Comparing the information we have got out of these methods, the conclusion about indicators' correlation are made.

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. В данной работе мы поставили задачу исследовать области активного звездообразования (комплексы звездообразования, КЗО) в других галактиках, сопоставив данные о КЗО в разных диапазонах электромагнитного спектра, в частности, выявив ситуации, когда КЗО различим в диапазоне, характерном для излучения пыли, но не наблюдается в эмиссионных линиях CO и HI. Эта информация поможет подтвердить или опровергнуть некоторые модели звездообразования.

Для решения задачи мы отобрали девятнадцать близких галактик различных типов при помощи базы данных HyperLeda [1]. Критериями отбора служили: близкие расстояния (менее 15 Мпк), принадлежность галактики к спиральному или неправильному типу, наклон плоскости галактики к лучу зрения менее 45 градусов, наличие качественных изображений этих галактик в диапазонах 8 и 160 мкм, а также в ближнем ультрафиолетовом диапазоне.

После отбора галактик в них были вручную выделены области, которые мы считаем кандидатами в КЗО. Критерием для выделения служило наличие эмиссии в одном из трёх исследуемых диапазонов: 8 мкм, 160 мкм и ближний ультрафиолет.

После отбора мы провели сравнительный анализ кандидатов для более тщательного отбора КЗО. Анализ основан на относительном расположении областей в картинной плоскости. При анализе карт со сравнимым разрешением критерием отбора служила степень перекрытия областей. Работая с картами разного разрешения, мы также следили, чтобы в одну область на карте с плохим разрешением попадало не более одной области карты с хорошим разрешением.

В работе представлены результаты сравнения эмиссии КЗО галактик, которые прошли все этапы отбора. Анализ также выявил наличие большого количества областей, в которых наблюдается эмиссия только в одном из исследуемых диапазонов. Эти области заслуживают дальнейшего изучения.

## Список литературы

- [1] *Makarov D., Prugniel P., Terekhova N. et al.* HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 570. — P. A13.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ С АККРЕЦИОННОЙ КОЛОНКОЙ

И. Д. Маркозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

В ходе работы промоделированы профили пульса излучения, приходящего от рентгеновских пульсаров с аккреционной колонкой. Было учтено 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<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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 из себя 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 и 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 несколько этапов. Первый: построение карты распределения энергии по полярному углу. На этом этапе рассчитывалась энергия, уходящая в единицу полярного угла от нейтронной звезды. В силу осевой симметрии задачи этой информации достаточно, чтобы восстановить все остальные характеристики. Полярный угол отсчитывался от условно верхней аккреционной колонки, то есть угол  $\pi$  соответствовал нижней колонке. Полная энергия от 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  $d\theta$  полярные углы. Каждому лучу присваивалась таким образом энергия  $g(h)f(\theta)dhd\theta$ , где  $g(h)$  - распределение энергии по высоте колонки, а  $f(\theta)$  - по углу. Далее с учетом гравитационного линзирования рассчитывалось направление, куда попадет луч. Если он уходил на бесконечность, то эта энергия, исправленная с учетом красного смещения, прибавлялась к величине энергии, накопленной в данном направлении на бесконечности. Если же луч пересекал поверхность нейтронной звезды, то энергия, тоже исправленная за красное смещение, присваивалась элементу 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 по высоте  $g(h)$  бралась однородной, функция распределения по углу [1]:

$$f(\theta) = \frac{6 \sin(\theta)^2 \left(1 + \frac{\pi}{2} \frac{\sin(\theta)}{\gamma(1-\beta \cos(\theta))}\right)}{7\pi\gamma^5(1-\beta \cos(\theta))^4} \quad (1)$$

где  $\beta$  — скорость стенок колонки в единицах скорости света,  $\gamma$  — соответствующий лоренц-фактор. Метрика пространства-времени принималась шварцшильдовской. Для учета линзирования была использована следующая аппроксимационная формула [2]:

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

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

На втором этапе задаче из полученной карты распределения энергии по полярному углу строился профиль пульса для конкретного наблюдателя. Задавались углы между осью вращения нейтронной звезды и магнитной осью —  $\theta_1$ , между осью вращения и направлением на наблюдателя —  $\theta_2$ . В зависимости от фазового угла из геометрии высчитывалось то, какой полярный угол будет иметь вектор направления на наблюдателя и исходя из этого, на основе полученной в 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 как если бы все фотоны излучались с поверхности нейтронной звезды. Принималось, что углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  являются равномерно распределенными случайными величинами. Исходя из этого вычислялись матожидание и дисперсия наблюдаемой светимости при фиксированных параметрах НЗ, а также вероятности ошибки в 10 и 100 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

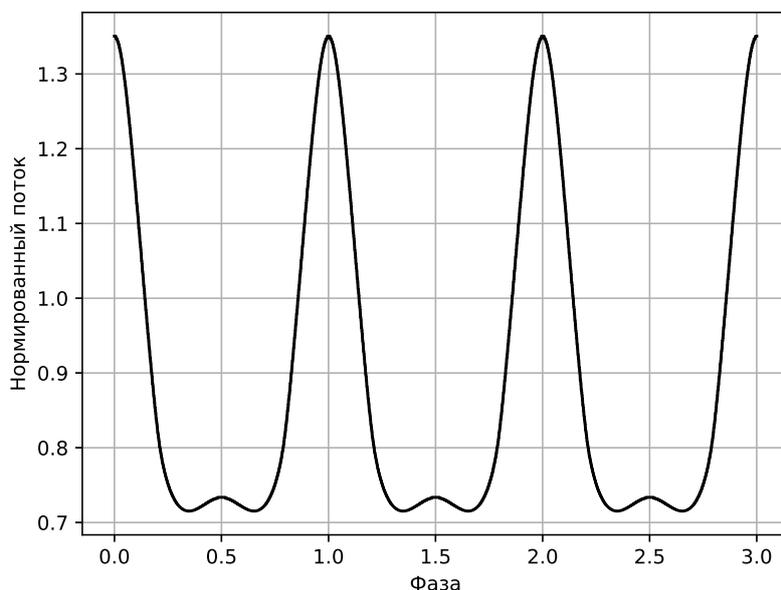


Рис. 1. Пример профиля пульса

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,  $\beta$  — скорость стенок

колонки (0 для покоящихся, ff 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 зависить светимость в 10 раз,  $P_{100}$  — в 100 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.

Таблица 1. Параметры распределения наблюдаемых светимостей

$H$	$\beta$	$L_{min}$	$L_{max}$	$\bar{L}$	$sd$	$P_{10}$	$P_{100}$
0.5	0	1.03	2.46	1.98	0.35	0.0	0.0
1	0	0.93	2.45	2.02	0.36	0.0	0.0
2	0	0.79	2.48	2.10	0.33	0.0	0.0
4	0	0.63	2.58	2.26	0.24	0.0	0.0
8	0	1.98	97.34	2.53	0.6	0.0001	0.0
12	0	2.05	127.11	2.72	0.79	0.0002	0.0
0.5	ff	1.88	2.35	2.06	0.13	0.0	0.0
1	ff	1.88	2.44	2.14	0.14	0.0	0.0
2	ff	1.87	2.74	2.19	0.23	0.0	0.0
4	ff	1.84	3.61	2.37	0.38	0.0	0.0
8	ff	1.81	265.40	2.75	1.92	0.0001	$1.6 \cdot 10^{-5}$
12	ff	1.84	372.91	3.01	2.69	0.0002	$1.6 \cdot 10^{-5}$

## 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 один и несколько порядков. 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.

## Список литературы

- [1] *Mushtukov A. A. et al.* On the radiation beaming of bright X-ray pulsars and constraints on neutron star mass–radius relation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 474. — P. 5425–5436.
- [2] *Poutanen Juri.* Accurate analytic formula for light bending in Schwarzschild metric // *Astron. Astrophys.* — 20202. — 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, описанного в [1], 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, согласующиеся с результатами модели в [1]. Дополнительно было рассмотрено влияние неопределенности значения отношения энергии диффузии к энергии десорбции на поверхности пылинки.

## STOCHASTIC ON-LATTICE SIMULATION OF H<sub>2</sub> FORMATION ON INTERSTELLAR GRAINS

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

We realized stochastic model evaluating efficiency of recombination H<sub>2</sub> in interstellar medium based on the approach of the continuous-time random walk on two-dimensional lattice described in [1]. 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 важной 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.

Целью данной работы являлось построить 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 рассматриваемом методе 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 диффузии  $E_b$ . Все направления для прыжков равновероятны. В случае, если узел в выбранном направлении занят другим атомом водорода, происходит реакция формирования молекулы. В реализованной модели молекула не задерживается на поверхности, а немедленно десорбирует в газ.

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 принимается 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  $a$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

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, в котором 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;  $\Delta E_d$  — экспоненциально распределенная положительная величина (отклонение от значения минимальной энергии десорбции).

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

В расчетах моделировались оливиновые и углеродные пылинки с тетрагональными и гексагональными решетками. Для оливиновых 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  $300 \text{ см}^{-3}$ . Температурный диапазон от 5 К до 30 К.

## Результаты

Эффективность 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 К до 9 К для оливина и от 11 К 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 (см. рис. 2).

Характерные времена выхода на стационарное состояние моделями составляют от  $10^6$  с 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.

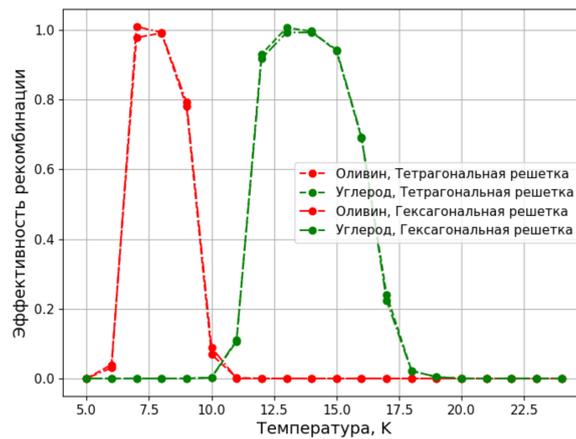


Рис. 1. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для однородных оливиновой и углеродной пылинок для решеток тетрагонального и гексагонального типов. Значение эффективности может превышать единицу в некоторых точках из-за численных флуктуаций количества водорода в стационарном состоянии на принятых размерах сетки

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  $\sigma = 0.1$ .

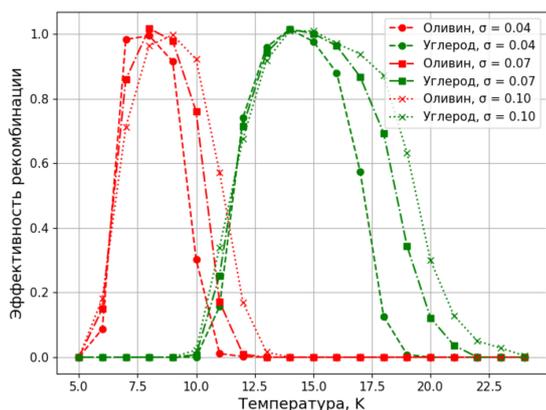


Рис. 2. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для неоднородных оливиновой и углеродной пылинок при различных значениях нормализованного отклонения

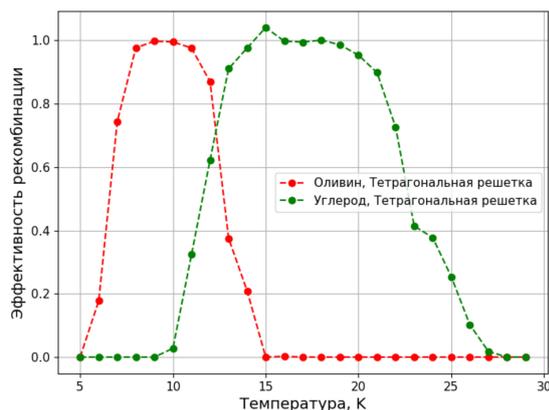


Рис. 3. Зависимость эффективности рекомбинации от температуры для неоднородных оливиновой и углеродной пылинок при нормализованном отклонении  $\sigma = 0.1$ . С равномерно распределенным случайным значением  $E_b/E_d$  на узлах

С такими параметрами рекомбинация становится эффективной на еще более широком диапазоне температур: от 6 К до 14 К для оливина и от 11 К до 25 К для углерода.

## Заключение

Полученные с помощью моделирования результаты качественно согласуются с результатами в [1], 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

## Список литературы

- [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 ПУТЁМ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДА И ЭКСТИНКЦИИ.

И. Н. Никоноров<sup>1</sup>, Р. Я. Жучков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Данная работа посвящена нахождению уравнений перехода от фотометрической системы RGB телескопа ШК-280, установленного на СКАС КФУ, в стандартную BVR систему Джонсона-Казинса, с применением современных численных методов. Были проведены наблюдения стандартов Ландольта поля SA110. Выполнена абсолютная фотометрия избранных звёзд, оценена погрешность измерений. Построена модель перехода от заатмосферных звёздных 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, G, R соответственно) и коэффициенты уравнений перехода между системами (цветовые коэффициенты 0.165, -0.120, -0.378 для B, V, R в зависимости от (B-G), (V-R), (V-R) соответственно).

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

I. N. Nikonorov<sup>1</sup>, R. Ya. Zhuchkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga region) Federal University

This work is devoted to study of transformations equations between RGB photometric system of 28-cm Schmidt-Cassegrain telescope mounted in NCAS KFU to standard Johnson-Cousins BVR using modern numerical methods. Observations of Landold Standards at the SA110 region were performed. Absolute photometry of selected stars was obtained with estimation 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, V, R in dependence of (B-G), (V-R), (V-R) respectively) and medium extinction at the observational period (0.276, 0.205, 0.159 for B, G, R respectively).

Важнейшим этапом получения данных является переход к стандартным заатмосферным звездным величинам. При этом зачастую наличие стандартных BVR фильтров 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 редукиции и полученных уравнениях перехода даже нестандартные (например, RGB) фильтры могут давать точность после перевода в международную систему не хуже традиционно используемых BVR.

Кроме того, в последнее время получило развитие множество численных методов, которые упрощают построение уравнений перехода и делают его методически более правильными. Так, весь код в данной работе, за исключением наблюдений, полностью 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. Звёздные величины из инструментальной системы BGR было решено переводить в BVR.

Проведены наблюдения части поля SA110 в июне-июле 2018 года. Были выбраны стандарты 496, 497, 499, 503, 504, 506, 507: они имеют звёздные величины 14.2 — 11.3 в полосе V, показатели цвета B-V 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 это ночи были получены 19 кадров в фильтре B и по 20 в G и R с выдержками 120 — 180 секунд. SNR составило  $\approx 80 - 300$ .

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 неопределённости значения в каждом из пикселей. Для регистрации смещений кадров относительно друг друга по ярким звёздам был использован пакет `Astroalign` [3]. Осуществлена апертурная абсолютная фотометрия избранных звёзд с помощью пакета `photutils` [4]. Погрешность суммы ( $S$ ) внутри апертуры считалась по алгоритмам пакета. Звёздная величина в инструментальной системе и её погрешность определялись по формулам 1.

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

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

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

Атмосферная экстинкция учитывалась также в соответствии с работой [5]. Уравнения для неё — 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. Параметры  $C$  и  $k$  считались априори распределёнными равномерно по фазовому пространству. Было учтено, что звёздные величины и показатели цвета в системе Ландольта имеют некоторые случайные погрешности, указанные в статье [1]. Они были включены в параметры модели и считались априори распределёнными нормально с известными дисперсиями и независимо. Функция правдоподобия также строилась в предположении, что невязки распределены нормально и независимо. За дисперсию их распределения полагались неопределённости, 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 афинно-инвариантный семплер emcee [9]. Из семплов апостериорного распределения путём маргинализации по звёздным величинам и показателям цвета в стандартной системе получены оценки коэффициентов экстинкции и перехода, см. таблицу 1.

Таблица 1. Найденные коэффициенты уравнений перехода и экстинкции.

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

Проверка показала, что уравнения перехода линейны с заявленной точностью в указанном диапазоне цветов. Невязки модели см. на рис. 1. Также можно заметить, что экстинкция в фильтрах не зависит от цвета звезды в рассмотренных условиях с реализованной точностью. Кроме того т.к. обычно погрешность дифференциальной фотометрии на инструменте порядка нескольких сотых величины, можно утверждать, что использование полученных уравнений перехода не будет значительно влиять на её 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.

## Список литературы

- [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, Sipócz 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 // *aj.* — 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.

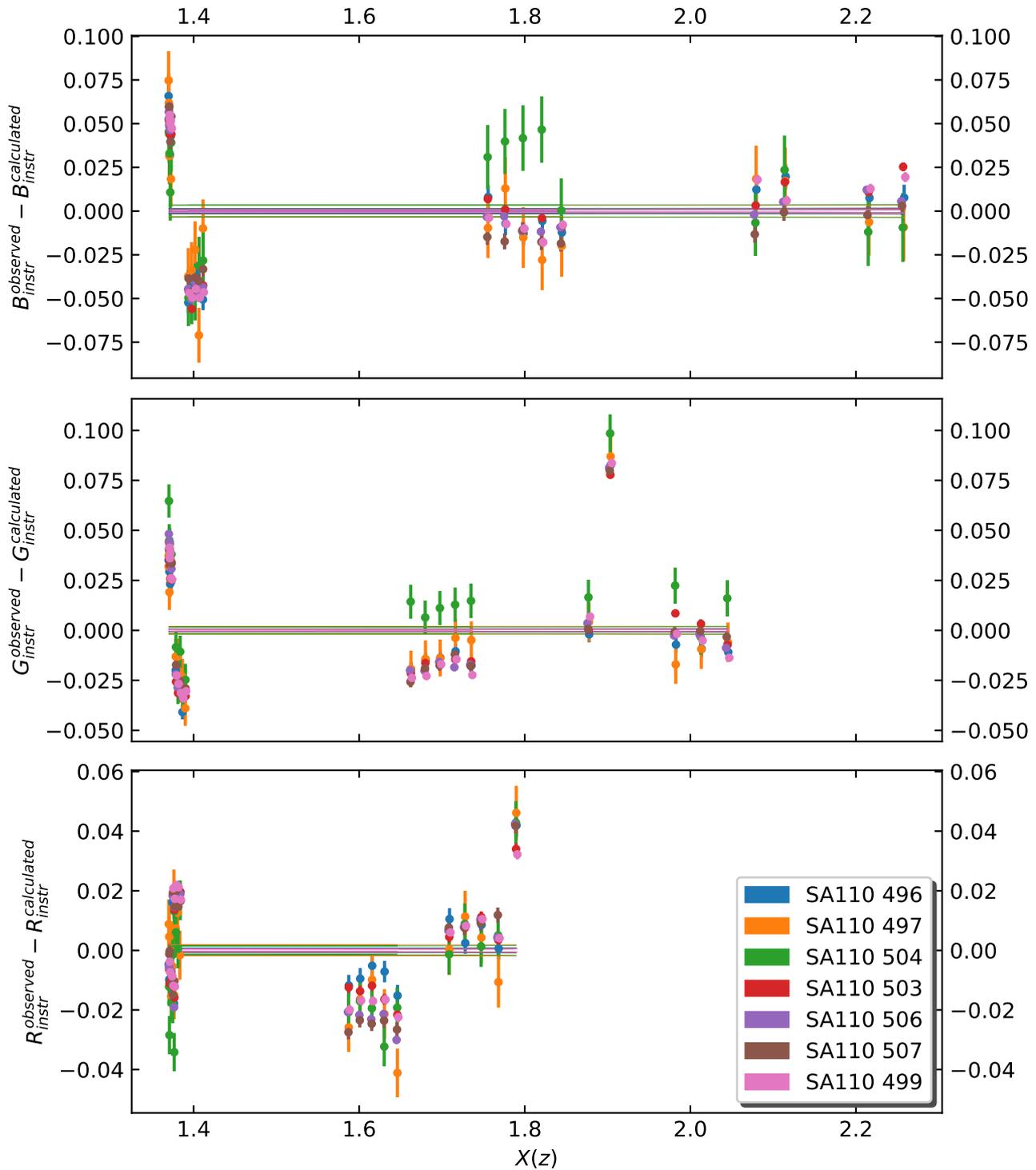


Рис. 1. Невязки построенной модели. Горизонтальные линии отражают погрешности проведения модельных прямых.

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

Т. А. Пермякова<sup>1</sup>, А. В. Локтин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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<sup>1</sup>, A. V. Loktin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 двух каталогов считались тождественными, если отклонение их экваториальных координат составляет не более 1 секунды дуги.

Далее строились графики зависимости металличности  $[Fe/H]$  от абсолютной звездной величины в полосе G (фотометрическая система телескопа GAIA), проводилось сглаживание зависимостей симметричным нерекурсивным девятичленным цифровым фильтром и аппроксимация результата полиномом третьей степени, полученным методом наименьших

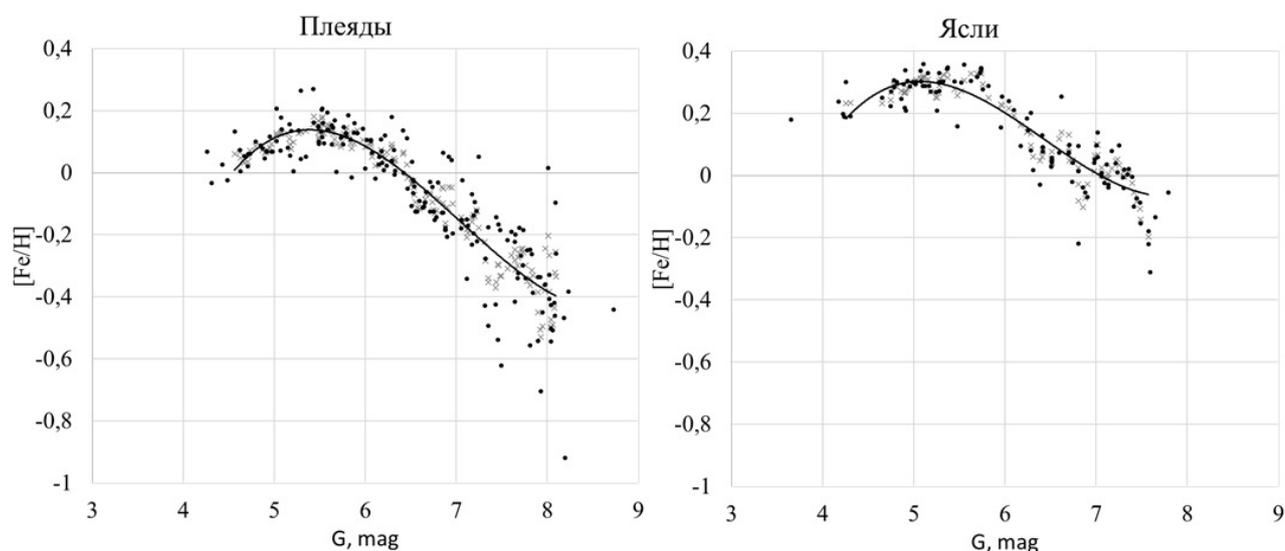


Рис. 1. Диаграммы абсолютная звездная величина — металличность. Черные точки — значение металличности для звезд скопления, серые — сглаженные, сплошная линия — аппроксимация

квадратов (соответствующие зависимости для скоплений показаны на рис. 1). 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:  $0.14 \pm 0.29$ ), в скоплении Плеяды полученная оценка оказалась немного меньше, чем в каталоге Chen L. и др. ( $-0.03$  и  $-0.074 \pm 0.031$  соответственно).

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

Для увеличения выборки и уточнения результатов в дальнейшем будут рассмотрены и другие близкие рассеянные звездные скопления.

## Список литературы

- [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] B. Taylor M. 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<sup>1</sup>, А. Ф. Пунанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 работы [1] по наблюдениям на GBT).

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

I. V. Petrashkevich<sup>1</sup>, A. F. Punanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 [1] 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<sup>-3</sup>, 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 спектров  $N_2H^+$ ,  $N_2D^+$ ,  $NH_2D$ ,  $H^{13}CO^+$  и  $DCO^+$ , и  $NH_3$  из работы [1]. Азотсодержащие соединения трассера плотных областей дозвездных ядер, а углеродсодержащие соединения являются трассерами менее плотного газа оболочки ядра. Мы оценили лучевую концентрацию соединений и построили карты доли дейтерия. На рисунках 1 и 2 представлены карты доли дейтерия наблюдаемых соединений. 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 [2], дисперсии скорости частиц газа (по нашим данным). Мы не нашли корреляции доли дейтерия

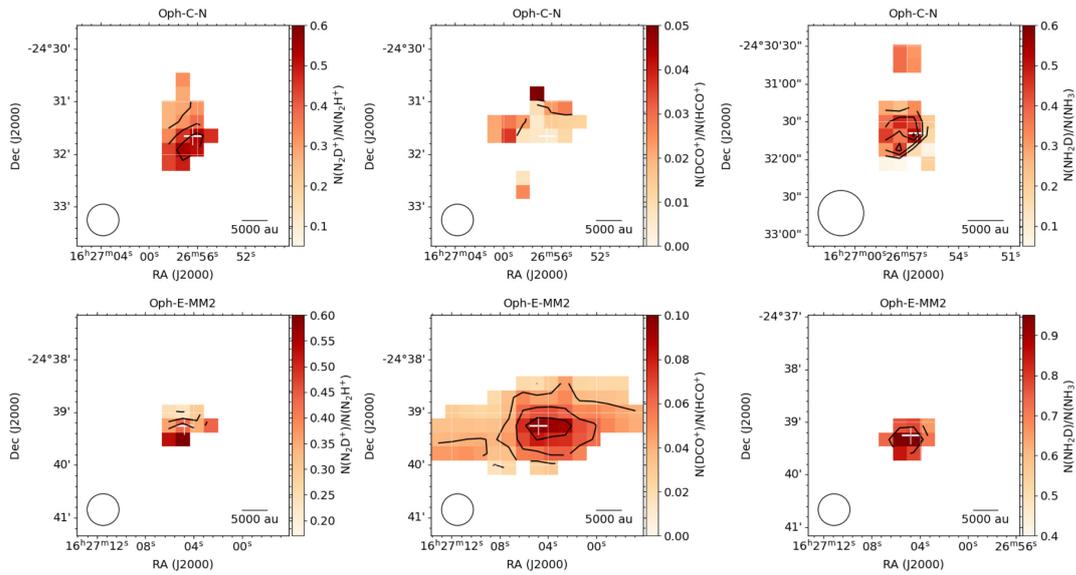


Рис. 1. Карты доли дейтерия ядер Oph-C-N и Oph-E-MM2. Начальное значение контуров  $3\sigma$ . Размер луча показан в нижнем левом углу каждой карты.

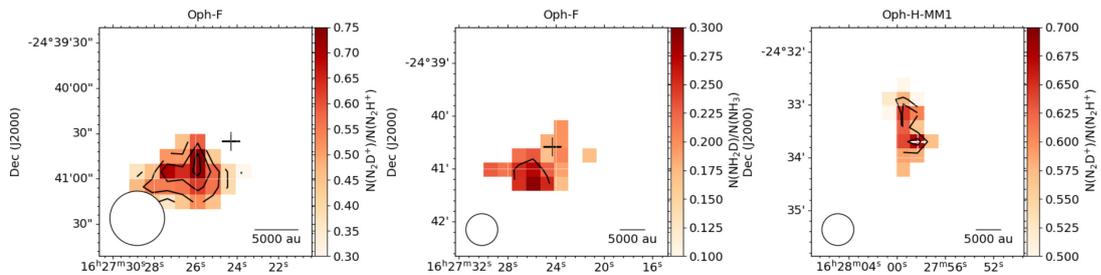


Рис. 2. Карты доли дейтерия ядер Oph-F и Oph-H-MM1. Начальное значение контуров  $3\sigma$ . Размер луча показан в нижнем левом углу каждой карты.

с лучевой концентрацией водорода и 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.

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

## Список литературы

- [1] *Friesen Rachel K., Pineda Jaime E., co-PIs et al.* The Green Bank Ammonia Survey: First Results of  $\text{NH}_3$  Mapping of the Gould Belt // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 843, № 1. — P. 63. 1704.06318.
- [2] *Ladjele 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.

## РАДИАЛЬНЫЙ ДРЕЙФ ПЫЛЕВЫХ ГРАНУЛ В ЗАМАГНИЧЕННЫХ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Е. И. Прокопьева<sup>1</sup>, С. А. Хайбрахманов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Челябинский государственный университет, <sup>2</sup> Уральский федеральный университет

Исследуется дрейф пылинок в замагниченных аккреционных дисках молодых звезд. Плотность и температура аккреционных дисков рассчитываются с помощью модели Дудорова и Хайбрахманова. Исследуется зависимость скорости радиального дрейфа от степени отклонения угловой скорости газа от кеплеровской,  $\eta$ . Полагается, что субкеплеровское вращение газа обусловлено влиянием натяжений остаточного крупномасштабного магнитного поля диска. Показано, что малые частицы в зависимости от величины параметра  $\eta$  дрейфуют со скоростью  $v_{dfirt} \approx [1, 3]$  см/сек, крупные частицы — со скоростью  $v_{dfirt} \approx [2 \times 10^2, 3 \times 10^5]$  см/сек.

## RADIAL DRIFT OF DUST GRANULES IN MAGNETIZED ACCRETION DISKS OF YOUNG STARS

E. I. Prokop'eva<sup>1</sup>, S. A. Khaibrakhmanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Chelyabinsk state university <sup>2</sup> Ural Federal University

The drift of dust particles in magnetized accretion disks of young stars is investigated. The density and temperature of the accretion disks are calculated using the Dudorov and Khaibrakhmanov model. Dependence of the drift speed on the degree of gas rotation velocity deviation from keplerian rotation is analyzed. It is considered that subkeplerian gas rotation is caused by the action of the tension of fossil large-scale magnetic field. It is shown that small particles, drift with small speed  $v_{dfirt} \approx [1, 3]$  cm/sec, large particles drift with speed  $v_{dfirt} \approx [2 \times 10^2, 3 \times 10^5]$  cm/sec.

## Введение

Инфракрасные наблюдения протопланетных дисков указывают на эволюцию размеров и пространственного распределения пылевых частиц в аккреционных и протопланетных дисках [1]. Предполагается, что в протопланетных дисках происходит рост пылевых частиц, а также их накопление за счет процессов радиального и вертикального дрейфов [2]. В дальнейшем объединение пылевых частиц может приводить к образованию зародышей протопланет [3], [4]. Современные наблюдательные данные указывают на то, что в аккреционных и протопланетных дисках молодых звезд присутствует крупномасштабное магнитное поле [5], [6], [7]. Этот вывод согласуется с предсказаниями теории остаточного магнитного поля, согласно которой в процессе звездообразования магнитный поток протозвездных облаков частично сохраняется и молодые звезды с аккреционными дисками рождаются с остаточным крупномасштабным магнитным полем [8]. Для определения условий образования планет в замагниченных аккреционных дисках молодых звезд актуально задачей является моделирование дрейфа пылевых гранул с учетом влияния магнитного поля на структуру диска. Радиальный дрейф обусловлен тем, что твердые частицы движутся в диске с кеплеровской скоростью, в то время как угловая скорость газа меньше кеплеровской. Согласно классической картине, отклонение угловой скорости газа от кеплеровской

обусловлено действием градиента газового давления [9]. Оценки показывают, что электромагнитная сила также может замедлять скорость вращения газа в областях динамически сильного магнитного поля. В данной работе анализируется скорость радиального дрейфа пылевых гранул в областях аккреционных дисков, в которых натяжения магнитного поля приводят к отклонению скорости газа от кеплеровского вращения.

## Краткое описание результатов

Рассмотрим радиальный дрейф пылевых гранул заданного радиуса  $a$  и плотности  $\rho_{grain}$  в аккреционном диске с известными плотностью  $\rho$ , температурой  $T$ , радиальной скоростью газа  $u_r$ .

Скорость радиального дрейфа определяется по формуле [10]

$$v_r = \frac{t_{stop}^{-1} u_r - \eta v_K}{\tau_{stop} + \tau_{stop}^{-1}}, \quad (1)$$

где  $t_{stop}$  — время остановки за которое скорость пылинки снизится за счет трения о газ,  $v_K$  — кеплеровская скорость,  $\eta$  — коэффициент отклонения угловой скорости газа от кеплеровской скорости,  $\tau_{stop} = t_{stop} \Omega_K$  — безразмерное время остановки частицы,  $\Omega_K$  — угловая кеплеровская скорость. Величина  $t_{stop}$  зависит от радиуса пылинки, а также плотности и температуры диска.

Формула (1) в предельном случае  $\tau_{stop} \ll 1$  сводится к

$$v_r = u_r - \eta \tau_{stop} v_K, \quad (2)$$

Будем полагать параметр  $\eta$  фиксированным и исследуем зависимость скорости радиального дрейфа от  $\eta = [0, 0.95]$  для пылинок различных радиусов. Мы полагаем, что это отклонение обусловлено действием электромагнитной силы в областях динамически сильного магнитного поля.

Структуру диска будем рассчитывать с помощью модели Дудорова и Хайбрахманова [11], [12]. Данная модель разработана для исследований аккреционных дисков молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем. В качестве базовой используется модель Шакуры и Сюняева [13]. Рассмотрим аккреционный диск звезды типа Т Тельца солнечной массы, и примем характерные значения параметра турбулентности  $\alpha = 0.01$  и темпа аккреции вещества  $3 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ .

Зависимость скорости дрейфа от степени отклонения скорости газа от Кеплеровской скорости была проанализирована при следующих параметрах:

$$t_{stop} = \frac{\rho_s a}{\rho v_{th}}, \quad (3)$$

где  $\rho_s = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $a = 1 \times 10^2 \text{ см}$ .

На рисунке 1 (a) показаны профили  $v_{drift}$  для пылинки радиусом  $1 \times 10^{-5} \text{ см}$ . При росте параметра  $\eta$  начальная скорость дрейфа частицы во внешней части диска увеличивается в пределах  $v_{drift} \approx [1, 3] \text{ см/сек}$ . Скорость радиального дрейфа пылинок малого радиуса мала.

На рисунке 1 (b) показаны профили  $v_{drift}$  для пылинки радиусом  $10 \text{ см}$ . При росте параметра  $\eta$  начальная скорость дрейфа частицы например, для крупной частицы скорость дрейфа составляет несколько километров в секунду для  $\eta=0.05$ , что на 3-5 порядков больше радиальной скорости газа. Таким образом, крупные пылинки испытывают быстрый дрейф по направлению к звезде.

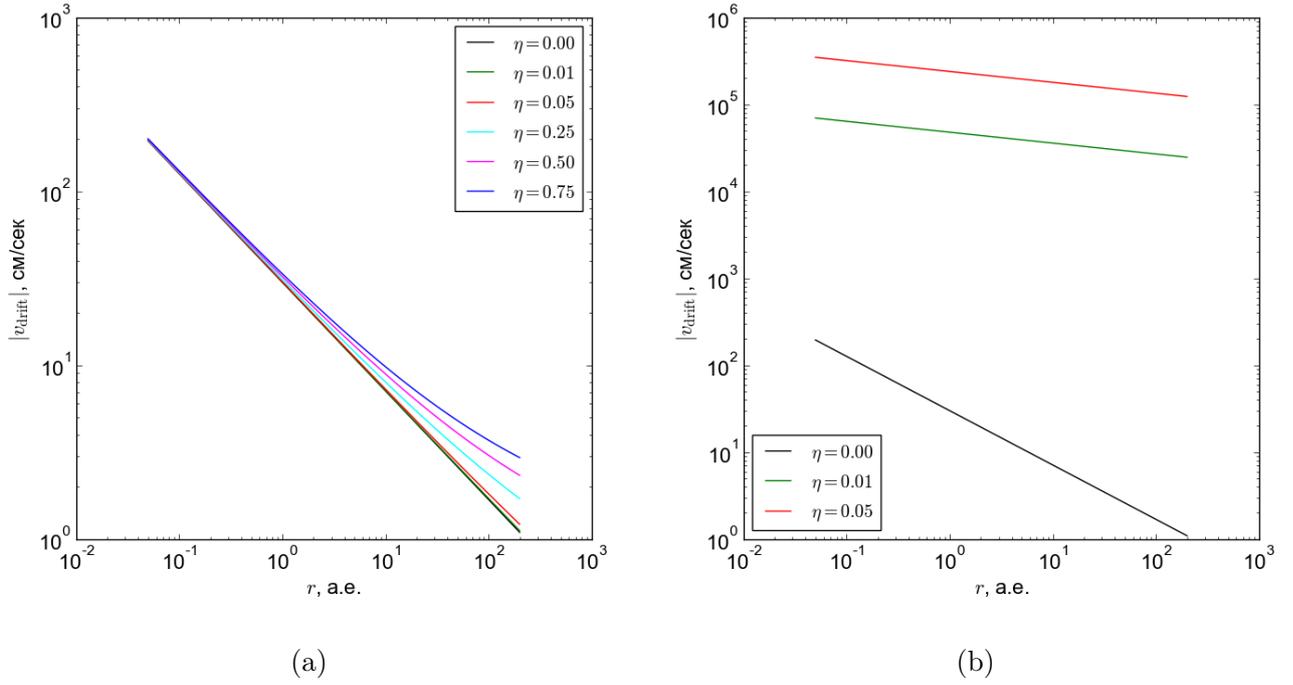


Рис. 1. Зависимость модуля скорости радиального дрейфа частицы от радиального расстояния в диске для различных значений степени отклонения угловой скорости газа от кеплеровской,  $\eta$ . Панель а: радиус пылинки равен  $1e-5$  см. Панель б: радиус пылинки равен 10 см.

## Заключение

В данной работе анализируется скорость радиального дрейфа пылевых частиц различных размеров в аккреционном диске звезды типа Т Тельца солнечной массы. Структура диска рассчитывается с помощью оригинальной модели Дудорова и Хайбрахманова [11], [12]. Полагается, что отклонение скорости газа от кеплеровской, которое обуславливает дрейф, вызвано действием электромагнитной силы. Проанализированы скорости дрейфа для пылинок различных размеров. Показано, что малые частицы в зависимости от величины параметра  $\eta$  имеют малую скорость дрейфа в пределах  $v_{dirt} \approx [1, 3]$  см/сек, крупные частицы дрейфуют со скоростями  $v_{dirt} \approx [2 \times 10^2, 3 \times 10^5]$  см/сек.

Благодарности. Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-42-740013).

## Список литературы

- [1] *ALMA Partnership, Brogan C. L., Pérez L. M. et al.* The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 808, № 1. — P. L3. 1503.02649.
- [2] *Williams Jonathan P., Cieza Lucas A.* Protoplanetary Disks and Their Evolution // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 49, № 1. — P. 67–117. 1103.0556.
- [3] *Safronov Viktor Sergeevich.* Evoliutsiia doplanetnogo oblaka. — 1969.
- [4] *Goldreich Peter, Ward William R.* The Formation of Planetesimals // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 183. — P. 1051–1062.
- [5] *Donati Jean-François, Paletou Frédéric, Bouvier Jérôme, Ferreira Jonathan.* Direct detection of a magnetic field in the innermost regions of an accretion disk // *Nature.* — 2005. — Vol. 438, № 7067. — P. 466–469. astro-ph/0511695.
- [6] *Li Dan, Telesco Charles M., Zhang Han et al.* Mid-infrared polarization of Herbig Ae/Be discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 473, № 2. — P. 1427–1437. 1708.08026.
- [7] *Vlemmings W. H. T., Lankhaar B., Cazzoletti P. et al.* Stringent limits on the magnetic field strength in the disc of TW Hya. ALMA observations of CN polarisation // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 624. — P. L7. 1904.01632.
- [8] *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 2014. — Vol. 352, № 1. — P. 103–121. 1403.5513.
- [9] *Weidenschilling S. J.* Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1977. — Vol. 180. — P. 57–70.
- [10] *Armitage Philip J.* *Astrophysics of Planet Formation.* — 2010.
- [11] *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение. — 2013. — Т. 74. — С. 27–39.
- [12] *Дудоров С. А., А. Е. and Хайбрахманов.* Кинематическая МГД модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение // *Вестн. Челяб. гос. ун-та.* — 2013. — № 74. — С. 40–52.
- [13] *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black Holes in Binary Systems: Observational Appearances // *X- and Gamma-Ray Astronomy / ed. by H. Bradt, Riccardo Giacconi.* — 1973. — Vol. 55. — P. 155.

## АКТИВНЫЕ ЯДРА СРЕДИ ГАЛАКТИК С ПОЛЯРНЫМ КОЛЬЦОМ

Д. В. Смирнов

*Санкт-Петербургский Государственный Университет*

На основе данных SDSS рассмотрен вопрос о встречаемости активных ядер среди 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 frequency of active nuclei among 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) - редкий класс внегалактических объектов. Они состоят из центральной галактики, окруженной примерно вдоль своей малой оси протяженным кольцом. В подавляющем большинстве случаев центральные объекты ГПК являются галактиками ранних типов бедными газом. Полярные структуры имеют голубые показатели цвета, содержат газ и звёзды, показывают вращение вокруг большой оси центральной галактики.

Современные модели предполагают, что формирование ГПК происходило в 2 этапа: на первом сформировалась центральная галактика, а на втором в следствии некоего события образовалось полярное кольцо. Этим событием могло быть, например, столкновение галактик с взаимно ортогональными дисками, аккреция газа при близком взаимодействии галактик, захват и разрушение спутника. Подобные взаимодействия должны сопровождаться аккрецией газа на центральную галактику, например, расчёты показывают, что при слиянии эллиптической и спиральной галактик около 10%-20% [1] газа падают к центру сформировавшегося объекта. Вековая эволюция полярных структур также может вызывать аккрецию газа к центру. Падение вещества на массивный объект в центрах галактик является общепринятым механизмом нетепловой активности их ядер. Учитывая особенности формирования и эволюции ГПК, встаёт вопрос о встречаемости активных ядер среди ГПК.

## Данные и методика

В работе рассматривались галактики из каталога SPRC [2], в котором приведены данные о 275 кандидатах в ГПК, разделённых на 4 группы: лучшие кандидаты, хорошие кандидаты, связанные объекты и кольца, видимые плашмя. Спектральные наблюдения показывают, что большая часть первой группы - кинематически-подтверждённые ГПК. Эта группа

была дополнена объектами из работы [3], в ней описывается 31 галактика из SDSS [4], морфологически подобная наилучшим кандидатам в каталоге 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 межзвёздного поглощения Калцетти. В дальнейшем при классификации галактик рассматривались только те объекты, у 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 светимости 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. Объёмы выборок сравнения составили от 17 до 55 тысяч объектов.

Для классификации галактик были использованы классические BPT-диаграммы. Эти диаграммы позволяют разделить объекты с разными источниками ионизации, сравнивая отношения потоков в разных эмиссионных линиях (см. Рис.1). 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 лайнеров (LINEAR galaxies). Нами была использована классификационная схема из работы [5]. При анализе диаграмм мы считали, что галактика имеет активное ядро, если она попала в соответствующую область на всех трёх диаграммах.

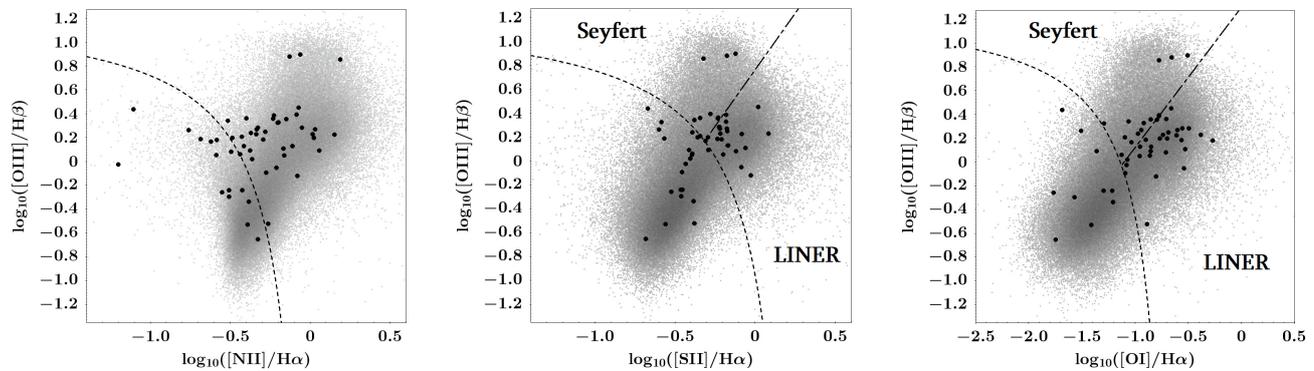


Рис. 1. BPT-диаграммы для лучших кандидатов в ГПК (чёрные кружки) и выборки сравнения (серые кружки). Линиями обозначены границы для разных типов активных ядер согласно [5]

## Результаты и обсуждение

Результаты проведённого анализа даны в таблице 1, в скобках указано число объектов. Во избежание нежелательных статистических эффектов было рассмотрено 50 реализаций выборок сравнения, в таблице приведено усреднённое 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 лайнеров ( $30.8\% \pm 6.4\%$ ), в выборке сравнения эти значения

Таблица 1. Встречаемость галактик с активными ядрами среди ГПК и галактик обзора SDSS

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

составляют 6.9% и 23% соответственно. То есть избыток активных ядер среди лучших кандидатов наблюдается и среди, SyG и среди лайнеров. Детальное рассмотрение показывает, что при  $M_r \leq -20^m$  наблюдается примерно двухкратное превышение долей активных ядер среди ГПК по сравнению с обычными галактиками 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 не достаточно) 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 [6]. 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 BPT-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.

## Список литературы

- [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] *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.
- [6] *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. Сусликов<sup>1</sup>, А. И. Колбин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, <sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН

В данной работе выполнено фотометрическое и спектральное исследование поляра V379 Vir. При определении параметров системы использовался метод моделирования ИК кривых блеска на основе модели точечного источника циклотронного излучения, метод синтетической фотометрии для описания наблюдаемого спектрального распределения плотности потока, а также метод моделирования магнитной кривой, полученной из величины зеемановского расщепления линии  $H_\beta$ . Нам удалось оценить температуру белого карлика  $T_{\text{eff}} = 11450$  К, массы и радиусы главной и вторичной компоненты:  $M_1 = 0.696 M_\odot$ ,  $R_1 = 0.011 R_\odot$ ,  $M_2 = 0.105 M_\odot$ ,  $R_2 = 0.14 R_\odot$ . Разделение компонент составило порядка 0.6 а.е., а угол наклона орбитальной плоскости  $i$  лежит в диапазоне  $47^\circ - 60^\circ$ .

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

M. V. Suslikov<sup>1</sup>, A. I. Kolbin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga-region) Federal University, <sup>2</sup>Special 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 describe the observed spectral distribution of the flux density, 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  $T_{\text{eff}} = 11450$  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 of the orbital plane  $i$  lies in the range  $47^\circ - 60^\circ$ .

## Введение

Поляры (переменные типа AM Her) представляют собой тесные двойные системы, состоящие из сильно замагниченного белого карлика ( $B \sim 10^7 - 10^8$  Гс) и холодной звезды главной последовательности, заполняющей свою полость Роша. Благодаря приливному взаимодействию 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  $\rho v^2$ , происходит захват вещества, которое начинает движение вдоль магнитных силовых линий. В результате вещество выпадает в области 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 или ИК диапазоне.

В нашей ранней работе [1] в спектре V379 Vir было обнаружено наличие четкого зеемановского расщепления компонент линии  $H_{\beta}$ , 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] для моделирования поведения циклотронного излучения в течение орбитального периода. При этом предполагается модель белого карлика с точечным источником. Спектр циклотронного излучения двух мод поляризации определялся из решения уравнения переноса для случая однородной среды. Описание выполнялось на основе взвешенного МНК с использованием алгоритма минимизации Нелдера-Мида. Сравнение наблюдаемых и теоретических ИК кривых блеска представлено на рис. 1.

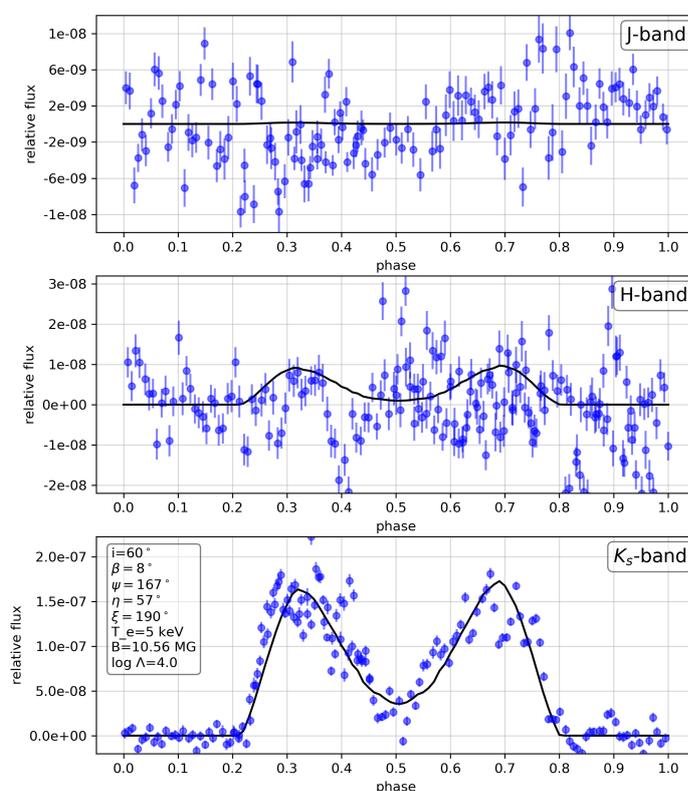


Рис. 1. Сравнение модельных и наблюдаемых кривых блеска V379 Vir в  $J$ -,  $H$ -,  $K_s$ -полосах. Параметры модели указаны на графике.

## 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 [3]. Для описания наблюдаемого распределения спектральной плотности потока использовался взвешенный МНК. В процессе минимизации определялась температура фотосферы белого карлика  $T_{\text{eff}} = 11450$  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. Ошибки определения потоков рассчитывались на основе метода Монте-Карло.

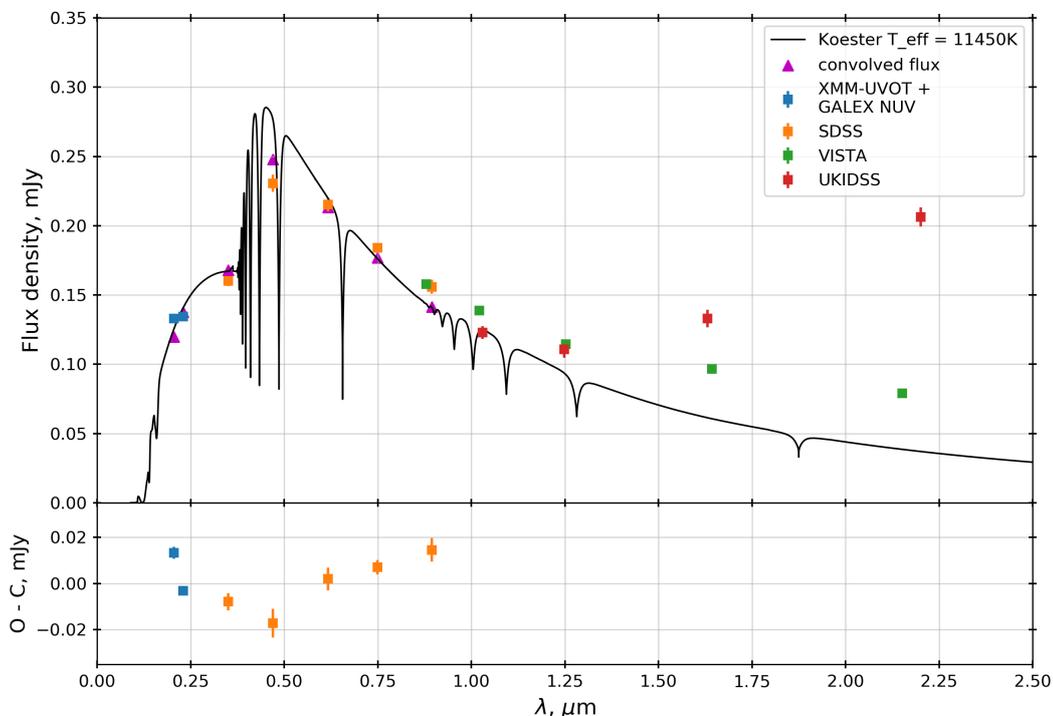


Рис. 2. Распределение спектральной плотности потока V379 Vir.

## Определение параметров V379 Vir

По полученному угловому радиусу V379 Vir и параллаксу из каталога GAIA мы определили радиус белого карлика  $R_1 = 0.011 R_{\odot}$ . Решая численным методом известное соотношение между радиусом и массой для белых карликов [4] можно получить  $M_1 = 0.696 M_{\odot}$ . В работе [5] из кривой лучевых скоростей получена оценка полуамплитуды  $K'_2$  для пятна коричневого карлика. Учитывая поправку перехода к центру вторичной компоненты нами получено, что  $K_2 = 346$  км/с. На основе уточненного нами в [1] орбитального периода  $P_{orb}$  и  $K_2$  можно вычислить функцию масс главной компоненты:

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

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 [6]  $R_2 = R_L(M_2, M_1)$ , решая совместно уравнение (2), мы определили угол наклона плоскости орбиты в диапазоне  $47^\circ - 60^\circ$ . Таким образом, по формуле (2) получили, что  $M_2 = 0.105 M_{\odot}$ ,  $R_2 = 0.14 R_{\odot}$ . Из третьего закона Кеплера мы вычислили разделение компонент  $A = 0.6$  а.е.

На основании уточненного угла наклона орбитальной плоскости  $i$  было выполнено моделирование магнитной кривой аналогично [1]. 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  $a = 0.15$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 19-32-60048).

## Список литературы

- [1] *Suslikov M. V., I. Kolbin A., V. Borisov N., V. Shimansky V.* Magnetic field study of the polar V379 Vir // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century / ed. by Romanyuk I. I., Yakunin I. A., Valeev A. F., Kudryavtsev D. O. : 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.
- [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] *Koester D.* White dwarf spectra and atmosphere models // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* — 2010. — Vol. 81. — P. 921–931.
- [4] *Nauenberg M.* Analytic Approximations to the Mass-Radius Relation and Energy of Zero-Temperature Stars // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 175. — P. 417.
- [5] *Schmidt G. D., P. Szkody, M. Silvestri N. et al.* Discovery of a Magnetic White Dwarf/Probable Brown Dwarf Short-Period Binary // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 630. — P. 173–176.
- [6] *L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, C. Chiosi.* 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. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 141. — P. 371–383.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ СПУТНИКОВОЙ ДИНАМИКИ

Е. Е. Шмидт<sup>1</sup>, М. А. Баньщикова<sup>1</sup>, В. А. Авдюшев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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<sup>1</sup>, M. A. Banshchikova<sup>1</sup> V. A. Avduyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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 этих спутников 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  $\varkappa$  и внутреннюю  $\hat{\varkappa}$  нелинейности [2] при четырех наблюдениях, распределенных на дугах  $\Delta t/T = 10^{-1}$  и  $10^{-2}$ , где  $\Delta t$  — временной интервал наблюдения, а  $T = 2\pi$  — период обращения спутника. На рисунке показаны значения показателей нелинейности в зависимости от начального положения объекта, определяемого аномалией  $\varphi$ , и от угла между картиной и орбитальной плоскостями  $\psi$ . Заливка полутонами серого цвета применяется только к уровням показателей, превышающих критическое значение  $10^{-3}$  [2].

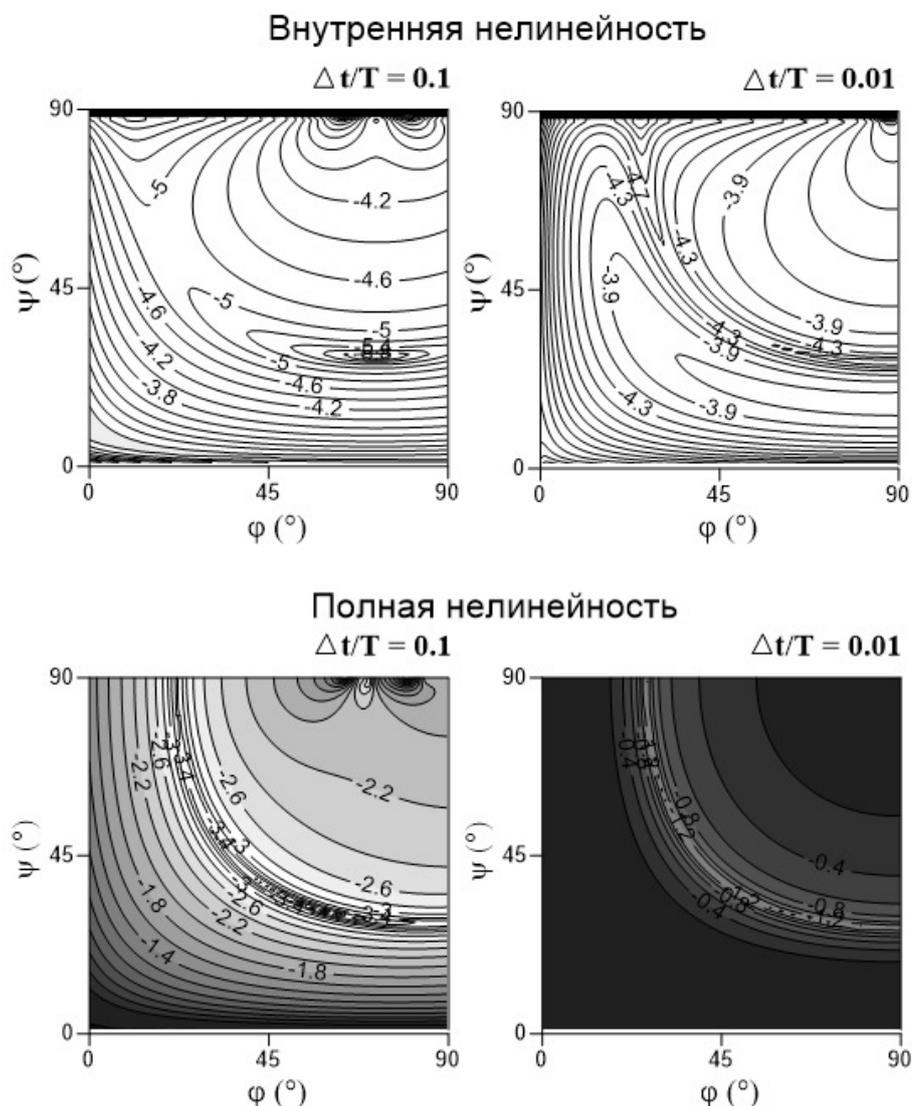


Рис. 1. Внутренняя  $\lg \hat{\varkappa}$  и полная  $\lg \varkappa$  нелинейности в модельной задаче

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-

Таблица 1. Показатели нелинейности для далеких спутников Юпитера

№	Спутник	$\varkappa$	$\hat{\varkappa}$	$N$	$\Delta t/T$	№	Спутник	$\varkappa$	$\hat{\varkappa}$	$N$	$\Delta t/T$
1	Архе	0.0003	0.0000	31	0.64	15	S2003J17	0.0214	0.0006	12	0.07
2	Автоное	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	Спондее	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	Эванте	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 номером строки от 11 по 20 — с умеренной нелинейностью, а спутники с номером строки 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).

## Список литературы

- [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., Сюзина О. М., Тамаров В. А. Нелинейность в обратных задачах астероидной динамики // Астрон. вестник. — 2021. — Т. 55. — С. 1—13.

# Научные сообщения



## ОЦЕНКА НЕТЕПЛОВОЙ ПОТЕРИ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ GJ 436b ЗА СЧЕТ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ $H_2$

А. А. Автаева<sup>1,2</sup>, В. И. Шематович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии РАН, Москва, <sup>2</sup>ГАИШ МГУ, Москва*

Оценен вклад процессов диссоциации молекулярного водорода жестким ультрафиолетовым (УФ) излучением и сопутствующим потоком фотоэлектронов в образование фракции надтеплого атомарного водорода в переходной  $H_2 \rightarrow H$  области и формирование нетеплового потока убегания из протяженной верхней атмосферы экзопланеты — горячего нептона GJ 436b. Рассчитаны скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации  $H_2$ .

## ESTIMATES OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC LOSS OF EXOPLANET GJ 436b DUE TO DISSOCIATION PROCESSES $H_2$

A. A. Avtaeva<sup>1,2</sup>, V. I. Shematovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, <sup>2</sup>SAI 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  $H_2 \rightarrow H$  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  $H_2$  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., являются основными источниками 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  $H(2s, 2p)$  состояниях. Фотолиз 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 нетепловую потерю атмосферы горячей экзопланеты [2].

Планета GJ 436b с массой  $M_p = 0.07M_{Jupiter}$  и радиусом  $R_p = 0.38R_{Jupiter}$  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 10 интервалов. При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере, и рассчитан нетепловой поток убегания. Поток

убегания оценен величиной  $3.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для умеренного уровня звездной активности в УФ-излучении, что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации  $H_2$  равной  $7.8 \cdot 10^8 \text{ г с}^{-1}$ . Расчетная величина входит в интервал полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне  $\sim (3.7 \cdot 10^6 - 1.1 \cdot 10^9) \text{ г с}^{-1}$ . 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.

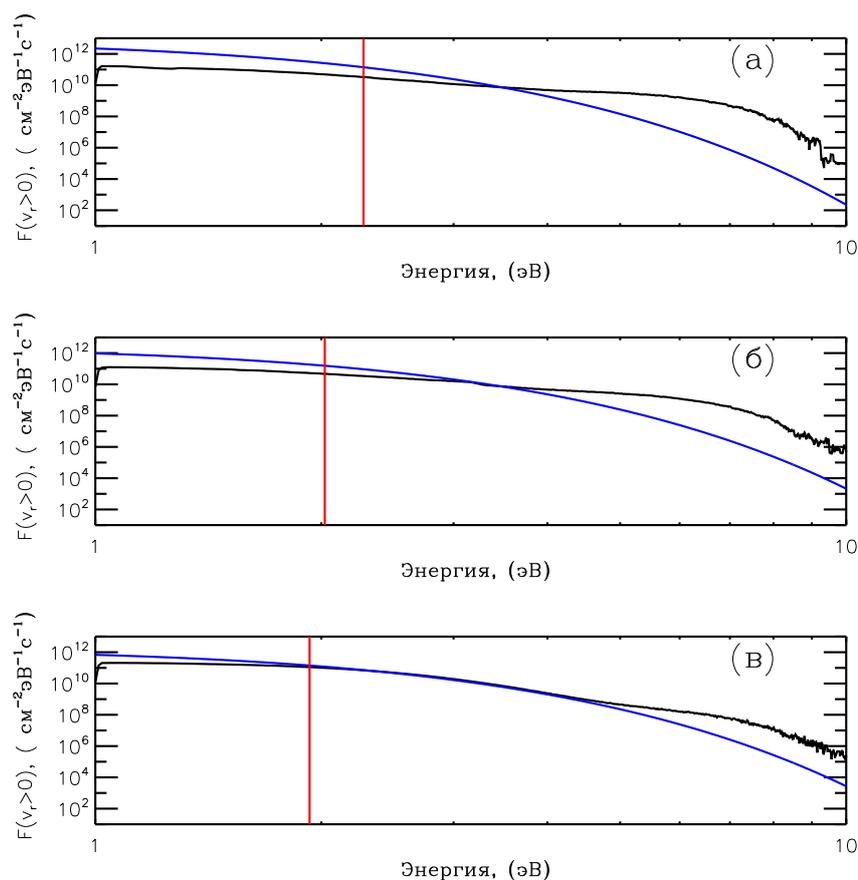


Рис. 1. Расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах  $1.56 \cdot R_p$  (верхняя панель),  $1.75 \cdot R_p$  (средняя панель) и  $1.84 \cdot R_p$  (нижняя панель). Линиями синего цвета показаны потоки тепловых атомов  $H$ , рассчитанные для локально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

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.

## Список литературы

- [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.

# АЛГОРИТМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДВУ- И ТРЁХМЕРНЫХ 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 трёхмерном пространстве параметров. Алгоритм двумерного анализа полностью завершён и опубликован в виде открытого C++ кода стабильной версии, тогда как трёхмерный 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 является 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  $s(x)$  есть детерминированный сигнал, а  $n(x)$  шум.

Здесь, однако, мы рассматриваем другую практическую задачу: анализ распределения случайной величины. В такой формулировке мы не можем измерять значений  $f(x_i)$  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 представляется из себя 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 всё ещё 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 1990х [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 обобщён на двумерный случай, т.е. для анализа распределения объектов на плоскости двух параметров [6], а сейчас ведётся работа по расширению методики на три измерения. Повышение размерности ведёт к усложнению некоторых формул, а также к резкому росту сложности вычислений, однако общая схема анализа остаётся 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  $\psi$  — анализирующий вейвлет (см. ниже). Изотропная она потому, что вейвлет радиально симметричен (зависит только от модуля аргумента).

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

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

где  $\varphi$  — некоторая сглаживающая функция колоколообразной формы. При таком выборе, вейвлет-преобразование  $Y$  представляет собой сглаженный ядром  $\varphi$  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 треугольные 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 её 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 отсчёта этого случайного поля, что сделано в указанных выше работах.

Также в работе проводился поиск оптимальных вейвлетов, точнее — оптимальных производящих функций  $\varphi$ , которые позволили бы минимизировать возникающий в  $z(a, \mathbf{b})$  шум (хотя  $z$  нормирована так, что дисперсия каждого её значения всегда равна единице, дисперсия максимального отсчёта 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 распространённого 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 звёзд солнечной окрестности по каталогу GAIA DR2 [9]. Основным итогом по первой задаче — вейвлет-анализ позволил обнаружить лишь часть известных астероидных семейств, т.е. многие семейства, обнаруженные обычным здесь методом НСМ (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, трёхмерное распределение по его двумерным проекциям. Во второй задаче наоборот, удалось найти около 20 ранее не известных движущихся групп звёзд. Все они оказались высокоскоростными (в низкоскоростной зоне весьма силён 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 звёздное население — пространства скоростей  $(U, V, W)$ . Использование лишь двумерных проекций не позволяет сделать однозначных выводов о соответствующем трёхмерном распределении, хотя иногда позволяет получить интересные результаты.

Обобщение нашего алгоритма на случай трех измерений в целом выполнено и 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).

## Список литературы

- [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., Cr ez e M., Bienaym e 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 расчёта вероятностей соударения большого числа астероидов. Сравняется эффективность трёх методов, основанных на 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 году), вероятно дальнейшее ускорение. Оценка вероятностей соударения требует всё больших вычислительных ресурсов. Около года назад на кафедре небесной механики СПбГУ был разработан высокооптимизированный алгоритм для расчёта 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 неопределённости играет в этом случае значительно большую роль, чем неучтенные возмущения. Особенность новой программы — возможность расчёта вероятности соударения сразу со всеми планетами Солнечной системы без заметного падения производительности.

Для массового расчёта вероятностей соударения выбрано три метода, которые будут сравниваться между собой: простой метод Монте-Карло; модифицированный метод, использующий информацию о шестимерной структуре области неопределённости; модифицированный метод, использующий возможности машинного обучения. Преимуществом последнего является возможность эффективного использования графического процессора, однако надёжность 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 неопределённости 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 ГОДУ

Д. А. Биколова<sup>1</sup>, С. В. Назаров<sup>2</sup> М. Ю. Ховричев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, <sup>2</sup>ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, <sup>3</sup>СПбГУ

В работе представлены результаты наблюдений спутников Урана и Нептуна, выполненных в 2020 году с помощью метрового зеркального телескопа «Сатурн» (ГАО РАН) и 350-миллиметрового гида телескопа «Синтез» (КрАО РАН). Получено более 8 тысяч 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 mas.

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

D. A. Bikulova<sup>1</sup>, S. V. Nazarov<sup>2</sup> M. Yu. Khovritchev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pulkovo Observatory, <sup>2</sup>Crimean astrophysical observatory, <sup>3</sup>Saint 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 Вояджер не обеспечили большой объем астрометрической информации. Поэтому сейчас и еще долгое время высокоточные наземные наблюдения спутников Урана и Нептуна будут оставаться актуальными [2]. Поэтому 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.

## 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  $13 \times 10$  угловых минут, масштаб  $172 \text{ mas/pix}$ . Были сняты длинные серии кадров (сотни штук) с экспозициями по несколько секунд (1-10). В 2020-м году наблюдения проводились с августа по декабрь. В общей сложности было получено более восьми тысяч отдельных наблюдений спутников Урана и Нептуна.

Наблюдения в КрАО РАН проводились при помощи телескопа системы Ньютона ( $D=350 \text{ мм}$ ,  $F=1767 \text{ мм}$ ), 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  $5.4 \text{ мкм}$ , масштаб  $630 \text{ mas/pix}$ , рабочее поле  $35 \times 26$  угловых минут, время накопления составляло 45 секунд. 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  $\text{SNR} > 100$  ( $\text{SNR}$  – 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 фотцентра, 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  $100 \text{ mas}$ . Эти поправки добавлялись к координатам спутников в зависимости от их положения на ПЗС-кадре.

## Заключение

Таблица 1 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 проницание, чем у гида телескопа «Синтез». По этой причине на телескопе «Сатурн» эффективно наблюдались четыре спутника (Ариэль (ARIEL), Умбриэль (UMBRIEL), Титания (TITANIA) и Оберон (OBERON)). 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 спутни-

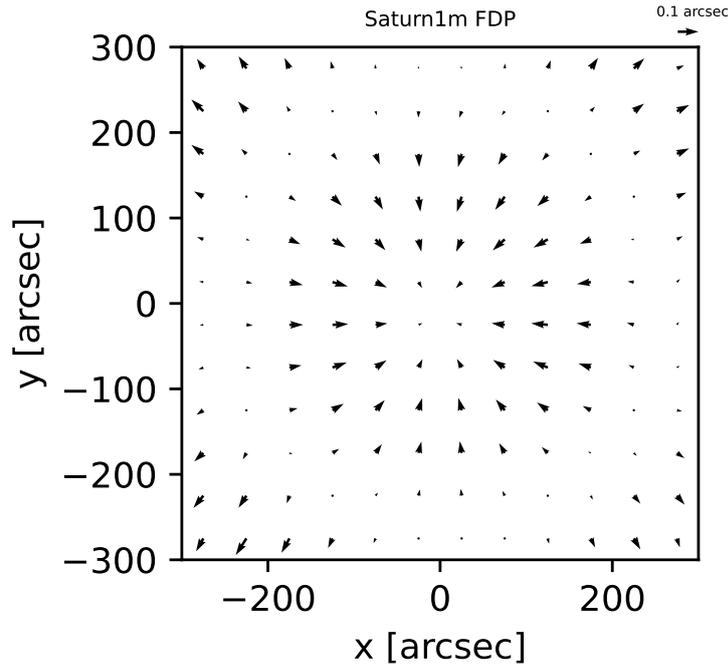


Рис. 1. Поле остаточной дисторсии для пулковского телескопа «Сатурн»

Таблица 1. O-C для спутников Урана и Нептуна

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

ков Урана и EPM2017+Emelyanov&Samorodov для Тритона с помощью сервиса [5] (вычисление (O-C)). В двух последних колонках таблицы 1 представлены средние значения (O-C) по обеим координатам и величины стандартных ошибок одного наблюдения. Величины (O-C)<sub>α</sub> 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). Таки образом, в течение получасовой серии наблюдений имеют место вариации разностей с размахом  $\pm 50$  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.

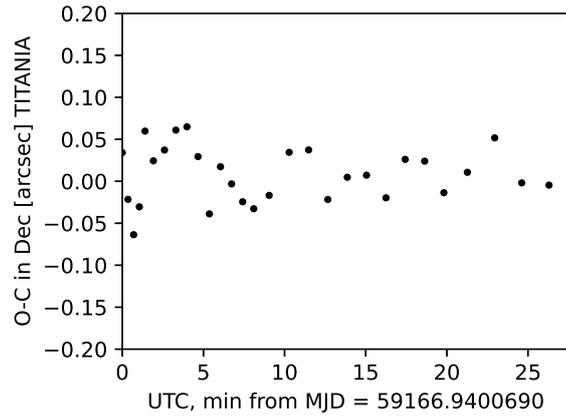


Рис. 2. Изменение О-С по склонению от времени для спутника Урана Титании по результатам наблюдений, выполненных на телескопе «Синтез» (КрАО РАН)

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

## Список литературы

- [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 пыли + толща ледяной мантии) на основе двухфазного кода Presta (газ + поверхность пыли), представлены результаты моделирования химического состава молекулярного облака. Элементный 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 + dust 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. Наблюдения протозвёздных объектов [1, 2] показывают, что самым обильным в ледяных мантиях пылинок является водяной лёд ( $g\text{H}_2\text{O}$ , где префикс «g» означает, что речь идет о поверхностных веществах), а концентрация льда монооксида углерода ( $g\text{CO}$ ) по отношению к концентрации водяного льда составляет порядка 10–30 %.

В работе [3], посвященной химическому моделированию вспышек светимости молодых солнцеподобных звезд, элементный состав молекулярного облака рассчитывается с помощью одноточечного астрохимического кода, основанного на базе данных ALCHEMIS [4]. В использованной двухфазной модели рассматриваются газофазные и поверхностные реакции наряду с процессами адсорбции вещества на пыль и десорбции из ледяных мантий пылинок.

В упомянутой модели поверхностный CO эффективно превращается в формальдегид и затем в метанол, поэтому метанольный лёд ( $g\text{CH}_3\text{OH}$ ) является основным углеродсодержащим компонентом: его концентрация составляет 30% по отношению к концентрации водяного льда. Однако по наблюдениям протозвёздных объектов [2] концентрация льда метанола в них составляет лишь 3–4 % по отношению к концентрации льда  $\text{H}_2\text{O}$ . Один из возможных путей устранения несоответствия авторы увидели в рассмотрении многослойной пыли. В настоящей работе описана реализация трехфазной астрохимической модели на основе имеющейся двухфазной, а также представлены результаты моделирования химического состава молекулярного облака.

# Трехфазная астрохимическая модель

В основе трехфазной астрохимической модели лежит двухфазная одноточечная модель Presta [3], где численно решаются уравнения химической кинетики. Численные концентрации газофазных  $n(i)$  и поверхностных  $n_s(i)$  веществ ( $\text{см}^{-3}$ ) 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 слагаемые, отвечающие за адсорбцию и десорбцию вещества, отсутствуют. Реакции в глубинных слоях мантии идут замедленно по сравнению с поверхностью, энергия диффузии вещества  $i$  в мантии связана с его энергией десорбции соотношением  $E_{swap} : E_{des} = 0.7$  [5].

В случае увеличения общей концентрации вещества на поверхности пыли ( $[dn_s/dt]_{chem} = \sum_i [dn_s(i)/dt]_{chem} > 0$ ) перераспределение вещества между поверхностью и толщей мантии [6] дается 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, а  $\alpha_{ads} = N_s/N_{site}$  — 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 мантии,  $\alpha_{des} = \min(n_m/n_s, 1)$  [7].

Возможен и физический обмен между веществом толщи мантии и поверхности — диффузия [5]. Изменение концентрации вещества  $i$  в толще мантии посредством диффузии 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. Изменение 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  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и температуры газа и пыли 10 К.

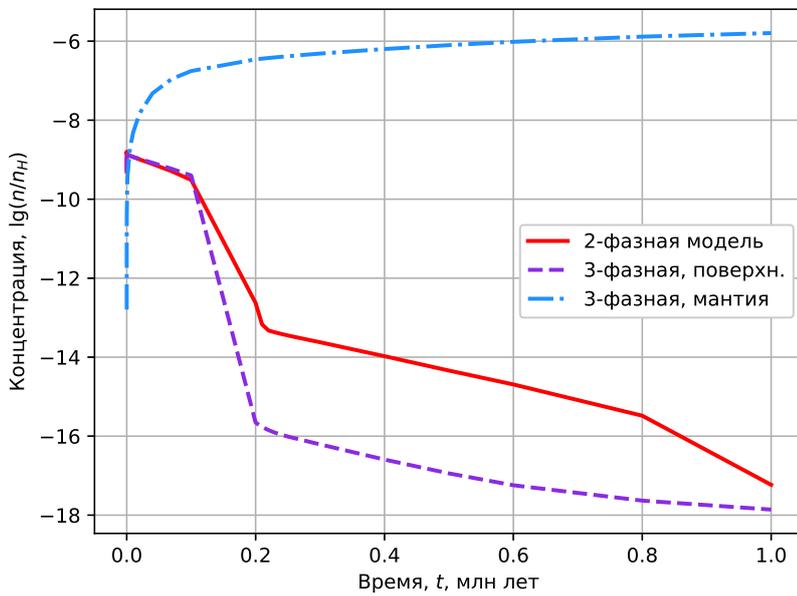


Рис. 1. Поверхностная концентрация атомарного кислорода в двух- и трехфазной моделях

## Результаты моделирования

В модельных физических условиях молекулярного облака около половины поверхностных веществ эффективно уходят в толщу мантии — в частности, O, CO, OH, H<sub>2</sub>CO (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. рис. 1) 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 CO<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>O практически совпадают с аналогичными двухфазными концентрациями на всем временном промежутке моделирования.

В отличие от исходной двухфазной модели, где  $gCO : gH_2O = 10^{-4}$ , в трехфазной концентрации 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. Концентрация метанола

в трехфазной модели ниже, чем в двухфазной (из-за ухода в толщу мантии CO не столь эффективно превращается в метанол), однако она все же больше, чем в наблюдаемых объектах —  $g\text{CH}_3\text{OH} : g\text{H}_2\text{O} = 0.12$ . Имеет место недостаток  $\text{CO}_2$  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. Необходимо отметить, 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  $\text{CO}_2$  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  $2 \cdot 10^5$  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. Однако концентрации метанола и  $\text{CO}_2$  в трёхфазной модели демонстрируют отличия от концентраций, наблюдаемых в молекулярных облаках со звездообразованием. Повышение температуры в пределах допустимых для стадии молекулярного облака значений и сокращение времени химической эволюции способно приблизить поверхностные концентрации метанола и двуокиси углерода к наблюдаемым.

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

## Список литературы

- [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  $\text{CO}_2$  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 Pravec и Vokrouhlický в 2009 году [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 NH103. Они заключили, что наиболее вероятный возраст семейства Hobson составляет  $365 \pm 67$  тыс. лет [2]. Pravec 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.

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 перицентров орбит астероида, Юпитера и Сатурна, соответственно.

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.

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

## Описание методики

Поиск новых членов семейства Hobson проводился путем вычисления метрик Холшевникова  $\varrho_2$  и  $\varrho_5$  [5] на основе оскулирующих элементов орбит на эпоху MJD 59000, 0 (00<sup>h</sup>00<sup>m</sup>00<sup>s</sup> 31.05.2020) из базы данных AstDyS. Критерием отбора служило одновременное выполнение двух условий:  $\varrho_2 < 0,008$  а. е.<sup>1/2</sup> и  $\varrho_5 < 0,002$  а. е.<sup>1/2</sup>. 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. Оценка значений дрейфа большой полуоси, обусловленного эффектом Ярковского, выполнялась путем нормализации с использованием параметров астероида (101955) Bennu [6, 7]. Также для всех астероидов были выполнены оценки радиусов сфер Хилла  $R_{Hill}$  и вторых космических скоростей  $v_2$ . Для оценки физических и динамических параметров астероидов использовался подход, изложенный в [8]. Оценки диаметров  $D$  астероидов семейства Hobson, радиусов сфер Хилла  $R_{Hill}$  и вторых космических скоростей  $v_2$  представлены в таблице 1.

## 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  $\varphi$  наклона оси вращения астероида к плоскости его орбиты:  $\dot{a} = 0$  при  $\varphi = 90^\circ$  или  $270^\circ$ ;  $\dot{a} = \pm|\dot{a}_{max}|$  при  $\varphi = 0^\circ$  или  $180^\circ$  соответственно;  $\dot{a} = \pm 1/2|\dot{a}_{max}|$  при  $\varphi = 60^\circ$  или  $240^\circ$  соответственно.

Если предположить, что астероиды семейства формировались в результате дробления родительских тел в результате низкоскоростных соударений, то моменту образования пары

Таблица 2. Возраст пар относительно двух самых крупных астероидов семейства

Астероид	(18777) Hobson Возраст пары, тыс. лет	(57738) 2001 UZ160 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

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  $\varrho_2$  и соответствующие им моменты времени. Для последнего анализа были отобраны только те варианты, в которых значение метрики  $\varrho_2$  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  $\varrho_2$ . В качестве диапазона возможного значения возраста пары было взято среднеквадратическое отклонение. В таблице 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  $365 \pm 67$  тыс. лет [2].

## Обсуждение результатов и заключение

Полученные оценки возрастов пар имеют большие стандартные отклонения, т. к. 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 [9].

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.

## Список литературы

- [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] *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.
- [6] *Spoto Federica, Milani Andrea, Knežević Zoran.* Asteroid family ages // *Icarus*. — 2015. — Vol. 257. — P. 275–289. 1504.05461.
- [7] *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.
- [8] *Kuznetsov E. D., Rosaev A. E., Plávalova E. et al.* A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // *Solar System Research*. — 2020. — Vol. 54, № 3. — P. 236–252.
- [9] *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 НАБЛЮЖДЕНИЙ НА ТЕРСКОЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Т. Ю. Галушина<sup>1</sup>, П. А. Левкина<sup>1,2</sup>, О. Н. Летнер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Томский Государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт астрономии РАН*

В данной работе обсуждаются результаты наблюдений астероидов в сентябре 2020 года 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. Galushina<sup>1</sup>, P. A. Levkina<sup>1,2</sup>, O. N. Letner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tomsk State University*

<sup>2</sup>*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 года 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  $\sigma$ , ошибки в векторе положения  $\Delta r$  и скорости  $\Delta v$  и объем доверительного эллипсоида в шестимерном пространстве  $V$ . В таблице 1 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 1, 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 величиной. Вопрос оценки точности данных наблюдений требует дополнительного исследования.

Таблица 1. Результаты улучшения орбит наблюдаемых АСЗ

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

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

## Список литературы

- [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 гг. на телескопах Коуровской обсерватории УрФУ, были обнаружены циклические изменения блеска системы с периодом  $7.6 \pm 0.6$  года, не связанные с явлением затмений или приливными деформациями компонентов, а также циклические мало амплитудные 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 влиянием эффекта Эпплгейта на период системы.

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

S. Yu. Gorda

*Kourovka 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  $7.6 \pm 0.6$  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 ( $V = 9.1^m - 9.7^m$ ) 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 разновысокости максимумов, т.н. эффект О'Коннела. Эти явления могут быть вызваны активностью на поверхности компонентов этой контактной тесной двойной системы, а именно, появлении и исчезновении 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 года по март 2020 года на телескопе 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 ( $1024 \times 1024$ , 24 мкм) и с 2015 года PL A230 фирмы FLI с чипом E2V CCD230-42 ( $2048 \times 2048$ , 15 мкм).

Уже с самых первых ПЗС наблюдений AM Leo, проведенных в 2007 году, 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  $\simeq 7.6$  лет. 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.1а. 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.1б,с приведены также изменения блеска AM Leo относительно звезды сравнения в максимумах и минимумах кривой блеска за все время наблюдений  $\Delta m = m_{\text{var}} - m_{\text{com}}$ .

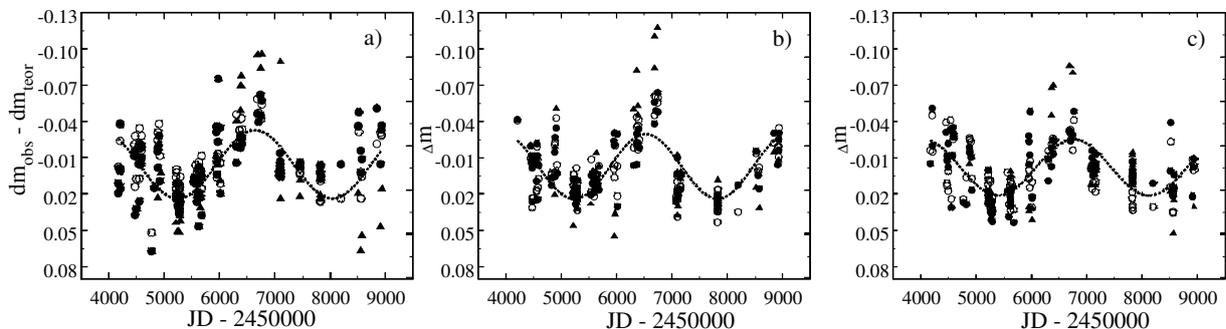


Рис. 1. Мало-амплитудные изменения блеска AM Leo со временем: а) общий блеск; б) блеск в максимумах и с) в минимумах кривой блеска после вычета линейных трендов; ▲ — фильтр В; ● — фильтр V; ○ — фильтр R; пунктирная линия — аппроксимационная синусоида.

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

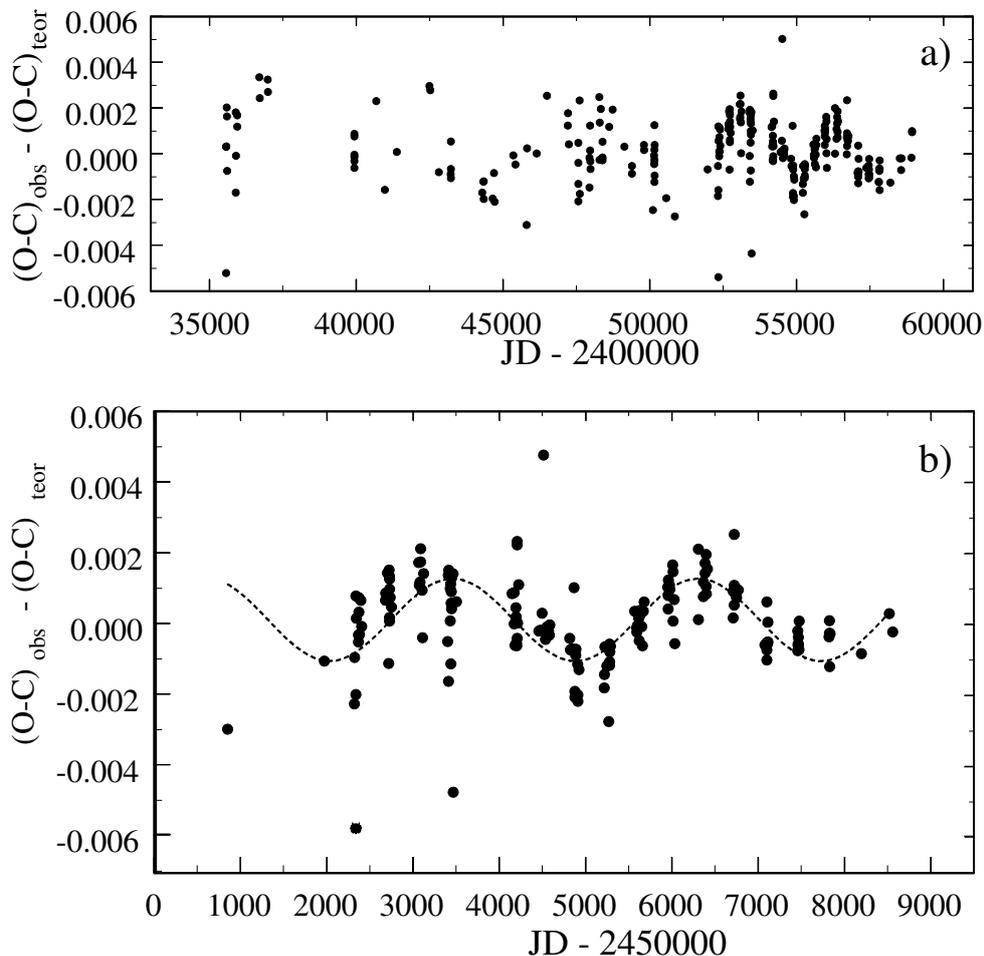


Рис. 2. Разности значений  $O - C$  и световой кривой из работы [7]; а) для всех известных значений моментов минимумов; б) для моментов минимумов позднее JD 2450000; пунктирная линия - аппроксимационная синусоида.

с третьим телом составляет порядка 50 лет [7]. В тоже 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.2а. 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.2б), оказался практически таким же, как и найденный из фотометрических данных. Причем, одинаковыми оказались и фазы 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 тоже время эффект Эпплгейта [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].

## Список литературы

- [1] *Hiller Mary E., Osborn Wayne, Terrell Dirk.* New Light Curves and Orbital Solution for AM Leo- nis // 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] *Stepień 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. Деминова<sup>1</sup>, В. В. Шиманский<sup>1</sup>, Н. В. Борисов<sup>2</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>1</sup>,  
М. М. Габдеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, <sup>2</sup> 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. Deminova<sup>1</sup>, V. V. Shimansky<sup>1</sup>, N. V. Borisov<sup>2</sup>, I. F. Bikmaev<sup>1</sup>,  
M. M. Gabdeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan (Volga region) Federal University, <sup>2</sup> 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 относят разделенные тесные двойные системы (ТДС), однократно прошедшие стадию общей оболочки. ПП были выделены в отдельную группу Риттером в 1986 году [1]. ПП делятся на 3 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 21 века 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 году 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  $\delta m \approx 0.01^m$  в B, 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 (1200 штр./мм) и CCD-приемником EEV 42-40 (2048 × 2048 пикс. размером 13.5 × 13.5 мкм), обеспечивающими спектральное разрешение  $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$  в интервале длин волн  $\lambda\lambda 4050 - 5850 \text{ \AA}$ . Данные наблюдения проведены при удовлетворительных астрономических условиях с размером изображений звезд  $2.0''$ , зенитные расстояния не превосходили  $20^\circ$ . Длительность экспозиций составила 300 секунд, что сделало возможным получить отношение сигнал/шум  $S/N = 48$ . Продолжительность наблюдений составила 102 минуты 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 эфемерида SDSS J162256, предложенная в работе [4]. В орбитальных кривых блеска SDSS J162256 выделяются 3 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 I, He I, He II, C III, N III, O II, Mg II, Si III, Si IV, S III. 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 ПП 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 I и He I в теоретическом и наблюдаемом спектрах в фазах, близких к главному затмению. В результате найдены следующие значения:  $T_{eff} = 30800 \text{ K}$ ,  $\log g = 5.75$ ,  $[He/H] = -0.62$ . (В статье [4] вычислены следующие параметры:  $T_{eff} = 29000 \text{ K}$ ,  $\log g = 5.65$ ). Данные параметры в целом характерны для умеренно горячих sdB-субкарликов с наличием эффектов стратификации в их атмосферах.

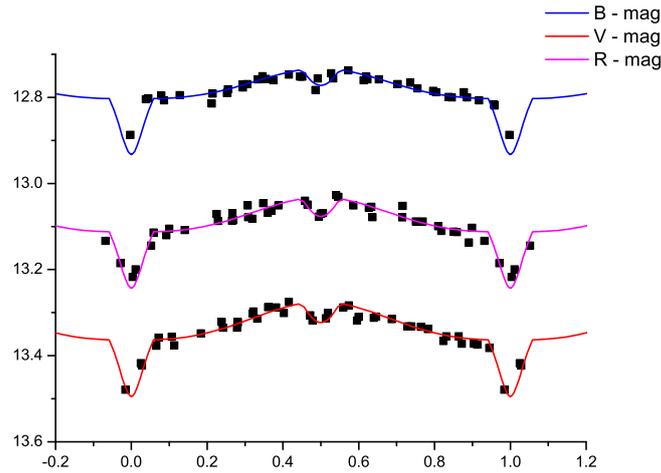


Рис. 1. Наблюдаемые кривые блеска (черные квадратики) и теоретические кривые блеска в полосах B, V, R (сверху вниз)

## 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 ПП возможны искусственные искажения кривых лучевых скоростей из-за эффектов отражения и несферичности компонент. Найденные амплитуды изменений  $V_r$  по разным линиям H $\beta$  составляют  $K_1 = 48.6 \pm 0.3$  км/сек, а по совокупности линий  $K_1 = 48.3$  км/сек. Совместный анализ кривых блеска систем типа HW Vir в полосах BVR позволят одновременно найти 5 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:  $i = 70.^\circ 0 \pm 0.^\circ 3$ ,  $R_1 = 0.195 \pm 0.01 R_\odot$ ,  $R_2 = 0.093 \pm 0.01 R_\odot$ . Представленные ошибки параметров обусловлены ошибками наблюдений. На рисунке 1 представлены кривые блеска с результатами моделирования в 3 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 sdB-субкарликов на пост-горизонтальной ветви [7]. Анализируя условия применимости новой методики Шиманский и др. [3], предположили, что она эффективна для систем с температурами главных

компонент выше  $T_{eff} = 32000$  К. Однако наш анализ излучения NSVS 14256825 [8] с горячей главной компонентой ( $T_{eff} = 40000$  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  $M_1 = 0.47M_\odot$ . 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..

## Список литературы

- [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. Дремова<sup>1</sup>, В. В. Дремов<sup>1</sup>, А. В. Тутуков<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Российский Федеральный Ядерный Центр, г. Снежинск,*  
<sup>2</sup>*Институт 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. Dryomova<sup>1</sup>, V. V. Dryomov<sup>1</sup>, A. V. Tutukov<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Russian Federal Nuclear Centre,*  
<sup>2</sup>*Institute 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.

## Введение

На рубеже XX и XXI веков начался “Ренессанс” в изучении планет благодаря инновациям в светочувствительной приемной аппаратуре, в числе которых адаптивная оптика, интегральные полевые спектрографы высокого разрешения, интерферометры, позволяющие создавать телескопы с большими эффективными размерами. Современные классы телескопов нового поколения позволили улавливать “шум” планет в “дрожании” лучевой скорости и/или блеска родительской звезды.

Так, с обнаружения первой планеты вблизи нейтронной звезды *PSR1257+12* в 1992 году [1] началась эра экзопланет, которая вывела концепцию планеты за границы Солнечной Системы и изменила отношение к ним. Но еще более удивительно то, что планеты, ранее ассоциируемые с ближним космосом, стали предметом пристального внимания инструментов, направленных на объекты, находящиеся на космологических расстояниях. Развитие техники микролинзирования квазаров сегодня позволяет выделять объекты планетарной природы за пределами нашей Галактики [2].

## Солнечная Система

Знакомое с детства словосочетание “Солнечная Система” сегодня как никогда представляет труднейшую загадку в вопросах ее происхождения, истинных размеров и количественной оценки планет, ее населяющих. По сложности организации Солнечную Систему можно сравнить со Вселенной – движение неисчислимого числа малых планет, обломков льда и камней организовано в подсистемы внутреннего и внешнего астероидных поясов, рассеянного диска транснептуновых объектов (ТНО), кометного облака Оорта.

Открытие В. Гершелем в 1781 году Урана сразу же увеличило размеры Солнечной Системы в два раза, что произвело настоящую сенсацию в научном мире. Не меньший

эффект был произведен открытием Д. Джуитта и Д. Лу в 1992 году [3] первого ТНО – QB1, которое еще дальше отодвинуло границу Солнечной Системы за орбиту Плутона. С 1993 года по январь 2021 года накоплены данные для более 4 000 объектов внешней Солнечной Системы. Часть этих открытий была сделана в рамках проекта DES, ориентированного на поиск проявлений темной энергии [4].

Тактика глубоких обзоров с использованием GAIA, а также телескопа LSST позволит на порядки поднять статистику ТНО и узнать о распределении их по массам и размерам. Далекая периферия Солнечной Системы на расстоянии почти светового года от Солнца, где проходит граница гипотетического облака Оорта, населенного по оценкам  $10^{12}$  комет, пока недоступна наблюдениям. Но другие звезды также имеют планетные диски и, возможно, свои экзокометные облака, которые извне, может быть, “легче” наблюдать. Сегодня запущена программа поиска подобных ледяных экзоблаков по картам реликтового излучения, на которых мог быть запечатлен их тепловой сигнал [5].

## Гравитационное рассеяние

Солнечная Система формировалась в ходе долгой сложной эволюции, один из ключевых механизмов которой – гравитационное рассеяние протопланетного вещества. Планеты-гиганты, рассеивающие своим мощным гравитационным полем малые планеты, а также эффект орбитального резонанса, способствовали процессу упорядочения орбит планет.

Границы устойчивости орбит оцениваются из анализа размеров сферы Хилла  $R = 0.4a \cdot (m/M)^{1/3}$ , 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:  $da/a = 0.25$  [6], [7].

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 необходимо, чтобы  $\Delta v$  превышало параболическую скорость АКП объекта на орбите планеты-ускорителя  $(GM/a)^{1/2}$ .

АКП объекты, не достигшие в процессе ускорения параболической скорости, становятся членами облака Оорта. Ими могут оказаться и планеты с массой Земли или Марса, если вспомнить о больших спутниках планет-гигантов – Ганимеда, Титана, Тритона. Пример хаотического гравитационного рассеяния астероидов и комет демонстрирует система спутников Юпитера, имитирующих свое облако “Оорта”. Аккумуляционную работу выполняют и планеты земной группы. Теоретические модели [8] предсказывают, что Земля также окружена облаком захваченных астероидов. Пока открыты две такие *минилуны*: 2006 RH120 и 2020 CD3 [9].

Также актуальны наблюдения за метеорами, созданными геоцентрическими до входа в атмосферу метеороидами. Изучение их орбит позволило установить, что до 30% последних имеют ретроградные относительно Солнечной системы орбиты [10] и гиперболические для уровня орбиты Земли скорости [11], что позволяет сортировать их принадлежность к облаку Оорта и общему планетному полю нашей Галактики.

## Результаты моделирования

Первые попытки прямого численного моделирования образования облака Оорта на шкале 4 млрд. лет были предприняты Дунканом и др. [12] с количеством АКП  $\sim 10^3$  с на-

чальным распределением по  $a$  4 - 40 а.е. В данной работе моделируется начальная стадия “разогрева” АКП системы за счет взаимодействия с планетами-гигантами.

Моделируется система Солнце, Юпитер и  $10^4$  АКП, однородно распределенных в торе с диаметром сечения 0.1а.е. с дисперсией скоростей 10% от Кеплеровской скорости на орбите Юпитера (Рис.1а). Орбитальная эволюция системы рассчитывается в предположении, что АКП гравитационно 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 [13].

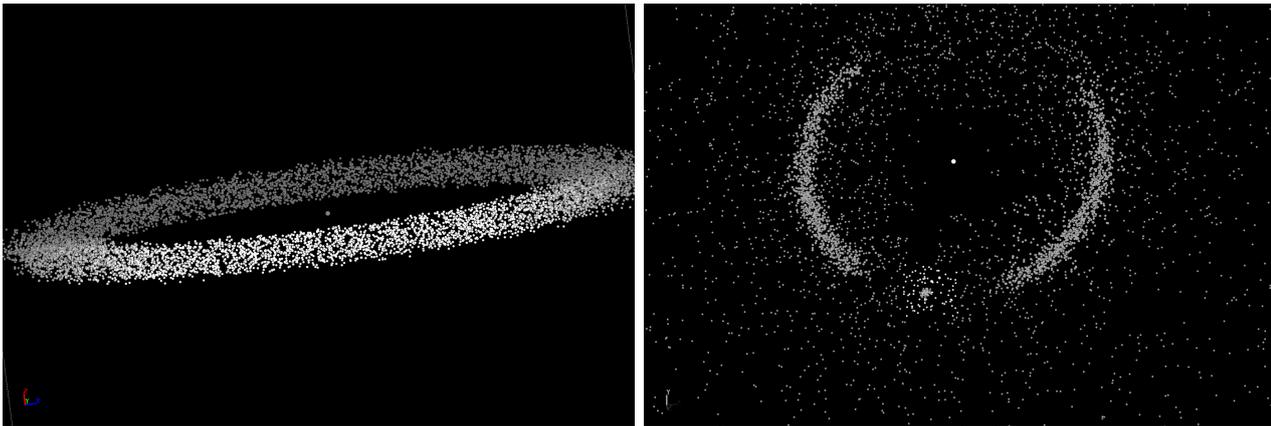


Рис. 1. Пространственная конфигурация АКП тора:  $t = 0$  (слева) и  $t = 55\ 000$  лет (справа)

Хаотизация АКП орбит изучалась на шкале  $10^5$  лет. Анализ пространственной конфигурации АКП позволил описать динамику разлета системы по сравнению с ее начальным состоянием. Например, к  $t = 55\ 000$  лет, хорошо заметны два разрыва в планетном торе (Рис.1b). 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 через тысячу оборотов Юпитера. С течением эволюции АКП стягиваются в дуги в окрестностях точек Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$ , в местах обитания “тройнец”.

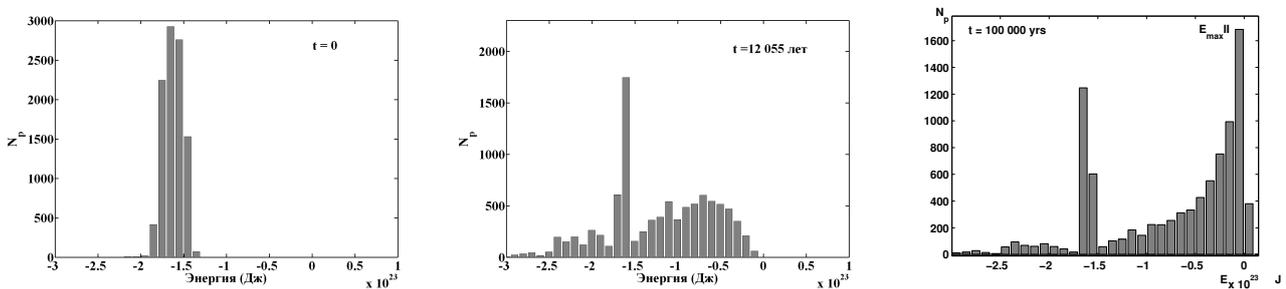


Рис. 2. АКП-распределение по величине полной энергии:  $t=0$ ; 12 000;  $10^5$  лет (слева направо)

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 (с положительной полной энергией) АКП объектов. В результате около Солнца формируется сначала кометное “копье”, а затем и кометное “кольцо” вокруг центра Галактики. Условие его появления за Хаббловское время у звезд с массой, меньшей солнечной – относительная скорость освободившегося АКП материала должна быть больше 3 км/с (Рис.3.1).

Но скорость межзвездных АКП может оказаться на порядки выше, если рассмотреть прохождение планетной системы вблизи сверхмассивной черной дыры. В расчетах тестировалась та же конфигурация АКП-тора в системе Солнце-Юпитер. Имитировался приход планетной системы из бесконечности ( $10^5 R_\odot$ ) в окрестность черной дыры с массой  $10^6 M_\odot$  при сближении с ней на расстоянии  $100 R_\odot$ . Начальная скорость задавалась  $\sim 60$  км/с, орбитальный период  $\sim 3.55$  лет. Анализ модельных спектров скоростей позволяет заключить о возможности сверхскоростных выбросах АКП со скоростями 800-1600 км/с (Рис.3.2).

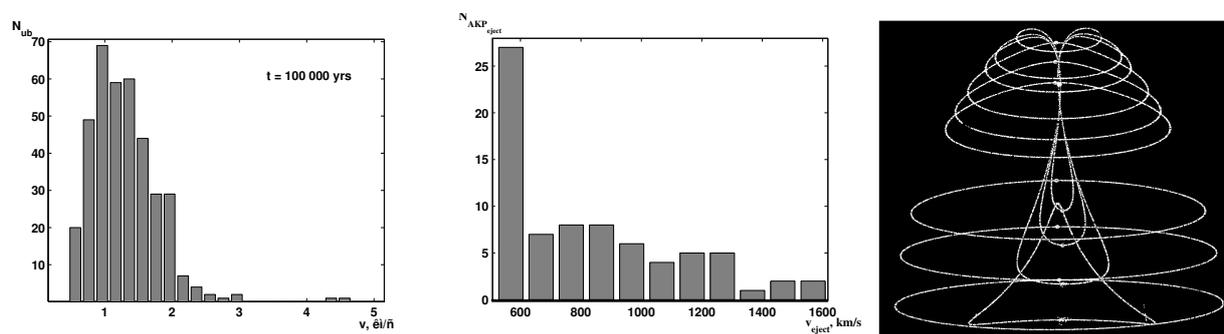


Рис. 3. Спектр скоростей межзвездных и сверхскоростных АКП и искажение планетного тора при прохождении окрестности СМЧД(слева направо)

## Заключение

В коллективных системах существуют механизмы, позволяющие освобождаться части ее компонент, что позволяет утвердиться в выводе о существовании межзвездных планет. Обнаружение межзвездного астероида Оумуамуа, кометы Borisov, а также околоквазарных свободных планет подтверждает наличие АКП компоненты, вероятно, у всех галактик.

## Список литературы

- [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] *Jewitt D., Luu J., Marsden B.* 1992 QB1 // *IAU Circ.* — 1992. — № 5611.
- [4] *Banda-Huarcá M., Camargo J., Desmars J., et al.* Astrometry and occultation predictions to Trans-Neptunian and Centaur objects observed within the Dark Energy Survey // *Astron. J.* — 2019. — Vol. 157. — P. 120–135.
- [5] *Orlowski-Scherer J., Baxter E., Devlin M., et al.* Characterizing extra-solar Oort clouds with submillimeter-wave observations // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 51, iss. 3. — P. 349.
- [6] *Tutukov A.* Stars and planetary systems // *Soviet Astronomy*. — 1987. — Vol. 31. — P. 663–669.

- [7] *Deck K., Payne M., Holman M., et al.* First-order resonance overlap and the stability of close two-planet systems // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 774, iss. 2. — P. 129–151.
- [8] *Fedorets G., Gravnik M., Jedicke R.* Orbit and size distributions for asteroids temporarily captured by the Earth-Moon system // *Icarus.* — 2017. — Vol. 285. — P. 83–94.
- [9] *Fedorets G., Michelli M., Jedicke R.* Characterization of 2020 CD3, Earth's Second Minimoons // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 52, № 6. — P. 415–418.
- [10] *Narziev 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.
- [11] *Siraj A., Loeb A.* Discovery of a Meteor of Interstellar Origin // *astro-ph/1904.07224.* — 2019.
- [12] *Duncan M., Quinn T., Tremaine S.* The formation and extent of the Solar System comet cloud // *Astron. J.* — 1987. — Vol. 94. — P. 1330–1338.
- [13] *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<sup>1</sup>, А. А. Савушкин<sup>1</sup>, Д. В. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Крымская Астрофизическая Обсерватория Российской Академии Наук (КрАО РАН)*

Важным источником информации о физических свойствах малых тел являются поляризационные характеристики света, рассеянного этими телами. Наиболее важной поляризационной характеристикой служит фазовая зависимость поляризации. В течении последующих 2-х 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<sup>1</sup>, A. A. Savushkin<sup>1</sup>, D. V. Petrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Crimean Astrophysical Observatory (CrAO 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

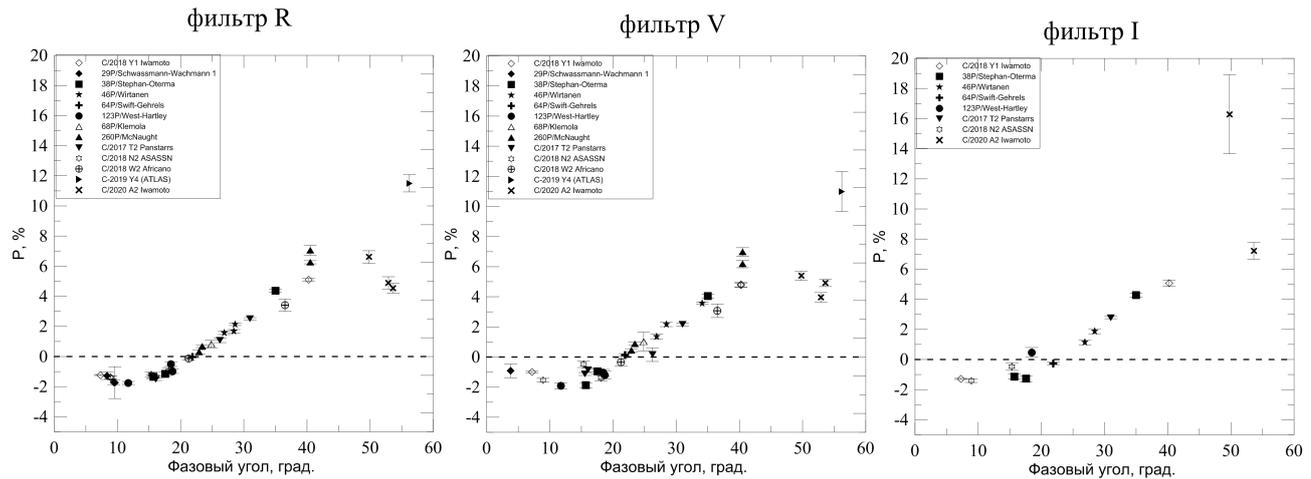
Изучение физических свойств малых тел Солнечной Системы является крайне важным этапом для решения такой фундаментальной задачи как происхождение и эволюция Солнечной Системы. Важным источником информации о физических свойствах малых тел являются поляризационные характеристики света, рассеянного этими 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 зв.вел) и повысить точность получаемых результатов.

# Результаты и обсуждение

течении последующих 2-х лет были проведены наблюдения 18 комет – 8 короткопериодических и 10 долгопериодических, из которых одна межзвездная (C/2019 Q4 (Borisov)). Интегральный блеск комет находился в пределах 10 – 15 зв.вел, а диапазон фазовых углов составил  $1,4^\circ - 103^\circ$ . 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 рис. 1 приведены фазовые зависимости степени линейной поляризации различных комет в трёх фильтрах - R (левая панель), V (средняя панель) и I (правая панель).



## 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  $\pi$  MEN CЕ. С. Калиничева<sup>1</sup>, В. И. Шематович<sup>1</sup>, Я. Н. Павлюченков<sup>1</sup><sup>1</sup>*Институт астрономии Российской академии наук*

В данной работе представлены результаты моделирования верхней атмосферы экзопланеты  $\pi$  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  $\pi$  MEN CE. S. Kalinicheva<sup>1</sup>, V. I. Shematovich<sup>1</sup>, Ya. N. Pavlyuchenkov<sup>1</sup><sup>1</sup>*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

In this work we present the results of the modeling of exoplanet  $\pi$  Men c upper atmosphere, produced using the previously developed one-dimensional self-consistent aeronomic model. The model used takes into account the contribution of suprathermal particles, which significantly refines the heating function of the atmosphere. The hight profiles of temperature, velocity and density were obtained, the atmospheric mass-loss rate was calculated. The presence of two hight-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 водород-гелиевыми 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, супер-землями и суб-нептунами. 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 нептуны (параметры порядка соответствующих значений для Нептуна из Солнечной системы). Супер-земли - 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 К), это повышение температуры вызвано описанным выше поглощением потока излучения в диапазоне XUV от родительской звезды.

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

пустыней короткопериодических непунов [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 непунов не может объясняться только лишь потерей атмосферы за счет жесткого излучения родительской звезды. В исследовании был сделан вывод, что в случае относительно маломассивных горячих непунов оценка верхнего предела оттока массы совпадает с оценками [1] уровня фотоиспарения атмосферы. В случае же более массивных горячих непунов 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  $\pi$  Men (HD 39091), также имеющей планету-гиганта на удаленной орбите. Планета  $\pi$  Men классифицируется как супер-земля. 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  $\pi$  Men повторяет солнечный, а также посчитан темп потери атмосферы  $\pi$  Men c. В [6] обсуждается вопрос о концентрации и роли водорода и более тяжелых элементов в атмосфере  $\pi$  Men c.

## Описание модели

В данной работе с помощью самосогласованной одномерной аэрономической модели водород-гелиевой атмосферы, включающей надтепловые электроны [7], выполнено моделирование газовой оболочки планеты  $\pi$  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 [7], [3]. 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 1147 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 рис. 1 приведены результаты расчетов - высотные профили температуры (а), скорости (b) и плотности (c) атмосферы  $\pi$  Men c. Как видно из приведенных графиков, максимум температуры достигает приблизительно 1900 K, а газодинамическая скорость не превышает

ет 1 км/сек. Наиболее интересным является третий график, отражающий наличие двусоставной структуры атмосферы планеты. Нижние слои (1-1.2 R<sub>0</sub>) образуют относительно плотную стационарную атмосферу, в то время как верхние 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/сек, 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  $\pi$  Men с должен превосходить соответствующую величину для горячего непуна 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/сек. 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 супер-земля  $\pi$  Men с превосходит горячий нептун GJ 436 b.

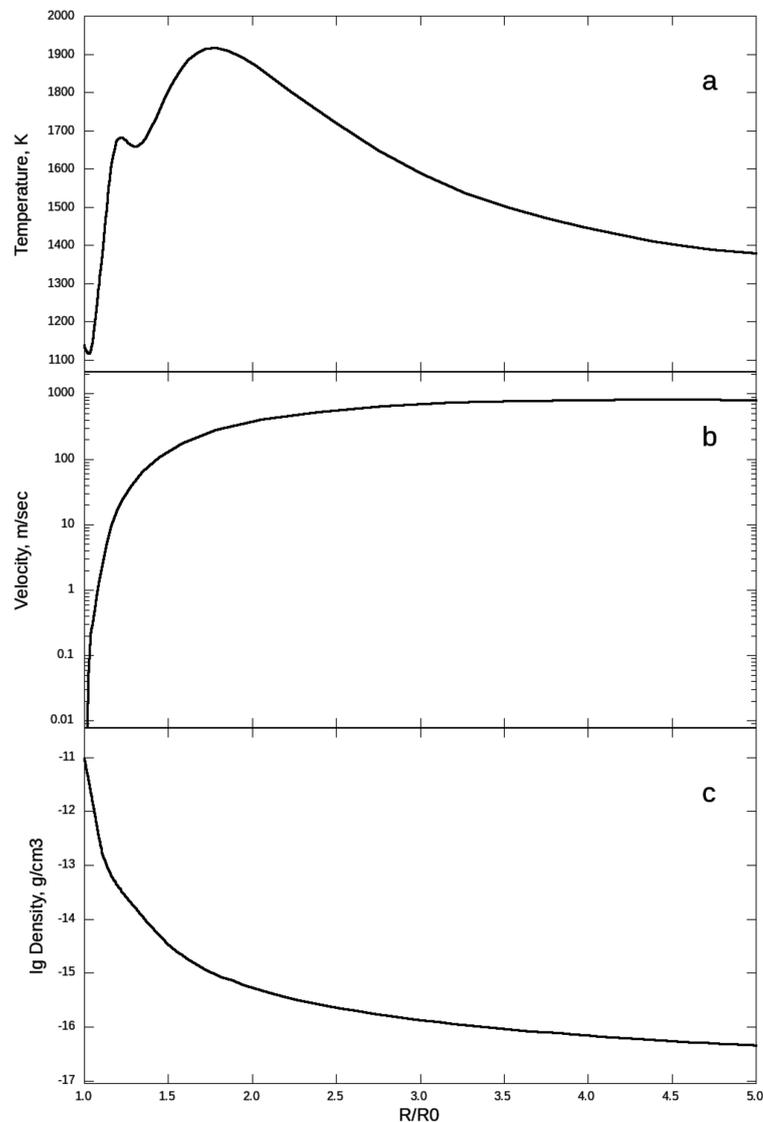


Рис. 1. Высотные профили температуры, скорости и плотности атмосферы  $\pi$  Men с

## Заключение

Первая подтвержденная экзопланета из миссии TESS,  $\pi$  Мен с - 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).

## Список литературы

- [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  $\pi$  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  $\pi$  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  $\pi$  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<sup>1,2</sup>, А. Е. Дудоров<sup>1,2</sup> С. А. Хайбрахманов<sup>1,2</sup>  
С. Ю. Парфенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, г. Челябинск, Россия

С помощью двумерного численного МГД-моделирования исследуются изотермические стадии коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков. Расчеты показывают, что в процессе изотермического коллапса образуется иерархическая структура: уплощенная оболочка облака, внутри которой находится первичный магнитоэлектрический 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 NH<sub>3</sub> (2,2).

## FORMATION AND OBSERVATIONAL FEATURES OF PRIMARY DISCS IN COLLAPSING PROTOSTELLAR CLOUDS

N. S. Kargaltseva<sup>1,2</sup>, A. E. Dudorov<sup>1,2</sup> S. A. Khaibrahmanov<sup>1,2</sup> S. Yu. Parfenov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Ural Federal University, <sup>2</sup>Chelyabinsk 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 NH<sub>3</sub> line (2,2) is under construction.

## Введение

Современное звездообразование происходит в ядрах межзвездных молекулярных облаков, (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 так же Томисака [4] отметили образование внутри коллапсирующего облака транзиентных 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 магнитоэлектрические 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  $\varepsilon_t$ , магнитной  $\varepsilon_m$  и вращательной  $\varepsilon_w$  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  $t_{\text{fmw}} = t_{\text{ff}}(1 - \varepsilon_m - \varepsilon_w)^{-1/2}$ , где  $t_{\text{ff}}$  - 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 магнитоэлектрический ПД. На рисунке 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, ограниченную голубой линией, а нижние (II) – структуру ПД, ограниченного зеленой линией. Панели II на рисунке 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.

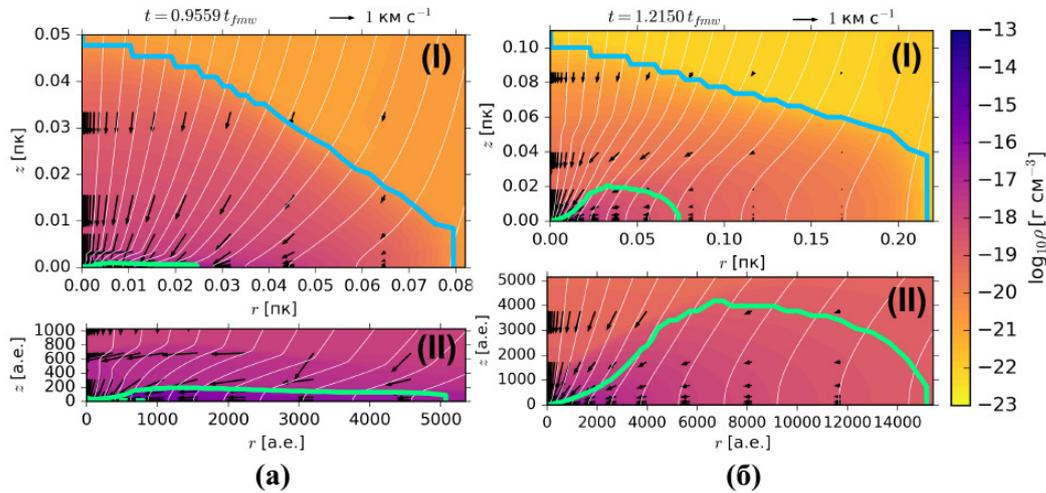


Рис. 1. Двумерное распределение плотности (цветная заливка), скорости (стрелки), магнитного поля (белые линии) коллапсирующего неравновесного облака  $\varepsilon_t = 0.3$ ,  $\varepsilon_m = 0.2$ ,  $\varepsilon_w = 0.01$  (а) и ПЗО близкого к равновесию  $\varepsilon_t = 0.7$ ,  $\varepsilon_m = 0.2$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

Основные характеристики (размер, масса, угловой момент) ПД и оболочки зависят в большей мере от  $\varepsilon_m$ , чем от скорости сжатия облака. Согласно нашему моделированию, степень уплощения оболочки протозвездного облака уменьшается с  $\varepsilon_m$  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  $\varepsilon_m$  в диапазоне от 0.2 до 0.7. Магнитное торможение уменьшает угловой момент оболочки на 5 – 30% в зависимости от  $\varepsilon_m = (0.1 - 0.7)$ .

## Наблюдательные проявления первичных дисков

Для расчетов, показанных на рисунке 1, определена средняя яркостная температура ПЗО в линии  $\text{NH}_3(2,2)$  в разные моменты времени (см. 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 рисунке 2а заметно уширены по сравнению с профилями линий на рисунке 2б. 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. 1а II). Наличие этой области выражается в пониженной средней яркостной температуре на скоростях  $\approx \pm 0.5$  км/с при малых углах наклона  $i$  (рис. 2а). 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 ещё до момента времени, когда согласно нашему критерию в облаке возникает ПД.

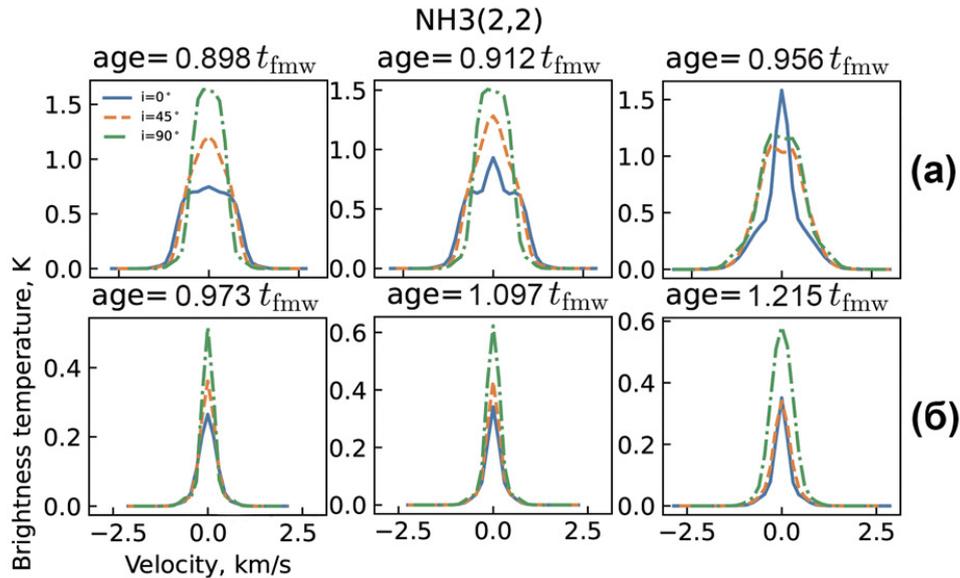


Рис. 2. Средняя яркостная температура в линии  $\text{NH}_3(2,2)$  для разных углов наклона между лучем зрения и осью вращения облака,  $i$ , и разных этапов эволюции облака в долях  $t_{fmw}$  для расчетов на рис. 1.

## Заключение

Численные расчеты магнитных вращающихся ПЗО показывают, что степень сжатия оболочки уменьшается как  $\varepsilon_m^{-1/2}$ . При увеличении магнитного параметра  $\varepsilon_m$  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 формируется геометрически тонкие ПД, а в случае квазистатического сжатия – геометрически толстые ПД. Однако в квазистатическом случае в линии NH<sub>3</sub> (2,2) не наблюдаются проявления ПД из-за малой скорости движения вещества в облаке. В случае динамического коллапса наблюдается характерный трехгорбный спектр линии NH<sub>3</sub> (2,2) в экваториальном направлении. Можно сделать вывод, что на ранних стадиях звездообразования возможно обнаружить проявления ПД в линиях NH<sub>3</sub> (2,2) в случае сильно неравновесных быстро коллапсирующих облаков.

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

## Список литературы

- [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] *Khaibrakhmanov S. A., E. Dudorov A., S Kargaltseva N.* Simulations of the isothermal collapse of magnetic protostellar clouds // submitted to RAA. – 2020.
- [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, РЕГИСТРАЦИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ И ПОИСК ВЕЩЕСТВА

Н. А. Кругликов<sup>1,2,3</sup>, А. Ю. Пастухович<sup>1</sup>, Г. А. Яковлев<sup>1</sup>,  
В. И. Гроховский<sup>1</sup>, О. Унсалан<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, <sup>2</sup>Институт физики металлов,

<sup>3</sup>Уральский государственный экономический университет,

<sup>4</sup>Эгейский 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 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 продолжался в течение лета 2020 года несколькими группами, но не привел к обнаружению вещества.

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

N. A. Kruglikov<sup>1,2,3</sup>, A. Yu. Pastuhovich<sup>1</sup>, G. A. Yakovlev<sup>1</sup>,  
V. I. Grokhovsky<sup>1</sup>, O. Unsalan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, <sup>2</sup>Institute of Metal Physics, UB of RAS,

<sup>3</sup>Ural State University of Economics, <sup>4</sup>Ege University, Izmir, Turkey

The 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 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. При этом успешный поиск вещества метеорита позволяет уточнить параметры траектории [1]. Тем не менее, в отличие от ископаемого метеоритного вещества, до сих пор зарегистрировано лишь около трех десятков случаев, когда по данным фото-видеосъемки удавалось обнаружить метеоритное вещество и затем построить доатмосферную траекторию с достаточной точностью. Наша группа активно и довольно успешно занимается подобной деятельностью [2, 3]. Одним из результатов таких исследований оказывается протопланетное вещество с низкой степенью выветривания, которое само по себе является интересным объектом для различных областей научного знания. Одним из средств повышения точности определения траектории является построение болидных сетей, состоящих из специализированных камер распределенных по поверхности Земли [4, 5]. Такой подход позволяет существенно улучшить качество определения траектории, но, к сожалению, не позволяет отказаться от данных случайных наблюдателей. Дело в том, что яркий болид, приводящий к выпадению метеоритного вещества, относительно редкое явление и не всегда, даже попадая в поле зрения камер болидной сети, может быть адекватно зарегистрирован как за счет текущей погоды, так и технологических особенностей работы таких камер [6]. Количество случайных наблюдателей (камер видеонаблюдения) обычно оказывается большим. При этом если все же

удалось зарегистрировать болид при помощи специализированной камеры — шансы найти вещество повышаются. В настоящей работе описываются обстоятельства явления произошедшего 27 мая 2020 года в 17:30 (UT) над южной частью Турецкой провинции Артвин, недалеко от городка Юсуфели (По данным центра исследований околоземных объектов NASA JPL координаты вспышки 40.8N, 41.7E; мощность 0.18 кт; высота 29.3 км; скорость тела при входе в атмосферу 14.9 км/с [7]).

## Описание события, район поиска

Событие зафиксировано камерами наблюдения 27 мая 2020 года в 17:30 (UT) в нескольких десятках точек на территории Южного федерального округа России, Грузии, Армении и Турции. Примечательной особенностью данного явления оказались отличные наблюдательные условия. Это позволило зарегистрировать болид даже из Ставрополя (расстояние около 500 км).

В течение карантина в связи с пандемией Covid-19 и закрытием международных границ, авторы этой работы собрали и обработали всю доступную информацию о событии. Кроме того, были произведены расчеты атмосферной траектории и определена предварительная зона поиска. Точность определения траектории и района поиска в случае использования данных случайных очевидцев определяется качеством этих данных. Поскольку видеоданные поступали постепенно, расчет проводили многократно, каждый раз используя записи, которые вызвали наибольшее доверие. Была предпринята попытка получить данные не только из открытых источников, но и посредством запросов в ведущие университеты, которые расположены в той же части Турции. Таким образом, для сбора информации, определения атмосферной траектории полета болида и предположительного района падения была сформирована рабочая группа из сотрудников УрФУ, NASA-SETI (Калифорния, США), 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).

Такой подход позволил получить несколько видеозаписей приемлемого качества. На некоторых из них можно было видеть изображение ярких звезд, что повысило точность определения направлений и полей зрения камер. Тем не менее, определение точного времени события все же вызывало некоторые сложности. Для решения этой чаще всего используются задачи данные сайта центра исследований околоземных объектов, но из-за пандемии они обновлялись со значительным запозданием. 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 года турецкие коллеги предприняли 4 безуспешные попытки поиска в расчетном районе. В конечном итоге удалось определить время и координаты вспышки, не дожидаясь данных NASA, за счет взаимодействия с Северно-Анатолийской обсерваторией, откуда также поступила видеозапись. Для дальнейшего увеличения точности определения направлений было решено получить дополнительные ночные снимки при помощи чувствительной камеры высокого разрешения с двух точек недалеко от города Эрзурум во время собственной экспедиции. Таким образом, окончательный расчет траектории и определение района поиска были проведены уже в ходе экспедиции.

На рис. 1 приведена расчетная зона предполагаемого выпадения фрагментов метеоритного вещества в горном районе недалеко от населенных пунктов Ишхан и Арпаджик, а также треки одного из участников поискового отряда, наглядно демонстрирующие географию перемещений. Перепад высот в зоне поисков от 500 до 2000 м над уровнем моря.

Протяженность ежедневных маршрутов 10-15 км. Условия для поиска осложнялись крутизной склонов от 20 до 40 градусов, наличием осыпей с обломками разного размера и высокой (до 30 градусов) температурой воздуха. К сожалению, метеоритное вещество не было обнаружено.

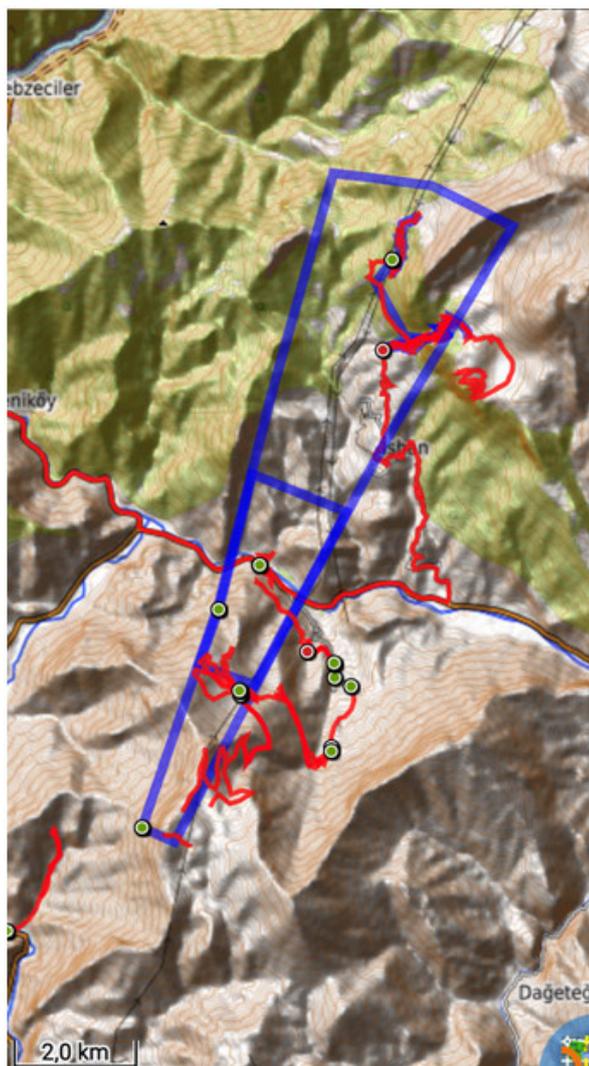


Рис. 1. Зона поиска в районе наблюдения Турецкого болида. Трапецией обозначена площадь, ограничивающая поле рассеяния, ломаная линия соответствует треку одного из участников.

## Поиск вещества

В период с 20.08 по 02.09. 2020 г. была проведена поисковая метеоритная экспедиция Ур-ФУ. Сразу же после открытия международного авиасообщения группа сотрудников из трех участников (Пастухович А.Ю., Кругликов Н.А., Яковлев Г.А.) отправилась по маршруту Екатеринбург-Москва-Стамбул-Эрзурум. По прибытию в г. Эрзурум были сделаны снимки ночного неба в местах расположения двух камер, зафиксировавших событие - на склоне горнолыжного курорта Паландокен и на территории Северо-Анатолийской обсерватории, вблизи населенного пункта Конаклы. Это позволило повысить точность расчетов (направление съемки соответствовало направлению движения болида). Далее группа выдвинулась на арендованном автомобиле в г. Юсуфели, где с 22.08 по 01.09 2020 вела поисковые работы в горах выше населенных пунктов Ишхан и Арпаджик. Поиск вели визуально, планомерно

прочесывая доступные для пешего передвижения склоны гор. Большая часть расчетной зоны вероятного выпадения метеоритного вещества, к сожалению, оказалась недоступна для поиска из-за особенностей рельефа. Район поиска оказался на пересечении нескольких ущелий с обрывистыми склонами, имеющими большое количество вертикальных участков, протяженность которых достигает нескольких сотен метров, сложенных из подвижных выветренных пород. В то же время видимость в основном достаточная и комфортная для визуального поиска. Было собрано несколько образцов резко отличающихся по внешнему виду от местных (преимущественно светлых) пород. Анализ полученных образцов показал, что они не имеют отношения к болиду. С учетом небольшой мощности болида, можно предположить, что количество выпавшего вещества не велико к тому же развитый рельеф замедляет поиск (скорость перемещения по склону с уклоном 45 градусов не превышает 0.1 км/ч) и создает реальную угрозу безопасности участников поиска.

## Заключение

В результате проделанной работы были собраны и обработаны видеоматериалы стационарных камер видеонаблюдения зафиксировавших болид, реконструирована траектория болида 27 мая 2020 года над Турцией, организована экспедиция в район явления. Во время экспедиции были получены дополнительные фотоматериалы, позволившие уточнить параметры траектории болида. Был подробно обследован район вероятного выпадения вещества. Метеоритное вещество не обнаружено, в дальнейшем находки могут носить случайный характер.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Давление», № АААА-А18-118020190104-3 и Акта 211 Правительства Российской Федерации, Соглашение № 02.А03.21.0006

## Список литературы

- [1] *Бредихин Ф. А.* Этюды о метеорах. — М. : Издательство Академии Наук СССР, 1954.
- [2] *Gritsevich Maria, Lyytinen Esko, Moilanen Jarmo et al.* First meteorite recovery based on observations by the Finnish Fireball Network // Proceedings of the International Meteor Conference, Giron, France, 18-21 September 2014 / ed. by J. L. Rault, P. Roggemans. — 2014. — P. 162–169.
- [3] *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.
- [4] *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.
- [5] *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.
- [6] *Larionov M. Yu., Kruglikov N. A., Pastukhovich A. Yu. et al.* Analysis of the Bright Fireball over the Ural Region of Russia on March 6, 2018 // 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society. — 2018. — Vol. 81. — P. 6302.
- [7] *JPL.* Center for NEO Studies. — <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> : NASA, 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 VA<sub>131</sub> — 2004 VU<sub>131</sub> 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 Kholshchevnikov 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 VA<sub>131</sub> — 2004 VU<sub>131</sub> 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 году. 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: разрушение в результате столкновений, дробление вследствие вращения, распад 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) Haumea [16]. Задача поиска столкновительных семейств ТНО рассматривалась в [17] и [18]. В работе [19]

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 FC<sub>8</sub> — 2000 GX<sub>146</sub>, указанной в [15]. Были выделены кандидаты в четыре новых столкновительных семейства ТНО, связанных с парами (134860) 2000 OJ<sub>67</sub> — 2001 UP<sub>18</sub>, 2003 UT<sub>291</sub> — 2004 VB<sub>131</sub>, 2002 CU<sub>154</sub> — 2005 CE<sub>81</sub> и 2003 HF<sub>57</sub> — 2013 GG<sub>137</sub>. Также были найдены несколько пар ТНО, которые могут иметь общее происхождение: (135571) 2002 GG<sub>32</sub> — (160148) 2001 KV<sub>76</sub> и 2005 GX<sub>206</sub> — 2015 BD<sub>519</sub>.

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  $\rho_2$  и  $\rho_5$  [20, 21]. Метрика  $\rho_2$  определена в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите). Метрика  $\rho_5$  определена в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$ , наклон  $i$ ) как минимальное значение  $\rho_2$  при всех возможных положениях узлов и перицентров орбит.

Анализ этих метрик позволяет выделить кандидатов в молодые пары ТНО, для которых положения линий узлов и линий апсид должны быть близки, а следовательно,  $\rho_2 \approx \rho_5$ . 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<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> 00.000<sup>s</sup> BDT 09.10.2018) and MJD 58800 (00<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> 00.000<sup>s</sup> BDT 13.11.2019). Использовались следующие критерии отбора кандидатов в молодые пары ТНО:  $\rho_2 < 0.07$  (а. е.)<sup>1/2</sup>,  $\rho_5 < 0.07$  (а. е.)<sup>1/2</sup> и  $\rho_2 - \rho_5 < 0.015$  (а. е.)<sup>1/2</sup>. Также отбирались пары, включающие двойные ТНО, при  $\rho_2 < 0.12$  (а. е.)<sup>1/2</sup> и пары, в которых оба ТНО двойные —  $\rho_2 < 0.3$  (а. е.)<sup>1/2</sup>

## 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.)<sup>1/2</sup>, 22 пары, в которых один из ТНО является двойным ( $\rho_2 < 0.12$  (а. е.)<sup>1/2</sup>), и 11 пар двойных ТНО ( $\rho_2 < 0.3$  (а. е.)<sup>1/2</sup>).

В таблице 1 приведены пары транснептуновых объектов с метриками  $\rho_2 \leq 0.0632$  (а. е.)<sup>1/2</sup> ( $\rho_2^2 \leq 0.0040$  а. е. =  $6.0 \times 10^5$  км). Возможно, что пара 2004 VA<sub>131</sub> — 2004 VU<sub>131</sub> с минимальными метриками  $\rho_2$  и  $\rho_5$  является самой молодой парой ТНО из известных на сегодняшний день.

Анализ элементов орбит ТНО, входящих в пары (см. таблицу 1), показал, что все объекты можно отнести к холодным классическим объектам пояса Койпера. Максимальные эксцентриситеты орбит наблюдаются у ТНО, входящих в пару 2004 VA<sub>131</sub> — 2004 VU<sub>131</sub>, и составляют 0.0937 и 0.0945, соответственно. Максимальные наклоны орбит достигают 5° для ТНО пары (500839) 2013 GW<sub>137</sub> — 2015 GZ<sub>58</sub>.

Особый интерес представляют случаи, когда возможно расположение ТНО пары по разные стороны зон резонансов средних движений (с учетом ошибок определения больших полуосей орбит).

Таблица 1. Пары ТНО на близких орбитах

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

Пары ТНО 2003 QL<sub>91</sub> — 2015 VA<sub>173</sub>, 2013 SD<sub>101</sub> — 2015 VY<sub>170</sub>, (88268) 2001 KK<sub>76</sub> — 2015 GV<sub>58</sub>, 2003 QD<sub>91</sub> — 2015 VC<sub>173</sub>, 2000 ON<sub>67</sub> — 2013 UN<sub>17</sub> расположены в окрестности резонанса 7:12 ( $a_{res} = 43.1$  а. е.).

Пары 2000 PW<sub>29</sub> — 2015 GL<sub>58</sub> и 2013 UR<sub>17</sub> — 2015 GY<sub>58</sub> — в окрестности резонанса 5:9 ( $a_{res} = 44.5$  а. е.).

## Обсуждение результатов и заключение

Проверка вывода, что пара 2004 VA<sub>131</sub> — 2004 VU<sub>131</sub> 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 VA<sub>131</sub> и 2004 VU<sub>131</sub> 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 лет назад.

По современным представлениям бóльшая 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, т.к. они могли образоваться в результате распада кратных ТНО.

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

## Список литературы

- [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., Hadjiyska 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] *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* 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] *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* Dynamically correlated minor bodies in the outer Solar system // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 474, № 1. — P. 838–846. 1710.07610.
- [20] *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. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [21] *Kholshevnikov 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. Лаврухина<sup>1</sup>, К. Л. Маланчев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет космических исследований, <sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга, <sup>3</sup>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. Lavrukhina<sup>1</sup>, K. L. Malanchev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research, <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Sternberg astronomical institute, <sup>3</sup>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 миллионах 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 чего 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,  $\delta_i$  — 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 Neumann  $\eta$  [5]

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

- $\eta^e$  — обобщение коэффициента  $\eta$  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,  $\sigma_m$  — среднеквадратическое отклонение звездной величины,  $\langle m \rangle$  — среднее значение звездной величины

- Inter-percentile range — интерперцентильный 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  $Q(d)$  — это  $n$ -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

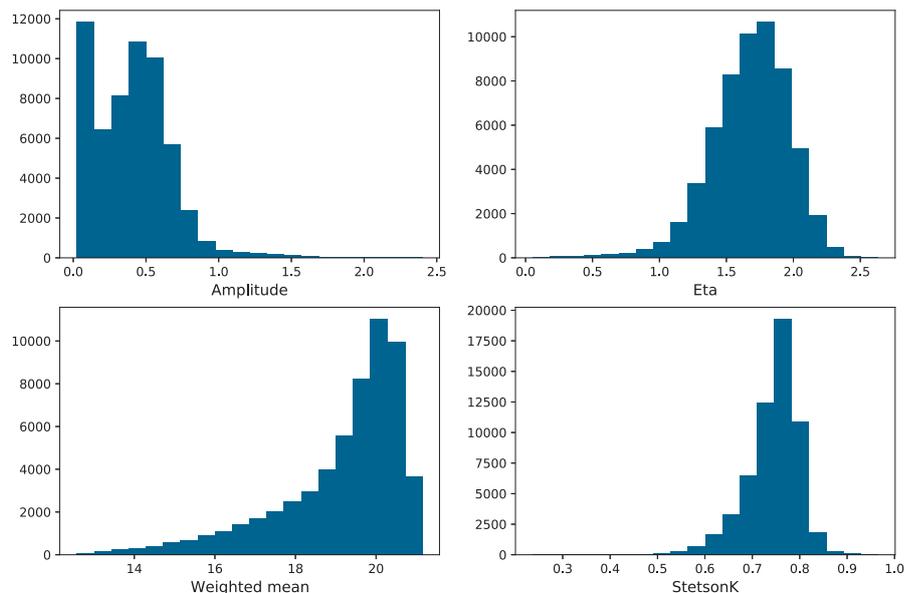


Рис. 1. Гистограммы распределения значений признаков для выборки кривых блеска ZTF DR3

- 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  $\chi^2$  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 Рис. 1 показаны гистограммы распределения амплитуды, коэффициента  $\eta$ , взвешенного среднего и коэффициента Стетсона  $K$  для тестового набора данных из 57546 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>

## Список литературы

- [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 JB, 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] *von Neumann John.* 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 в себя выделение сгустков с помощью алгоритма GAUSSCLUMP, а так же автоматизированное построение многослойной модели переноса излучения для сгустков с использованием методов оптимизации и Монте-Карло. Методика применена на практике для анализа крупномасштабного картографирования комплекса звёздообразования S231-S235 в четырёх 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 межзвёздной среде. Зачастую наблюдаются сразу несколько линий молекулы СО, в том числе изотопические разновидности  $^{13}\text{CO}$  и  $\text{C}^{18}\text{O}$ , а так же различные вращательные переходы молекулы СО, в том числе (1-0), (2-1), (3-2) и другие. 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:

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

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

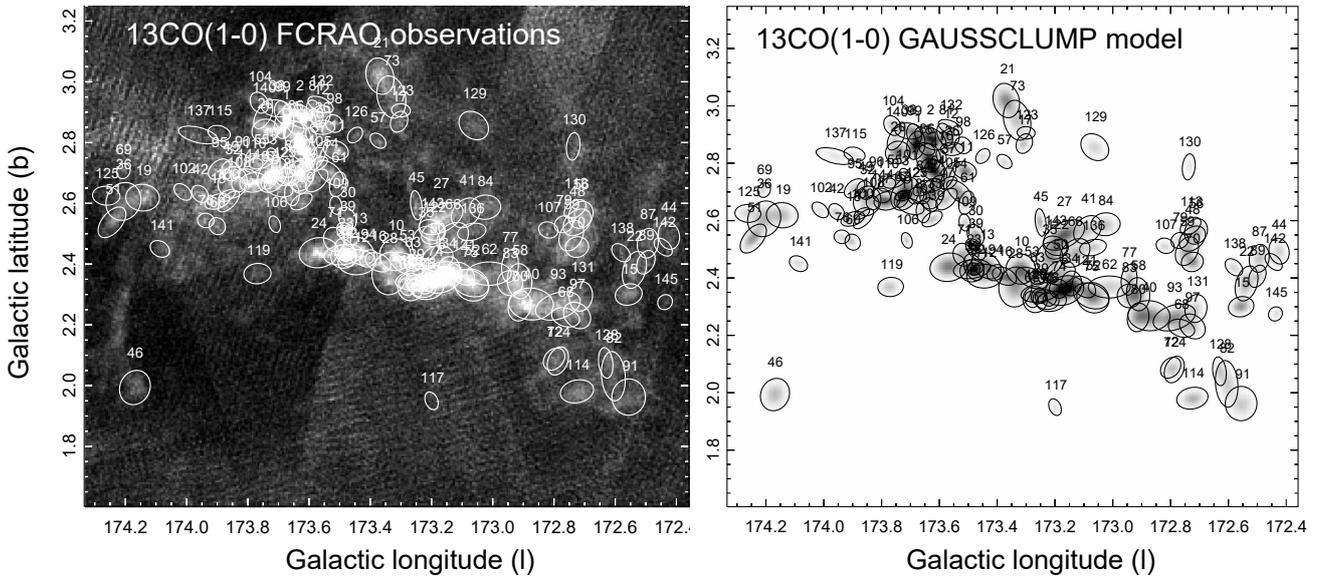


Рис. 1. Результат выделения сгустков методом GAUSSCLUMP в области звездообразования S231-235. Панель слева – нулевой момент карты излучения линии  $^{13}\text{CO}(1-0)$  с телескопа FCRAO, панель справа – имитация исходной карты, построенная по данным из каталога GAUSSCLUMP

толщина в центре линии,  $v_0$  – лучевая скорость центра линии,  $\sigma$  – доплеровская ширина линии ( $\sigma = \text{FWHM}/2.3548$ ).

Таким образом, модель имеет 4 свободных параметра: лучевая скорость центра линии ( $v_0$ ), оптическая толщина в центре линии ( $\tau_0$ ), температура возбуждения ( $T_{ex}$ ) и ширина линии ( $\sigma$ ). 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 позволят 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 в себя 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 пересекаются, а разделены они могут быть только по лучевой скорости (см. Рисунок 1). Важным преимуществом метода GAUSSCLUMP является возможность выделения сгустков, которые имеют пересечение, а так же корректное описание градиента скорости для каждого сгустка.

Для каждого сгустка получено начальное приближение для расчёта модели переноса излучения. Лучевая скорость для каждого сгустка установлена из каталога сгустков 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  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$ , который часто используется в литературе.

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

Для перехода от одномерных спектров к модели распределения излучения в пространстве “положение-положение-лучевая скорость” предполагается, что для каждого сгустка значения температуры возбуждения и ширины линии не меняется в зависимости от положения. Меняется только оптическая толщина и лучевая скорость сгустка в соответствии с параметрами источников из каталога GAUSSCLUMP. В центре каждого сгустка оптическая толщина и лучевая скорость соответствует параметрам “одномерной” модели. При удалении от центра оптическая толщина уменьшается в соответствии с размером и позиционным углом соответствующего источника GAUSSCLUMP. Лучевая скорость меняется в соответствии с градиентом скорости, найденным при помощи GAUSSCLUMP. Таким образом, параметры “одномерной” модели каждого сгустка с привлечением данных из каталога GAUSSCLUMP позволяют построить “трёхмерную” модель сгустка в любой разновидности линии CO.

Описанный подход позволяет получить параметры модели для каждого сгустка 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 так же описать профили самопоглощения, когда в линии  $^{13}\text{CO}$  имеется единственный пик, а в линии  $^{12}\text{CO}$  имеется двойной пик. Это делается путём введения внешнего к наблюдателю слоя с относительно невысокой оптической толщиной и температурой возбуждения по отношению к основному слою. На Рисунке 2 представлены два характерных случая профилей молекулы CO и их модели: несколько отдельных компонент (сгусток №18) и профиль самопоглощения (сгусток №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<sup>1,2</sup>.

---

1. [https://github.com/DmityL/CO\\_model](https://github.com/DmityL/CO_model)

2. <https://co-model.readthedocs.io>

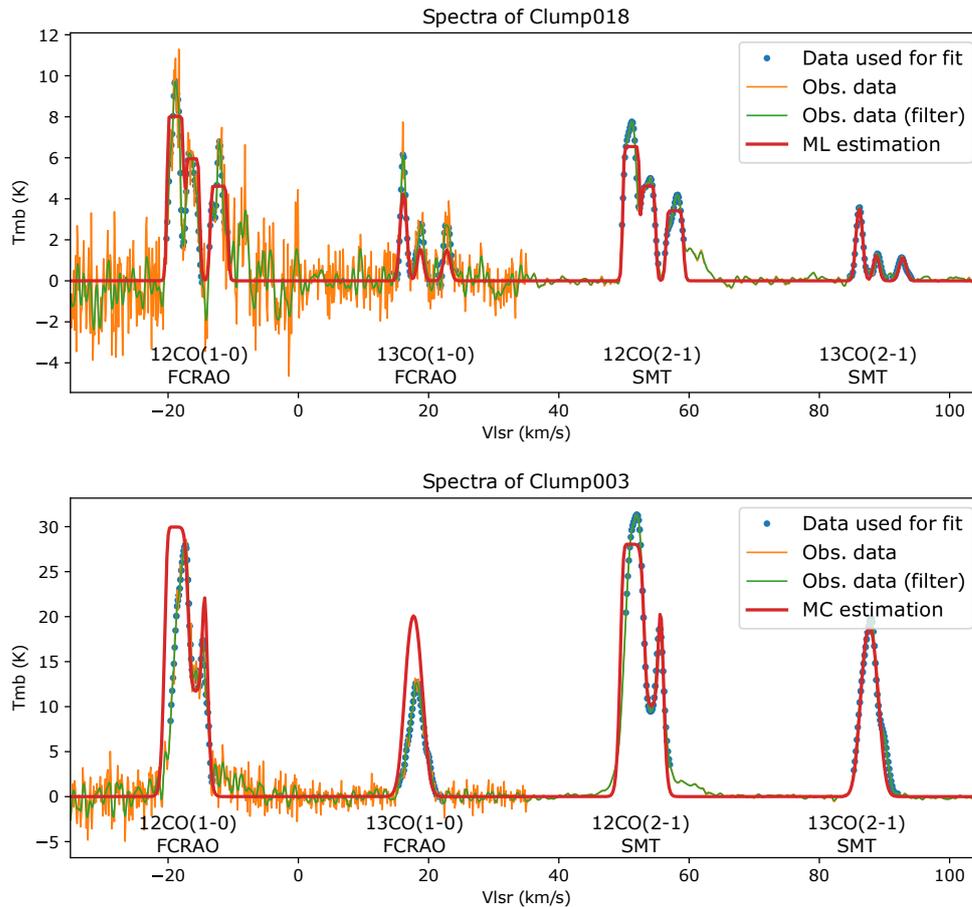


Рис. 2. Два характерных вида профилей линии CO в молекулярных облаках: №18 – несколько изолированных компонент, №3 – профиль самопоглощения. Оранжевым цветом показаны наблюдаемые спектры различных линий CO, зелёным – исходные спектры, сглаженные с помощью низкочастотного фильтра, точками отмечены значения,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

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

## Список литературы

- [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,  $^{13}\text{CO}$  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 ЗВЁЗДООБРАЗОВАНИЯ: 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 обобщённой 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  $\mu\text{m}$  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*. Данная система 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  $\text{H}_2\text{O}$ , OH и SiO в проэволюционировавших 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 произведён 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 так же изображения и текстовые описания мазерных источников. Дополнительно присоединена информация, отсутствующая в статьях, в том числе: ассоциация и параметры источников из популярных астрономических каталогов, в том числе Simbad, 2MASS, GLIMPSE, WISE, IRAS, Akari, ATLASGAL, Volocam, Hi-GAL, MSX, SDC и других, а так же информация о регистрации мазеров других молекул, в том числе  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{OH}$  и  $\text{SiO}$ . 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 7232 положительные регистрации и 14102 отрицательные регистрации водяных мазеров из 102 статей. Из них 995 регистраций являются данными интерферометров, для которых доступна информация о мазерных пятнах. К 2974 наблюдениям были добавлены изображения спектров в формате PNG из статей. Общее число групп источников с положительной регистрацией мазера составило 2334, с отрицательной – 5577. По оценке, покрытие базы данных по числу включённых 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 проэволюционировавших звёздах. Для каждой статьи было выписано число положительных регистраций, а процент готовности рассчитан как отношение суммы регистраций в добавленных статьях на сумму регистраций для не включённых в базу данных статей.

Интерфейс для работы с базой данных позволяет в режиме онлайн отбирать источники по различным критериям (см. Рисунок 1), 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 определённого типа ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{SiO}$ ), какие характеристики имеют связанные источники в популярных инфракрасных, миллиметровых и радио-каталогах, какие наиболее яркие водяные мазеры известны в настоящее время и т.д. Возможно так же 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 обобщённой 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.

- H<sub>2</sub>O  CH<sub>3</sub>OH (Class I)  
 OH  CH<sub>3</sub>OH (Class II)  
 SiO

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

- H<sub>2</sub>O  CH<sub>3</sub>OH (Class I)  
 OH  CH<sub>3</sub>OH (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 H<sub>2</sub>CO maser (experimental) NEW

Include information about H<sub>2</sub>CO maser (experimental) NEW

We found **1080** objects observed in H<sub>2</sub>O 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 ilike '%Y%' OR det ilike '%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 NEW  
 Hi-GAL parameters (70-500 um)  
 MSX source NEW  
 MSX parameters (8-21 um)  
 Spitzer Dark Cloud (SDC) source NEW  
 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)

Рис. 1. Страница выбора критериев для отбора объектов в системе MaserDB.net

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

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

где  $F_{\text{peak}}$  и  $F_{\text{int}}$  - пиковая и интегральная плотность потока в Ян,  $L_{\text{bol}}$  - болометрическая светимость в  $L_{\odot}$ ,  $r_{\text{FWHM}}$  - размер сгустка в пк на уровне половины интенсивности,  $M_{\text{clump}}$  - масса сгустка 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

( $\sim 1000$  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:  $\overline{L}_{\text{bol}}^{\text{true}} / \overline{L}_{\text{bol}}^{\text{false}} = 2.87$ ,  $\overline{F}_{\text{peak}}^{\text{true}} / \overline{F}_{\text{peak}}^{\text{false}} = 2.25$ . 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 АТСА (код проекта С3413).

Применение модели (1) ко всем сгусткам из каталога [8], для которых определены необходимые физические параметры, следует, 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  $\sim 25\%$  от общего числа водяных мазеров в направлении на источники ATLASGAL. Это даёт мотивацию для проведения дальнейших наблюдений водяных мазеров в направлении на сгустки из каталога ATLASGAL.

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

## Список литературы

- [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. Назаров<sup>1</sup>, А. С. Харченко<sup>2</sup>, А. С. Кривенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Крымская астрофизическая обсерватория РАН*

<sup>2</sup>*АО ЦНТЭЭ*

В 1978-м году в Крымской астрофизической обсерватории был введён 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 и модернизации телескопа и первые результаты.

## MODERNIZATION OF THE TELESCOPE "SINTEZ" AT THE CRAO RAS

S. V. Nazarov<sup>1</sup>, A. S. Kharchenko<sup>2</sup>, A. S. Krivenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Crimean astrophysical observatory RAS*

<sup>2</sup>*CNTEE*

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 modernization process and the first results.

## Введение

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

Эксперимент ставился, чтобы выяснить принципиальную возможность постройки больших по диаметру зеркал, чем зеркало крупнейшего в мире (на тот момент) телескопа БТА в САО.

Основными целями при строительстве «Синтеза» были:

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 1980х до 2018го телескоп находился на консервации. Анализ состояния телескопа 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 на базе гексаподов превышают финансовые возможности КраО, 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, привода и труба). К началу 2021-го года удалось реализовать ряд технических и программных решений, позволивших начать эксплуатацию Синтеза как научного инструмента на базе временного телескопа.

## Аппаратное устройство системы

### Временный телескоп:

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

Монтировка телескопа «Синтез» экваториальная вилочная, 2 идентичных привода, в составе которых:

1. Двигатель грубого движения, ДПТ 110В 750 Вт, 2500 об/мин, момент инерции 0.52 Н\*м<sup>2</sup>
2. Двигатель тонкого движения, ДПТ 110В 250 Вт, 3000 об/мин, момент инерции 0.098 Н\*м<sup>2</sup>
3. Шаговый двигатель часового ведения, 27В, 6.3А
4. Электромагнитный тормоз вала двигателя грубого движения
5. Сельсин-датчик грубого наведения, 1 оборот соответствует 1 обороту телескопа
6. Сельсин-датчик точного наведения, 1 оборот соответствует 1 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 был разработан модуль движения, состоящий из:

- Драйвер двигателя постоянного тока, на 110 В 10-15 А – 2 шт.
- Драйвер шагового двигателя, на 27 В 15 А, аналогичный драйверу ДПТ – 1 шт.
- Контроллер движения, на процессоре STM32F103, включающий в себя:

1. Два интерфейса RS-485, с гальванической развязкой

2. Аналоговая часть для подключения сельсина
3. Пять дискретных выходов, изолированных
4. Восемь дискретных входов, изолированных
5. Выходы для управления двигателями и входы датчиков тока
6. Питание 18-36 В, изолированное
7. Встроенное ПО для управления по протоколу Modbus/RTU с автономным выполнением функции движения с заданной скоростью, в заданную координату, разгона и торможения с учётом ограничений.

## Программное обеспечение

При проектировании системы было решено использовать открытые и стандартные протоколы. В настоящее время общение астрономических программ с аппаратурой «Синтеза» 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 «Синтеза» 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 в 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 съёмка наблюдаемого объекта (NINA)
11. Телескоп наводится на следующий объект

Для управления двигателями монтировки был разработан специальный программный регулятор, который обеспечивает точное позиционирование монтировки за небольшое время.

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

определять координаты телескопа. Предположительно источником ошибки является крепление энкодера на оси телескопа либо деформация самой оси. В настоящее время идёт 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 2020го года в качестве первой пробной научной задачи была начата систематическая съёмка 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 × 26 угловых минут. 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 периодичу по оси альфа и гнутие трубы 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 драйвера монтировки и крыши для распространённого 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.

Предполагаемая оптическая система главного телескопа — цельное параболическое или гиперболическое главное зеркало с корректором и приёмником в прямом фокусе с аберрациями укладываемыми в пиксель 9 микрон на поле зрения не менее 30 × 30 угловых минут.

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.

Научные задачи: фотометрия и астрометрия широкого круга объектов, поисковые работы (послесвечение гамма-всплесков, новые и сверхновые, килоновые, отождествление новых источников и др.).

## Список литературы

- [1] *Ustinov N. D., Vasilev A. S., Vysotskii Iu. P. et al.* AST-1200 astronomical telescope having a sectional main mirror // *Optiko Mekhanicheskaiia 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 РАССЕЯНИЕ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА КАК МЕХАНИЗМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КИЛОПАРСЕКОВЫХ ДЖЕТОВ КВАЗАРОВ

С. В. Назаров <sup>1</sup>, М. С. Бутузова <sup>1</sup>, А. Б. Пушкарев <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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. В данной работе 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 <sup>1</sup>, M. S. Butuzova <sup>1</sup>, A. B. Pushkarev <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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 успешно наблюдаются с высоким угловым разрешением в рентгеновском диапазоне космической обсерваторией Chandra с 2000 г [1]. Для первого обнаруженного джета квазара PKS 0637–752, также как и для джетов других квазаров с доминирующими ядрами, поток излучения в рентгеновском диапазоне оказался выше, чем ожидаемое значение из экстраполяции синхротронного радиооптического спектра на рентгеновские частоты. [1], [2]. Это свидетельствует о разных процессах, генерирующих излучение в указанных диапазонах.

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.

Выбор объектов осуществлялся по следующим критериям:

1. квазары с доминирующими ядрами.
2. должен наблюдаться спад рентгеновской интенсивности узлов вдоль кпк-джета, что является указанием на возможность обратного комптоновского рассеяния центрального источника. При этом отбирались джеты, два и более узлов которых наблюдаются как в радио-, так и в рентгеновском диапазонах.
3. необходимо 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.

В данной работе 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. Обратное комптоновское рассеяние центрального источника дает естественное объяснение наблюдаемому уменьшению рентгеновской интенсивности узлов с удалением от активного ядра и позволяет при известном спектре центрального источника определить как физические параметры узлов, так и угол с лучом зрения и скорость кпк-джета.

Мы получили адекватные оценки на концентрацию 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, также 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, исключаящую 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 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.

## Список литературы

- [1] *Tavecchio Fabrizio, Maraschi Laura, Sambruna Rita M., Urry C. Megan.* 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 Annalisa, Ghisellini Gabriele, Chiaberge Marco.* 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<sup>1</sup>, А. А. Савушкин<sup>1</sup>, Е. А. Жужулина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Крымская Астрофизическая Обсерватория Российской Академии Наук (КрАО РАН)*

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 с размером от 3 до 5 мкм вызывают заметное повышение интенсивности рассеянного света 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<sup>1</sup>, A. A. Savushkin<sup>1</sup>, E. A. Zhuzhulina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Crimean Astrophysical Observatory (CrAO RAS)*

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 nonspherical particles with a size of 3 to 5 microns cause a noticeable increase in the intensity of the scattered light compared to 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 называют 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 сфероиды (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 (см. рис. 1). В данной работе были изучены частицы с соотношением осей  $a/b = 0.8$ ,  $a/b = 1.0$  и  $a/b = 1.2$ .

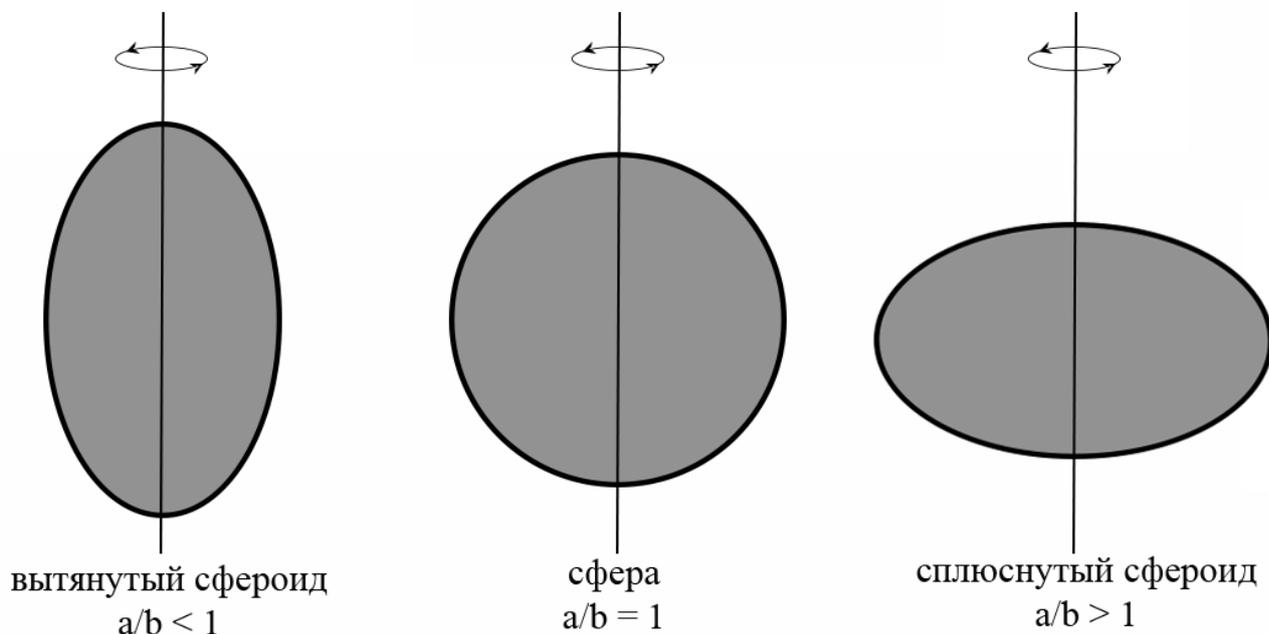


Рис. 1. Примеры изучаемых частиц. Вытянутый сфероид, сфера, сплюснутый сфероид.

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 (см. рис. 2) взята из работы [9].

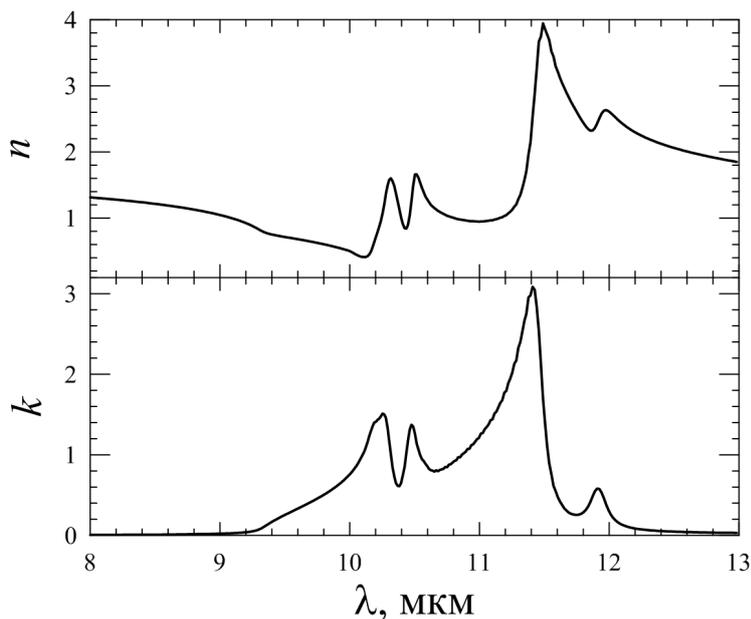


Рис. 2. Спектральная зависимость действительной (верхняя панель) и мнимой (нижняя панель) частей показателя преломления оливина

## Результаты и обсуждение

Мы рассчитали интенсивность света, рассеянного на вытянутых и сплюснутых частицах оливина, для разных длин волн и размеров рассеивающей частицы. Поскольку частицы разного размера по-разному рассеивают свет, соответствующая часть спектра была нормирована для каждого размера рассеивающей частицы - максимальное значение интенсивности света принималось равным единице. Отметим, что расчеты проводились при угле рассеяния 0 градусов (рассеяние вперед). Рисунок 3 демонстрирует карту разности интенсивностей несферической ( $a/b=1.2$  для левой панели и  $a/b=0.8$  для правой панели) и сферической частицы  $\Delta I = I_{nonsph} - I_{sph}$  в зависимости от размера (вертикальная шкала) и длины волны (горизонтальная шкала). Из рисунка видно, что при определенном размере частиц (примерно от 3 до 5  $\mu\text{m}$ ) проявляется заметное повышение интенсивности рассеянного света 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 определенного диапазона размеров вызывают повышение интенсивности рассеянного света в спектральном диапазоне от 8 до 12  $\mu\text{m}$ . 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.

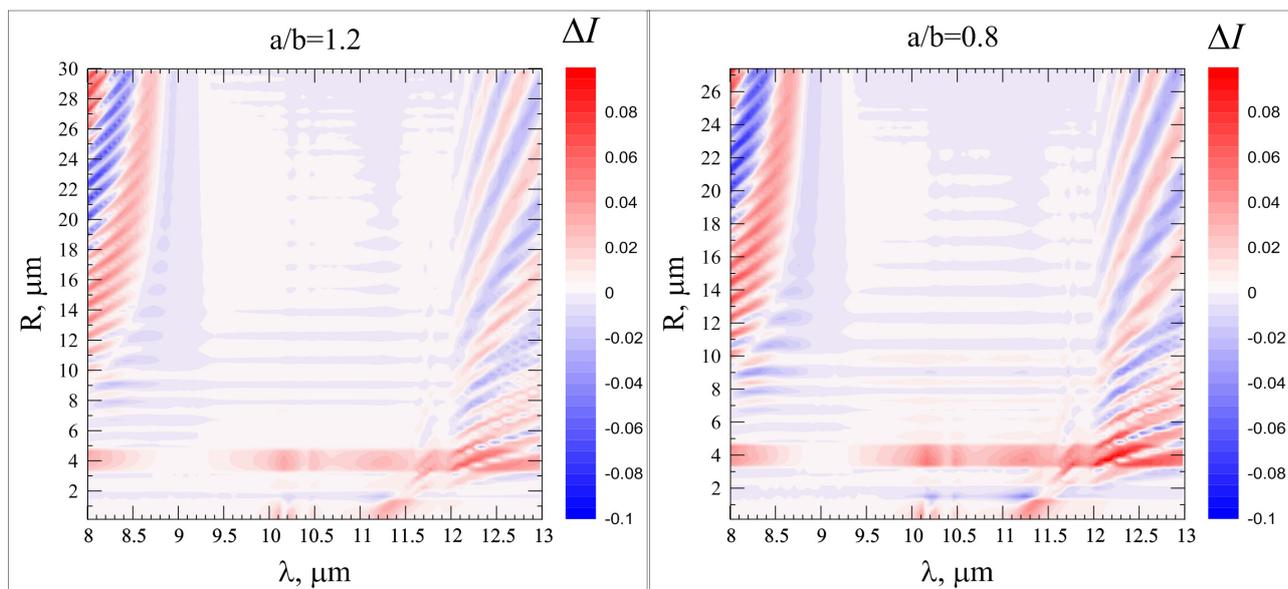


Рис. 3. Карта разности интенсивностей несферической ( $a/b=1.2$  для левой панели и  $a/b=0.8$  для правой панели) и сферической частицы в зависимости от размера (вертикальная шкала) и длины волны (горизонтальная шкала)

## Список литературы

- [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](#).
- [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- $\mu\text{m}$  silicate feature // *Icarus.* — 2020. — Vol. 350. — P. 113907.
- [5] *Петров Д. В., Журужulina Е. А., Савушкин А. А.* Влияние формы рассеивающих частиц на силикатную особенность SiO<sub>2</sub> // *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] *Wielgaard 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. Попандопуло<sup>1</sup>, В. А. Авдюшев<sup>1</sup>, Т. В. Бордовицына<sup>1</sup>, И. Н. Чувашов<sup>1</sup>,  
П. А. Левкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, <sup>2</sup>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 в ЦКП «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН в период 11-25 сентября 2020 г.

## DETERMINATION OF SAILING OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS USING POSITIONAL OBSERVATIONS OBTAINED AT TERSKOL PIKE

N. A. Popandopulo<sup>1</sup>, V. A. Avdyushev<sup>1</sup>, T. V. Bordovitsyna<sup>1</sup>, I. N. Chuvashov<sup>1</sup>,  
P. A. Levkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, <sup>2</sup>Institute of Astronomy RAS

The results of the joint determination of the orbital elements and the sailing parameter 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 Center for Collective Use 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 из 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 поднять точность сходимости процесса определения искомым параметров.

В процессе улучшения орбиты по данным измерений определялись начальные координаты и скорости объектов в рамках задачи наименьших квадратов, которая решается

Таблица 1. Данные о процессе улучшения орбит

Номер объекта	Число наблюдений	$\sigma$ , "	$A/m$ , $m^2/kg$
90008	219	0,350	0,0102
90031	344	0,494	0,0083
97149	224	0,398	0,0142
90214	302	3,704	0,1008

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 1. Здесь номера объектов даны согласно динамической базе данных космических объектов Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН [5],  $\sigma$  — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений.

Как показывают данные, приведенные в таблице 1, элементы орбит трех из перечисленных выше объектов с номерами 90008, 90031 и 97149 определяются достаточно надёжно. Распределение невязок этих объектов очень близко по своей структуре. Для примера на рисунке 1 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. табл. 1).

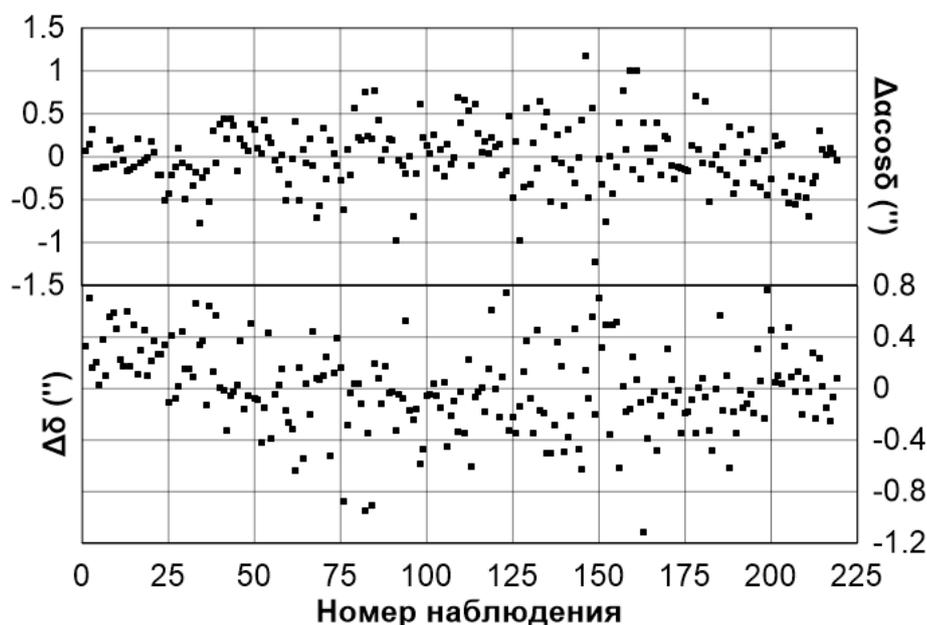


Рис. 1. Распределение невязок объекта № 90008 в зависимости от номера наблюдения

Таким образом, усовершенствованный ПК показал свою пригодность к определению параметров движения ГСО. Параметры орбит и светового давления трех из четырех рассмотренных 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).

## Список литературы

- [1] *Кузнецов Э. Д.* О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов // *Астрономический вестник*. — 2011. — Vol. 45. — P. 444–457.
- [2] *Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В. et al.* О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков // *Астрономический вестник*. — 2012. — Vol. 46. — P. 480–488.
- [3] *Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // *Изв. вузов. «Физика»*. — 2017. — Vol. 60. — P. 69–76.
- [4] *Авдюшев В. А.* Новый коллокационный интегратор для решения задач динамики. I. Теоретические основы // *Изв. вузов. «Физика»*. — 2020. — Vol. 63. — P. 131–140.
- [5] *Молотов И. Е. [и др.]*. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. — 2020. — P. 17.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СГУСТКОВ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S254-S258

Е. А. Попова<sup>1</sup>, Д. А. Ладейщиков<sup>1</sup>, М. С. Кирсанова<sup>2</sup>, А. М. Соболев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет

<sup>2</sup>Институт астрономии РАН

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<sup>+</sup>, 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. Popova<sup>1</sup>, D. A. Ladeyschikov<sup>1</sup>, M. S. Kirsanova<sup>2</sup>, A. M. Sobolev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University

<sup>2</sup>Institute 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<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> 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 полученных карт определены массы сгустков путем интегрирования по занимаемой ими площади.

На картах лучевой концентрации ViaLactea, 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 имеет низкую интенсивность излучения по данным ViaLactea, так же был взят для рассмотрения, поскольку он содержит яркие пики в линиях CO и 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  $\text{H}_2$  по данным ViaLactea либо контурами численности МЗО на уровне пяти звезд  $\text{pk}^{-2}$  при отсутствии сильного излучения в этой карте. Расстояние до области S254-S258 принято равным 1.59 кпк.

Лучевая концентрация  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{CS}$  и  $\text{HCO}^+$  рассчитывалась с применением подхода, описанного в работе [3]. Для расчёта лучевой концентрации молекул  $\text{CS}$ ,  $\text{HCO}^+$ , трассирующих высокоплотный газ, у нас есть карты  $\text{CS}$  и  $\text{HCO}^+$ , но данные  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  и  $\text{C}^{34}\text{S}$  доступны только для шести положений вблизи центрального яркого скопления S255N. Тем не менее мы вычислили лучевую концентрацию в направлении доступных спектральных данных. Получившиеся значения лучевых концентраций  $\text{CS}$  и  $\text{HCO}^+$  для этих направлений находятся в пределах  $N = 0.39 - 8.24 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  для внешних и внутренних частей скопления S255N, соответственно.

Для определения оценок физических параметров газа по трассерам газа промежуточной плотности использованы два перехода молекул  $\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$ : (1-0) и (2-1) для получения двух независимых оценок лучевой концентрации. Используются данные по линии излучения  $^{12}\text{CO}(1-0)$  и  $^{13}\text{CO}(1-0)$  из работы [2], а так же данные из работы [4] по линиям  $^{12}\text{CO}(2-1)$  и  $^{13}\text{CO}(2-1)$ .

Для вычисления температуры возбуждения оптически толстой линии  $^{12}\text{CO}$  использовалась следующее выражение (1):

$$T_{\text{ex}} = T_0 / \ln \left( 1 + \frac{T_0}{T_B^{12} + T_0 / (e^{T_0/T_{\text{bg}}} - 1)} \right), \quad (1)$$

где  $T_B^{12}$  — яркостная температура линии  $^{12}\text{CO}$  на ее пике. Коэффициент  $T_0 = h\nu/k$  равен 5.53 К для линии  $^{12}\text{CO}(1-0)$  и 11.06 К для линии  $^{12}\text{CO}(2-1)$ . В данном случае учитывался микроволновый фон  $T_{\text{bg}} = 2.7$  К. Мы приняли  $T_B = T_{\text{mb}}$ , так как средний размер источников в линиях излучения молекул  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$  больше размера диаграммы направленности.

Излучение молекулы  $^{13}\text{CO}$  также используется для получения оценки ее оптической толщины в центре линии по следующей формуле (2):

$$\tau^{13} = -\ln \left( 1 - \frac{T_B^{13}/T_0}{(e^{T_0/T_{\text{ex}}} - 1)^{-1} - (e^{T_0/T_{\text{bg}}} - 1)^{-1}} \right), \quad (2)$$

где  $T_B^{13}$  — яркостная температура линии  $^{13}\text{CO}$ ,  $T_{\text{ex}}$  — температура возбуждения, определенная по линии  $^{12}\text{CO}$  при ЛТР путем решения уравнения радиативного переноса с помощью формулы (1). Коэффициент  $T_0 = h\nu/k$  равен 5.29 К для линии  $^{13}\text{CO}(1-0)$  и 10.58 К для линии  $^{13}\text{CO}(2-1)$ .

С учетом соотношения обилий молекул вычисленные значения лучевой концентрации  $^{13}\text{CO}$  используются для определения  $N(\text{H}_2)$ , а те, в свою очередь, для расчета массы по формуле (3):

$$M = N(\text{H}_2) \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}} A, \quad (3)$$

где  $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$  — это средний молекулярный вес межзвездной среды,  $m_{\text{H}}$  — это масса атома водорода,  $A$  — это размер пикселя карты в  $\text{см}^2$ .

Лучевая концентрация  $N(\text{H}_2)$  рассчитывается также из теплового излучения *Volosam* 1.1 мм согласно работе [5] по формуле  $N(\text{H}_2) = 2.19 \times 10^{22} [e^{13.0/T_d} - 1] S_{1.1}$  ( $\text{см}^{-2}$ ), где  $S_{1.1}$  — это плотность потока на 1.1 мм в Ян, а  $T_d$  — температура пыли. Таким образом, значение лучевой концентрация газа по данным *Volosam* 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, применены для расчета лучевой концентрации. Для этого было использовано следующее соотношение между поглощения в ИК

Таблица 1. Параметры сгустков в регионе S254-S258

Название	ViaLactea 70–500 $\mu\text{m}$	Масса сгустка, $M_{\odot}$			Bolocam 1.1 мм	ViaLactea 70–500 $\mu\text{m}$	$N(\text{H}_2), \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$			Bolocam 1.1 мм	$T_{\text{dust}}, \text{K}$ ViaLactea 70–500 $\mu\text{m}$
		$^{13}\text{CO}$ 2–1	$^{13}\text{CO}$ 1–0	$A_V$			$^{13}\text{CO}$ 2–1	$^{13}\text{CO}$ 1–0	$A_V$		
S255N	1285	1936	1144	1459	875	19.34	29.6	17.19	22.61	13.51	20.11
S256-south	1399	1223	1141	1830	170	12.12	10.5	9.83	15.67	1.45	15.53
G192.63-0.00	431	411	321	415	62	8.13	7.7	6.11	7.70	1.2	17.55
S258	218	306	229	343	117	8.31	11.5	8.83	12.61	4.59	19.18
G192.75-0.08	339	241	240	537	64	8.69	6.2	6.12	14.38	1.66	13.78
G192.69-0.25	117	97	92	75	15	7.23	5.9	5.51	4.70	0.96	13.67
G192.75-0.00	34	56	43	47	2	3.28	5.32	4.16	4.22	0.20	14.93
G192.54-0.15	48	21	4	56	10	4.57	1.95	0.32	4.97	0.98	18.03
$1\sigma$						2	3	1	3	0.7	

диапазоне и лучевой концентрацией:  $N(\text{H})/A_V = 1.87 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-2}\text{mag}^{-1})$  [7]. Следует отметить, что в расчет лучевой концентрации из поглощения входят многие неопределенности, которые могут изменять коэффициент конверсии.

Параметры сгустков (массы, лучевые концентрации и температуры пыли) по различным трассерам приведены в таблице 1. 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 они 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 основному облаку по всем доступным трассерам (мы не располагаем 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  $\text{HCO}^+$  показывают наличие непрерывной связи между скоплениями S255N и S256-south на уровне  $6\sigma$ . 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 было обнаружено, что массы в каждом трассере газа коррелируют между собой кроме области S255N. Разные трассеры газа и пыли имеют тенденцию уменьшать или увеличивать массу скоплений. Наибольшие оценки массы и лучевой концентрации дает карта поглощения. Возможная причина этого — влияние атомарного газа на карту поглощения. Более низкая оценка массы и лучевой концентрации получается для ViaLactea. Очень близки к ним параметры, вычисленные по  $^{13}\text{CO}(2-1)$  и  $^{13}\text{CO}(1-0)$ , но имеют тенденцию быть ниже. Оценка массы и лучевой концентрации из излучения Bolocam значительно ниже из-за влияния температуры — более холодные сгустки имеют меньшую интенсивность излучения. Таким образом, лучевая концентрация по ним значительно занижена.

По карте ViaLactea наибольшие значения лучевой концентрации обнаружались в направлении сгустка S255N (среднее значение составляет  $1.9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ). Наиболее массив-

ные сгустки это 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. Однако, данные  $^{13}\text{CO}(2-1)$  проявляют значительный пик лучевой концентрации в направлении центра сгустка S255N, что приводит к еще более высокой оценке массы и лучевой концентрации. Средние значения лучевой концентрации составляют  $2.9 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ .

Скопления S256-south и G192.75-0.08 проявляются на карте Volocam на уровне  $2-3\sigma$ , но другие трассеры проявляют относительно яркое излучение, связанное с этими скоплениями. Слабое излучение Volocam в скоплении S256-south и G192.75-0.08 можно объяснить низкой средней температурой пыли в этих областях (13-15 K) по сравнению с другими областями (19-20 K для S255N и S258). Физическая интерпретация состоит в том, что карта Volocam показывает нагретую пыль, которая определяет общую поступающую энергию от источников тепла. Излучение HCO+ показывает области фотодиссоциации, т.е. обнаруживает УФ-излучение от источников тепла. Интенсивность излучения HCO+(1-0) почти одинакова как для регионов S258 и S256-south ( $T_{mb} = 1.5 \text{ K}$ ). Однако, излучение Volocam ярче в S258. Поэтому можно сделать вывод, что источник нагрева в области III S258 создает больше теплового излучения, чем в области III S256, что может быть связано с различием спектральных классов источников нагрева либо с несколькими источниками нагрева в регионе III 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 Volocam 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.

## Список литературы

- [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] Mangum J. G., Shirley Y. L. How to Calculate Molecular Column Density // Public. Astron. Soc. Pacific. — 2015. — Vol. 127. — P. 266.
- [4] 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.
- [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). Пары 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 так же 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]:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{da}{dt}\right)_B \cdot \frac{\sqrt{a_B}(1 - e_B^2)}{\sqrt{a}(1 - e^2)} \frac{D_B \rho_B \cos \phi}{D \rho \cos \phi_B} \frac{1 - A}{1 - A_B},$$

где  $e$  — эксцентриситет орбиты,  $D$  — диаметр астероида,  $\rho$  — его плотность,  $\phi$  — 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, 7:3 представлен в таблице 1. Для каждой пары приведены оценки метрик Холшевникова [5]:  $\varrho_2$  — расстояние в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите),  $\varrho_5$  — расстояние в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$ , наклон  $i$ ) как минимальное значение  $\varrho_2$  при всех возможных положениях узлов и перицентров орбит. В последнем столбце таблицы 1 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–

Таблица 1. Пары астероидов вблизи резонансов

Астероиды		$\varrho_2,$ (а.е.) <sup>1/2</sup>	$\varrho_5,$ (а.е.) <sup>1/2</sup>	$(da/dt)_{max},$ 10 <sup>-4</sup> 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.)<sup>1/2</sup>,  $\rho_5 \approx 0.05$  (а. е.)<sup>1/2</sup>), 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 будущем, 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 и 7:3. Динамическая эволюция орбит астероидов в окрестности области 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 для того, чтобы сделать однозначные выводы о том, каким образом их орбиты эволюционируют, возможно ли сохранение тесной пары после прохождения резонанса и т.д. Анализ полученных результатов показывает, что при прохождении областей резонансов средних движений в среднем орбиты астероидов, входящих в тесные пары, удаляются друг от друга при моделировании в будущее.

В дальнейшем планируется выполнить детальное изучение различных сценариев динамической эволюции орбит пар астероидов на близких орбитах в окрестности резонансов. Будет расширен список исследуемых объектов, а также увеличен интервал интегрирования (в том числе, в прошлое). Для детального 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.

## Список литературы

- [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] Kholshchevnikov 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. 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 ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

А. Ф. Пунанова<sup>1</sup>, И. В. Петрашкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Уральский федеральный университет*

Образование звезд малых масс начинается в дозвездных ядрах — плотных ( $> 10^5 \text{ см}^{-3}$ ) холодных ( $\sim 10 \text{ K}$ ) сгустках внутри молекулярных облаков. Дозвездные ядра особенно ярко характеризуются двумя явлениями — “вымерзанием” молекул, в первую очередь, CO, из газа на пыль, и фракционированием дейтерия в молекулах. 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. 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.

## DEUTERIUM FRACTIONATION IN LOW-MASS STAR-FORMING REGIONS

A. F. Punanova<sup>1</sup>, I. V. Petrashkevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Ural Federal University*

Low-mass star formation starts with pre-stellar cores — dense ( $> 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) cold ( $\sim 10 \text{ K}$ ) clumps within molecular clouds. The pre-stellar cores are essentially characterised by two processes, the “freezing” of molecules, primarily CO, from gas to dust, and the fractionation of deuterium in molecules. With an increase in the density of the medium in the cold core, freeze-out increases, as well as the deuterium fraction in the species. Thus, high deuterium fraction becomes one of the indicators of the pre-stellar phase, which is important for studying the initial conditions of the solar-type stars formation. In this work, we study how the deuterium fraction changes with the physical conditions in cold cores in the molecular clouds of Taurus, Perseus and Ophiuchus.

## 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  $1.5 \times 10^{-5}$  [2], в холодных ( $T \sim 10$  K) дозвездных ядрах отношения содержаний дейтерированных и содержащих основной изотоп водорода молекул (например, отношение лучевых концентраций  $N(N_2D^+)/N(N_2H^+)$ ) может достигать десятков процентов (см., например, [3]).

Дейтерий заменяет собой водород в результате следующей цепочки реакций:  $H_3^+ + HD \rightleftharpoons H_2D^+ + H_2 + 230$  K, протекающей только слева направо в холодных ядрах, увеличивающей количество иона  $H_2D^+$  [4], далее распространяющего дейтерий в реакции с любой двухатомной молекулой A:  $H_2D^+ + A \rightarrow AD^+ + H_2$  [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 маломассивного звездообразования, молекулярные облака так называемого пояса Гулда, наиболее удобные для наблюдений, имеют различный темп звездообразования. Для лучшего понимания этого процесса необходимо исследовать и учитывать локальные физические условия в облаке, то есть 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 ( $N(H_2) \sim 5 \times 10^{21}$  см<sup>-2</sup>). 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 ( $N(H_2) \sim 10^{22}$  см<sup>-2</sup>). 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 ( $N(H_2) \sim 10^{23}$  см<sup>-2</sup>) [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, углерод-содержащие молекулы (как CO) и генетически связанные с ними ионы (как HCO<sup>+</sup>) рано образуются в молекулярном облаке и присутствуют в газе при довольно малых плотностях ( $\sim 10^3$  см<sup>-3</sup>), а в плотном газе их содержание снижается из-за вымерзания CO. А азот-содержащие соединения (как NH<sub>3</sub> или N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) начинают быть видны при больших плотностях (поскольку образуются в уже проэволюционировавшем, а значит более плотном газе) и остаются в газе вплоть до  $n > 10^6$  см<sup>-3</sup>. Чтобы наиболее полно изучить фракционирование дейтерия в холодных ядрах, мы пронаблюдали выбранные источники в линиях трех пар молекул и ионов: N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и N<sub>2</sub>D<sup>+</sup>, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> и DCO<sup>+</sup> и *p*-NH<sub>2</sub>D и *p*-NH<sub>3</sub>. Все наблюдения выполнены нами в 2014–2018 гг. на телескопе IRAM 30m за исключением на-

блюдений  $p\text{-NH}_3$ , выполненных на телескопе GBT в составе обзора GAS [11]. В этой работе мы будем считать, что  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  и  $\text{DCO}^+$  являются трассерами оболочки холодных ядер, а  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{N}_2\text{D}^+$ ,  $p\text{-NH}_2\text{D}$  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 гидrogenизированного изотополога одного и того же соединения, например,  $R_D = N(\text{N}_2\text{D}^+)/N(\text{N}_2\text{H}^+)$ . Расчет лучевых концентраций  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{N}_2\text{D}^+$ ,  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{DCO}^+$ ,  $p\text{-NH}_3$  и  $p\text{-NH}_2\text{D}$  выполнялся в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для расчета лучевой концентрации  $\text{HCO}^+$ , обладающего большим содержанием в газе, мы использовали наблюдательные данные его более редкого изотополога  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ , линии которого обладают небольшой оптической толщиной и позволяют исследовать весь газ на луче зрения. Фракционированием изотопов углерода в этом случае пренебрегают, и оно не существенно (не регистрируемо) 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 центральной части плотного ядра выше, чем во внешних частях — это видно как из сравнения доли дейтерия в трейсерах 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,  $\text{N}_2\text{H}^+$  и  $\text{DCO}^+$ , тогда как для нейтрального аммиака эта связь практически не прослеживается. Это может быть связано с различием химии ионов и молекул.

Область В5 представляет из себя небольшое волокно с погруженным инфракрасным источником и несколькими плотными ядрами.  $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$  сначала увеличивается с расстоянием от погруженного источника — протозвезда разогрела окружающий газ, и доля дейтерия вблизи протозвезды стала уменьшаться, — 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  $\text{N}_2\text{H}^+$  и менее плотным газом в  $\text{HCO}^+$  существенно меньше, только в 2–3 раза. Результаты этой работы частично опубликованы в [13] и часть их (об L1688) более подробно обсуждается в работе Петрашкевича И. В. и Пунановой А. Ф. в этом же сборнике трудов.

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

## Список литературы

- [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<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Проанализированы архивные рентгеновские наблюдения 9 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

E. B. Ryspaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 газо-пылевые 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 с<sup>-1</sup>). При указанных терминальных скоростях верхний предел температуры плазмы в рамках модели MCWS должен составлять  $\sim 0.43$  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 9 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 SAS<sup>1</sup>. Полученные спектры в диапазоне энергий 0.2-8 кэВ были аппроксимированы различными моделями с использованием пакета "XSPEC 12.10.0"<sup>2</sup>. Для проверки применимости MCWS к изучаемым звездам Хербига их спектры были аппроксимированы двух- или трехтемпературными моделями АРЕС (Astrophysical Plasma Emission Code [6]) или МЕКАЛ [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 АРЕС и PSHOCK [10] — модели ударной волны, описывающей нестационарное тепловое рентгеновское излучение. Дополнительно спектры были аппроксимированы моделью АРЕС 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 околозвездных дисков. Примеры аппроксимаций спектра с покомпонентным разложением показаны на Рис. 1.

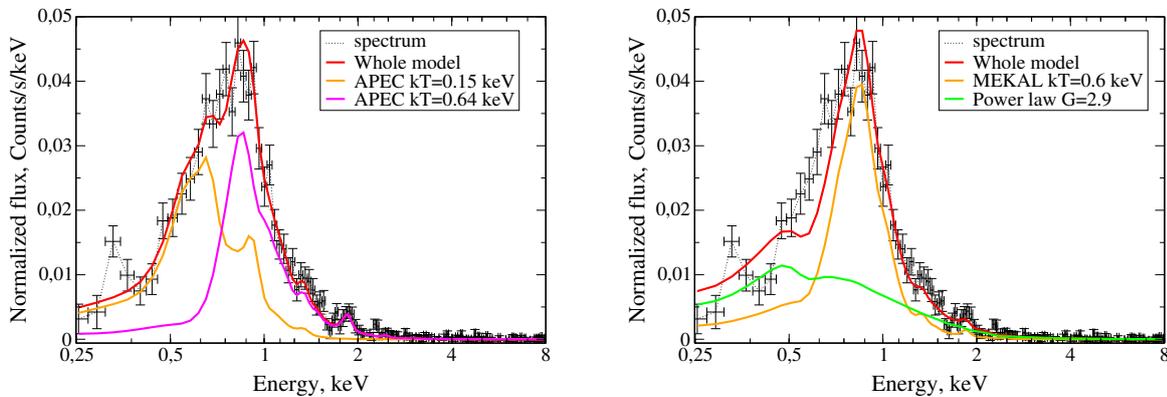


Рис. 1. Модельные спектры звезды HD 31293 с покомпонентным разложением. Красной пунктирной линией показан суммарный модельный спектр, оранжевыми и сиреневыми линиями — вклады моделей АРЕС, МЕКАЛ, зеленой линией — вклад степенной компоненты.

В результате аппроксимаций рассмотренных спектров было установлено, что они могут быть достаточно точно описаны моделями АРЕС или МЕКАЛ с  $kT < 3$  кэВ, но при добавлении степенного закона температуры становятся  $< 1$  кэВ. При этом доли степенных компонент<sup>3</sup> составляют от 20% до 70%, а спектральный индекс  $G \sim 2-3$  (отн. ед.). Спектры рассмотренных А звезд также удалось описать моделями АРЕС+PSHOCK.

<sup>1</sup> [www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton](http://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton)

<sup>2</sup> <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

<sup>3</sup> Эти величины определялись как отношение интегрального потока степенного компонента, к потоку, описываемого 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. Были выявлены корреляции, показанные на Рис. 2. Доля степенной компоненты линейно увеличивается с ростом жесткости (коэффициент корреляции  $0.76 \pm 0.11$ ), а жесткость спектров Ae звезд Хербига линейно убывает с увеличением напряженности магнитного поля (коэффициент корреляции  $-0.93 \pm 0.6$ ).

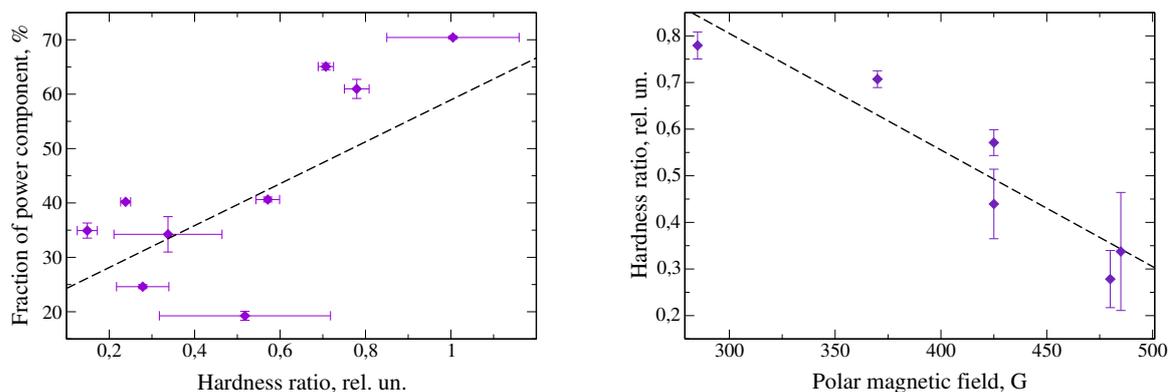


Рис. 2. Слева: зависимость доли степенной компоненты от жесткости (hardness ratio) спектров звезд Хербига; справа: зависимость жесткости от напряженности полярного магнитного поля для звезд Ae Хербига. Линейные аппроксимации показаны штриховыми линиями

## Обсуждение результатов и общее заключение

В работах Ryspaeva & Kholtygin [11, 13] показано, что процессы, формирующие рентгеновское 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 рентгеновское 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 6 из 9 рассмотренных объектов, а известные значения находились в узком диапазоне 0.6 dex. 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, либо не применима к звездам Хербига, либо играет малую роль в ансамбле механизмов формирования их рентгеновского излучения. Возможное нетепловое рентгеновское излучение, скорее всего, формируется в результате обратного комптоновского рассеяния.

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.

## Список литературы

- [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., van den Oord G. H. J.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. V. // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1985. — Vol. 62. — P. 197–254.
- [8] *Mewe R., Lemen J. R., van den Oord G. H. J.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. VI - Improved calculations for continuum emission and approximation formulae for nonrelativistic average Gaunt factors. // *Astron. and 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<sub>3</sub> (1,1), (2,2) и (3,3) в 2019 году 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<sub>3</sub> (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<sub>3</sub> (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<sub>3</sub> (1,1) lines was carried out.

**Введение**

Исследования последних лет неизменно показывают, что образование звезд происходит в наиболее плотных частях межзвездных молекулярных волокнообразных облаков [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 идеальными 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 показывают признаки активного звездообразования: в них наблюдаются мазеры водяного пара H<sub>2</sub>O, а так же точечные ИК-источники IRAS и MSX [4]. Вероятно, 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 относительно водорода. Обилия CS, CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HCN, 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, что делает NH<sub>3</sub> надежным трассером температуры. Также аммиак является надежным трассером местоположения плотных сгустков, поскольку наблюдается в газовой фазе без вымораживания на пыль в плотных (до 10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup>) 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.

Обработка дынных производилась с помощью пакетов CLASS GILDAS [6] и MIRIAD [7], также 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 5 компонент, разнесенных на расстояние нескольких МГц. В спектре линии (2,2) интенсивность сателлитных компонент не превышает уровень шума и видна только главная компонента. В результате приближения сверхтонкой структуры линий перехода (1,1) функцией Гаусса мы получаем распределение 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 вращательную температуру аммиака [8]:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 \ln \left( \frac{-0.282}{\tau_{(1,1)m}} \ln \left( 1 - \frac{T_{B(2,2)}}{T_{B(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)m})) \right) \right)^{-1} \text{ (K)}. \quad (1)$$

Далее по выкладкам из работы [9] рассчитывается лучевая концентрация аммиака в переходе (1,1)  $N_{1,1}$  и полная лучевая концентрация  $N_{\text{NH}_3}$ :

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)m} \Delta V_{(1,1)} \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (2)$$

$$N_{\text{NH}_3} = N_{1,1} \left( \frac{\exp(21.3/T_{\text{rot}})}{3} + 1 + \frac{5\exp(-41.2/T_{\text{rot}})}{3} + \frac{14\exp(-99.4/T_{\text{rot}})}{3} \right) \text{ (cm}^{-2}\text{)}, \quad (3)$$

где  $\nu_{(1,1)}$  – частота перехода  $\text{NH}_3$  (1,1),  $\Delta V_{(1,1)}$  – ширина линии. В тех пикселях полученных карт, где не удалось вписать сверхтонкую структуру и получить оптическую толщину, линии считались оптически толстыми и лучевая концентрация рассчитывалась по соответствующим формулам. Кинетическая температура газа рассчитывается из вращательной температуры аммиака следующим образом [10]:

$$T_{\text{kin}} = \frac{T_{\text{rot}}}{1 - \frac{T_{\text{rot}}}{42} \ln(1 + 1.1\exp(\frac{-16}{T_{\text{rot}}}))} \text{ (K)}. \quad (4)$$

Оптическую толщину удалось получить только в центральных, наиболее плотных частях сгустков. Все сгустки имеют умеренную оптическую толщину  $\tau_{(1,1)} < 2$ . Кроме того, мы обнаружили, что линия  $\text{NH}_3$  (1,1) обладает большей оптической толщиной в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43, чем в центральных сгустках WB 673 и S233-IR.

Карты лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 представлены на рис. 1. Черные контуры показывают излучение пыли на 1,1 мм (Bolocam), красные контуры - излучение пыли в ближнем инфракрасном диапазоне на 22  $\mu\text{m}$  (WISE), красные эллипсы - источники ИК-излучения

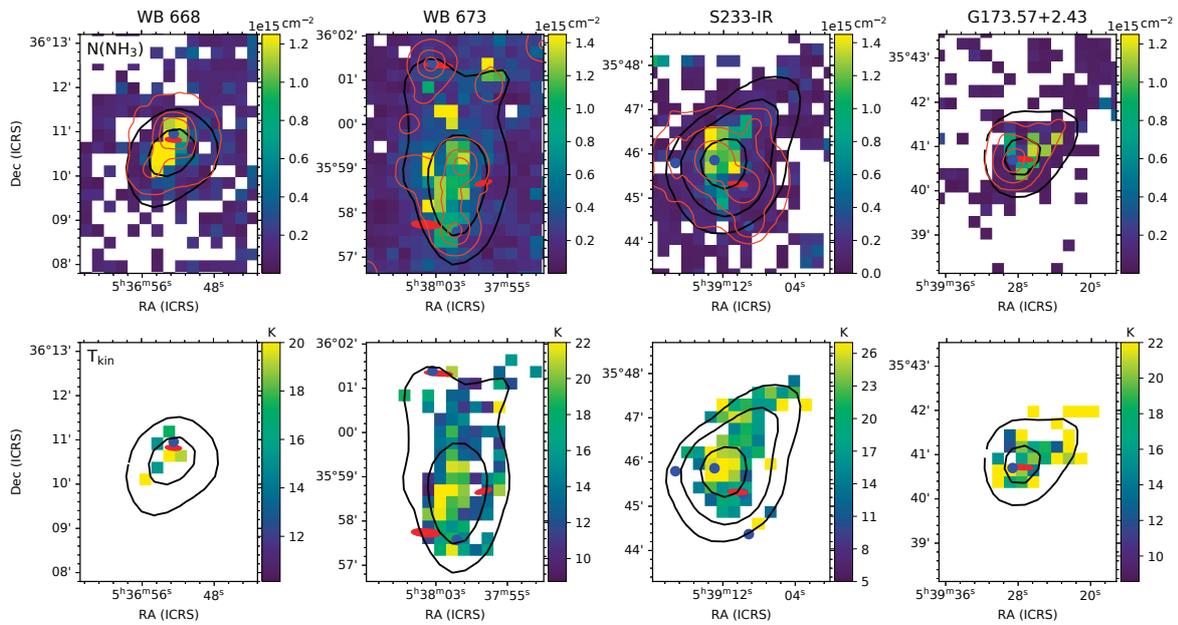


Рис. 1. Карты лучевой концентрации аммиака (сверху) и кинетической температуры газа (снизу) в сгустках волокна WB 673

IRAS (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки - источники MSX. Во всех сгустках максимум излучения аммиака совпадает с пиками излучения пыли на 1.1 мм, в сгустке WB 673 есть усиление лучевой концентрации аммиака в северной части сгустка, где обнаруживается отдельный пик излучения пыли на 22  $\mu\text{m}$ . Значения пиков лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. Кинетические температуры выше в центральных частях сгустков по сравнению с периферией. Максимальное значение температуры газа наблюдается в центральных сгустках волокна: 27 и 30 K в WB 673 и S233-IR соответственно, а температура в обоих периферийных сгустках ниже: около 20 K.

В условиях ЛТР и без градиента лучевой скорости две внутренние и две внешние сателлитные линии перехода  $\text{NH}_3$  (1,1) будут иметь одинаковую интенсивность. Однако в молекулярных облаках наблюдаются аномалии сверхтонкой структуры, при которых интенсивность сателлитных компонент изменяется [11]. Мы обнаружили, что в сгустке WB 673 аномалии сверхтонкой структуры указывают на градиент лучевой скорости вдоль сгустка и его сжатие. Для сгустка S233-IR аномалии указывают на составную структуру: предполагается, что газ состоит из небольших отдельных сгустков, которые производят излучение аммиака с шириной линии, близкой к тепловой (модель ядра).

## Выводы

Получено распределение лучевой концентрации аммиака и кинетической температуры газа. Пик лучевой концентрации смещен к северу относительно пика эмиссии пыли на 1.1  $\mu\text{m}$  в центральном сгустке WB 673, однако он хорошо коррелирует с эмиссией 22  $\mu\text{m}$ . Значения пиков лучевой концентрации аммиака практически одинаковы во всех сгустках волокна. Кинетическая температура газа увеличивается в направлении наиболее плотных центральных частей сгустков, тогда как содержание аммиака в этом направлении уменьшается. Проведен анализ аномалий сверхтонкой структуры линий аммиака в переходе (1,1). Показано, что значения аномалий в центральном сгустке WB 673 соответствуют модели сжатия, а сгусток S233-IR - модели ядра.

## Список литературы

- [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, <sup>13</sup>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] *Maret S., Hily-Blant P., Pety J. et al.* Weeds: a CLASS extension for the analysis of millimeter and sub-millimeter spectral surveys // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 526. — P. A47. 1012.1747.
- [7] *Sault R. J., Teuben P. J., Wright M. C. H.* A Retrospective View of MIRIAD // *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV* / ed. by R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes : *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 1995. — Vol. 77. — P. 433. astro-ph/0612759.
- [8] *Walmsley C. M., Ungerechts H.* Ammonia as a molecular cloud thermometer. // *Astron. Astrophys.* — 1983. — Vol. 122. — P. 164–170.
- [9] *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.
- [10] *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.
- [11] *Stutzki J., Winnewisser G.* On the interpretation of hyperfine-structure intensity anomalies in the NH<sub>3</sub> (J, K) = (1,1) inversion transition. // *Astron. Astrophys.* — 1985. — Vol. 144. — P. 13–26.

## ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S255IR-SMA1

С. В. Салий,

*Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета*

По радиолиниям 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 ( $3 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ ), удельной лучевой концентрации метанола ( $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}\text{с}$ ), относительного обилия метанола ( $10^{-7}$ ) и фактора заполнения диаграммы (10%). Значения параметров характерны для горячих плотных ядер. Показано, что объект S255IR-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  $1.78 \pm 0.12$  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 ([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  $\sim 1.4$  км/с. Уровень шума ( $2\sigma$ ) 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 9 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 ( $n_{H_2}$ ,  $\text{см}^{-3}$ ), удельная лучевая концентрация метанола ( $N_{CH_3OH}/\Delta V$ ,  $\text{см}^{-3}\text{с}$ ), и относительное обилие метанола ( $N_{CH_3OH}/N_{H_2}$ ). 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  $\chi^2$ ). 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

$$p = (T_{gas}, N_{CH_3OH}/\Delta V, n_{H_2}, N_{CH_3OH}/N_{H_2}, f).$$

Вероятность, что  $N$  наблюдавшихся линий с интенсивностями  $T_{o_i}$ , определенных с точностью  $\sigma_i$ , 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 (см. табл. 2), с наблюдаемыми интенсивностями (1), можно заметить, что не все линии приближаются хорошо. 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. рис. 1 справа). Профили линий на 331.502 и 342.729 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 и 342.729 и 349.106 ГГц, помимо известных [2]

Таблица 1. Результат отождествления линий метанола в частотных полосах 326.7–334.5 и 342.4–350.2 ГГц.

Частота МГц	$E_{up}$ К	$A_{ij}$ с <sup>-1</sup>	Переход	$\int T_a$ К*км/с	$V_{lsr}$ км/с	$\Delta V$ км/с	$T_a$ К
326961.232	133.1	1.29E-4	10 <sub>-1</sub> – 9 <sub>0</sub> $v_t0 E$				<0.1
327317.253	218.7	5.88E-5	12 <sub>2</sub> – 11 <sub>3</sub> $v_t0 A^{--}$				<0.1
327407.873	492.8	5.63E-5	17 <sub>5</sub> – 18 <sub>4</sub> $v_t0 A^{++}$				<0.1
327440.644	492.8	5.63E-5	17 <sub>5</sub> – 18 <sub>4</sub> $v_t0 A^{--}$				<0.1
327486.835	307.2	5.62E-5	13 <sub>4</sub> – 14 <sub>3</sub> $v_t0 E$	1.56 ± 0.28	5.7 ± 0.2	2.9 ± 3.2	0.51 ± 0.07
327596.176	791.6	6.29E-5	24 <sub>4</sub> – 23 <sub>5</sub> $v_t0 E$				<0.1
328468.853	536.9	6.31E-5	20 <sub>3</sub> – 19 <sub>4</sub> $v_t0 A^{++}$	1.42 ± 0.49	4.2 ± 1.4	9.4 ± 4.7	0.14 ± 0.07
329632.881	218.8	6.00E-5	12 <sub>2</sub> – 11 <sub>3</sub> $v_t0 A^{++}$	1.37 ± 0.22	5.9 ± 0.5	6.9 ± 1.4	0.19 ± 0.05
330172.526	810.7	4.19E-5	11 <sub>3</sub> – 12 <sub>4</sub> $v_t0 A^{--}$				<0.05
330172.553	810.7	4.19E-5	11 <sub>3</sub> – 12 <sub>4</sub> $v_t0 A^{++}$				<0.05
330355.512	537.0	6.42E-5	20 <sub>3</sub> – 19 <sub>4</sub> $v_t0 A^{--}$				<0.05
330793.887	146.3	5.39E-5	8 <sub>-3</sub> – 9 <sub>-2</sub> $v_t0 E$	1.35 ± 0.05	6.1 ± 0.1	4.8 ± 0.2	0.26 ± 0.04
331071.711	597.8	3.04E-8	12 <sub>3</sub> – 11 <sub>5</sub> $v_t1 E$	<i>блендируется с линией CH<sub>3</sub>CN на 331071.544 МГц</i>			
331220.371	320.6	5.24E-5	16 <sub>-1</sub> – 15 <sub>-2</sub> $v_t0 E$	0.76 ± 0.10	5.8 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.21 ± 0.05
331502.319	169.0	1.96E-4	11 <sub>1</sub> – 11 <sub>0</sub> $v_t0 A^{-+}$	4.39 ± 0.06	5.2 ± 0.1	7.5 ± 0.1	0.55 ± 0.05
331755.099	823.9	1.27E-4	15 <sub>-5</sub> – 16 <sub>-6</sub> $v_t0 E$				<0.05
331930.616	791.6	9.79E-6	13 <sub>7</sub> – 12 <sub>8</sub> $v_t0 E$				<0.05
332505.432	299.6	4.05E-8	15 <sub>1</sub> – 15 <sub>-1</sub> $v_t0 E$	1.25 ± 0.09	7.0 ± 0.2	5.2 ± 0.5	0.22 ± 0.04
332996.563	614.5	6.33E-5	22 <sub>-2</sub> – 21 <sub>-3</sub> $v_t0 E$	0.23 ± 0.07	5.3 ± 0.5	3.5 ± 1.1	0.06 ± 0.04
333864.722	125.5	8.04E-7	9 <sub>1</sub> – 8 <sub>-2</sub> $v_t0 E$				<0.04
334326.177	964.4	1.99E-5	21 <sub>5</sub> – 22 <sub>4</sub> $v_t0 E$				<0.04
334426.571	314.5	5.55E-5	3 <sub>0</sub> – 2 <sub>1</sub> $v_t0 E$	0.57 ± 0.06	5.4 ± 0.2	4.1 ± 0.4	0.13 ± 0.04
342726.474	979.0	6.75E-5	20 <sub>-6</sub> – 19 <sub>-7</sub> $v_t0 E$	<i>блендируется с линией CH<sub>3</sub>OH на 342729.796 МГц</i>			
342729.796	227.5	2.12E-4	13 <sub>1</sub> – 13 <sub>0</sub> $v_t0 A^{-+}$	3.53 ± 0.07	5.3 ± 0.1	6.8 ± 0.2	0.49 ± 0.03
343005.882	60.7	1.09E-7	5 <sub>-2</sub> – 4 <sub>1</sub> $v_t0 E$				<0.03
343599.019	624.0	3.58E-5	13 <sub>-1</sub> – 14 <sub>-2</sub> $v_t0 E$	0.21 ± 0.09	5.5 ± 0.9	3.9 ± 2.5	0.05 ± 0.03
343687.066	902.3	3.89E-5	20 <sub>3</sub> – 20 <sub>2</sub> $v_t0 E$				<0.03
344064.646	885.8	1.01E-6	20 <sub>2</sub> – 19 <sub>5</sub> $v_t0 E$				<0.03
344109.039	419.4	6.81E-5	18 <sub>2</sub> – 17 <sub>3</sub> $v_t0 E$	0.63 ± 0.07	5.7 ± 0.2	3.7 ± 0.5	0.16 ± 0.03
344312.267	491.9	1.77E-4	10 <sub>-2</sub> – 11 <sub>-3</sub> $v_t0 E$	<i>блендируется с линией SO на 344310.612 МГц</i>			
344443.433	451.2	9.35E-5	19 <sub>1</sub> – 18 <sub>2</sub> $v_t0 A^{++}$	0.56 ± 0.07	5.5 ± 0.2	4.2 ± 0.6	0.16 ± 0.03
344970.808	761.6	8.95E-5	12 <sub>7</sub> – 11 <sub>6</sub> $v_t0 E$				<0.03
345903.916	332.7	9.03E-5	16 <sub>1</sub> – 15 <sub>2</sub> $v_t0 A^{--}$	0.99 ± 0.18	6.0 ± 0.4	5.2 ± 1.0	0.18 ± 0.02
345919.260	459.4	7.30E-5	18 <sub>-3</sub> – 17 <sub>-4</sub> $v_t0 E$	0.64 ± 0.03	5.9 ± 0.1	6.4 ± 0.3	0.09 ± 0.02
346202.719	115.2	2.18E-5	5 <sub>4</sub> – 6 <sub>3</sub> $v_t0 A^{--}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
346204.271	115.2	2.18E-5	5 <sub>4</sub> – 6 <sub>3</sub> $v_t0 A^{++}$	1.30 ± 0.14	4.9 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.24 ± 0.04
347445.285	856.3	4.04E-5	19 <sub>3</sub> – 19 <sub>2</sub> $v_t0 E$	0.27 ± 0.07	5.8 ± 0.5	4.0 ± 1.6	0.06 ± 0.03
347507.451	57.1	1.76E-8	5 <sub>2</sub> – 5 <sub>-1</sub> $v_t0 E$				<0.03
347745.442	71.0	2.68E-8	6 <sub>2</sub> – 6 <sub>-1</sub> $v_t0 E$				<0.03
347918.109	791.6	1.66E-6	24 <sub>4</sub> – 25 <sub>1</sub> $v_t0 E$				<0.03
348031.826	686.2	1.12E-5	7 <sub>3</sub> – 8 <sub>2</sub> $v_t0 E$				<0.03
349106.997	260.2	2.20E-4	14 <sub>1</sub> – 14 <sub>0</sub> $v_t0 A^{-+}$	2.32 ± 0.07	5.4 ± 0.1	6.3 ± 0.2	0.35 ± 0.03

Таблица 2. Значения параметров при которых реализуется минимум  $\chi^2$  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
$n_{H_2}$ , см <sup>-3</sup>	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>9</sup>	3 × 10 <sup>6</sup>	3 × 10 <sup>5</sup> – 3 × 10 <sup>7</sup>
$N_{CH_3OH}/\Delta V$ , см <sup>-3</sup> с	3 × 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>14</sup>	2 × 10 <sup>12</sup>	1.6 × 10 <sup>12</sup> – 2.5 × 10 <sup>12</sup>
$N_{CH_3OH}/N_{H_2}$	10 <sup>-9</sup> – 3 × 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	3 × 10 <sup>-8</sup> – 3 × 10 <sup>-7</sup>
$f$ , %	10 – 100	10	< 20%

сгустков на скоростях  $\sim 4$  и  $\sim 8$  км/с (зеленый пунктир на рис. 1 справа), дает сгусток на скорости около 2 км/с [1]. Но достоверно выделить его при имеющимся спектральном разрешении (1.4 км/с) не представляется возможным.

Для получения более точных оценок необходимы наблюдения с более высоким спектральным разрешением.

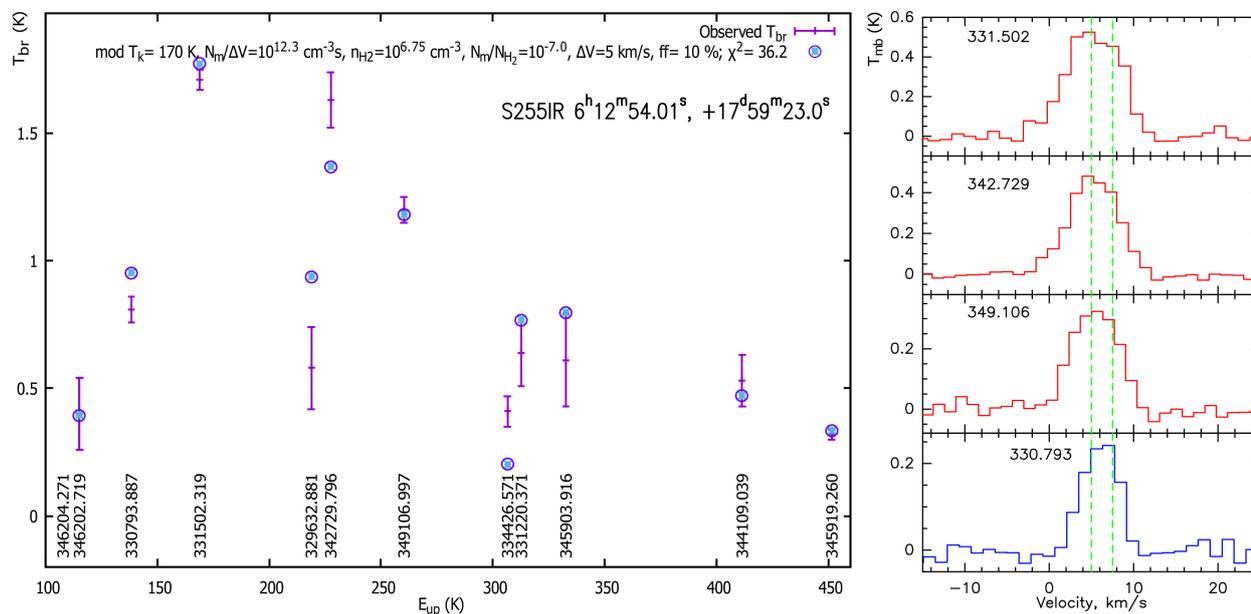


Рис. 1. Слева: сопоставление наблюдаемых интенсивностей с модельными значениями, которые обеспечивают минимальное значение  $\chi^2$ . Приведены частоты линий в МГц. Справа: спектры наиболее ярких линий метанола. Частоты линий указаны в ГГц. Зеленым пунктиром отмечены скорости известных сгустков

Оценки физических параметров выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00917.

## Список литературы

- [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 S255IR 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  $^{12}\text{CO}$  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

*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым*

На примере 1685 Торо 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 Торо 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, Nauchny, Crimea, Russia*

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  $\kappa^2/r^2$ , где  $\kappa^2$  — произведение постоянной тяготения на массу  $\mathcal{S}$ .

## Уравнения движения

В качестве переменных выберем оскулирующие элементы  $n, e, i, \Omega, \omega, M$  — среднее движение, эксцентриситет, наклон, долготу восходящего узла, аргумент перицентра, среднюю аномалию. В [1] мы провели осредняющую процедуру уравнений движения типа Эйлера

и получили уравнения движения в средних элементах в первом порядке малости. Решение этих уравнений при  $S, T, W \neq 0$  и в различных частных случаях выполнено нами в статье [2]. Здесь приведем частное решение при  $S, T \neq 0, W = 0$ :

$$t = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left( \frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \right)^3 [f(\eta) - f(\eta_0)], \quad \text{где } f(\eta) = 2 \ln \eta + \frac{1}{\eta} - \eta, \quad (1)$$

$$n = n_0 \left[ \frac{\eta(1 - \eta_0)}{\eta_0(1 - \eta)} \right]^3, \quad a = a_0 \left[ \frac{\eta_0(1 - \eta)}{\eta(1 - \eta_0)} \right]^2, \quad i = i_0, \quad \Omega = \Omega_0, \quad \omega = \omega_0,$$

$$M = M_0 + \frac{\varkappa^2 - 2S}{T} \left( \eta + \ln \frac{1 - \eta}{1 - \eta_0} - \eta_0 \right), \quad (2)$$

где  $a = \varkappa^{2/3} n^{-2/3}$  — большая полуось,  $\eta = \sqrt{1 - e^2}$ , индексом 0 отмечены значения элементов в начальную эпоху  $t_0 = t(e_0) = 0$ . В (2) элементы орбиты  $n, a, M$  представлены явными элементарными функциями эксцентриситета. В кинематическом уравнении (1)  $t = F(e)$  функция  $F$  также элементарна. В [2] доказана ее строгая монотонность, так что каждому  $t$  отвечает единственное значение  $e$ .

При  $e < 0.8$  вычисления  $f(\eta)$  содержат разности почти одинаковых чисел, что приводит к потере точности. В этих случаях следует пользоваться рядом

$$t = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k+1)!!}{(2k+2)!!} e_0^{2k} \right]^{-3} \sum_{k=0}^{\infty} c_k \left( \frac{e^6}{e_0^6} e^{2k} - e_0^{2k} \right), \quad c_k = \frac{(2k+3)!!}{(2k+4)!!} - \frac{1}{k+3}.$$

Решение (1)-(2) определено на временах от  $-t_1$  до  $\infty$  при  $T > 0$  и от  $-\infty$  до  $-t_1$  при  $T < 0$ , где

$$t_1 = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left( \frac{\eta_0}{1 - \eta_0} \right)^3 f(\eta_0) = \frac{\varkappa^2}{n_0 T} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k+1)!!}{(2k+2)!!} e_0^{2k} \right]^{-3} \sum_{k=0}^{\infty} c_k e_0^{2k}. \quad (3)$$

## Модель ускорения Ярковского

На основе линейной модели ускорения Ярковского для сферических астероидов [3] и уравнений [4, формулы (12)] для компонентов этого ускорения в системе  $\mathcal{O}$  мы получили выражения для негравитационных параметров

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\alpha \Phi(1 \text{ а.е.})}{9(1 + \chi)} \left\{ [E_{R'_s} \exp(-i\delta_{R'_s}) + E_{R'_s} \exp(i\delta_{R'_s})] \sin^2 \gamma + \right. \\ &\quad \left. + [E_{R'_d} \exp(-i\delta_{R'_d}) + E_{R'_d} \exp(i\delta_{R'_d})] (1 + \cos^2 \gamma) \right\}, \\ A_2 &= \frac{\alpha \Phi(1 \text{ а.е.})}{9(1 + \chi)} \left\{ i [E_{R'_s} \exp(-i\delta_{R'_s}) - E_{R'_s} \exp(i\delta_{R'_s})] \sin^2 \gamma - \right. \\ &\quad \left. - 2i [E_{R'_d} \exp(-i\delta_{R'_d}) - E_{R'_d} \exp(i\delta_{R'_d})] \cos \gamma \right\}, \\ A_3 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

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 (4) индекс  $s$  соответствует сезонному эффекту Ярковского,  $d$  — суточному,  $\gamma$  — наклон оси вращения астероида относительно нормали к плоскости его орбиты,  $\alpha = 1 - A$  — коэффициент оптического поглощения,  $A$  — альbedo Бонда,

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}_* \pi R^2}{mc}, \quad \chi = \frac{\Theta_s}{\sqrt{2} R'_s}, \quad \Theta_s = \frac{\Gamma \sqrt{\omega_{rev}}}{\epsilon \sigma T_*^3}, \quad \Gamma = \sqrt{K \rho C}, \quad T_* = \left( \frac{\alpha \mathcal{E}_*}{\epsilon \sigma} \right)^{1/4},$$

$\Gamma$  — 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,  $c = 299792458$  м/с — скорость света,  $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$  Вт м<sup>-2</sup>К<sup>-4</sup> — 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  $\Phi$ , 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 и  $P_{rot}$  — период вращения вокруг оси. Амплитуда  $E_{R'} = E(\sqrt{2}R')$  и фаза  $\delta_{R'} = \delta(\sqrt{2}R')$  определены, как и в [3], 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

$$\begin{aligned} A(x) &= -(x+2) - e^x[(x-2)\cos x - x\sin x], & B(x) &= -x - e^x[x\cos x + (x-2)\sin x], \\ C(x) &= A(x) + \frac{\chi}{1+\chi} (3(x+2) + e^x[3(x-2)\cos x + x(x-3)\sin x]), \\ D(x) &= B(x) + \frac{\chi}{1+\chi} (x(x+3) - e^x[x(x-3)\cos x - 3(x-2)\sin x]). \end{aligned}$$

## Орбитальная эволюция (1685) Того

Определим для астероида (1685) Того числовые значения параметров (4), а затем с помощью решения (1)-(2) найдем дрейф большой полуоси за 1 млн лет, а также смещение возмущенного за счет силы Ярковского положения относительно невозмущенного за 1000  $P_{rev}$  (1600 лет).

При вычислениях будем использовать следующие константы:  $\varkappa = 1.152 \times 10^{10}$  м<sup>3/2</sup>с<sup>-1</sup>,  $1 \text{ а.е.} = 1.495978707 \times 10^{11}$  м,  $1 \text{ год} = 365.25$  сут,  $1 \text{ сут} = 86400$  с, а также элементы орбиты и теплофизические характеристики астероида (1685) Того:  $a = 1.367586471667151$  а.е.,  $e = 0.4358371102560366$ ,  $P_{rev} = 584.1583930934321$  сут [5],  $P_{rot} = 10.19782 \pm 3 \times 10^{-5}$  час,  $\gamma = 161 \pm 6^\circ$ ,  $R = 1750_{-200}^{+150}$  м,  $\rho = 2500$  кг м<sup>-3</sup>,  $\Gamma = 260_{-110}^{+140}$  Дж м<sup>-2</sup>с<sup>-1/2</sup>К<sup>-1</sup>,  $p_V = 0.13 \pm 0.03$ ,  $G = 0.11$  [6],  $C = 680$  Дж кг<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup> [4],  $\epsilon = 0.9$  [7]. Альбедо Бонда вычислим по формуле  $A = p_V (0.290 + 0.684 G) = 0.04748 \pm 0.011$  [8], где  $p_V$  — геометрическое альбедо,  $G$  — наклонный параметр.

В результате найдем  $A_1 = (7.96229_{-3.48}^{+2.72}) \times 10^{-15}$  а.е./сут<sup>2</sup> и  $A_2 = (-3.24047_{-0.57}^{+0.42}) \times 10^{-15}$  а.е./сут<sup>2</sup> (для сравнения, в базе JPL [5]  $A_2 = (-3.099651371662129 \pm 0.6952) \times 10^{-15}$  а.е./сут<sup>2</sup> (по состоянию на 05.11.2020), значение для  $A_1$  не указано). Величины неопределенностей  $A_1$  и  $A_2$  определялись путем варьирования теплофизических параметров в пределах их ошибок.

Согласно (3) решение (1)-(2) определено на временах от  $-\infty$  до 6.754 млрд лет. Дрейфы эксцентриситета и большой полуоси за 1 млн лет составят:  $de/dt = (-9.86928710_{-1.28}^{+1.74}) \times 10^{-6}$  (млн лет)<sup>-1</sup>,  $da/dt = (-1.45_{-0.19}^{+0.26}) \times 10^{-4}$  а.е./млн лет). Для сравнения приведем значения дрейфа большой полуоси, полученные в других работах:  $(-1.38 \pm 0.32) \times 10^{-4}$  а.е./млн лет [6],  $(-1.68 \pm 0.38) \times 10^{-4}$  а.е./млн лет [9],  $(-1.57 \pm 0.4) \times 10^{-4}$  а.е./млн лет [10]. Результаты хорошо согласуются.

Наличие возмущающего ускорения оказывает также значительное воздействие на среднюю аномалию. С помощью последнего уравнения (2) мы нашли, что за  $1000P_{rev}$  (1600 лет)

отклонение средней аномалии от невозмущенного значения составит от 2.50 до 3.28 угловых минут с учетом неопределенностей параметров  $A_1$ ,  $A_2$ . В результате астероид отклонится от невозмущенного положения на расстояние от 143 до 188 тыс. км. За этот период изменения эксцентриситета  $de = (-1.578327374352_{-0.21}^{+0.28}) \times 10^{-8}$  и большой полуоси  $da = (-2.32_{-0.30}^{+0.41}) \times 10^{-7}$  а.е.

## Заключение

Для астероида 1685 Торо (1948 ОА) вычислены значения компонентов возмущающего ускорения Яркковского на основе теплофизических характеристик 1685 Торо, затем найдены дрейфы эксцентриситета, большой полуоси и средней аномалии и оценено смещение относительно невозмущенного положения за 1000 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.

## Список литературы

- [1] Санникова Т. Н., Холшевников К. В. Осредненные уравнения движения при возмущающем ускорении, меняющемся по закону обратных квадратов // Астрон. ж. — 2019. — Т. 96, № 5. — С. 418—430.
- [2] 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. ж. — 2020. — Т. 97, № 9. — С. 747—753.
- [3] Vokrouhlický D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // Astron. Astrophys. — 1999. — Vol. 344. — P. 362—366.
- [4] 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.
- [5] NASA Jet Propulsion Laboratory. JPL Small-Body Database Search Engine. — [https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb\\_query.cgi](https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi).
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Muinonen K., Belskaya I. N., Cellino A. et al. A three-parameter magnitude phase function for asteroids // Icarus. — 2010. — Vol. 209, № 2. — P. 542—555.
- [9] 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.
- [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.

## 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: распад быстро вращающегося родительского тела [1], вторичное деление образующихся при распаде тел [2], кратерообразующее столкновение с почти критически вращающимся родительским астероидом [3], каскадное разрушение 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  $\varrho_2$  и  $\varrho_5$  позволяет выявлять кандидатов в молодые пары астероидов [8–10]. Метрика  $\varrho_2$  определяет расстояние в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит: большой полуоси  $a$ , эксцентриситета  $e$ , наклона  $i$ , долготы восходящего узла  $\Omega$  и аргумента перигея  $g$ . Метрика  $\varrho_5$  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  $\varrho_2$  и  $\varrho_5$  были выделены кандидаты в молодые пары астероидов. При выборе кандидатов использовались следующие критерии:  $\varrho_2 < 0.001$  (а. е.)<sup>1/2</sup>,  $\varrho_5 < 0.001$  (а. е.)<sup>1/2</sup> и  $\varrho_2 - \varrho_5 < 0.0001$  (а. е.)<sup>1/2</sup>. 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 парс (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  $\varepsilon_{0k}$ , 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) Bennu [13, 14]. Для оценки скорости дрейфа большой полуоси необходимо знать наклон оси вращения астероида к плоскости его орбиты  $\phi$ . Поскольку для исследуемых астероидов таких данных нет, были рассмотрены различные сценарии эволюции, соответствующие различным положениям оси вращения астероида:  $da/dt = 0$  при  $\phi = 90^\circ$  или  $270^\circ$ ,  $\pm 1/2 |da/dt|_{max}$  при  $\phi = 60^\circ$  и  $240^\circ$  и  $\pm |da/dt|_{max}$  при  $\phi = 0^\circ$  и  $180^\circ$ . 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  $\Delta r$  — 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: 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 1 приведены оценки возраста  $t_r$  и  $t_o$ , соответствующие минимальным расстояниям между

Таблица 1. Оценки возраста пары (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49

$(da/dt)_{87887}$ , а. е./млн лет	$(da/dt)_{415992}$ , а. е./млн лет	$t_r$ , годы	$t_\varrho$ , годы	Варианты с низкоскоростными сближениями
$1.1 \cdot 10^{-4}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-8176 \pm 41$	$-8360 \pm 110$	74%
$5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-8064 \pm 40$	$-8260 \pm 130$	74%
$-5.5 \cdot 10^{-5}$	$9.5 \cdot 10^{-5}$	$-7850 \pm 38$	$-8030 \pm 130$	68%

астероидами  $\Delta r$  и минимальным значениям метрики  $\varrho_2$ . В последнем столбце таблицы 1 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  $t_\varrho$ , хотя и близки между собой, но 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  $\Delta r$  и увеличить количество вариантов, соответствующих условию низкоскоростных сближений.

Оценки возраста  $t_r$  и  $t_\varrho$  различаются между собой для данных вариантов примерно на 200 лет. Это связано с тем, что близость орбит не гарантирует сближение астероидов. Наиболее тесные сближения астероидов происходят, когда расстояние между орбитами (метрика  $\varrho_2$ ) 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  $t_\varrho$ , соответствующие минимальным расстояниям между астероидами  $\Delta r$  и минимальным значениям метрики  $\varrho_2$ , 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  $7.4 \pm 0.3$  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.

Полученные результаты показывают, что представленный в данной работе метод оценки возраста молодой пары астероидов может быть успешно применен для решения данной задачи.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

## Список литературы

- [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., 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.
- [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. Семенихин<sup>1</sup>, М. В. Пружинская<sup>2</sup>, М. В. Корнилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет космических исследований, <sup>2</sup>Московский государственный университет имени 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

T. A. Semenikhin<sup>1</sup>, M. V. Pruzhinskaya<sup>2</sup>, M. V. Kornilov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research, <sup>2</sup>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 каталоге 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 восстанавливать отсутствующие части 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 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 и тремя интерполяциями (каждая соответствует своему ядру). Пример графика для сверхновой DES17C1cqv на рисунке 1.

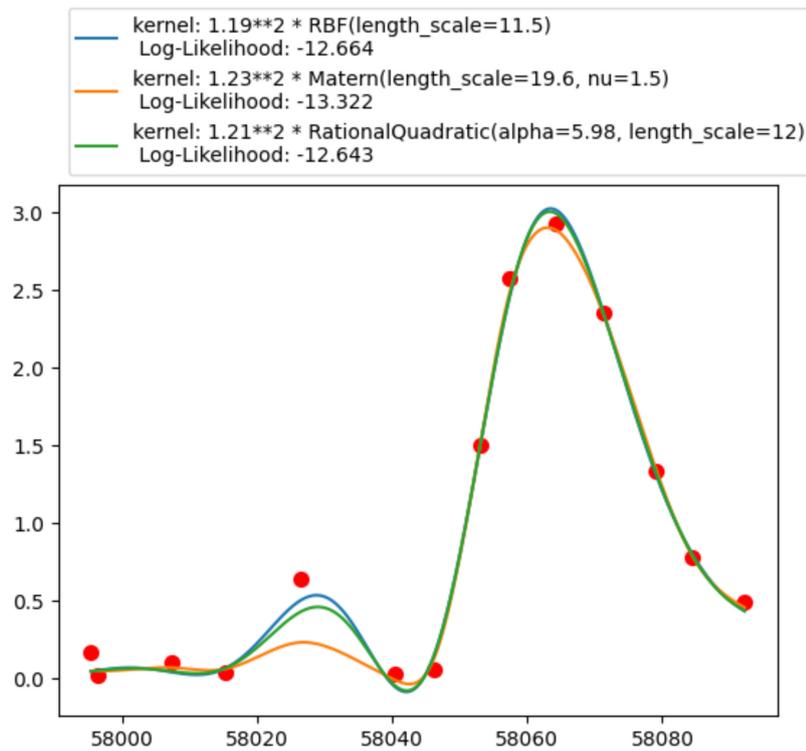


Рис. 1. Кривая блеска сверхновой DES17C1srv и результат ее интерполяции Гауссовыми процессами с разными ядрами — RBF (синяя кривая), Matern (оранжевая кривая), RationalQuadratic (зеленая кривая).

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, используя 2 фильтра.

## ДРОБЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ПЫЛИ НА БОЛЬШИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЫСОТАХ

Е. Э. Сивкова<sup>1</sup>, Д. З. Вибе<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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. Расширена 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<sup>1</sup>, D. Z. Wiebe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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 микрона).

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 околосгалактическое 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 околосгалактическое 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 более точному определению распределения их концентраций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-72-20089.

## Список литературы

- [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 ПАРНЫХ СБЛИЖЕНИЙ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ДИСКЕ ПО ДАННЫМ GAIA EDR3

М. Д. Сизова, С. В. Верещагин  
*Институт астрономии РАН*

Разработана методика поиска возможных сближений звезд в процессе их движения в галактическом диске. Построена картина сближений звезд на интервале времени 5 млн. лет в прошлые и будущие эпохи. Найдены пары звезд, проходившие на расстоянии до 0.5 пк.

## SEARCHING FOR CLOSE APPROACHES OF STAR PAIRS IN THE GALACTIC DISK WITH GAIA EDR3 DATA

M. D. Sizova S. V. Verechshagin  
*Institute of Astronomy RAS*

We developed a technique for searching close approaches of star pairs during their motion in the Galactic disk. We provide a picture of the approaches over a time interval of 5 million years in past and future epochs. Stars that passed at a distances up to 0.5 pc have been found.

### Введение

Плотность звезд в окрестностях Солнца составляет около  $1 \text{ пк}^{-3}$ . Это дает средний размер расстояния между звездами  $\sim 1 \text{ пк}$ . Ближайшая к Солнцу звезда, Проксима Центавра, расположена на расстоянии около 1.3 пк.

Поскольку движения звезд постоянно изменяют расстояния между ними, то могут возникать случайные более близкие прохождения звезд относительно друг друга. Так, в работе [1] показана таблица ближайших сближений звезд, как в прошлые эпохи, так и в будущем. В случае близких сближений неизбежны деформации облаков Оорта звезд, а также потери малых тел из их внешних частей. В этом случае появляются межзвездные малые тела.

В данной работе мы с помощью выборки звезд из каталога Гайя [2], расположенных на расстоянии до 20 пк от Солнца, рассчитали минимальное расстояние между звездами  $d_{min}$  и момент времени  $t_{min}$ . Результаты представляют интерес для поиска межзвездных комет.

### Минимальное расстояние сближения звездных пар

Каково минимальное расстояние сближения? Оценка следует из формулы (1):

$$V = \pi r_{min}^2 v_{start} t, \quad (1)$$

где  $V$  - объем пространства, в который попадают звезды, летящие со скоростью  $v_*$  за время  $t$ . У нас  $V = 4/3\pi \text{ пк}^3$ ,  $v_* = 30 \text{ км/с}$  средняя скорость движения звезд относительно друг друга. Мы рассматриваем это значение, представляя звезды из различных ОВ ассоциаций. Радиус  $r_{min}$  - искомое минимальное расстояние сближения. Подобные оценки были сделаны в [3], сводка данных и собственная оценка в [1]. Из формулы (1) следует:

$$r_{min} = \frac{100 \text{ pc}}{\sqrt{t} \text{ year}} \quad (2)$$

В нашем случае  $t = 10^6$  лет и из уравнения (2) получим  $r_{min} = 0.1$  пк.

## Описание методики и исходных данных

Из каталога Gaia EDR3 [2] мы выбрали звезды по следующим фильтрам: наличие радиальной скорости RV, параллакса  $\text{plx} > 50 \text{ mas}$ .

В результате получили 313 звезд с собственными движениями, параллаксами и лучевыми скоростями (рис. 1). Звезды распределены почти равномерно по небесной сфере, имеют нормальное распределение собственных движений, доля звезд с относительными ошибками RV больше 20 % невелика.

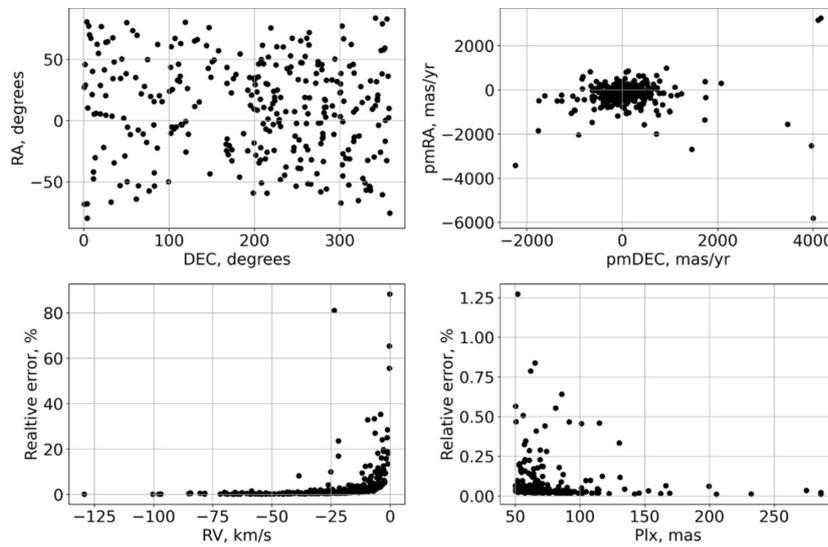


Рис. 1. Основные характеристики нашей выборки звезд. Распределение на небесной сфере, диаграмма собственных движений, относительные ошибки в зависимости от величины лучевой скорости и параллакса.

Расчет движения звезд в прошлые и будущие эпохи проводился с использованием пакета galru для языка Python ([4]). Далее выполнялся расчет расстояния между каждой возможной парой звезд на каждом шаге интегрирования, для каждой пары находилось минимальное значение расстояния и соответствующий этому событию момент времени.

## 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 рисунке 2.

Оценим полноту выборки. При средней плотности звезд в околосолнечных окрестностях равной  $1 \text{ пк}^{-3}$  легко подсчитать ожидаемое число звезд внутри сферы радиусом 20 пк, это 8 тыс. звезд. Таким образом, наши 313 звезд составляют лишь около 4 %.

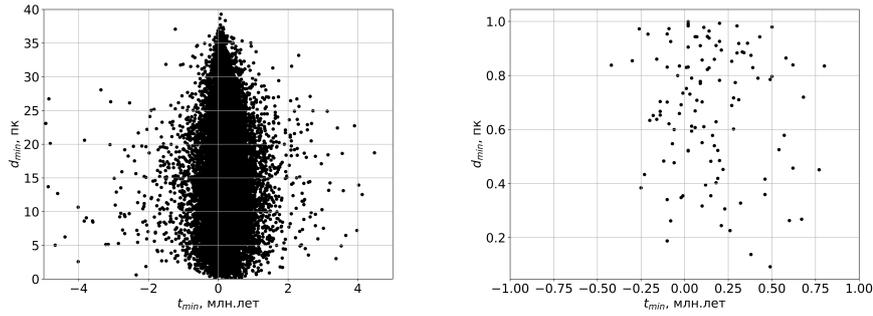


Рис. 2. Минимальное расстояние между парами звезд (левая панель) и для пар с  $d_{min} < 1$  пк (правая панель).

## Обсуждение результатов

За исследуемый промежуток времени насчитывается 232 сближения на расстояние до 1 пк. Самое близкое сближение претерпела пара звезд Gaia EDR3 1776317182780536064 и Gaia EDR3 3737308025029348608, они сблизятся на расстояние 0.1 пк через 0.49 млн. лет. В прошлые эпохи, 0.1 млн. лет назад на расстояние 0.19 пк сблизались Gaia EDR3 778758492243661824 и Gaia EDR3 1510834911934401152. 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.

В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, CDS, Страсбург, Франция, «Астрономическая база данных SIMBAD» [5], 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. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12009.

## Список литературы

- [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] *Gaia Collaboration.* VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2020. — P. I/350.
- [3] *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.
- [4] *Bovy Jo.* galpy: A python Library for Galactic Dynamics // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2015. — Vol. 216, № 2. — P. 29. 1412.3451.
- [5] *Wenger M., Ochsenbein F., Egret D. et al.* The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 2000. — Vol. 143. — P. 9–22. astro-ph/0002110.

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

О. М. Сюсина<sup>1</sup>, Т. Ю. Галушина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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<sup>1</sup>, T. Yu. Galushina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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 года 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 и, 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./сут<sup>2</sup> на  $8.8 \cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup>, а для 2020 DD с  $2.9 \cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup> на  $-3.5 \cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup>. При исключении наблюдений в пределах точности «3 сигма», значение параметра меняется незначительно, в пределах получаемой точности. Так на рисунке 1 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  $-3.96 \cdot 10^{-13}$  а.е./сут<sup>2</sup>  $\pm 1.6 \cdot 10^{-13}$  а.е./сут<sup>2</sup>. Таким образом, как видно из рисунка, значение параметра Ярковского в случае различных

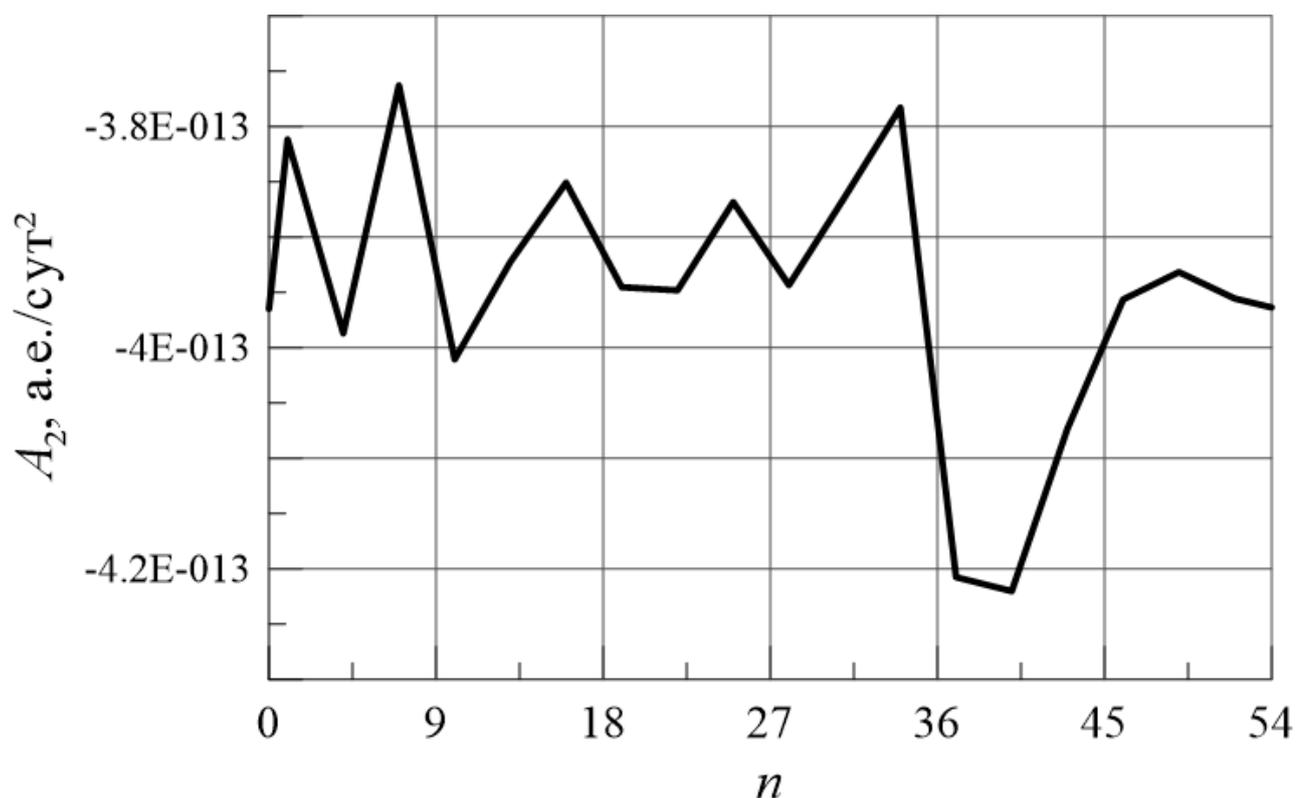


Рис. 1. Значение параметра эффекта Ярковского для астероида 2007 PR10 в зависимости от состава наблюдений

выборка наблюдений изменяется относительно значения, полученного по полной выборке, в пределах точности  $\pm 1.6 \cdot 10^{-13}$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

## Список литературы

- [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.
- [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.

## ИК КОЛЬЦЕВЫЕ ТУМАННОСТИ В ГАЛАКТИКАХ МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ И М33

А. П. Топчиева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук*

Изучение образования массивных звезд в нашей и в 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 нашей галактике и галактике М33, которая расположена недалеко от нас, и в картинкой 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<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

Studying the formation of massive stars in our and other galaxies are 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 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, и особое место занимает в ней изучение образования массивных звезд. Мы все еще далеко не полностью представляем себе процесс формирования этих объектов, что в значительной степени было 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. Сопоставления информации по ИККТ и КЗО поможет провести сравнение образования звезд и выявить общие законы, в том числе для эволюции межзвездного вещества.

В данной работе представлены краткий обзор статистических данных по инфракрасным наблюдениям для внегалактических КЗО и для ИККТ в нашей Галактике. Показаны результаты расчетов кода DustEM, который представляет 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 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] в нашей Галактике. 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 от теплового излучения пыли в ИККТ и КЗО. ИК потоки рассчитывались на длинах волн 8, 24, 70 и 160 мкм, как для нашей галактики, так и для 258 КЗО в М33. По результатам было показано, что потоки согласуются с предсказанием согласно критериям [5] 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. 1в). 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 не разрешимы в данной работе.

Помимо этого, на основе наблюдательных данных и рассчитанных потоков с использованием программного кода DustEM были построены теоретические карты распределения ПАУ с учетом того, что размер пылинок и их состав взяты из работы [8–10]. На рис. 2 представлены карты распределения излучения на 8 мкм, который связывают с излучением ПАУ слева и справа непосредственно результат теоретического вывода, то как распределены ПАУ в NGC

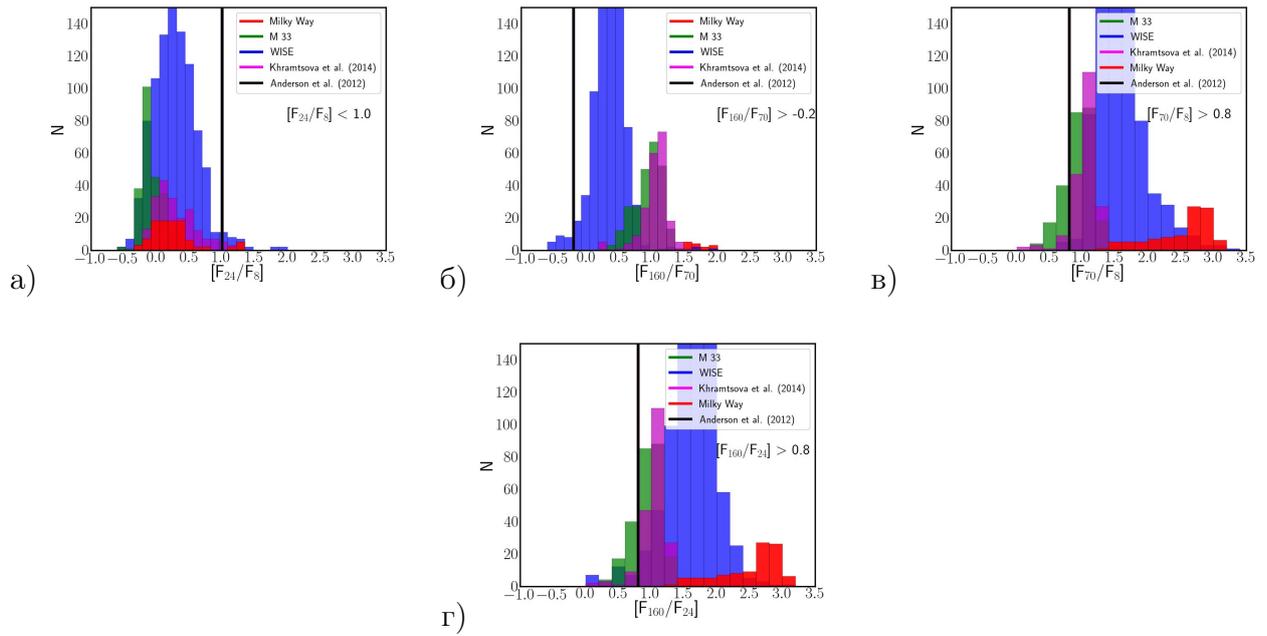


Рис. 1. Показатели цвета ИККТ. Фиолетовым цветом показаны данные для внегалактических КЗО [6], красным цветом — данные для 99 объектов, представленных в нашей Галактике, зеленым цветом для 258 КЗО в М33 и синим для ИККТ из каталога WISE; вертикальными линиями — границы между областями НП и планетарными туманностями согласно [5]: а)  $[F_{24}/F_8]$ ; б)  $[F_{160}/F_{70}]$ ; в)  $[F_{70}/F_8]$ ; г)  $[F_{160}/F_{24}]$ .

604 с учетом излучения на 24, 70 и 160 мкм, которые олицетворяют тепловое излучение пыли разного размера (см. работу [8]).

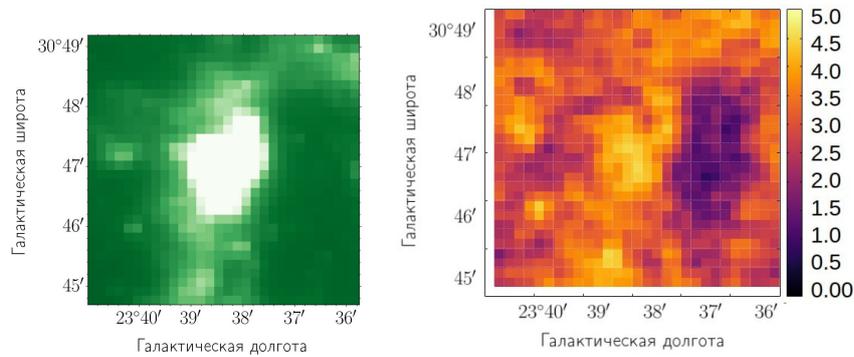


Рис. 2. Карта распределения инфракрасного излучения на 8 мкм (слева) и доля ПАУ (справа) в КЗО NGC 604 галактики М33.

В дальнейшем планируется применить отработанную методику для сравнения наблюдаемых параметров для ИККТ не только сферически симметричной формы, но и для S255, которая имеет сложную морфологию, но являющаяся комплексом звездообразования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-02-00643 А, а также данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

## Список литературы

- [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., Deharveng 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., Krushinski 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. Федотов<sup>1</sup>, Г. М. Карелин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, <sup>2</sup>ГАО РАН

С целью обнаружения неоднородностей собственного излучения экзопланеты HD209458b по наблюдениям космического телескопа Spitzer проведена 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. Fedotov<sup>1</sup>, G. M. Karelin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*St. Petersburg State University, the Department of Celestial Mechanics*

<sup>2</sup>*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 обнаружить смещение горячего пятна. В дальнейшем планируется построение карты 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 МЯн/ср.

В качестве объекта исследования была выбрана экзопланета HD209458b, так как ее орбита является почти круговой, что упрощает моделирование. Для неё 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 только 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 3 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 программный код, а также подробное описание алгоритмов моделирования и подбора параметров, находятся в свободном доступе <https://github.com/dosidicus-deprimas/HD209458b>

## Заключение

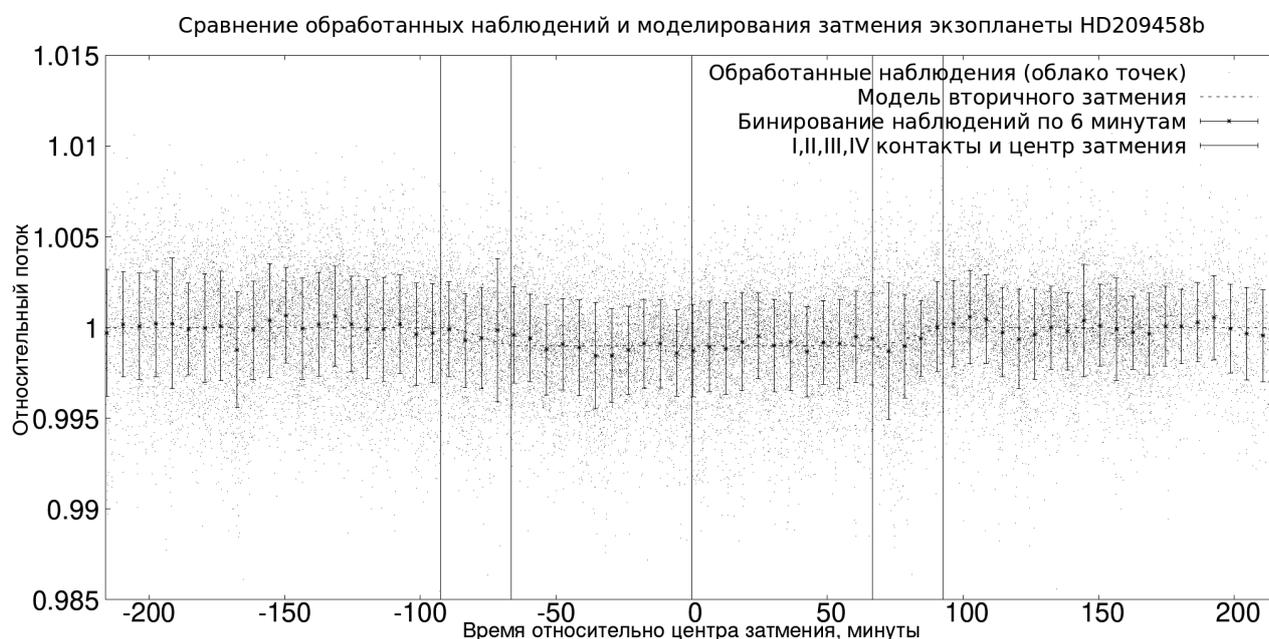


Рис. 1. Графические результаты моделирования

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 ( $1.64 \pm 1.29$  минуты) 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 необходимо тщательное моделирование небелого (цветного) шума и дополнительные наблюдения.

## Список литературы

- [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<sup>1</sup>, А. Г. Рудницкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

Представлено описание и демонстрация работы программы «LineViewer», ориентированной на первичную обработку спектров галактических и внегалактических мазеров и визуализации 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 усреднённых 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

М. А. Shchurov<sup>1</sup>, А. G. Rudnitskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*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:

1. для корректировки полосы пропускания сигнала
2. для построения и анализа усреднённых по времени и частоте интерференции спектров мазерных источников
3. 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 даёт 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 выполняется нормировка спектра, аппроксимация спектральных линий суммой функций Гаусса в количестве не более указанного максимального числа компонентов и расчёт скоростей спектральных линий на луче зрения  $V_{LSR}$  с точностью не хуже 60 м/сек.

Для анализа усреднённых 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 усреднённый 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.

## Список литературы

- [1] *Щуров М. А., Авдеев В. Ю., Гурин И. А. и др.* Программа Lineviewer пакета Astro Space Locator (ASL) для построения и обработки усреднённых спектров // Краткие сообщения по физике. — 2019. — № 4. — С. 38–45.
- [2] *S. Kardashev N., V. Khartov V., V. Abramov 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 H<sub>2</sub>O

М. А. Щуров<sup>1</sup>, И. Е. Вальтц<sup>1</sup>, Н. Н. Шахворостова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

В рамках научной программы интерферометра «Радиоастрон» обработаны данные наблюдений мазера H<sub>2</sub>O 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 (Медичина, Италия), РТ – 32 м (Торунь, Польша) и РТ – 64 м (Калязин, РФ). Получена карта распределения мазерных пятен, где присутствует 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 проекций баз предложена двухкомпонентная модель пространственной структуры этого компонента с размерами протяженной и компактной составляющей 4 мсек и 0.06 мсек, т.е. 1.56 а.е. и 0.023 а.е., соответственно.

## VLBI RESEARCH IN THE RADIOASTRON PROJECT: STRUCTURE OF THE H<sub>2</sub>O MASER IN NGC 2071 IRS 1

М. А. Shchurov<sup>1</sup>, I. E. Valtts<sup>1</sup>, N. N. Shakhvorostova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute*

Within the Radioastron interferometer scientific program, observational data of the H<sub>2</sub>O 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 msec and 0.06 msec, i.e. 1.56 au and 0.023 au, respectively.

Область звездообразования NGC 2071 в созвездии Ориона была одной из основных целей исследований межзвездных мазеров H<sub>2</sub>O в рамках международной космической миссии «РадиоАстрон» (<http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>).

Два скопления вокруг молодых источников NGC 2071 IRS1 (более развитый) и NGC 2071 IRS3 (менее развитый) наблюдались ранее на частоте 22 ГГц в радиоконтинууме и в мазерном излучении воды между уровнями 6<sub>16</sub> – 5<sub>23</sub> вращательных переходов. Мазеры на молекулах воды, джеты, крупномасштабное истечение и предполагаемый 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 32 м радиотелескопа в г. Торунь (Польша) и 32 м радиотелескопа в г. Медичина (Италия) и 64 м радиотелескопа в г. Калязин (Московская область, Россия). Наблюдения проводились на частоте мазера H<sub>2</sub>O 22.2280 ГГц с полосой регистрации 16 МГц (~215 км/с).

Наземно — космические базы интерферометра обеспечивали угловое разрешение 70 мксек (при максимальных проекциях баз  $\sim 3.1$  ED, т.е.  $\sim 40000$  км), синтезированный луч наземной сети составлял  $0.006 \times 0.0006$  сек дуги, что обеспечило угловое разрешение 1.2 мсек дуги.

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 ( $\sim 215$  км/с) для 2048 каналов, что обеспечивало разрешение по частоте 7.81 кГц (т.е. 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 CLASS (для Гауссовой аппроксимации профиля спектральных линий, <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>). Калиброванные по амплитуде авто- и кросс-корреляционные 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 6 спектральных деталях кросс-спектров.

Размер области, занимаемый этими компонентами, составляет  $\sim 100 \times 100$  мсек 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  $\sim 4$  Ян до  $\sim 29$  Ян и для всех компонентов совпадает с величиной  $F\nu/\text{beam}$ , т.е. все компоненты точечные в пределах диаграммы. Интервал скоростей 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 каналного анализа. Корреляция на уровне надежности  $6\sigma$  была обнаружена на космической базе (2.9 ED) между радиотелескопами КРТ — Медицина и КРТ — Торунь 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%.

## Список литературы

- [1] *Trinidad M. A., Rodríguez T., Rodríguez L. F.* Radio Jets and Disks in the Intermediate-Mass Star-Forming Region NGC2071IR // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 706, № 1. — P. 244–251.

# Содержание

Кузнецов Э. Д., Салий С. В., Полушина Т. С. Полина Евгеньевна Захарова	3
<b>Студенческие доклады</b>	<b>20</b>
Балакина Е. А. Пекулярные скорости сверхновых звезд типа Ia в скоплениях галактик . . . . .	21
Горбачев М. А., Бутузова М. С., Назаров С. В. Цветовые характеристики блазара S5 0716+714 в аспекте геометрического образования долговременной переменности . . . . .	24
Зозуля В. Д. Галактические бары: взгляд с точки зрения переменных действия	28
Корчагина Е. П. Анализ фотометрических наблюдений переменной HS 2231+2441	32
Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Метод определения радиуса скопления по радиальному профилю плотности . . . . .	35
Лисицин Д. Д., Кузин А. В. Корреляции между основными индикаторами звездообразования в галактиках . . . . .	39
Маркозов И. Д. Моделирование профилей пульса пульсаров с аккреционной колонкой . . . . .	41
Медведев М. Г., Островский А. Б., Васюнин А. И. Стохастическая сеточная модель формирования молекулярного водорода на поверхности пыли в межзвездной среде . . . . .	45
Никоноров И. Н., Жучков Р. Я. Построение фотометрической системы 28-см телескопа SKAS КФУ путём совместного моделирования уравнений перехода и экстинкции . . . . .	49
Пермякова Т. А., Локтин А. В. Исследование возможных закономерностей распределения металличностей звезд рассеянных скоплений по данным каталога LAMOST . . . . .	53
Петрашкевич И. В., Пунанова А. Ф. Доля дейтерия в холодных плотных ядрах в области звездообразования L1688 . . . . .	55
Прокопьева Е. И., Хайбрахманов С. А. Радиальный дрейф пылевых гранул в замагниченных аккреционных дисках молодых звезд . . . . .	57
Смирнов Д. В. активные ядра среди галактик с полярными кольцами . . . . .	61
Сусликов М. В., Колбин А. И. Определение параметров компонент, магнитного поля и аккреции поляра V379 Vir . . . . .	65
Шмидт Е. Е., Баньщикова М. А., Авдюшев В. А. Исследование нелинейности в обратных задачах спутниковой динамики . . . . .	69
<b>Научные сообщения</b>	<b>72</b>
Автаева А. А., Шематович В. И. Оценка нетепловой потери атмосферы экзопланеты GJ 436b за счет процессов диссоциации $H_2$ . . . . .	73
Балуев Р. В. Алгоритм вейвлет-анализа дву- и трёхмерных статистических распределений . . . . .	76
Баляев И. А. Массовый расчет вероятностей соударения астероидов: методы, подводные камни, сравнение результатов . . . . .	80
Бикулова Д. А., Назаров С. В., Ховричев М. Ю. Астрометрические наблюдения спутников Урана и Нептуна на телескопах ГАО РАН и КРАО РАН в 2020 году . . . . .	82
Борщева Е. В. Трёхфазный астрохимический код: моделирование состава молекулярного облака . . . . .	86
Васильева М. А., Кузнецов Э. Д. Исследование динамической эволюции семейства астероидов Hobson . . . . .	90

Галушина Т. Ю., Левкина П. А., Летнер О. Н. Точность определения орбит избранных АСЗ по данным позиционных наблюдений на Терскольской обсерватории . . . . .	94
Горда С. Ю. Цикличность изменений магнитного поля затменной переменной AM Leo . . . . .	96
Деминова Н. Р., Шиманский В. В., Борисов Н. В., Бикмаев И. Ф., Габдеев М. М. Исследование характеристик тесной двойной системы SDSS J162256 . . . . .	100
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Межзвездные планеты . . .	104
Жужулина Е. А., Савушкин А. А., Петров Д. В. Исследования поляризационных свойств комет методом апертурной поляриметрии . . . . .	109
Калиничева Е. С., Шематович В. И., Павлюченков Я. Н. О тепловом убегаии атмосферы $\pi$ Men с . . . . .	111
Каргальцева Н. С., Дудоров А. Е, Хайбрахманов С. А., Парфенов С. Ю. Образование и наблюдательные проявления первичных дисков в коллапсирующих протозвездных облаках . . . . .	115
Кругликов Н. А., Пастухович А. Ю., Яковлев Г. А., Гроховский В. И., Унсалан О. Анализ яркого болида над Турцией 27 мая 2020, регистрация, определение траектории и поиск вещества . . . . .	119
Кузнецов Э. Д., Аль-Шиблави О. М., Гусев В. Д., Устинов Д. С. Пары транснептуновых объектов на близких орбитах . . . . .	123
Лаврухина А. Д., Маланчев К. Л. Извлечение признаков из кривых блеска астрономических источников . . . . .	127
Ладейщиков Д. А. Методика описания профилей линий молекулы CO с помощью многокомпонентной модели переноса излучения . . . . .	131
Ладейщиков Д. А. Онлайн база данных водяных мазеров в областях звёздообразования: первые результаты . . . . .	135
Назаров С. В., Харченко А. С., Кривенко А. С. Модернизация телескопа «Синтез» в КрАО РАН . . . . .	139
Назаров С. В., Бутузова М. С., Пушкарев А. Б. Обратное комптоновское рассеяние килопарсековых джетов квазаров . . . . .	143
Петров Д. В., Савушкин А. А., Жужулина Е. А. 10-микронная эмиссионная особенность несферических частиц оливина . . . . .	146
Попандопуло Н. А., Авдюшев В. А., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н., Левкина П. А. Определение парусности геосинхронных объектов по позиционным наблюдениям на Пике Терскол . . . . .	150
Попова Е. А., Ладейщиков Д. А., Кирсанова М. С., Соболев А. М. Физические параметры молекулярных сгустков в области звездообразования S254-S258 . . . . .	153
Потоскуев А. Э., Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция орбит пар астероидов в окрестности резонансов . . . . .	157
Пунанова А. Ф., Петрашкевич И. В. Фракционирование дейтерия в областях маломассивного звездообразования . . . . .	161
Рыспаева Е. Б. Рентгеновское излучение звезд Хербига . . . . .	165
Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака . . . . .	169
Салий С. В. Оценка физических условий в области звездообразования S255IR-SMA1	173

<b>Санникова Т. Н.</b> Оценка эффекта Ярковского на примере астероида 1685 Toro (1948 OA) . . . . .	177
<b>Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д.</b> Оценка возраста молодых пар астероидов на близких орбитах: пара (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 . . . . .	181
<b>Семенихин Т. А., Пружинская М. В., Корнилов М. В.</b> болометрические кривые блеска и параметры взрыва сверхъярких сверхновых . . . . .	185
<b>Сивкова Е. Э., Вибе Д. З.</b> Дробление углеводородной пыли на больших галактических высотах . . . . .	187
<b>Сизова М. Д., Верецагин С. В.</b> Поиск близких парных сближений звезд в галактическом диске по данным Gaia EDR3 . . . . .	190
<b>Сюсина О. М., Галушина Т. Ю.</b> Влияние состава наблюдений на определение параметра эффекта Ярковского . . . . .	193
<b>Топчиева А. П.</b> ИК кольцевые туманности в галактиках Млечный Путь и М33	195
<b>Федотов А. А., Карелин . М.</b> Первые шаги к картированию экзопланет: моделирование вторичных затмений и поиск неоднородностей инфракрасных профилей яркости . . . . .	199
<b>Щуров М. А., Рудницкий А. Г.</b> программа lineviewer пакета astro space locator (asl) для построения и обработки усредненных спектров . . . . .	203
<b>Щуров М. А., Вальтц И. Е., Шахворостова Н. Н.</b> NGC 2071 в космическом проекте «Радиоастрон»: пространственное распределение мазерных пятен H <sub>2</sub> O . . . . .	205

# Contents

<b>Kuznetsov E. D., Salii S. V., Polushina T. S.</b> Polina Evgenievna Zakharova . . . . .	3
<b>Students talks</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>Balakina E. A.</b> Peculiar velocities of supernovae Ia in clusters of galaxies . . . . .	21
<b>Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Nazarov S. V.</b> Color characteristics of the blazar S5 0716+714 under geometrical origin of the long-term variability . . . . .	24
<b>Zozulya V. D.</b> Galactic bars: a look at the point of view of action variables . . . . .	28
<b>Korchagina E. P.</b> Analysis of photometric observations of the variable HS 2231+2441 . . . . .	32
<b>Kulesh M. V., Seleznev A. F.</b> Method for determination of cluster radius from radial density profile . . . . .	35
<b>Lisitsin D. D., Kuzin A. V.</b> Correlations between star formation tracers in galaxies . . . . .	39
<b>Markozov I. D.</b> Modeling pulse profiles of the radiation from x-ray pulsars with accretion column . . . . .	41
<b>Medvedev M. G., Ostrovskii A. B., Vasyunin A. I.</b> Stochastic on-lattice simulation of H <sub>2</sub> formation on interstellar grains” . . . . .	45
<b>Nikonorov I. N., Zhuchkov R. Ya.</b> Photometric calibration of 28-cm telescope of NCAS KFU by jointly modeling equations of transformations and the extinction. . . . .	49
<b>Permyakova T. A., Loktin A. V.</b> Study of possible regularities of the metallic distribution of open cluster stars according to the LAMOST catalog . . . . .	53
<b>Petrashkevich I. V., Punanova A. F.</b> Deuterium fraction in cold dense cores in the star-forming region L1688= . . . . .	55
<b>Prokop’eva E. I., Khaibrakhmanov S. A.</b> Radial drift of dust granules in magnetized accretion disks of young stars . . . . .	57
<b>Smirnov D. V.</b> active galactic nuclei among the polar-ring galaxies . . . . .	61
<b>Suslikov M. V., Kolbin A. I.</b> Determination of the parameters of polar V379 Vir components, magnetic field and accretion. . . . .	65
<b>Shmidt E. E., Banshchikova M. A., Avduyshev V. A.</b> Investigation of nonlinearity in inverse problems of satellite dynamics . . . . .	69
<b>Contributed talks</b> . . . . .	<b>72</b>
<b>Avtaeva A. A., Shematovich V. I.</b> Estimates of non-thermal atmospheric loss of exoplanet GJ 436b due to dissociation processes H <sub>2</sub> . . . . .	73
<b>Baluev R. V.</b> Wavelet analysis algorithm for bi- and trivariate statistical distributions . . . . .	76
<b>Balyaev I. A.</b> Mass calculation of asteroid collision probabilities: methods, pitfalls, comparison of results . . . . .	80
<b>Bikulova D. A., Nazarov S. V., Khovritchev M. Yu.</b> Astrometric observations of Uranian and Neptunian satellites with the Pulkovo and Crimean observatory telescopes in 2020 . . . . .	82
<b>Borshcheva E. V.</b> The three-phase astrochemical code: modeling of the molecular cloud composition . . . . .	86
<b>Vasileva M. A., Kuznetsov E. D.</b> Investigation of the dynamic evolution of Hobson asteroid family . . . . .	90
<b>Levkina P. A., Galushina T. Yu., Letner O. N.</b> The precision of the orbit fitting for selected NEAs from positional observations at the Terskol Observatory . . . . .	94
<b>Gorda S. Yu.</b> Cyclicity of variations of the magnetic field of the eclipsing variable AM Leo . . . . .	96
<b>Deminova N. R., Shimansky V. V., Borisov N. V., Bikmaev I. F., Gabdeev M. M.</b> Research of the characteristics of the close binary system SDSS J162256 . . . . .	100

<b>Dryomova G. N., Dryomov V. V., Tutukov A. V.</b> Interstellar planets . . . . .	104
<b>Zhuzhulina E. A., Savushkin A. A., Petrov D. V.</b> Study of polarization properties of comets by the method of aperture polarimetry . . . . .	109
<b>Kalinicheva E. S., Shematovich V. I., Pavlyuchenkov Ya. N.</b> On the thermal atmospheric escape of $\pi$ Men c' . . . . .	111
<b>Kargaltseva N. S., Dudorov A. E., Khaibrahmanov S. A., Parfenov S. Yu.</b> Formation and observational features of primary disks in collapsing protostellar clouds . . . . .	115
<b>Kruglikov N. A., Pastukhovich A. Yu., Yakovlev G. A., Grokhovsky V. I., Unsalan O.</b> Analysis of the bright fireball over Artvin region of Turkey on may 27, 2020 followed by meteorite recovery campaign . . . . .	119
<b>Kuznetsov E. D., Al-Shiblawi O. M., Gusev V. D., Ustinov D. S.</b> Pairs of Trans-Neptunian Objects with close orbits . . . . .	123
<b>Lavrukhina A. D., Malanchev K. L.</b> Light curve feature extraction from astro- nomical source . . . . .	127
<b>Ladeyschikov D. A.</b> A technique for describing line profiles of the CO molecule using a multi-component radiation transfer model . . . . .	131
<b>Ladeyschikov D.A.</b> A technique for describing complex line profiles of the CO molecule using a multi-component radiation transfer model . . . . .	135
<b>Nazarov S. V., Kharchenko A. V., Krivenko A. S.</b> Modernization of the telescope "Sintez" at the CrAO RAS . . . . .	139
<b>Nazarov S. V., Butuzova M. S., Pushkarev A. B.</b> Backward Compton scattering of kiloparsec jets of quasars . . . . .	143
<b>Petrov D. V., Savushkin A. A., Zhuzhulina E. A.</b> 10-micron emission feature of nonspherical olivine particles . . . . .	146
<b>Popandopulo N. A., Avdyushev V. A., Bordovitsyna T. V., Chu- vashov I. N., Levkina P. A.</b> Determination of sailing of geosynchronous objects using positional observations obtained at Terskol Pike . . . . .	150
<b>Popova E. A., Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Sobolev A. M.</b> Physical parameters of molecular clumps in the S254-S258 star formation region . . . . .	153
<b>Potoskuev A. E., Kuznetsov E. D.</b> Dynamical evolution of asteroid pairs in the vicinity of resonances . . . . .	157
<b>Punanova A. F., Petrashkevich I. V.</b> Deuterium fractionation in low-mass star- forming regions . . . . .	161
<b>Ryspaeva E. B.</b> X-ray emission from Herbig stars . . . . .	165
<b>Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S.</b> Study of the filament WB 673 in radiolines ammonia . . . . .	169
<b>Salii S. V.</b> Estimation of physical conditions in star formation region S255IR-SMA1 173	
<b>Sannikova T. N.</b> Estimation of the Yarkovsky effect on the example of the asteroid 1685 Toro (1948 OA) . . . . .	177
<b>Safronova V. S., Kuznetsov E. D.</b> Age estimation of young pairs of asteroids in close orbits: pair (87887) 2000 SS286 — (415992) 2002 AT49 . . . . .	181
<b>Semenikhin T. A., Pruzhinskaya M. V., Kornilov M. V.</b> bolometric light curves and parameters of superbright supernova explosions . . . . .	185
<b>Sivkova E. E., Wiebe D. S.</b> Dust destruction at high galactic altitude . . . . .	187
<b>Sizova M. D., Vereshchagin S. V.</b> Searching for close approaches of the star pairs in the galactic disk with Gaia EDR3 data . . . . .	190
<b>Syusina O. M., Galushina T. Yu.</b> Influence of the sample of observations on the determination of the Yarkovsky effect parameter . . . . .	193

<b>Topchieva A. P.</b> IR ring nebulae in the Milky Way and M33 galaxies . . . . .	195
<b>Fedotov A. A., Karelin G. M.</b> First steps to mapping of exoplanets: modeling secondary eclipses and search inhomogeneities in the infrared brightness profilesk	199
<b>Shchurov M. A., Rudnitskiy A. G.</b> lineviewer — program of the astro space locator (asl) package for constructing and processing averaged spectra . . . . .	203
<b>Shchurov M. A., Valts I. E., Shakhvorostova N. N.</b> Vlbi research in the Radioastron project: structure of the H <sub>2</sub> O maser in NGC 2071 IRS 1 . . . . .	205