

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 44-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург
2—6 февраля 2015 г.

Посвящается 50-летию Коуровской обсерватории



Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2015

УДК 524.4
Ф503

Печатается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

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

Физика Космоса : Тр. 44-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2–6 февр. 2015 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 270 с.

ISBN 978-5-7996-1381-5

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

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 524.4

ISBN 978-5-7996-1381-5

© Уральский федеральный
университет, 2015

ФИЗИКА КОСМОСА
44-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра астрономии и геодезии
Астрономическая обсерватория

2—6 февраля 2015 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский федеральный университет), Д. Э. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), М. Г. Мингалиев (САО РАН), В. В. Орлов (НИАИ СПбГУ), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), А. И. Васюнин (Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics (MPIfER), Германия), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), В. Н. Обридко (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн), А. А. Соловьев (Главная Пулковская астрономическая обсерватория РАН)

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбург

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

50 ЛЕТ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. К. А. БАРХАТОВОЙ

Мы ясно осознаем, что живем не только в своих домах, городах и странах, но и в реальном космосе, который столь же прекрасен, сколь и опасен.

Самая восточная в Европе Коуровская астрономическая обсерватория, созданная в 1965 г., входит в состав Института естественных наук Уральского федерального университета и является одной из немногих эффективно работающих в последнее время университетских астрономических обсерваторий России. Это уникальное научное учреждение, расположенное вблизи 60-го градуса восточной долготы, единственное в интервале долгот от Казани до Иркутска, обладает высоким интеллектуальным потенциалом и развитой материальной базой. В обсерватории трудятся два доктора и шестнадцать кандидатов физико-математических наук.

Коуровская обсерватория своим рождением обязана развитию советской программы освоения космоса. На протяжении 57 лет одной из основных задач уральских астрономов является наблюдение за искусственными спутниками Земли. Без преувеличения можно сказать, что появление в Уральском государственном университете им. А. М. Горького астрономической обсерватории — историческая необходимость.

Я помню, как в 1957 г. мы, будучи на первом курсе университета им. А. М. Горького, уже заранее знали, что будет запущен искусственный спутник Земли и активно готовились проводить научные наблюдения. Спутник был запущен 4 октября. Интересны были получаемые нами телеграммы: «Свердловск. Небо. Бархатовой». А обратный адрес: «Москва. Космос». К. А. Бархатова в то время была заведующей кабинетом астрономии. В 1957 г. еще не было ни кафедры астрономии и геодезии, ни Астрономической обсерватории.

К сожалению, первые наблюдения спутника сорвались. В тот момент над Свердловском небо было затянуто тучами. Мы смогли впервые проследить полет спутника только через несколько дней после его запуска. Тогда приходилось часами ждать, когда он появится на

звездном небе — настолько несовершенны были расчеты его траектории. Был центр наблюдений, располагавшийся во дворе одного из зданий университета по улице 8 Марта, дом 62, были энтузиасты-наблюдатели, в основном из Уральского университета. А до наблюдений первого искусственного спутника Земли мы наблюдали метеоры. Как сейчас помню, в августе 1957 г. мы лежали во дворе дома по улице 8 Марта, 62 под большим обручем, головами к центру, и считали метеоры мощного потока Персеид, известного более 1 200 лет. Первый искусственный спутник Земли мы наблюдали там же, только уже на крыше здания.

Один из основоположников российской космонавтики Борис Раушенбах назвал первые десять лет освоения космического пространства спортивно-романтическими годами. Так что все мы, астрономы старшего поколения, вышли оттуда. Именно наблюдения, общение со звездным небом заставляют задуматься над бытием, над тем, как устроен этот мир. Слова академика Раушенбаха: «Главное занятие человека — жить, и жить достойно» — остались с нами на всю жизнь.

Астрономия — наука точная. В отличие от первых лет космонавтики, когда были огромные отклонения положения спутников от заданной орбиты, сейчас все точно просчитано: мы знаем, в какие минуты и секунды должен появиться такой-то спутник, по какому участку неба он пройдет. В разработку некоторых расчетов немалый вклад внесли и сотрудники нашей обсерватории. Коуровская астрономическая обсерватория уникальна именно тем, что от долгот Казани до Иркутска это единственная астрономическая обсерватория, которая ведет постоянные оптические наблюдения за небесными телами.

Да, Урал не лучшее место для астрономических наблюдений. Слишком часто бывает закрыто небо, да и горы не слишком высоки. Мы находимся в центре России, страны, где очень мало мест, пригодных для астрономических наблюдений. Но у нас есть научные школы, у нас есть специалисты.

Научные школы по звездной астрономии (основатель К. А. Бархатова) и изучению двойных и переменных звезд (основатель М. А. Свечников) пользуются мировым признанием. Обсерватория активно участвует в реализации государственных и международных программ по наблюдению рассеянных звездных скоплений, переменных звезд и областей звездообразования, гамма-всплесков и сверхновых звезд, Солнца, малых тел Солнечной системы, искусственных спутников Земли.

Фундаментальные и прикладные научные исследования в обсерватории проводятся по следующим направлениям:

- строение, происхождение и развитие Галактики и ее подсистем;
- физика звезд и межзвездной среды;
- физика солнечной активности и ее земные проявления;
- астрометрия и небесная механика.

Научная и учебная работа проводится совместно с преподавателями кафедры астрономии и геодезии УрФУ, являя уникальное сочетание науки и образования, необходимое для качественной подготовки специалистов. Основой для научных исследований служит наблюдательный материал, получаемый с помощью телескопов, установленных в обсерватории:

- 70-см телескопа системы Кассегрена;
- 453-мм зеркального телескопа АЗТ-3;
- 500-мм телескопа СБГ;
- 440-мм горизонтального солнечного телескопа АЦУ-5.

Коуровская обсерватория сейчас, как и в советское время, успешно функционирует. Работы наших сотрудников в области астрофизики ежегодно включаются в обзоры мировых достижений. Научный совет по астрономии РАН часто включает работы астрономов УрГУ—УрФУ в список важнейших достижений российской астрономии. У нас работает коллектив единомышленников. Последние годы показали, что нашему коллективу по плечу очень многие задачи. В 2007—2008 гг. мы выиграли конкурс инновационно-образовательных проектов, который проводило Министерство образования и науки РФ. Благодаря этому появилась возможность оборудовать обсерваторию двумя новыми телескопами, уникальными не только для учебных заведений. В обсерватории установлен новый азимутальный телескоп с диаметром главного зеркала 1.2 м, оснащенный оптоволоконным спектрографом высокого разрешения (первый в России спектрограф подобного типа) для спектральных исследований и ПЗС-камерой со светочувствительным чипом глубокого охлаждения. Пока это третий по размеру зеркала телескоп в России, спроектирован и изготовлен он в Германии, но вся оптика сделана в России. А сотрудники обсерватории здесь, на месте, сделали все возможное, чтобы это уникальное оборудование было установлено в помещении, отвечающем принятым мировым стандартам. Телескоп полностью автоматизирован и управляется по программе от компьютера. Наведение на небесные объекты производится с большой точностью согласно заданным координатам. Уральские астрономы получили воз-

возможность использовать самый мощный метод исследования звезд — метод спектрального анализа. На телескопе планируется проводить фундаментальные исследования звездных скоплений, областей звездообразования, переменных звезд, а также решать прикладные задачи по наблюдениям объектов ближнего космоса, выполнять работы экологического характера, связанные с определением загрязняющих факторов земной атмосферы.

Второй телескоп, роботизированный телескоп «МАСТЕР II» (два телескопа диаметром 400 мм, укомплектованных панорамными фотометрами на базе ПЗС), способен работать и в автономном режиме. Таких телескопов в России несколько. Они составляют единую сеть. Робот-телескоп разработан в МГУ, не имеет аналогов в России, а по своим характеристикам соответствует современным иностранным роботизированным системам. Безусловно, уникальны фундаментальные задачи МАСТЕРА. Уральский сегмент сети МАСТЕР выполняет задачи, поставленные перед сетью телескопов (поиск раннего послесвечения гамма-всплесков, обзор неба с целью поиска сверхновых звезд в других галактиках и др.), а также проводит собственные исследовательские программы — наблюдения рассеянных звездных скоплений, поиск переменных звезд и транзитных экзопланет. Кстати, за последние годы работы наши сотрудники на МАСТЕРЕ открыли около четырехсот переменных звезд.

Сотрудники обсерватории также активно используют инструменты других обсерваторий России (в частности, 6-метровый и 1-метровый телескопы Специальной астрофизической обсерватории РАН, 22-метровый радиотелескоп Пушчинской радиоастрономической обсерватории ФИ РАН) и мира, в частности, радиоинтерферометры ВМА (США), АТСА (Австралия), 20-метровый радиотелескоп в Онсала (Швеция) и др.

Обсерватория проводит фундаментальные исследования в рамках совместных проектов с Институтом астрономии РАН, Государственным астрономическим институтом им. П. К. Штернберга при МГУ, Санкт-Петербургским, Томским государственными университетами и др. Выполняемые проекты финансируются Министерством образования и науки РФ, а также Российским фондом фундаментальных исследований.

В обсерватории выполняются прикладные исследования по договорам с ФГУП «Центр эксплуатации наземной космической инфраструктуры» (Федеральное космическое агентство), «Межгосударственная акционерная корпорация "Вымпел"» и другими партнерами.

Одна из новых программ — экологическая, которая включает наблюдение за космическим мусором и составом земной атмосферы. В начале XXI в. появилась новая трасса запуска искусственных спутников с Байконура на солнечно-синхронную орбиту, которая проходит вдоль Урала. По заданию Роскосмоса мы наблюдали запуски космических аппаратов разного назначения по этой орбите у себя в обсерватории. Ясно, что Коуровская обсерватория находится в таком месте, что мы просто обязаны участвовать в процессе.

Мы работаем в плотном режиме. У нас всегда очень много объектов наблюдений, поэтому никакого времени их отследить при нашем неважном небе не хватает.

Появилось много заботы, очень большая работа и просто огромная ответственность. Ведь, в частности, мы наблюдаем для того, чтобы понять, куда упадет вторая ступень ракеты. И все это требуется сделать в течение короткого промежутка времени.

Откровенно, даже для астронома запуск космического корабля, падение ступеней ракеты — впечатляющее зрелище. Я, кажется, всю жизнь, с детства, наблюдаю за небом, но такое наблюдала впервые: когда на небе, где-то далеко над северной тайгой, ярко сияя, падает вторая ступень ракеты.

Экология — необходимое направление, по которому надо работать. Этому требуют инновационные программы. С 2003 г. обсерватория участвует в международных программах по мониторингу глобального климата Земли. В частности, Коуровская обсерватория включена в международную сеть солнечных фотометрических измерений AERONET, определяющую аэрозольную замутненность земной атмосферы.

В 2008 г. в Коуровской обсерватории появилось достаточно уникальное оборудование, которое позволяет проводить мониторинг парниковых газов как в приземном слое, так и во всем атмосферном столбе. Оборудование уже опробовано, и в ближайшее время обсерватория официально войдет в международную сеть по наблюдению за содержанием в воздухе загрязняющих атмосферу антропогенных парниковых газов. Именно они, как полагают, определяют текущие изменения климата.

Другое очень важное направление — исследование солнечной активности и солнечно-земных связей. Солнце — это жизнь на планете. Наша цивилизация всецело зависит от Солнца, и в 90-х гг. даже появился официальный термин «космическая погода».

Наблюдения за Солнцем в обсерватории мы ведем с 1966 г., с того времени, как был введен в строй горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-5. У нас существует однородный длительный ряд наблюдений солнечной активности по программе «Служба Солнца». Эти данные мы посылаем в Главную астрономическую обсерваторию РАН в Пулково, где они суммируются с наблюдениями других обсерваторий страны и публикуются на сайте Пулковской обсерватории. В начале космической эры эти наблюдения направлялись в Международный центр данных и использовались Центром управления космическими полетами для планирования пилотируемых запусков. В этом смысле, с точки зрения прикладной науки, мы тоже вносим свой вклад.

Поведение солнечной активности интересует очень многих, тем более что в последнее время Солнце преподнесло нам неожиданный «сюрприз» — чрезвычайно затянувшийся минимум солнечной активности и чрезвычайно низкий текущий 24-й максимум, который свидетельствует о том, что мы еще многого не знаем о Солнце. Такая низкая солнечная активность, возможно, говорит о грядущем похолодании на Земле, приблизительно таком, как было в пушкинские времена. Я в детстве всегда удивлялась строчкам пушкинского стихотворения «Осень»: «Октябрь уж наступил... но пруд уже застыл...». С нашими «октяблями» 1950—2013-х гг. этот пейзаж у меня мало вязался. А сейчас известно, что в те времена была низкая солнечная активность, за которой последовало похолодание на Земле. Во время еще более раннего длительного периода очень низкой солнечной активности, в Средние века, тоже было очень холодно: в Нидерландах катались на коньках, замерзали Темза и Сена.

Еще раз хочется повторить: Солнце — наша ближайшая звезда, от которой мы всецело зависим, поэтому можно сказать, что работы по изучению солнечной активности (в том числе изучение пятен и вспышечно-активных протуберанцев и петель, которые проводятся в нашей обсерватории) имеют не только фундаментальное, но и самое непосредственное прикладное значение.

Исключение астрономии из списка обязательных предметов средней школы привело к необходимости издания «Астрономического календаря», предназначенного для удовлетворения интересов школь-

ников, студентов, преподавателей школ и вузов, любителей астрономии. Такой календарь издается в течение 15 лет, начиная с 2001 г.

Сформирована система непрерывного астрономического образования. Научные сотрудники обсерватории преподают астрономию в ряде школ Екатеринбурга. Ежегодно более 300 экскурсий для школьников, учителей и населения не только Уральского региона проводится в Коуровской астрономической обсерватории. Свыше 5000 учащихся Екатеринбурга и региона знакомятся с достижениями современной науки.

Результаты исследований астрономов УрФУ отмечены многочисленными наградами, среди которых 11 серебряных и 22 бронзовые медали ВДНХ СССР, две премии Астрономического совета АН СССР им. А. Ф. Фиолетовой, различные премии университета и региона. Работы сотрудников Коуровской обсерватории часто отмечаются Научным советом РАН по астрономии как важнейшие астрономические достижения российских ученых.

Важная роль уральской астрономии отмечена всемирным астрономическим сообществом. Решением Международного астрономического союза в честь профессора К. А. Бархатовой названа малая планета № 5781 Barkhatoва, в честь директора обсерватории П. Е. Захаровой — малая планета № 4780 Polina, в честь доцента Н. Б. Фроловой — малая планета № 6165 Frolova, в честь бывшего ректора УрГУ В. Е. Третьякова — малая планета № 13479 VET. В 1996 г. малой планете № 4964 было присвоено имя Коуровка в честь Астрономической обсерватории УрГУ, являющейся «Меккой студентов-астрономов России», как сказано в свидетельстве.

Коуровская обсерватория — совершенно уникальное место не только для наблюдений космических объектов, но и для воспитания молодого поколения студентов-астрономов. Мы в этом году проводим 44-ю студенческую конференцию «Физика Космоса». Помню, как зародилась эта идея. Наши студенты, занимавшиеся в студенческом научном обществе, предложили пригласить ребят из других регионов на астрономический семинар, чтобы обменяться опытом. И на первую школу в Коуровку прибыли немногие — два студента из Казанского государственного университета и два студента из Московского государственного университета (в том числе Н. Н. Самусь). Причем в то время никто не хотел отпускать из вузов студентов в далекую деревню, в глушь под названием «Слобода». Но с каждым годом интерес к конференции в Коуровке только разрастался. Где студент может рассказать о результатах своей научной

работы? На какой научной конференции будут слушать студента? А у нас слушают. Ядро конференции составляют научные студенческие доклады. Оценивают эти доклады ведущие профессора Московского, Санкт-Петербургского, Ростовского, Казанского, Волгоградского, Томского и других университетов России. На конференциях обсуждаются самые последние веяния в астрономической науке. Результаты исследований, изложенные здесь, часто публикуются в ведущих научных журналах по астрономии. И мы горды, что многие участники наших студенческих конференций в настоящее время стали ведущим учеными мира.

Самое ценное, что имеет Коуровская астрономическая обсерватория, — это сплоченный коллектив единомышленников, которые сегодня проводят исследования на высоком мировом уровне и воплощают в жизнь мечты своих учителей. Одновременно обсерватория — это неотъемлемая часть образа УрФУ. Университет считает дальнейшее развитие первой на Урале астрономической научной обсерватории перспективным и многообещающим.

Обзорные лекции



Septem artes liberales.
Гравюра. XV в.

ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОХИМИЯ

Лабораторные астрофизические и астрохимические эксперименты необходимы для понимания физики и химии в областях звездо- и планетообразования. Эксперименты позволяют изучать экзотическую для земных условий межзвездную химию в полностью контролируемых условиях. В лекции будут рассмотрены основные методы лабораторных исследований химических реакций в холодном разреженном газе, а также на аналогах межзвездных пылевых частиц. Будет показано, каким образом лабораторные измерения, проведенные в последние десятилетия, улучшили наше понимание межзвездной химии, а также каковы перспективные направления дальнейших исследований.

Laboratory astrophysical and astrochemical experiments are necessary for understanding the physics and chemistry in regions of star- and planet formation. As an example, experiments allow us to study exotic for terrestrial conditions interstellar chemistry in the controlled environment. In the lecture, basics of experimental techniques to study chemical reactions in the cold rarefied gas as well as on analogues of interstellar grains will be discussed. It will be shown how laboratory measurements done during last decades improved our understanding of interstellar chemistry. Prospective directions of future laboratory studies will also be discussed.

ДИСКИ КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ

Количество известных коричневых карликов исчисляется многими сотнями, однако механизм образования этих «неудавшихся звезд» до сих пор неясен. Имеется два конкурирующих сценария. Согласно одному из них коричневые карлики представляют собой не более чем маломассивный хвост распределения звезд по массам и формируются в тех же условиях, что и «обычные» звезды. Другой сценарий связывает происхождение коричневых карликов с тем, что они формируются в группах и выбрасываются из них, не успев набрать достаточно массы, чтобы стать звездой. Диски коричневых карликов могут стать важным критерием для выбора конкретного сценария.

Number of known brown dwarfs is measured in many hundreds, but a mechanism which forms these “failed stars” is still unclear. There are two competing scenarios. According to one of them, brown dwarfs are no more than a low-mass tail of the stellar mass distribution, and they form in the same conditions as “normal” stars. Another scenario relates an origin of brown dwarfs to their formation in groups, out of which they are expelled before they collect enough mass to become a star. Brown dwarf disks can be an important criterion to select a specific scenario.

Коричневые карлики

Основополагающий параметр звезды — ее масса. Именно от массы (и во вторую очередь от химического состава) зависит, сколько проживет звезда, сколько (и как) произведет энергии, как закончит свой жизненный путь. Чем больше масса, тем горячее звездные недра, тем быстрее протекают термоядерные реакции, тем быстрее расходуется термоядерное топливо. Соответственно чем меньше масса, тем холоднее звезда, тем медленнее идут в ней термоядерные реакции. Еще в 1963 г. Шив Кумар предсказал, что если масса звезды при рождении окажется меньше $0.07\text{--}0.09 M_{\odot}$ (эту величину называют теперь пределом Кумара), термоядерные реакции в ней вовсе не

начнутся [1]. Строго говоря, звездой этот объект и не будет, поскольку единственным источником энергии в нем будет тепло, запасенное при первоначальном сжатии. Кумар предложил называть такие несостоявшиеся звезды черными карликами, но прижилось другое название — коричневые карлики [2].

От предсказания коричневых карликов до их открытия прошло больше тридцати лет. Первые достоверные данные об объектах, которые из-за малой массы не смогли стать звездами, появились в 1995 г. [3], а в настоящее время их известно уже более 1 200. Среди них есть как объекты с массой, немного уступающей пределу Кумара, так и объекты, масса которых лишь в несколько раз превышает массу Юпитера (M_J). Это означает, что наименее массивные коричневые карлики по массе перекрываются с наиболее массивными экзопланетами-гигантами.

Уверенного ответа на вопрос о происхождении коричневых карликов до сих пор нет. Во-первых, они могут быть продуктом «обычного» процесса звездообразования, происходя из маломассивного «хвоста» функции масс плотных ядер молекулярных облаков. Недостатком такого варианта может быть возможное наличие нижнего предела массы плотного протозвездного ядра, превышающего массу коричневых карликов (понятно, что произвольно малой массы у ядра молекулярного облака быть не может). Чтобы преодолеть это (возможное) затруднение, предлагается второй вариант, согласно которому коричневые карлики возникают в тех случаях, когда процесс аккумуляции массы ядра по каким-то причинам прерывается, например, если формирующееся ядро выбрасывается из молекулярного облака прежде, чем успеет накопить достаточно массы, чтобы стать звездой [4].

Однако некоторые коричневые карлики существуют не в изоляции, а формируют пары с нормальными звездами. В этих случаях не исключен третий сценарий: образование коричневого карлика в околозвездном диске по «планетному» сценарию. Против этого сценария, по крайней мере в части более массивных коричневых карликов, свидетельствует так называемая «пустыня коричневых карликов» — почти полное отсутствие (по сравнению с планетами-гигантами и маломассивными звездами) коричневых карликов с массами 20–80 M_J на близких орбитах (порядка нескольких а. е.) в системах с нормальными звездами. Следует отметить, что известные оценки масс протопланетных дисков у обычных звезд составляют порядка 1 % массы звезды, т. е. порядка 10 M_J для звезды типа Солнца. Это также ука-

зывает на то, что образование массивного коричневого карлика по планетному сценарию крайне маловероятно.

С учетом того что некоторые изолированные коричневые карлики, массы которых близки к планетным, могут на самом деле быть планетами-гигантами, выброшенными из своих планетных систем в результате взаимодействия с другими планетами, возникает вопрос: как отличить коричневый карлик от планеты-гиганта и есть ли вообще между ними различия? Сейчас границу между коричневым карликом и планетой-гигантом проводят по массе, считая коричневыми карликами объекты массивнее $13 M_J$ и относя к планетам менее массивные объекты. Масса $13 M_J$ соответствует так называемому пределу горения дейтерия: предположительно в объектах с массой от 13 до $80 M_J$ начальная центральная температура оказывается достаточной для кратковременного протекания термоядерных реакций с участием дейтерия (но не обычного водорода, как в нормальных звездах). Очевидно, что это разделение несколько искусственно, так как пока неизвестны ни ограничения, которые не давали бы объектам планетных масс (т. е. менее $13 M_J$) образовываться по «звездному» сценарию, ни ограничения, которые не давали бы объектам массивнее $13 M_J$ образовываться по «планетному» сценарию.

Диски у коричневых карликов

Для реального разделения сценариев желательно было бы найти свойства, которые указывали бы на различную историю формирования. Одним из таких различий может стать наличие у коричневого карлика собственной планетной системы или протопланетного диска. Если окажется, что параметры планетных систем и протопланетных дисков у КК так или иначе вписываются в общие закономерности для звезд различных масс, это будет доводом в пользу «звездного» сценария. Если верен сценарий выброса, диск будет либо отсутствовать, либо окажется «усеченным».

Существует несколько свидетельств в пользу того, что у коричневых карликов, как и у более массивных звезд, есть аккреционные, предположительно протопланетные, диски. Собственно говоря, это стандартный набор — наблюдения ультрафиолетового излучения и эмиссионных линий, наблюдения инфракрасных избытков и наблюдения излучения пыли в более длинноволновых (дальнем ИК, субмиллиметровом, миллиметровом) диапазонах. При этом каждый вариант раскрывает собственную сторону аккреционного диска. На-

блюдения в УФ-диапазоне и наблюдения эмиссионных линий позволяют установить сам факт аккреции (неявно предполагающий наличие диска), а также оценить ее темп. Наблюдения избытка в ИК-диапазоне несут информацию о близких окрестностях коричневого карлика и, по сути, свидетельствуют о наличии вблизи карлика нагретой пыли, но не дают прямой информации о ее распределении. Кроме того, наблюдения в ИК-диапазоне не позволяют оценить полную массу пыли в диске, поскольку в этом диапазоне не видна холодная пыль. Для ее наблюдений необходимо переходить в более длинноволновые диапазоны, желателен использовать пространственно разрешенные (читай — интерферометрические) наблюдения.

Наблюдения дисков коричневых карликов в инфракрасном диапазоне осложняются следующим обстоятельством. Во-первых, будучи более холодными объектами, чем звезды, они сами значительную часть энергии излучают в ИК-диапазоне. Во-вторых, холодный коричневый карлик не в состоянии сильно нагреть свой диск. В результате в ближнем ИК-диапазоне вклад центрального объекта становится больше, а вклад диска — меньше, чем в случае диска у нормальной звезды.

Тем не менее первым признаком того, что у коричневых карликов (т. е. у объектов с массой меньше $80 M_J$, не дающих оснований подозревать в них планеты-гиганты) есть диски, стали именно результаты наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне в сочетании с наблюдениями эмиссионных линий. Такие наблюдения начались на рубеже XX—XXI вв. Вероятно, первое наблюдение инфракрасного избытка в сочетании с широкой (шире, чем можно было бы ожидать для хромосферной активности) линией $H\alpha$ у коричневого карлика было представлено Кевином Луманом с соавторами в 1997 г. [5]. В соответствии с парадигмой дисковой аккреции, которая к тому времени была уже хорошо установлена для звезд типа Т Тельца, это сочетание было проинтерпретировано как свидетельство наличия аккреционного диска. Впоследствии было показано, что инфракрасные избытки и эмиссионные линии различных водородных серий являются характерной особенностью многих молодых коричневых карликов. (Возраст, как правило, устанавливается по членству в звездном скоплении известного возраста; знание возраста и расстояния необходимо, чтобы по эволюционным трекам перевести светимость объекта в массу, тем самым подтвердив его субзвездный статус.)

Вскоре наблюдения признаков аккреции на коричневые карлики стали систематическими. В частности, в работе [6] инфракрасные

избытки на длине волны 6.7 мкм были обнаружены у четырех из 13 коричневых карликов и маломассивных звезд в области звездообразования Chamaeleon I. Причем обнаружилась связь между ИК-избытком и эмиссией в линии $H\alpha$: у источников без избытка линия водорода оказалась слабой, тогда как у объектов с ИК-избытком наблюдались как слабые, так и весьма широкие линии $H\alpha$. Натта и Тести [7] оценили массу объекта с наибольшей шириной линии $H\alpha$ (100 Å) в этой выборке и получили для нее субзвездное значение: 0.04–0.05 M_{\odot} . Ими также впервые было показано, что инфракрасный спектр вещества, окружающего коричневый карлик, в диапазоне до 15 мкм хорошо описывается «обычной» моделью расходящегося (flared) околозвездного диска [8], которая с равным успехом применялась к дискам звезд типа Т Тельца и Ae/Ве Хербига.

В работе Натта и др. [9] тот же метод был применен еще к девяти объектам, наименее массивный среди которых имеет массу около 8–12 M_J , т. е., возможно, ниже предела горения дейтерия. Выяснилось, что для описания спектров некоторых объектов более подходят модели расходящихся дисков, однако большинство спектров более соответствует модели плоского (не расходящегося) диска. Авторы предположили, что плоская форма диска может быть связана с оседанием пыли к срединной плоскости диска, т. е. с тем, что в этих дисках уже началось образование планетной системы. В целом к середине 2000-х гг. стало ясно, что коричневые карлики, подобно более массивным «настоящим» звездам, на раннем этапе эволюции окружены газопылевыми дисками. Также у многих коричневых карликов с дисками были обнаружены истечения — характерная деталь околозвездных дисков [10].

Космические инфракрасные телескопы Spitzer и WISE позволили исследовать инфракрасные избытки в статистически значимых выборках коричневых карликов, оценив тем самым частоту их встречаемости в скоплениях разных возрастов, а также выяснив, насколько для субзвездных объектов сохраняются тенденции, обнаруженные для более массивных звезд, в частности корреляция темпа аккреции и массы диска с массой центрального объекта. Естественно, наблюдения в ближнем и среднем ИК-диапазонах не позволяют достоверно оценить полную массу диска. Для этого необходимы наблюдения в

более длинноволновых диапазонах, которых пока не так много. О первом обнаружении диска коричневого карлика в миллиметровом диапазоне сообщалось в работе Кляйна и др. [11].

Большая часть исследований показала, что диски у коричневых карликов являются естественным расширением семейства околозвездных дисков у молодых звезд. В молодых звездных скоплениях доля коричневых карликов с дисками составляет порядка половины, что сопоставимо с распространенностью дисков у более молодых звезд [12]. Имеются свидетельства того, что доля объектов с дисками возрастает при понижении массы центрального объекта. Как и в случае со звездами типа Т Тельца, масса диска (в тех случаях, когда ее удается определить) составляет порядка 1 % от массы центрального объекта [13, 14]. Темп аккреции также следует корреляции

$$\dot{M} \propto M_*^2,$$

что для коричневых карликов соответствует крайне малым величинам \dot{M} , порядка $10^{-12} M_\odot$ в год. Кроме того, мониторинг эмиссионных линий у коричневых карликов указывает на возможность значительных (порядок величины) вариаций темпа аккреции на шкале порядка недель и даже дней, так что в корреляции наблюдается значительный разброс.

В последние годы начались наблюдения дисков коричневых карликов в субмиллиметровом диапазоне — на космическом телескопе *Herschel* и на интерферометре ALMA, что, в частности, впервые дало возможность проводить пространственно разрешенные исследования этих объектов. Результаты исследования дисков у коричневых карликов при помощи *Herschel* опубликованы в работах Харви и др. [15, 16]. Авторы этих работ исследовали около 50 коричневых карликов и получили для их дисков оценки массы, варьирующиеся от 10^{-6} до $10^{-3} M_\odot$, соответствующие среднему отношению массы диска к массе центрального объекта несколько меньше 1 %.

Исследования структуры дисков у трех коричневых карликов, проведенные на интерферометре ALMA [17], позволили определить размеры дисков, и они оказались довольно внушительными, от 66 до 139 а. е. Этот результат, правда, пока единственный, свидетельствует против сценария, в котором коричневые карлики представляют собой «недообразовавшиеся звезды», выброшенные из областей звездообразования. «Усеченные» диски, допускаемые этим сценарием, должны иметь гораздо меньшие размеры [18].

Планеты у коричневых карликов

Звезда	Масса планеты, M_J	Большая полуось, а. е.	Масса звезды, M_\odot
MOA-2007-BLG-192-L	$0.01^{+0.015}_{-0.005}$	0.66 ± 0.14	$0.084^{+0.015}_{-0.012}$ [19]
OGLE-2012-BLG-0358L	1.85 ± 0.19	0.87 ± 0.03	0.022 ± 0.002
2M1207	4.0 ± 1.0	46.0 ± 5.0	0.025
CFBDS 1458	6.5 ± 4.5	2.6 ± 0.2	0.024 ± 0.016
OGLE-2009-BLG-151	7.5 ± 0.3	0.31 ± 0.01	0.018 ± 0.001
2M 044144	7.5 ± 2.5	15.0 ± 0.6	0.02
OGLE-2011-BLG-0420	9.4 ± 0.5	0.19 ± 0.01	0.025 ± 0.001
WISE 0458+6434	10	5	0.01
WISE 1711+3500	13.0 ± 9.0	15	0.024 ± 0.014
UScoCTIO 108	$14.0^{+2.0}_{-8.0}$	670	0.057 ± 0.02
2M 2140+16	$20.0^{+80.0}_{-20.0}$	3.53 ± 0.15	0.08 ± 0.06

Примечание. Данные взяты из электронной энциклопедии Exoplanet.eu, за исключением массы центрального объекта в системе MOA-2007-BLG-192-L.

Планеты коричневых карликов

Если диски у коричневых карликов подобны дискам у более массивных звезд, их эволюция должна приводить к тому же результату — к образованию планетной системы. На сегодняшний день известно несколько планет, обращающихся вокруг коричневых карликов, точнее, тел планетной массы (меньше $13 M_J$), обращающихся вокруг тел субзвездной массы (больше $13 M_J$ и меньше предела Кумара). Они перечислены в таблице. В таблицу включены тела, попадающие в нужный интервал с учетом ошибок измерения. Если ошибки не указаны, значит, соответствующая величина определена с большой неопределенностью.

В таблице присутствует одна «сверхземля» (MOA-2007-BLG-192-L b), остальные же планеты превосходят по массе Юпитер. Большие полуоси их орбит достигают значений в десятки а. е., что согласуется с наблюдаемыми размерами дисков. Из общего распределения выделяется система UScoCTIO 108 с большой полуосью орбиты компаньона 670 а. е. Размер системы в сочетании с сопоставимыми массами «центрального тела» и «спутника» указывает на то, что в данном случае мы, вероятно, имеем дело с двойным объектом, а не с планетной системой.

Заклучение

Имеющиеся данные о дисках и планетных системах коричневых карликов указывают, что эти объекты образуются по тому же сценарию, что и объекты звездных масс. Хотя другие сценарии не исключены, бóльшая часть коричневых карликов, по-видимому, представляет собой нижний «хвост» распределения звезд и субзвездных объектов по массам.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-02-00642 и Президента РФ НШ-3620.2014.2.

Библиографические ссылки

1. *Kumar S. S.* The Structure of Stars of Very Low Mass. // *Astrophys. J.* — 1963. — Vol. 137. — P. 1121.
2. *Tarter J.* Brown Is Not a Color: Introduction of the Term “Brown Dwarf” // *Astrophysics and Space Science Library* / ed. by V. Jørgensen. — 2014. — Vol. 401. — P. 19.
3. *Rebolo R., Zapatero Osorio M. R., Martín E. L.* Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster // *Nature.* — 1995. — Vol. 377. — P. 129–131.
4. *Reipurth B., Clarke C.* The Formation of Brown Dwarfs as Ejected Stellar Embryos // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 122. — P. 432–439. [astro-ph/0103019](#).
5. *Luhman K. L., Liebert J., Rieke G. H.* Spectroscopy of a Young Brown Dwarf in the rho Ophiuchi Cluster 1 // *Astrophys. J. Lett.* — 1997. — Vol. 489. — P. L165.
6. *Comerón F., Neuhäuser R., Kaas A. A.* Probing the brown dwarf population of the Chamaeleon I star forming region // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 359. — P. 269–288.
7. *Natta A., Testi L.* Exploring brown dwarf disks // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 376. — P. L22–L25. [astro-ph/0107509](#).
8. *Chiang E. I., Goldreich P.* Spectral Energy Distributions of T Tauri Stars with Passive Circumstellar Disks // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 490. — P. 368–376. [astro-ph/9706042](#).
9. *Natta A., Testi L., Comerón F. et al.* Exploring brown dwarf disks in rho Ophiuchi // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 393. — P. 597–609. [astro-ph/0207463](#).

10. *Whelan E. T.* Jets from young stars and brown dwarfs // *Astronomische Nachrichten*. — 2014. — Vol. 335. — P. 537. 1406.7627.
11. *Klein R., Apai D., Pascucci I. et al.* First Detection of Millimeter Dust Emission from Brown Dwarf Disks // *Astrophys. J. Lett.* — 2003. — Vol. 593. — P. L57–L60. astro-ph/0307076.
12. *Jayawardhana R., Ardila D. R., Stelzer B., Haisch K. E., Jr.* A Disk Census for Young Brown Dwarfs // *Astron. J.* — 2003. — Vol. 126. — P. 1515–1521. astro-ph/0305412.
13. *Scholz A., Jayawardhana R., Wood K.* Exploring Brown Dwarf Disks: A 1.3 mm Survey in Taurus // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 645. — P. 1498–1508. astro-ph/0603619.
14. *Andrews S. M., Rosenfeld K. A., Kraus A. L., Wilner D. J.* The Mass Dependence between Protoplanetary Disks and their Stellar Hosts // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 771. — P. 129. 1305.5262.
15. *Harvey P. M., Henning T., Ménard F. et al.* A Herschel Search for Cold Dust in Brown Dwarf Disks: First Results // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 744. — P. L1. 1110.4586.
16. *Harvey P. M., Henning T., Liu Y. et al.* A Herschel Survey of Cold Dust in Disks around Brown Dwarfs and Low-mass Stars // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 67. 1206.1161.
17. *Ricci L., Testi L., Natta A. et al.* Brown Dwarf Disks with ALMA // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 791. — P. 20. 1406.0635.
18. *Bate M. R., Bonnell I. A., Bromm V.* The formation of a star cluster: predicting the properties of stars and brown dwarfs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — Vol. 339. — P. 577–599. astro-ph/0212380.
19. *Kubas D., Beaulieu J. P., Bennett D. P. et al.* A frozen super-Earth orbiting a star at the bottom of the main sequence // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 540. — P. A78. 1009.5665.

Т. Ю. Галушина¹,
П. В. Скрипниченко²

¹Томский государственный университет,

²Уральский федеральный университет

ОБЗОР ПОПУЛЯЦИИ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Данная работа посвящена обзору популяции астероидов, сближающихся с Землей. В настоящее время насчитывается уже свыше 11 тысяч таких объектов, из них 863 имеют диаметр больше 1 км. По имеющимся оценкам, в настоящее время открыты почти все крупные астероиды (больше 1 км диаметром), но с уменьшением размера падает и процент уже открытых объектов. В отдельный класс относят потенциально опасные астероиды. Таковых в настоящее время насчитывается 1 500, из них порядка 10 % имеют размер больше 1 км.

Орбиты АСЗ отличаются большим разнообразием: большие полуоси расположены в пределах от 0.55 до 66.1 а. е., эксцентриситеты — от 0.0032 до 0.9855, наклонения плоскости орбиты к эклиптике — от 0.021 до 154°. Однако всего 1 678 АСЗ являются нумерованными, т. е. имеют хорошо определенные орбиты. Особое внимание в работе уделено объектам, которые в ближайшие 100 лет пройдут через сферу тяготения Земли.

The paper deals with survey of Near-Earth asteroids population. It is known over than 11 thousands such objects in present time. 863 of them are larger than 1 km. As consistent with modern estimations we know almost all large asteroids (more than 1 km) in current time, but percent of discovered asteroid decrease with reduction of sizes. A separate class includes 1 500 potentially hazardous asteroids; about 10 % of them have size more than 1 km.

The orbits of the NEAs are very diverse: semi-major axes are located in the range of 0.55 to 66.1 AU, eccentricities are from 0.0032 to 0.9855, and the inclinations of the orbit to the ecliptic plane are from 0.021 to 154°. However only 1 678 are numbered, i.e. have good determined orbits. In the paper special attention is paid to the objects which pass through gravity sphere of the Earth in next 100 years.

© Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В., 2015

Введение

Одним из наиболее важных практических приложений исследования динамических свойств малых тел Солнечной системы является проблема астероидно-кометной опасности. Группа объектов, представляющих научный интерес в рамках данной задачи, получила обозначение как астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). По определению данная группа классифицируется как совокупность объектов, перигелийные расстояния которых не превосходят 1.3 а. е. [1]. Исследования данного множества объектов началось с открытия в 1898 г. астероида 433 Эрос, ставшего первым АСЗ. В момент открытия 433 Эрос имел геоцентрическое расстояние, не превышающее 22 млн км [2]. Данный астероид имеет сигарообразную форму с характерной длиной в поперечнике порядка 34 км. Однако открытие новых АСЗ было затруднено в связи с целым рядом причин. В конце XX в. модернизированная наблюдательная техника, более совершенная теоретическая модель движения и инициированная научным сообществом исследовательская программа по поиску АСЗ привели к массовому открытию новых АСЗ. К концу 80-х гг. XX в. было открыто всего несколько десятков АСЗ [3]. На текущий момент их известно более 11 000.

Общие сведения об АСЗ

На рис. 1 показано положение всех известных АСЗ на 31 августа 2014 г. в проекции на плоскость эклиптики. Из рисунка видно плотное заполнение пространства в окрестности Земли астероидами.

Множество объектов, входящих в группу АСЗ, довольно любопытно распределено по элементам орбит. Так, например, согласно сведениям из каталога Э. Боуэлла [4] на сентябрь 2014 г. подавляющее большинство (99.7 %) АСЗ имеют большие полуоси в пределах 0.9–3.6 а.е (рис. 2,а), хотя наблюдаются и некоторые исключительные случаи типа 2007 EB26 с $a = 0.55$ а. е. и 2009 DQ33 с $a = 66.1$ а. е. (рис. 3). Последний объект также обладает высоким для астероидов эксцентриситетом $e = 0.985$, что в совокупности с большой полуосью позволяет ему путешествовать практически по всей Солнечной системе. Очевидно, что условия наблюдения данного объекта на достаточно большом интервале времени не позволяют получать его высокоточные положения, кроме того, на текущий момент времени для 2009 DQ33 получено всего восемь наблюдений, что говорит о

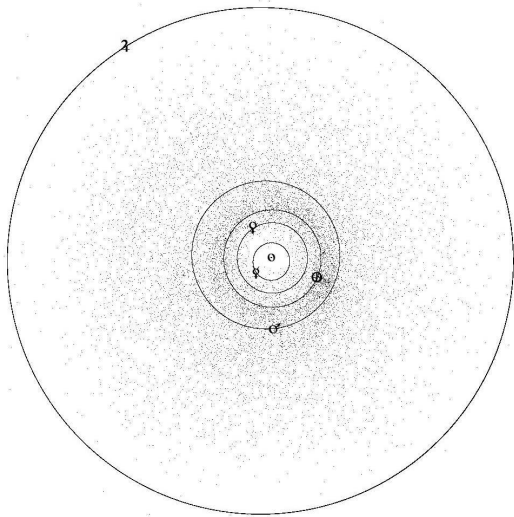


Рис. 1. Положение всех АСЗ в проекции на плоскость эклиптики на 31.08.2014

низкой достоверности вычисленных элементов орбит. В ближайшее время данный объект окажется доступным для наблюдений с Земли через несколько столетий, что, скорее всего, приведет к тому, что астероид будет открыт заново.

Порядка 60 % АСЗ обладают эксцентриситетами в диапазоне от 0.3 до 0.6 (рис. 2, б). Данные значения весьма велики для общего множества астероидов, что является характерным признаком группы АСЗ, однако и здесь имеются исключения. К примеру, 2011 WK2 обладает свойственным астероидам главного пояса малым $e = 0.0032$, а 2009 DQ33 — $e = 0.9855$. Стоит отметить, что объекты с нетипичными эксцентриситетами нередко оказываются достаточно плохо изученными, т. е. при появлении новых наблюдений элементы орбит будут уточнены.

Около 60 % АСЗ обладают наклонениями, меньшими 10 (рис. 4, а). Нехарактерными исключениями можно считать орбиты 2012 FZ23 с $i = 75.4^\circ$, 2014 PP69 с $i = 93.6^\circ$, 2007 VA85 с $i = 131.9^\circ$ и 343158 2009 HC82 с $i = 154.5^\circ$. Последние три объекта обладают обратным по отношению к большинству объектов Солнечной системы движением (рис. 5).

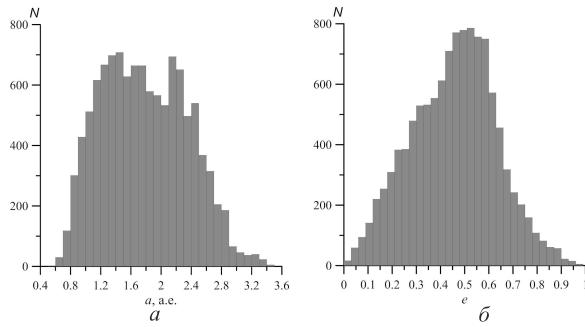


Рис. 2. Распределение АСЗ по большой полуоси a (a) и эксцентриситету e (b). N — число астероидов

Необходимо уделить внимание и физическим свойствам объектов из группы АСЗ. На текущий момент известно порядка 860 АСЗ с диаметром более 1 км. В рамках проблемы астероидно-кометной опасности это множество крупных объектов представляет определенный интерес, так как в случае гипотетического столкновения с Землей способны причинить глобальные разрушения. Абсолютная астероидная звездная величина H — характеристика, зависящая от физических размеров и отражающей способности. Астероидные величины АСЗ лежат в пределах от 9.45 (1036 Galimed — более 33 км в поперечнике) до 33.24 (2008 TS26) (рис. 4,б).

Для получения статистических оценок размеров АСЗ можно воспользоваться формулой [5]

$$D = \frac{1329 \cdot 10^{-0.2H}}{\sqrt{pv}}, \quad (1)$$

где pv — альbedo астероида; H — абсолютная звездная величина; D — диаметр, км. В том случае если за среднее альbedo принято значение 0.14 [6], оценки размеров самых слабых АСЗ лежат в пределах 1 м. Подобное ограничение связано скорее с техническими возможностями наблюдателей, нежели с отсутствием менее крупных АСЗ. С другой стороны, в связи с нечетким определением понятия «астероид» [7] до конца непонятно, каким минимальным диаметром

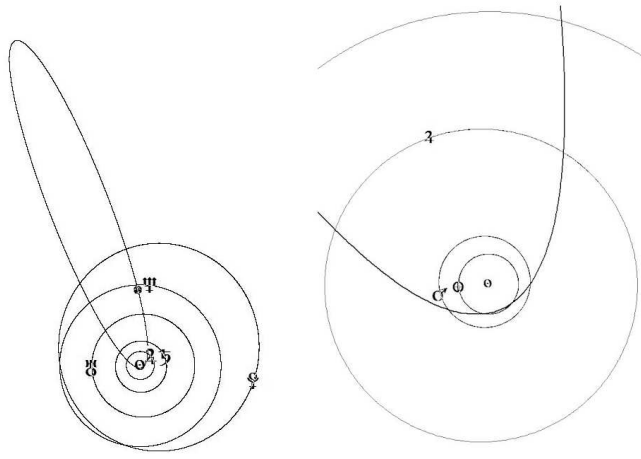


Рис. 3. Проекция орбиты астероида 2009 DQ33 и больших планет на плоскость эклиптики в различных масштабах

должен обладать космический объект, чтобы считаться принадлежащим данному множеству. В обозримом будущем, вероятно, возникнет строгая классификация между астероидами, метеороидами и космической пылью.

Классы астероидов, сближающихся с Землей

По состоянию на текущий день считается, что открыты и каталогизированы практически все объекты крупнее 330 м [8]. Если предположить, что диаметр объектов обратно пропорционален их числу в Солнечной системе, то за сегмент глобальных и региональных катастроф в случае гипотетического столкновения можно оставаться спокойным, чего не скажешь о проблеме локальных катастроф. Челябинский объект 15 февраля 2013 г. [9] не превышал по размерам 17 м, а изучение данного сегмента остается до сих пор в начальной фазе.

Строго говоря, объекты крупнее 1 км способны вызвать глобальную катастрофу. Столкновения с самыми крупными астероидами могут привести к вымиранию до 95 % форм жизни на Земле. Считается, что все подобного рода объекты обнаружены, каталогизированы и достаточно хорошо исследованы.

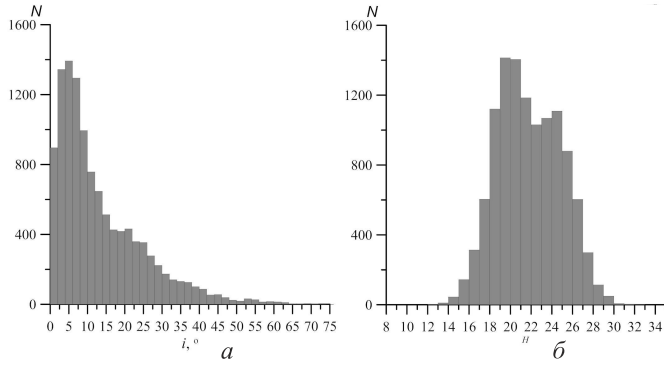


Рис. 4. Распределение АСЗ по наклонению i (a) и абсолютной звездной величине H (b). N — число астероидов

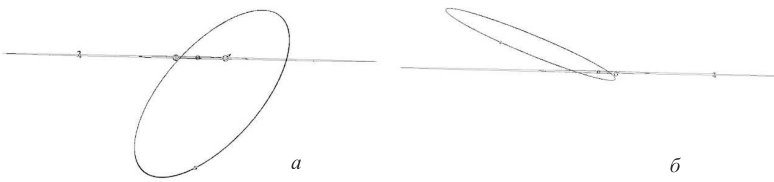


Рис. 5. Проекция орбит астероидов 2007 VA85 (a) и 343158 2009 HC82 (b) на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики

Объекты от 100 м до 1 км приводят к катастрофе регионального масштаба. Объекты крупнее 330 м до 1 км обнаружены и исследованы в меньшей степени, чем их более крупные сородичи, но с уменьшением диаметра снижается и количество открытых объектов к потенциальному их числу.

Небольшие астероиды размером 10–100 м способны вызвать локальную катастрофу. Объектов, способных вызвать событие, равносильное Челябинскому, в Солнечной системе предположительно порядка нескольких миллионов, т. е. исследование данного множества только начинается.

Стоит отметить, что вышеописанные границы достаточно условны. С ростом числа городов и технически опасных объектов на Земле локальная угроза вполне способна превратиться в региональную, если природная катастрофа приведет к техногенной.

Орбиты АСЗ традиционно делят на четыре класса:

- группа Амура, для которой $1.0167 < q \leq 1.3$ а. е. Астероиды этой группы всегда находятся за пределами орбиты Земли;
- группа Аполлона, для которой $a > 1$ а. е., $q \leq 1.0167$ а. е. Орбиты этих астероидов в проекции на плоскость эклиптики пересекают орбиту Земли;
- группа Атона, для которой $a < 1$ а. е., $Q \geq 0.983$ а. е. Такие астероиды выходят за орбиту Земли только в окрестности афелия своей орбиты, т. е. большую часть времени проводят внутри орбиты Земли;
- группа Атиры, для которой $Q < 0.983$ а. е. Эти астероиды постоянно находятся внутри орбиты Земли.

На рис. 6 показаны проекции орбит типичных представителей данных классов на плоскость эклиптики. В табл. 1 приведены некоторые статистические данные о популяции АСЗ на сентябрь 2014 г. (верхняя строка) и на октябрь 2004 г. (нижняя строка), выбранные из каталога Боуэлла [4]. Динамика открытия новых АСЗ впечатляет. Менее чем за 10 лет число известных АСЗ увеличилось в три раза. Но необходимо отметить, что ориентация программы наблюдений на поиск новых объектов имеет и обратную сторону: число объектов, чьи орбиты известны с достаточной точностью, чтобы эти астероиды стали нумерованными, увеличивается гораздо менее стремительными темпами.

Таблица 1. Данные о популяции АСЗ

	Класс				Всего
	Атон	Аполлон	Амур	Атира	
Общее число	4408	6132	864	14	11418
	1365	1604	251	–	3220
Нумерованные	657	878	141	2	1678
	191	189	24	–	404

Важно отметить, что количество известных объектов разных классов также отличается. К примеру, соотношение числа известных амуров и атир — 1:400. Это связано как с реальным количеством объектов в данных областях пространства, так и с условиями их на-

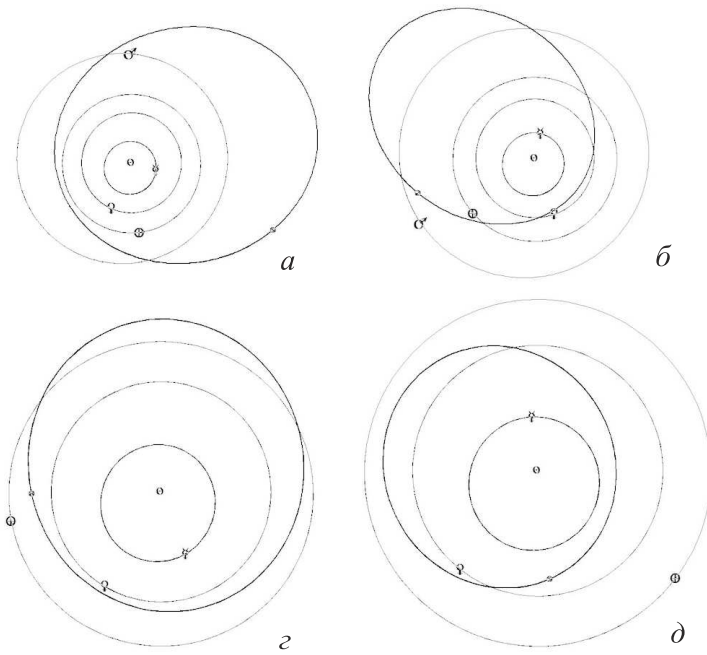


Рис. 6. Проекция орбит астероидов 1221 Amor (а), 1862 Apollo (б), 2062 Aten (в), 163693 Atira (г) и внутренних планет на плоскость эклиптики

блюдений, поскольку, к примеру, объекты типа Атиры наблюдаются лишь вблизи элонгаций (вечернее и утреннее небо) на коротких интервалах времени.

Из АСЗ выделяется группа потенциально опасных для Земли астероидов. В эту группу включают АСЗ, абсолютная звездная величина которых не больше 22^m и минимальное расстояние между орбитами объекта и Земли не больше 0.05 а. е. Первым потенциально опасным астероидом стал 4179 Тутатис, который был открыт 4 января 1989 г. французским астрономом Кристианом Поля. На 9 сентября 2014 г., по сведениям NASA, известно 1 500 потенциально опасных астероидов (<http://neo.jpl.nasa.gov/orbits/>), порядка 140 из них имеют диаметр больше 1 км, т. е. при столкновении способны вызвать глобальную катастрофу.

Самым крупным из известных потенциально опасных астероидов является 3122 Флогенсе размером около 4.9 км. Следующее сближение с Землей данного объекта ожидается 1 сентября 2017 г., когда он пройдет на расстоянии 0.04723 а. е. (7 млн км) от центра Земли. Что касается нижней границы, то, как видно, из приведенной выше формулы (1), звездная величина 22^m примерно соответствует диаметру 130 м, что приводит к недооцениванию опасности, исходящей от меньших объектов.

Астероиды, имеющие тесные сближения с Землей

Наиболее любопытными для исследования являются те объекты, которые в ближайшем будущем пройдут в околоземном космическом пространстве. Для выявления данной группы объектов использовался программный комплекс «ИДА» [10], позволяющий производить исследование динамических свойств астероидов (в том числе и с помощью параллельных вычислений). Рассматривалась возмущенная задача двух тел в гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике и равноденствию 2000.0. Набор возмущающих факторов включал в себя возмущения от больших планет, Луны, Плутона, Цереры, Паллады, Весты; источником начальных данных послужил каталог элементов орбит астероидов Боуэлла от 31 августа 2014 г. Решение уравнений движения осуществляется методом Эверхарта на интервале времени 100 лет.

В ближайшие 100 лет сферу тяготения Земли (примерно 254 000 км) пройдут 29 астероидов. В табл. 2 представлены даты прохождения объектов через сферу тяготения, минимальные расстояния до центра Земли d_{min} , абсолютная звездная величина H и оценка диаметра D , полученная по формуле (1). Некоторые объекты проходят сферу тяготения дважды за данный интервал времени. 2014 RA, 2014 RC и 2014 SG1 были открыты во время прохождения вблизи Земли. На минимальное расстояние 38 000 км (из вышперечисленных объектов) сблизится 99942 Апофис в 2029 г. [11–14]. Самым крупным из исследованных объектов является 153814 2001 WN5 — почти 500 м в диаметре. Астероиды 153814 2001 WN5, 99942 Арофис и 2007 YV56 отмечены, как потенциально опасные.

Таблица 2. Перечень АСЗ, проходящих через сферу тяготения Земли в ближайшие 100 лет

Объект	Дата	d_{min} , км	H	D , м
2014 RA	31.08.2014	56746	29	6
2014 RC	07.09.2014	39893	27	15
2014 SG1	20.09.2014	79579	29	5
2012 TC4	12.10.2017	78306	27	17
2008 GY21	10.04.2018	248204	28	10
2006 QV89	09.09.2019	70653	25	30
2009 BF58	21.01.2022	102236	27	12
2013 GM3	14.04.2026	98118	26	19
153814 2001 WN5	26.06.2028	249053	18	495
99942 Apophis	13.04.2029	37557	19	330
2008 VB4	03.11.2033	174451	28	8
2014 HB177	06.05.2034	206584	28	8
2012 UE34	08.04.2041	107043	23	82
2012 HG2	13.02.2047	89615	27	13
2007 UD6	18.1002048	95036	28	7
2008 EZ7	09.03.2049	181485	27	13
2006 RH120	31.01.2060	147015	30	4
2008 US	21.10.2064	201910	32	2
2008 EL68	16.02.2065	140612	28	10
2010 VB1	07.01.2068	140049	23	74
2008 DB	10.02.2071	193538	26	25
2011 CH22	04.02.2074	100981	29	6
2012 HG2	21.07.2083	232477	27	14
2011 MD	15.06.2086	227647	28	9
2014 RS17	31.01.2090	133236	23	77
2007 YV56	02.01.2101	235924	21	213
2007 TX22	13.10.2101	107731	28	7
2009 FH	19.03.2104	105237	27	16
2013 GM3	17.04.2109	157872	26	19

Заклучение

Таким образом, астероиды, сближающиеся с Землей, разделенные на четыре группы по типам орбит (Амуры, Атоны, Аполлоны, Атиры), демонстрируют широкое разнообразие элементов орбит —

больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов. Орбиты АСЗ в большинстве своем близки к эклиптике, но встречаются и почти перпендикулярные к ней; встречаются как практически круговые орбиты, так и сильно эллиптические; как лежащие полностью внутри орбиты Земли, так и пересекающие орбиты Меркурия, Венеры, Земли и Марса. На текущий момент времени известно более 11 900 АСЗ.

Разнообразие физических размеров также является чертой АСЗ. Крупных объектов, способных нанести разрушения при столкновении в глобальном масштабе, открыто свыше 800 (больше 1 км в диаметре). Региональную катастрофу способны вызвать объекты от 100 м до 1 км, разрушения местного характера — до 100 м в диаметре. На современную эпоху известно 1 500 потенциально опасных объектов, однако событие 15 февраля 2013 г. в небе над Челябинском заставляет задуматься о необходимости переоценки понятия опасности в рамках астероидно-кометной угрозы. В рамках данного исследования выявлено 29 объектов, которые пройдут сферу тяготения Земли в ближайшее столетие. Три из них угрожают Земле региональной катастрофой и являются потенциально опасными.

Работа выполнена в рамках Программ повышения конкурентоспособности ТГУ и УрФУ.

Библиографические ссылки

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра /ред. Б. М. Шустов, Л. В. Рыжлова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — С. 348.
2. Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В. Астероидная опасность — от первых представлений до наших дней // Физика космоса: Тр. 43-й международ. студ. науч. конф., 3–7 февр. 2014 г., Екатеринбург. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — С. 237–248.
3. Симоненко А. Н. Астероиды, или Тернистые пути исследований. — М. : Наука, 1985. — С. 208.
4. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // In Asteroids, Comets, Meteors, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. — 1994. — P. 477–481.
5. *Perna D., Barucci M. A., Fulchignoni M.* The near-Earth objects and their potential threat to our planet // Astron Astrophys Rev. — 2013. — Vol. 21, iss. 65.

6. *Mainzer A., Grav T., Bauer J. et al.* NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results // *Astrophys J.* — 2011. — Vol. 743, iss. 156.
7. *Галушина Т. Ю.* К вопросу о терминологии в области астероидной опасности // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества.* — 2013. — Т. 5, вып. 3. — С. 53–56.
8. *Harris A. W.* The population of near-Earth asteroids and current survey completion // 3rd IAA planetary defense conf., Flagstaff, abstract IAA-PDC13-02-09P. — 2013.
9. *Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др.* Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрон. вестн.* — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 262–277.
10. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // *Изв. вузов. Физика.* — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89–96.
11. *Шор В. А., Чернетенко Ю. А., Кочетова О. М., Железнов Н. Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 2. — С. 131–142.
12. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Борисова Т. П. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 4. — С. 311–320.
13. *Farnocchia D., Chesley S. R., Chodasa P. W. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus.* — 2013. — Vol. 224, iss. 1. — P. 192–200.
14. *Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю.* Исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции на примере астероида 99942 Apophis // *Изв. вузов. Физика.* — 2013. — Т. 56, вып. 6/3. — С. 229–231.

МИЛЛИМЕТРОВАЯ И СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

Радиоастрономические наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах являются важнейшим средством исследования Вселенной. В настоящее время в мире имеется целый ряд крупных наземных обсерваторий этих диапазонов и создаются новые инструменты. В то же время реализуется ряд космических проектов. Что лучше? В настоящем обзоре описываются основные разработки в этой области и сравниваются возможности наземных и космических инструментов по решению актуальных задач астрофизики.

Radio astronomical observations at millimeter and submillimeter waves represent a very important tool for studies of the Universe. At the present time there are several large ground based observatories operating in these bands in the world and new facilities are constructed. At the same time some space projects are implemented. What is better? In this review we describe main developments in this field and compare capabilities of ground based and space facilities for solution of actual astrophysical problems.

Миллиметровые и субмиллиметровые антенны на Земле и в космосе: достоинства и недостатки

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия является одним из основных источников информации о Вселенной [1]. Однако миллиметровые и особенно субмиллиметровые волны сильно поглощаются атмосферой Земли. Астрономические наблюдения возможны лишь в так называемых «окнах прозрачности», которые представляют собой интервалы частот между линиями поглощения водяного пара и кислорода. Самое высокочастотное окно лежит вблизи частоты 1.5 ТГц, но даже при самых благоприятных атмосферных условиях величина пропускания в нем составляет лишь $\sim 20\%$. Это обстоятельство делает невозможными наблюдения многих важных спектральных линий атомов и молекул, а также исследования излучения континуума в этом диапазоне с поверхности Земли.

Решением проблемы является запуск субмиллиметровых телескопов в космос. В 2009 г. Европейское космическое агентство запустило аппараты Herschel [2] и Planck [3], работающие в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. С их помощью удалось получить огромное количество новой важной астрофизической информации. Следующим важным шагом в развитии космической радиоастрономии может стать российский проект «Миллиметрон», включенный в федеральную космическую программу [4, 5].

Понятно, что при современном уровне развития космических технологий размеры космических антенн много меньше, чем размеры наземных. Но антенну в космосе можно охладить до очень низких температур, что на много порядков снижает ее шумы на субмиллиметровых волнах. Это позволяет значительно повысить чувствительность телескопа, превзойдя наземные инструменты. Однако это возможно только в том случае, если собственные шумы приемной аппаратуры достаточно малы. К сожалению, в гетеродинных приемниках, которые используются для спектральных измерений с высоким разрешением, имеется так называемый квантовый шум, который на этих волнах превышает шумы даже теплой антенны, поэтому для них охлаждение антенны не дает никакого выигрыша.

Помимо наблюдений в недоступных с поверхности Земли частотных интервалах и повышения чувствительности есть еще одна причина для запуска антенны в космос. Одним из самых эффективных методов радиоастрономии является радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), которая позволяет получать рекордное угловое разрешение, необходимое для исследования очень компактных объектов, таких как активные ядра галактик, космические мазеры и пр. Для наземных антенн расстояние между антеннами интерферометра ограничено размером Земли. Если же запустить антенну в космос, то это расстояние можно увеличить во много раз, увеличивая соответственно и угловое разрешение. Несколько лет назад Россией был запущен космический радиотелескоп «Радиоастрон» диаметром 10 м, работающий на волнах от ~ 1 см до ~ 1 м [6] (проект Астрокосмического центра ФИАН). Поскольку угловое разрешение определяется отношением длины волны к длине базы, наземно-космический интерферометр, работающий на миллиметровых волнах, позволил бы еще повысить угловое разрешение. Это одна из задач проекта «Миллиметрон». Нужно, однако, иметь в виду, что интерферометр «видит» только очень компактные (сравнимые с шириной синтезированного луча) и очень яркие (поток от

которых в синтезированном луче достаточно велик) объекты. Поэтому надежды использовать такой интерферометр для исследования мелких деталей тепловых источников, к сожалению, не оправданны.

Но для интерферометра нужно по крайней мере две антенны. Учитывая сложность и дороговизну задачи, запуск двух больших космических телескопов в обозримом будущем не реален. Так что нужна наземная антенна, причем большая, поскольку чувствительность интерферометра определяется произведением чувствительностей его компонент.

Этим, конечно, не исчерпывается предназначение наземных антенн. Выше уже отмечалось, что космический телескоп сильно уступает по чувствительности крупным наземным инструментам при спектральных наблюдениях компактных (т. е. с размером меньше ширины диаграммы направленности) объектов в окнах прозрачности атмосферы. Например, ожидаемая эффективная площадь «Миллиметра» составляет около 50 м^2 , а эффективная площадь крупных наземных радиотелескопов на два порядка больше. Он также уступает им и по угловому разрешению. Поэтому до тех пор, пока человечество не научится создавать в космосе антенны такого же размера, как на Земле, наземные инструменты будут востребованы. Вопрос в том, какие задачи лучше решать на Земле, а какие в космосе.

Задачи и инструменты наземной миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

В соответствии с вышесказанным понятно, что наземные телескопы имеют значительное преимущество перед ожидаемыми в обозримом будущем космическими при спектральных наблюдениях с высоким разрешением в окнах прозрачности атмосферы достаточно компактных объектов. Диапазон размеров здесь от ~ 10 до $\sim 10^{-4}''$. Существует множество астрофизических задач, которые требуют такого рода наблюдений. В исследованиях далекой Вселенной это наблюдения линий в спектрах квазаров. Ширина линий излучения составляет обычно сотни километров в секунду. Для их обнаружения можно использовать спектрометры низкого разрешения ($R \sim 1000$) на космическом телескопе. Но для исследования профилей линий требуется более высокое разрешение. Кроме того, большой интерес

представляет изучение линий поглощения, которые возникают в облаках на луче зрения (например, [7]). Их ширина мала, и здесь необходимы спектрометры высокого разрешения.

Исследования межзвездной среды в более близких галактиках также требуют наблюдений с высоким спектральным и угловым разрешением. Например, угловой размер комплекса звездообразования размером 10 пк на расстоянии 1 Мпк составляет примерно $2''$. Его строение можно наиболее эффективно исследовать с помощью наземных интерферометров. То же самое можно сказать об изучении молодых остатков сверхновых. Пример такого исследования SN1987A в Большом Магеллановом Облаке известен (например, [8, 9]).

При исследованиях объектов нашей Галактики наземные телескопы в условиях конкуренции с космическими будут незаменимы, в частности, при изучении близких окрестностей протозвезд и молодых звезд, протопланетных дисков и т. п. Объект размером 1 000 а. е. на расстоянии 1 кпк имеет угловой размер около $1''$. В этом случае вывод тот же: для его исследования нужны наземные инструменты.

Есть много других галактических объектов, в изучении которых наземные телескопы могут сыграть если не определяющую, то очень важную роль. Среди них даже сверхмассивная черная дыра в центре Галактики. Сеть наземных миллиметровых телескопов, объединенных в Телескоп Горизонта Событий (ЕНТ) имеет угловое разрешение, близкое к ожидаемому размеру этого объекта.

Наконец, наземная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия, конечно, важна и для исследований Солнечной системы. Можно привести много примеров впечатляющих результатов наблюдений Солнца, планет, спутников планет и комет в этих диапазонах с высоким угловым разрешением. Они позволяют изучать строение, химический состав и динамику атмосфер и пр.

В настоящее время в мире имеется немало антенн, способных работать на волнах миллиметрового диапазона длин волн. Даже крупнейшие полноповоротные антенны, такие как 100-м радиотелескоп в Эффельсберге и 100-м радиотелескоп НРАО в Грин Бэнк (Green Bank Telescope), могут работать на волнах до 3–8 мм, хотя их эффективность на этих волнах очень мала. Мы здесь рассмотрим в основном те инструменты, которые работают на волнах ~ 1 мм и короче.

Крупнейшей из одиночных антенн, удовлетворяющих этому условию, пока остается 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM), который расположен на высоте 2920 м в горах Сьерра Невада вблизи вершины Pico Veleta (3394 м), в 50 км от Гранады (Испания) [10]. В основе конструкции антенны — принцип гомологических деформаций. Среднеквадратичная ошибка поверхности главного зеркала составляет 70 мкм (точность изготовления панелей — 26 мкм). Для уменьшения температурных деформаций используется тепловая изоляция внешней стороны зеркала. Радиотелескоп используется на частотах до 350 ГГц (длина волны 0.8 мм). Коэффициент использования апертуры меняется от 61 ± 3 % на частоте 88 ГГц до 16 ± 4 % на частоте 350 ГГц. Усиление антенны максимумально при угле возвышения 43° и уменьшается с отклонением от этого угла, особенно сильно на высоких частотах. Ширина диаграммы направленности меняется от $28''$ на частоте 86 ГГц до $8''$ на частоте 345 ГГц. Среднеквадратичная точность наведения составляет $2-3''$, точность слежения при ветре до 15 м/с — $1''$. Радиотелескоп оснащен 4-диапазонным (3, 2, 1.3, и 0.9 мм) двухполяризационным приемником EMIR (элементы всех диапазонов размещены в одном криостате). Его оптическая схема позволяет вести прием четырьмя каналами одновременно. Кроме того, имеется многолучевой (2×9) СИС приемник HERA, работающий в диапазоне 215–272 ГГц, и матрицы болометров.

В недалеком будущем может заработать более крупный радиотелескоп этого диапазона — 50-м Большой миллиметровый радиотелескоп (LMT) в Мексике [11]. Радиотелескоп расположен на высоте 4600 м на горе Серро Негра в Мексике. Строительство радиотелескопа в настоящее время заканчивается. Установлены три кольца панелей из пяти, так что сейчас диаметр заполненной части апертуры 32 м. Ожидаемая точность поверхности антенны 75 мкм. Проведены первые тестовые наблюдения на волнах до 1.1 мм.

Еще более амбициозный проект создания 70-м радиотелескопа был начат почти 30 лет назад в СССР, но после распада СССР строительство было заморожено. Согласно проекту 70-м радиотелескоп на плато Суффа должен работать на волнах до ~ 1 мм. В настоящее время решается вопрос возобновления строительства радиотелескопа, а также ведутся работы по доработке проекта телескопа с учетом современных технологических возможностей. Он должен стать

крупнейшим инструментом коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн в мире с эффективной площадью, сравнимой с суммарной площадью всех антенн интерферометра ALMA.

Имеется несколько антенн размером 10–15 м, работающих на волнах ~ 1 мм и короче. К ним относятся, в частности, телескопы JCMT, APEX, CSO, NHT, SPO.

Помимо одиночных антенн к настоящему времени построено несколько антенных решеток, работающих на этих волнах. Крупнейшей из них является Большая Миллиметровая Решетка в Атакаме (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array — ALMA), строительство которой практически завершено в настоящее время на высоте 5 000 м в пустыне Атакама в Чилийских Андах совместными усилиями ряда организаций США, Европы и Японии. Этот инструмент состоит из 54 12-м и 12 7-м антенн с точностью поверхности около 20 мкм, что в сочетании с высокой прозрачностью атмосферы в этом районе обеспечивает рабочий диапазон до ~ 900 ГГц. Максимальная база между антеннами интерферометра около 15 км, что обеспечивает угловое разрешение до нескольких миллисекунд дуги. Благодаря огромной суммарной собирающей площади антенн достигается рекордная чувствительность.

Очень эффективно работают и другие интерферометры этого диапазона — PdBI, CARMA, SMA. Планируется удвоить число антенн интерферометра PdBI, что сделает его крупнейшим миллиметровым телескопом в северной полусфере. Обновленный инструмент будет называться NOEMA.

Как уже упоминалось выше, одиночные антенны и антенные решетки могут объединяться в глобальную интерферометрическую сеть.

Задачи космической миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Космический телескоп обеспечивает наблюдения в континууме и наблюдения со средним спектральным разрешением с беспрецедентной чувствительностью, а также наблюдения в недоступных с поверхности Земли участках спектра. Кроме того, в интерферометрическом режиме можно получить чрезвычайно высокое угловое разрешение. Этими возможностями определяются приоритетные задачи для космической обсерватории. Обзор научных задач обсерватории «Миллиметр» представлен в работе [12].

В области исследований межзвездной среды наиболее перспективными объектами будут холодные (10–20 К) газопылевые сгустки, которые трудно обнаружить менее чувствительными средствами, «горячие ядра» и высокоскоростные биполярные истечения, диффузные облака, субмиллиметровые мазеры, межзвездная среда других галактик. Наблюдательные программы могут включать в себя наблюдения недоступных с поверхности Земли переходов ряда атомов и молекул (в частности, С II, О I, HD, H₂O и др.), поиск новых молекул (в частности, интересной задачей представляется поиск HeH⁺), исследования излучения пыли. Важные результаты в этой области уже были получены на субмиллиметровой космической обсерватории Herschel. Значительный прогресс может быть достигнут с помощью «Миллиметрона».

Другие возможные задачи перспективной космической обсерватории «Миллиметрон» в режиме одиночного телескопа эксплуатируют главным образом ее ожидаемую высокую чувствительность в болометрическом режиме. К ним относятся исследования звезд и экзопланет, пульсаров, изучение образования и эволюции галактик, исследование космологических объектов и развитие космологической стандартной модели. В режиме интерферометра планируется изучение ближайших окрестностей черных дыр и проверка общей теории относительности, изучение аккреционных потоков и струйных выбросов (джетов) вблизи горизонта событий черных дыр.

Заключение

Появление все более совершенных космических телескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн отнюдь не обесценивает наземные наблюдения в этих диапазонах. До тех пор пока человечество не научится создавать в космосе антенные системы такого же размера, как на Земле, наземные инструменты будут иметь преимущества в решении многих важных задач астрофизики. Наилучшие результаты могут быть достигнуты за счет комплексного использования как наземных, так и космических инструментов.

Работа частично поддержана грантом в рамках соглашения от 27 августа 2013 г. 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ, а также грантом РФФИ 13-02-12220-офи_м.

Библиографические ссылки

1. *Зинченко И. И.* Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, № 8–9. — С. 641–659.
2. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1.
3. *Tauber J. A., Planck Collaboration.* The Planck mission // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* — 2012. — Vol. 83. — P. 72.
4. *Wild W., Kardashev N. S., Likhachev S. F. et al.* Millimetron – a large Russian-European submillimeter space observatory // *Experimental Astronomy.* — 2009. — Vol. 23. — P. 221–244.
5. *Смирнов А. В., Барышев А. М., де Бернардис П. и др.* Текущий этап разработки приемного комплекса космической обсерватории «Миллиметрон» // Изв. вузов. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 8–9. — С. 617–630.
6. *Александров Ю. А., Андреев В. В., Бабакин Н. Г. и др.* Радиоастрон (проект «Спектр-Р») — радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // *Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина.* — 2011. — № 3. — С. 11–19.
7. *Muller S., Combes F., Guélin M. et al.* An ALMA Early Science survey of molecular absorption lines toward PKS 1830-211. Analysis of the absorption profiles // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 566. — P. A112. 1404.7667.
8. *Lakićević M., van Loon J. T., Patat F. et al.* The remnant of SN 1987A revealed at (sub-)mm wavelengths // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. L8. 1107.1323.
9. *Kamenetzky J., McCray R., Indebetouw R. et al.* Carbon Monoxide in the Cold Debris of Supernova 1987A // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 773. — P. L34. 1307.6561.
10. *Wild W.* — The 30m manual: A handbook for the IRAM 30m telescope.
11. *Irvine W. M., Schloerb F. P.* The Large Millimeter Telescope- El Gran Telescopio Milimetrico // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 37. — P. 652.

12. Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // Успехи физических наук. — 2014. — Т. 184, № 12.

ЗА ДИФРАКЦИОННЫМ ПРЕДЕЛОМ, ИЛИ... КАК РАБОТАЕТ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

В обзорной лекции представлены начальные сведения о методе доплеровской томографии, используемом при исследовании взаимодействующих двойных звезд, а также представлены результаты наиболее свежих работ, соединяющих в себе использование метода доплеровской томографии и результаты численного газодинамического моделирования. В частности, представлен обзор работы, в которой с помощью томографии и численного моделирования удалось выяснить, какие именно элементы течения в молодых двойных звездах типа Т Тау отвечают за формирование эмиссионных спектральных линий бальмеровской серии водорода. Также представлена самая современная работа по определению механизма формирования двугорбых кривых блеска в катаклизмических переменных звездах типа WZ Sge, где сочетание метода доплеровской томографии и численного газодинамического моделирования позволило впервые в мире увидеть аккреционный диск тесной двойной системы в динамике и выявить физические процессы, ответственные за наблюдательные проявления звезд этого класса.

In my lecture I am going to talk on the basic principles of Doppler tomography, a technique, used to study interacting binary stars and present several recent results of our research. In particular, I am going to talk on the work where we managed to find the elements of the flow pattern in a young T Tau binary system, mainly contributing to the formation of emission Balmer series' lines. Besides, I am going to present the very new results of our research that allow us to explain the mechanism of formation of the double-humped light curves in cataclysmic variable systems of the WZ Sge sub-type.

Введение

Особое место среди двойных звезд занимают взаимодействующие двойные системы (ВДС), в которых происходит обмен веществом

между компонентами системы. Такие объекты представляют собой уникальные естественные лаборатории для исследования поведения вещества в экстремальных условиях, которые никогда не могут быть воспроизведены в земных условиях.

Предположение о том, что в подобных системах присутствуют газовые потоки, было впервые выдвинуто в работе Струве [1] для объяснения пекулярных особенностей спектров системы β Луг. Современные наблюдения позволяют с уверенностью говорить о том, что газодинамическая структура течения в ВДС состоит из потоков, струй, аккреционных дисков, межкомпонентных газовых оболочек и других подобных структур (см., например, [2]). Актуальность исследования процессов массопереноса в ВДС обусловлена необходимостью их учета при рассмотрении эволюции таких систем. Кроме того, предполагается, что большинство наблюдательных проявлений ВДС, характеризующихся выделением большого количества энергии, обусловлено процессами массопереноса и последующей аккреции в этих объектах.

ВДС имеют малые размеры и достаточно далеки от Солнца, что делает почти невозможным прямые наблюдения газодинамических структур. Классическим методом исследования структуры течения вещества в ВДС является анализ кривых блеска, а также исследование спектральных особенностей. С развитием астрономической техники в недавнее время были получены коронографические изображения отдельных молодых двойных систем типа Т Тау. Однако это редкие и, можно сказать, уникальные случаи, когда удалось обнаружить относительно близкую к Солнцу молодую двойную звезду, которую способны разрешить современные большие телескопы. Что касается проэволюционировавших катаклизмических переменных звезд, то ни с одним самым совершенным астрономическим инструментом, а также ни с одним из планируемых инструментов разрешить подобную систему как двойную — а уж тем более увидеть какие бы то ни было газодинамические элементы — не представляется возможным.

Однако в 1988 г. был предложен метод так называемого непрямого картирования, метод доплеровской томографии [3], позволяющий получать карты интенсивности излучения в определенных спектральных линиях в пространстве скоростей — так называемые доплеровские томограммы. Такие карты в некотором смысле более наглядны и лучше поддаются интерпретации, чем исходные спектры.

Существенный прогресс в интерпретации доплеровских томограмм произошел в последние годы, когда, с развитием вычислительной техники и численных методов моделирования физических процессов, появились численные модели газодинамики вещества в ВДС, которые позволяют строить теоретические (синтетические) доплеровские карты. Совместное использование методов доплеровской томографии и численного моделирования представляет собой мощный инструмент исследования газодинамической картины течения в ВДС.

Принципы доплеровской томографии

Метод доплеровской томографии [3] позволяет получать распределение интенсивности излучения в определенной спектральной линии в пространстве скоростей.

Математический формализм томографической задачи был сформулирован австрийским математиком И. Радона в 1917 г. [4]. Преобразование Радона представляет собой интегральное уравнение Фредгольма первого рода типа свертки. В случае доплеровской томографии преобразование Радона записывается в следующем виде (для простоты приведен двумерный случай и отсутствует шум):

$$f(V, \phi) = \int \int I(V_x, V_y) g(V - V_r) dV_x dV_y, \quad (1)$$

где $f(V, \phi)$ — профиль линии в зависимости от фазы двойной звезды; $V_r = \gamma - V_x \cos 2\pi\phi + V_y \sin 2\pi\phi$ — лучевая скорость элемента течения во вращающейся системе координат; γ — лучевая скорость центра масс системы относительно Солнца; ϕ — фаза двойной; $I(V_x, V_y)$ — распределение интенсивности в плоскости V_x, V_y (искомая доплеровская томограмма); $g(V - V_r)$ — функция рассеяния точки, которая в идеальном случае является дельта-функцией, а в реальном приборе может быть, например, дифракционной функцией Эйри.

Рассмотрим процесс формирования профиля эмиссионной линии в аккреционном диске. Для простоты предположим, что скорости в диске в точности соответствуют кеплеровским, и будем рассматривать двумерный случай, т. е. только экваториальную плоскость системы. На рис. 1 схематически показано формирование профиля линии при наблюдении системы на фазе 0.25. Фазы отсчитываются по часовой стрелке от момента, когда звезда-донор полностью затмевает звезду-аккретор и центры звезд лежат на луче зрения.

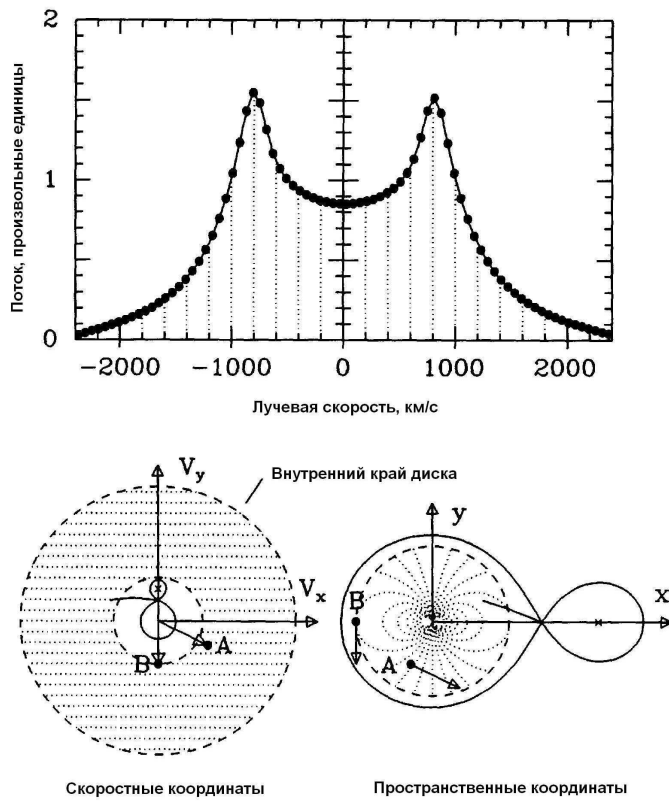


Рис. 1. Схематическое изображение тесной двойной системы и аккреционного диска в пространственных и скоростных координатах (нижняя панель) и принцип формирования профиля спектральной линии (верхняя панель)

Предполагается, что система вращается против часовой стрелки. В нижней части рисунка диск представлен в пространственной (справа) и скоростной (слева) системах координат. Внутри диска в пространственной системе координат тонкими штриховыми линиями показаны кривые равных лучевых скоростей (каждой кривой соответствует своя скорость). То есть точки, попадающие на эти кривые, имеют одинаковые лучевые скорости и дают вклад в одну и ту же частоту в спектральной линии. Видно, что длина кривых разная.

Так, например, кривая на которой лежит точка B , длиннее остальных. Следовательно, если предположить, что все точки диска имеют одинаковую интенсивность, то при формировании профиля на частоте, соответствующей лучевой скорости данной кривой, появится пик. Очевидно, что для схемы, изображенной на рис. 1, вследствие симметрии аналогичный пик появится на частоте, соответствующей равной по модулю и противоположной по знаку лучевой скорости. Таким образом формируется двугорбый профиль линии.

На рис. 1 видно, что кривые равных лучевых скоростей в скоростных координатах превращаются в прямые, параллельные лучу зрения. То есть профиль спектральной линии получается интегрированием интенсивностей вдоль каждой такой прямой, что соответствует процессу проецирования в томографии. Таким образом, профиль спектральной линии можно рассматривать как проекцию распределения интенсивности в скоростных координатах.

В силу центральной симметрии схемы, показанной на рис. 1, профили линий будут одинаковыми при наблюдении на любой фазе. Реальные диски не обладают центральной симметрией, и, более того, скорости в них могут отличаться от кеплеровских вследствие различных возмущений. На рис. 2 схематически показано, как будет изменяться профиль спектральной линии в зависимости от фазы наблюдений при наличии в диске некоторого образования. Видно, что в спектральной линии появляется дополнительный пик, перемещающийся по профилю в зависимости от фазы наблюдения.

Накапливая в процессе наблюдений профили линий со всех углов зрения, мы получаем последовательную спектрограмму. На рис. 3 в качестве иллюстрации показаны последовательные спектрограммы из работы [5], представляющие собой зависимость потока излучения в определенной линии от лучевой скорости и фазы двойной звезды. Если те структуры, которые формируют упомянутые выше дополнительные пики на профиле, покоятся в системе координат, вращающейся вместе с двойной звездой, то пики в зависимости от фазы будут перемещаться по профилю не хаотически. Они будут формировать на последовательных спектрограммах так называемые «S-волны». Эти «S-волны» хорошо видны на рис. 3.

Таким образом, из наблюдений мы получаем функцию $f(V, \phi)$ (последовательная спектрограмма), из калибровок приборов нам известна функция $g(V - V_r)$. Эти функции являются исходными данными в задаче доплеровской томографии.

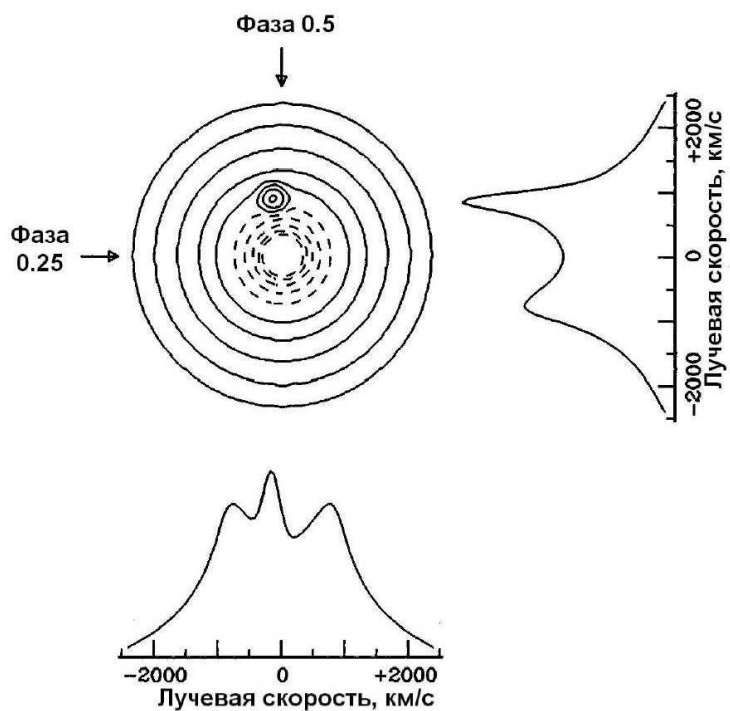


Рис. 2. Принцип формирования особенностей на профиле спектральной линии

Решая уравнение (1) относительно неизвестной функции $I(V_x, V_y)$, мы получаем доплеровскую томограмму, т. е. распределение интенсивности излучения в пространстве скоростей. Пример доплеровской томограммы показан на рис. 4 (томограмма взята из работы [5]).

Необходимо отметить, что задача доплеровской томографии основана на предположении о том, что газовые потоки в ВДС прозрачны для излучения в наблюдаемых эмиссионных линиях. В противном случае форму профиля линии уже нельзя будет представить простым соотношением вида (1). Это достаточно сильное ограничение, но практика применения доплеровской томографии показывает, что до определенной степени точности это условие действительно выполняется.

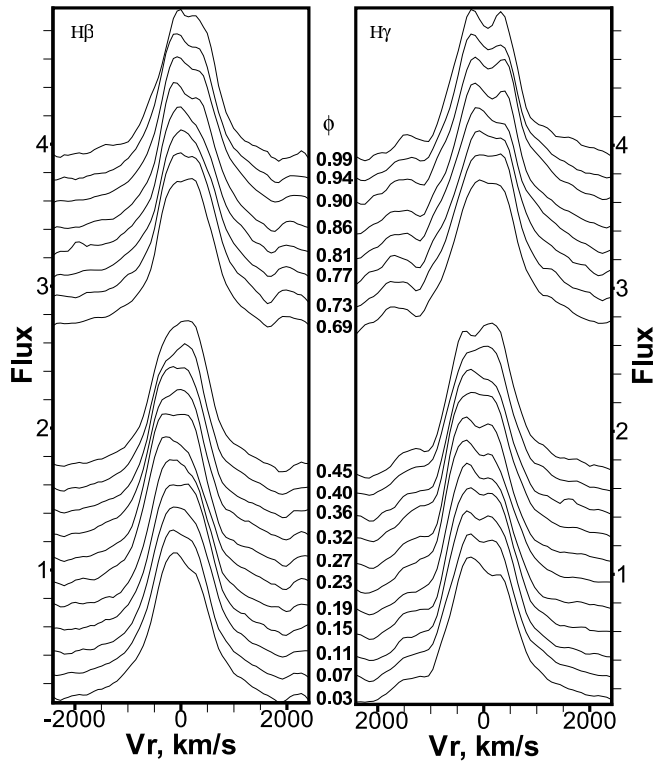


Рис. 3. Последовательная спектрограмма в линиях H_β и H_γ [5]

Главной проблемой, с которой сталкивается исследователь при работе с доплеровскими томограммами, является то, что однозначного перехода из поля скоростей в пространственные координаты не существует. Это обусловлено тем фактом, что две точки в пространстве координат, сколь угодно сильно удаленные друг от друга, могут иметь одинаковые компоненты скорости газа и давать вклад в одно и то же место на доплеровской томограмме. В данном случае единственным способом разрешить задачу является сравнение доплеровских томограмм с результатами численного газодинамического моделирования, о которых, собственно, и пойдет речь.

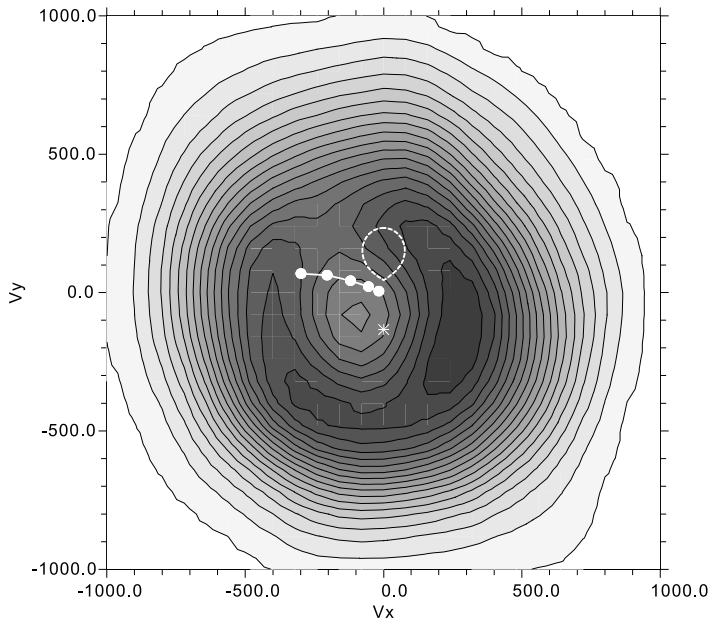


Рис. 4. Доплеровская томограмма системы SS Cygni в линии H_γ [5]. Штриховой линией на рисунке показана полость Роша донора. Сплошная линия с кружками соответствует баллистической траектории частицы, вылетающей из внутренней точки Лагранжа. Звездочкой обозначено положение аккректора

Доплеровская томография молодых двойных звезд

Одним из ярких примеров того, как совместный анализ доплеровских томограмм и результатов численного моделирования помогает получить детальные сведения о структуре течения во взаимодействующих двойных звездах, является проведенное нами в 2014 г. исследование молодой двойной системы V 4046 Sgr. В работе были использованы спектры звезды V 4046 Sgr, полученные Стемпельсом и Гамом на телескопе VLT [6]. «Сырые» данные наблюдений были получены из архива ESO [7] и обработаны в программном пакете ESO-MIDAS. По профилям эмиссионных линий серии Бальмера построены доплеровские томограммы для исследуемой звезды.

Было проведено численное газодинамическое моделирование звезды, которое показало, что вследствие сверхзвукового движения компонент перед ними образуются отошедшие ударные волны. Два потока газа вдоль этих волн во внутреннюю область системы, сталкиваясь, образуют стоячую ударную волну-перемычку.

Совместный анализ результатов численного моделирования и доплеровских томограмм позволил определить, какие элементы течения отвечают за формирование эмиссионных линий в спектре звезды. Оказалось, что эмиссионные линии серии Бальмера формируются в основном в потоках газа к компонентам системы вдоль стоячей ударной волны-перемычки, а также в потоках вещества вдоль отошедших ударных волн, а не в потоках к точкам Ланранжа L1 и L2, как это предполагали Стемпельс и Гам [6].

Данная работа является первым примером применения метода доплеровской томографии к звездам типа Т Тельца. Ранее этот метод не применялся к звездам данного класса, однако успех применения доплеровской томографии к звезде V 4046 Sgr дает основания полагать, что ее можно и в дальнейшем применять для исследования газодинамики молодых двойных звезд.

Механизм формирования кривых блеска катаклизмических переменных звезд WZ Sge

Недавно по результатам численного моделирования газодинамики в тесной двойной системе V455 Andromedae, принадлежащей к подклассу катаклизмических переменных звезд типа WZ Sge, нами был предложен механизм формирования характерных двугорбых (а иногда и многогорбых) кривых блеска этих объектов [8]. Суть модели состоит в том, что горбы на кривой блеска возникают вследствие последовательного усиления ударных волн в аккреционном диске в результате взаимодействия этих волн с прецессионной волной плотности.

Для проверки предложенной модели в сентябре 2014 г. были проведены одновременные спектральные и фотометрические наблюдения катаклизмической переменной V455 Andromedae, принадлежащей к подклассу WZ Sge. Фотометрия производилась в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ на 70-сантиметровом телескопе Кассегрен 700, оснащенный двухканальным фотометром. Спектральные наблюдения проводились в обсерватории пика Терскол (ТФ ИНАСАН) на телескопе Цейсс-2000 с помощью подвес-

ного спектрометра MMCS с разрешением около 1800. С использованием профилей эмиссионной линии H_α , полученных при наблюдениях в десяти различных интервалах орбитальных фаз 0.0–0.5, 0.1–0.6, . . . 0.9–1.4, построено 10 доплеровских томограмм системы V455 And. Анализ полученных томограмм показал, что наибольшие поярчения определенных участков возникают на томограммах, построенных по профилям, наблюдавшимся в интервалах фаз 0.2–0.7 и 0.8–1.3. Расположение участков, в которых наблюдаются поярчения, позволяет отождествить их с «горячей линией» — ударной волной, возникающей в результате взаимодействия околосферического гало со струей вещества из внутренней точки Лагранжа, и отошедшей ударной волной, возникающей вследствие сверхзвукового движения аккректора и диска в газе межкомпонентной оболочки. При этом на томограммах, построенных по профилям, полученным в других интервалах фаз, те же самые участки не выделяются особой яркостью. В этих же самых интервалах орбитальных фаз (0.2–0.7 и 0.8–1.3) наблюдаются горбы на кривых блеска, полученных одновременно со спектрами.

Кроме того, по результатам численного моделирования нами были построены синтетические профили эмиссионных спектральных линий. С использованием этих профилей мы рассчитали синтетические доплеровские томограммы системы V455 And в тех же интервалах орбитальных фаз, что и наблюдательные томограммы. Сравнение поведения синтетических и наблюдательных томограмм выявило их поразительное сходство, что дает нам все основания полагать, что предложенная в [8] модель формирования кривых блеска верна и горбы на них действительно возникают вследствие усиления определенных ударных волн при взаимодействии с прецессионной волной плотности.

Заключение

В обзорной лекции даны основы метода доплеровской томографии, а также обсуждаются новейшие результаты исследований взаимодействующих двойных звезд с использованием этого метода и численного газодинамического моделирования. С целью экономии места рисунки, касающиеся работ по таким системам, как V 4046 Sgr и V455 And, в обсуждении их результатов не публикуются. Однако вся наглядная информация будет представлена в презентации во время доклада.

Работа выполнена при поддержке гранта программы Фулбрайта в России, гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых кандидатов и докторов наук МК-2432.2013.2, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (номер проекта RFMEFI59114X0003).

Библиографические ссылки

1. *Struve O.* The spectrum of β Lyrae // *Astrophys. J.* — 1941. — Vol. 93. — P. 104.
2. *Warner B.* Cataclysmic Variable Stars. — Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2003.
3. *Marsh T. R., Horne K.* Images of accretion discs. II - Doppler tomography // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1988. — Vol. 235. — P. 269.
4. *Radon J.* Uber die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten // *Berichte Sachsische Akademie der Wissenschafte.* — 1917. — Vol. 29. — P. 262–277.
5. *Бисикало Д. В., Кононов Д. А., Кайгородов П. В. и др.* Структура течения вещества в системе SS Cyg в спокойном состоянии по результатам сравнения наблюдаемых и синтетических доплеровских томограмм // *Астрон. журн.* — 2008. — Т. 85. — С. 356–365.
6. *Stempels H. C., Gahn G. F.* The close T Tauri binary V 4046 Sagittarii // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 421. — P. 1159–1168.
7. ESO Science Archive: <http://archive.eso.org/cms.html>.
8. *Кононов Д. А., Бисикало Д. В., Пузин В. Б. и др.* О возможном механизме формирования горбов на орбитальных кривых блеска в катаклизмических переменных звездах типа WZ Sge // *Астрон. журн.* — В печати.

СОВРЕМЕННАЯ НАЗЕМНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ: НОВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ И ПРОЕКТЫ

В докладе будет представлен обзор современных новых и проектируемых наземных радиотелескопов: ALMA (Atacama Large Millimeter Array), FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope), LOFAR (LOw-Frequency Array), LWA (Long Wavelength Array), ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder), MeerKAT (Karoo Array Telescope), SKA (Square Kilometre Array), LMT (Large Millimeter Telescope), SRT (Sardinia Radio Telescope) и др. Обсуждаемые телескопы покрывают весь частотный диапазон, доступный для наблюдений с поверхности Земли. Их ожидаемые параметры по всем показателям превышают все существующие радиотелескопы, исследуемые объекты — весь перечень астрофизических объектов Вселенной. В докладе также будут затронуты и организационные моменты этих проектов: научные организации и страны-участники, сроки и этапы введения в эксплуатацию.

The report will provide an overview of the new ground-based radio telescopes and new projects: ALMA (Atacama Large Millimeter Array), FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope), LOFAR (LOw-Frequency Array), LWA (Long Wavelength Array), ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder), MeerKAT (Karoo Array Telescope), SKA (Square Kilometre Array), LMT (Large Millimeter Telescope), SRT (Sardinia Radio Telescope) and others. The telescopes cover the entire frequency range observable from the surface of the Earth. Their expected parameters (resolution, sensitivity, effective area et al.) exceed all of them for the modern radio telescopes. In the report will be discussed other details of these projects too: science case, organizations and countries involved in the project, dates and stages of commissioning.

**НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ, ОСНОВАННАЯ
НА ОБЗОРАХ ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ МАЗЕРОВ**

В последние несколько лет было открыто множество возможностей по использованию систематических обзоров мазеров SiO и H₂O для решения проблем в различных областях современной астрономии, таких как звездная эволюция, галактическая динамика, накачка мазеров и т. д. Мазерное излучение — это излучение молекулярной линии в миллиметровом диапазоне длин волн, которое значительно усилено нетепловыми процессами и которое может быть задетектировано в направлении различных астрофизических объектов с низкотемпературной молекулярной составляющей. Поскольку мазерное излучение усиливается нетепловыми процессами, оно обычно не используется напрямую для оценки фундаментальных физических параметров, таких как температура и плотность. Тем не менее, поскольку мазерное излучение имеет чрезвычайно большую яркость и оно свободно от межзвездного поглощения, наблюдения мазерного излучения могут вносить существенный вклад в изучение важных феноменов в различных областях современной астрономии. В этой лекции будет дано обобщение тех феноменов, которые были обнаружены в последнее десятилетие при систематических обзорах мазерных источников SiO и H₂O. В частности, будет уделено внимание темам, связанным с мазерными источниками в проэволюционировавших звездах, а именно в AGB (асимптотическая ветвь гигантов) и пост-AGB звездах. Также будут предложены темы для совместных исследований с молодыми российскими учеными, которые могут быть заинтересованы в работе в данной области астрономии.

In the last several years, we have been exploring possibilities about how systematic surveys of SiO and H₂O maser sources can be utilized to tackle unsolved problems in various fields of modern astronomy, such as stellar evolution, galactic dynamics, maser pumping etc. Maser emission is molecular line emission in millimeter-wavelengths, which is strongly amplified by non-thermal processes, and it is ubiquitously detectable toward various astrophysical objects with low temperature molecular components. Since maser emission is amplified by non-thermal processes, usually it does not seem to be directly used for deriving fundamental physical parameters, such as temperature and density. However, on the other hand, since maser emission exhibits enormously large brightness and it is free from interstellar extinction, observations of maser emission could have often contributed to finding important phenomena in various fields in modern astronomy. In this talk, I summarize what kinds of phenomena we have found in the last decade through our systematic surveys of SiO and H₂O maser sources. Particularly in this talk, I focus on topics related to maser sources of evolved stars, such as AGB (asymptotic giant branch) and post-AGB stars. I also suggest possible collaborations with Russian young researchers, who may be interested in the field.

М. Б. Нечаева¹, И. Шмелд²

¹Научно-исследовательский радиофизический институт,

²Вентспилсский международный радиоастрономический центр

**РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОВОДИВШИЕСЯ
В ВЕНТСПИЛСКОМ МЕЖДУНАРОДНОМ
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОМ
ЦЕНТРЕ В 2010—2014 гг.**

Дается обзор работ проведенных в Вентспилсском международном радиоастрономическом центре в области исследования космического мусора, орбит навигационных ИСЗ и земной ионосферы с помощью методов РСДБ.

An overview of efforts made in Ventspils International Radio Astronomy Centre in the field of survey of the space debris, orbits of navigation satellites and terrestrial ionosphere using VLBI techniques is given.

Введение

В первые годы после создания Вентспилсского международного радиоастрономического центра (VIRAC) определился круг научных задач, в том числе экспериментальных, которые предполагалось решать с помощью 32-метрового радиотелескопа, расположенного в Ирбене. В числе этих задач — задача развития метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ).

Первые радиоинтерферометрические эксперименты по приему сигналов удаленных космических источников и солнечного радиоизлучения были проведены в 1999 г. с участием ирбенского радиотелескопа и российских антенн. Позже, в 2007 и 2008 гг., РСДБ-пункт Ирбене включился в международные радиолокационные эксперименты по исследованию объектов космического мусора в составе международной низкочастотной РСДБ-сети «Low Frequency VLBI Network», включающей радиотелескопы в России, Украине, Италии, Китае [1].

Тогда же были заложены основы сотрудничества с Научно-исследовательским радиофизическим институтом (ФГБНУ НИР-ФИ, г. Нижний Новгород, Россия), Национальным центром управ-

ления и испытания космических средств (НЦУИКС, г. Евпатория, Крым) и Радиоастрономическим институтом Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ, г. Харьков, Украина). Целью совместных работ являлось развитие радиоинтерферометрических методов для решения ряда научных и прикладных задач, разработка аппаратуры и программного обеспечения для приема, регистрации и обработки информации.

В 2009 г. VIRAC получил финансовую поддержку Европейского социального фонда на развитие радиоастрономических исследований в рамках проекта «Технологии приема, передачи и обработки сигналов, относящиеся к искусственным спутникам Земли». Задача уточнения траекторий движения объектов космического мусора методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой стала одним из направлений этого проекта. Были продолжены международные радиоинтерферометрические эксперименты по РСДБ-локации и поставлены новые задачи, которые выполнялись совместно с НИРФИ. В программы экспериментов включены следующие работы:

- РСДБ-локация объектов космического мусора и астероидов, сближающихся с Землей;
- разработка РСДБ-метода исследования вспышечного радиоизлучения Солнца;
- прием сигналов навигационных космических аппаратов для уточнения их положения;
- исследование ионосферы в спокойном и искусственно возмущенном состоянии методом радиопросвечивания.

Исследование параметров движения объектов в околоземном космическом пространстве методом РСДБ-локации

Создание и развитие средств обнаружения объектов в околоземном космическом пространстве и определения их орбит является важной задачей для решения проблемы космической безопасности. Естественным дополнением к хорошо разработанным и эффективным оптическим системам наблюдений являются радиолокационные средства. Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, обладающей высоким угловым разрешением, в комбинации с радиолокацией (метод РСДБ-локации) может успешно использоваться для уточнения параметров орбит космических объектов (КО), обнару-

женных оптическими инструментами [2–4]. В отличие от прочих методов метод РСДБ-локации позволяет полностью решить координатную задачу, т. е. одновременно определить радиальную скорость, расстояние до КО, его угловые координаты и угловые скорости.

С 2010 г. VIRAC принимал участие в нескольких радиолокационных экспериментах. В качестве объектов исследования выбирались ступени ракет-носителей, отработавшие ресурс космические аппараты, фрагменты космического мусора, возникшие при разрушении аппаратов Iridium, Cosmos, Fengyun [5].

В экспериментах был задействован планетный локатор — 70-метровый радиотелескоп, расположенный в г. Евпатория (НЦУИКС) и оборудованный мощным передатчиком на частоту 5 ГГц. Антенный комплекс, включающий антенны Латвии, Италии и Китая, принимал отраженный от объекта сигнал. Важным этапом радиоинтерферометрического эксперимента является обработка зарегистрированных сигналов. В VIRAC в последние годы разрабатывался собственный коррелятор, предназначенный для обработки данных радиолокационных экспериментов. Усовершенствованные алгоритмы, созданные для обработки шумовых сигналов, позволят ускорить процесс получения результата и поставить процесс обработки на современный уровень. Отдельные функции коррелятора были отлажены в локационных экспериментах. Обработка данных — корреляция и спектральный анализ — осуществлялись также в центре обработки в НИРФИ с помощью новой версии коррелятора НИРФИ-4.

Процедура обработки заключается в корреляционном и спектральном анализе полученной информации и выполняется в несколько этапов:

- автокорреляция сигнала, зарегистрированного в каждом приемном пункте;
- режим бистатической локации;
- режим РСДБ.

В режиме бистатической локации выполняется корреляция сигнала передатчика и сигнала, отраженного от КО и принятого в одном из приемных пунктов. При этом измеряется доплеровский сдвиг частот принятого сигнала относительно излученного, который обусловлен радиальной скоростью движения объекта на трассе «передатчик—КО—приемник». Измерение частоты максимума спектра мощности сигнала интерферометра позволяет определить частотный сдвиг Доплера, который зависит от радиальной скорости движения КО относительно передающего и приемного пунктов. В ре-

жиме РСДБ выполняется перемножение сигналов, зарегистрированных в приемных пунктах РСДБ-комплекса, и измеряется частота интерференции, зависящая от угловой скорости объекта. В случае локации КО квазишумовым (линейно-частотно-модулированным сигналом) в данном режиме измеряется разность времен распространения сигнала от КО до двух приемных радиотелескопов (пространственная задержка), которая определяется угловыми координатами исследуемого объекта.

В результате обработки экспериментальных данных для ряда объектов космического мусора с высокой точностью измерены значения доплеровских сдвигов частоты отраженных сигналов относительно передаваемого монохроматического зондирующего сигнала. Анализ показал, что данные РСДБ-локации позволяют в 7–10 раз уменьшить неопределенность орбит объектов, предварительно измеренных оптическими средствами.

Одним из наиболее интересных РСДБ-экспериментов, в котором принимал участие VIRAC, был эксперимент по РСДБ-локации астероида. 15 февраля 2013 г. в 19:24 UT астероид 2012 DA14 (теперь он получил окончательное название 367943 Duende), размеры которого оцениваются величинами от 30 до 80 м, приблизился к Земле на минимальное расстояние 27 700 км. Так как момент сближения астероида с Землей был известен заранее, многими исследовательскими группами была использована возможность для отработки методов исследования характеристик малых небесных тел и оценки параметров их движения. В момент пролета астероида кроме оптических наблюдений проводились радиолокационные эксперименты с использованием локаторов Голдстоуна, Хайстека и EISCAT [6–9]. Нами был проведен эксперимент по РСДБ-локации [10, 11].

Локация объекта осуществлялась с помощью передающего комплекса РТ-70, Евпатория (НЦУИКС), в режиме непрерывного излучения квазишумового сигнала на частоте 5 ГГц. Прием сигналов, отраженных от астероида, выполнялся 32-метровыми радиотелескопами в Медичине (IRA-INAF, Италия) и Ирбене.

Обработка экспериментальных данных производилась в режиме бистатической локации и в режиме РСДБ. В режиме бистатической локации выполнялось перемножение сигнала передатчика и эхо-сигнала, принятого в каждом приемном пункте с предварительной компенсацией частотного сдвига и времени распространения сигнала на трассе «передатчик—астероид—приемник». В результате спектрального анализа получены ряды частотных сдвигов Доплера.

Получено удовлетворительное совпадение с частотами, рассчитанными по данным оптических измерений.

Точность измерения частоты в режиме бистатической локации в данном эксперименте составляла 0.1 Гц, что соответствует погрешности определения радиальной скорости 3 мм/с.

На следующем этапе обработки выполнялось перемножение сигналов, отраженных от астероида и зарегистрированных в РСДБ-пунктах Ирбене и Медичина (режим РСДБ). Впервые в эксперименте по РСДБ-локации астероида получена взаимная корреляция сигналов двух РСДБ-пунктов (в предыдущих экспериментах по локации более удаленных астероидов взаимной корреляции сигнала в режиме РСДБ не было обнаружено).

В результате спектрального анализа была измерена частота интерференции, которая используется для уточнения угловой скорости движения объекта. Точность измерения частоты в режиме РСДБ в данном эксперименте составляла 0.125 Гц, что соответствует погрешности определения угловой скорости 0.01"/с.

Значительный размер астероида и малое расстояние до него обеспечили высокий уровень принимаемого эхо-сигнала, что позволило получить достоверные данные на всех этапах обработки при удалении объекта от Земли до 200 000 км. В целом получено хорошее совпадение экспериментально измеренных параметров отраженного сигнала с предварительно рассчитанными по данным оптических наблюдений. Тем не менее наблюдается увеличение расхождения экспериментальных и расчетных величин в момент наибольшего сближения астероида с Землей, что совпадает с результатами наблюдений других исследовательских групп [8, 9]. Показано, что при достаточной чувствительности приемных систем достигаются экстремально высокие точности измерения частот Доплера и частот интерференции, необходимых для уточнения радиальной и угловых скоростей движения астероида.

РСДБ-эксперименты по приему сигналов навигационных космических аппаратов

В 2011 г. в программу радиоинтерференционных экспериментов были включены наблюдения навигационных космических аппаратов (НКА) спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС. В этих экспериментах ставились две задачи:

— прием сигналов НКА для уточнения положения аппарата и решение обратной задачи — калибровки базы интерферометра;

— исследование ионосферы Земли при зондировании ее сигналами НКА и излучением естественных радиоисточников.

В процессе развития технологии РСДБ разработаны достаточно эффективные методы как измерения координат источников излучения, так и калибровки инструментов, но практически все они предполагают использование сигналов удаленных компактных внеземных источников (квазаров, радиогалактик и др.) с точно известными координатами (до $10^{-4}''$), привязанных к системе International Celestial Reference Frame 2 [12]. Так как интенсивность излучения большинства таких источников невелика, то качественная калибровка проводится только с использованием антенн с большой эффективной площадью и высокочувствительной аппаратурой.

Достаточно эффективно РСДБ проявили себя в измерении положения дальних космических аппаратов, излучающих монохроматический сигнал [13, 14]. Однако для связи с межпланетными космическими аппаратами использовались узкополосные или монохроматические сигналы, не позволявшие применить стандартную методику РСДБ для определения задержки (дальности) и соответственно угловых координат объекта.

С вводом в действие глобальных навигационных систем в околоземном пространстве появилось значительное количество аппаратов, излучающих мощный фазоманипулированный сигнал. Широкополосный квазишумовой сигнал НКА при использовании РСДБ метода позволяет достичь высокой точности координатных измерений, а большая интенсивность излучаемого сигнала — получить высокое отношение сигнал/шум для приемных антенн с небольшой эффективной площадью. НКА находятся на стабильных и хорошо известных орбитах, что облегчает задачу планирования эксперимента и отработки методики измерения координат. РСДБ-измерения угловых координат и скоростей НКА на интерферометрах с различной ориентацией базовых линий в сочетании с дальномерным методом, применяемым в спутниковых навигационных системах, позволит существенно повысить точность и оперативность определения местоположения НКА.

Обратной задачей к задаче получения координат КА является задача измерения проекций базы радиоинтерферометрического комплекса. В РСДБ величина проекции базы измеряется при наблюдении космических источников с известными координатами. Предель-

но достижимая точность такого определения ограничивается неопределенностью электрической толщи турбулентной атмосферы и составляет 1—3 см в зависимости от угла наблюдений. При наблюдении минимум четырех радиоисточников на разных углах места с известными координатами определяются три проекции базы интерферометра на оси геоцентрической системы отсчета и инструментальная задержка в пунктах интерферометра, в которых фиксируются принятые сигналы. Очевидно, что от точности привязки баз интерферометра зависит точность координатных измерений. В настоящее время проводится разработка алгоритмов калибровки базы по источникам излучения — НКА, находящихся в околоземном пространстве, т. е. в ближней зоне интерферометра.

Основным преимуществом метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой в решении астрометрических задач является его высокая точность определения угловых координат. Тем не менее при наблюдении космических объектов в околоземном пространстве потенциальная точность интерферометрических координатных измерений ограничивается влиянием среды на трассах распространения радиоизлучения. Наибольшее влияние на радиосигналы оказывает ионосфера Земли. Неравномерность распределения электронной концентрации в ионосфере приводит к ряду случайных эффектов: мерцаниям сигналов, фазовым и групповым задержкам сигналов, изменению частоты, вращению плоскости поляризации и другим эффектам. Выраженность этих эффектов зависит от состояния ионосферы в момент наблюдений, которое определяется солнечной и геомагнитной активностью, временем суток и т. д.

Повышение эффективности методов исследования космического пространства напрямую связано с созданием адекватных моделей происходящих в ионосфере процессов, для чего необходимо накопление данных о состоянии ионосферы в спокойном состоянии и в условиях естественного и искусственного возмущения. По этой причине круг научных задач, решаемых в VIRAC, был дополнен задачей исследования ионосферы Земли методом РСДБ в комбинации с методом радиопросвечивания для измерения характерных параметров ионосферной турбулентности.

Метод радиопросвечивания заключается в зондировании среды радиосигналами и анализе их искажений, вызванных неоднородностями среды распространения. При радиоинтерферометрическом приеме мощный сигнал от источника — естественного или искусственного — распространяется через плазму ионосферы и принима-

ется в разнесенных наземных пунктах. Процедура обработки данных, применяемая в РСДБ, позволяет выделить относительные возмущения сигналов, вносимые средой на двух различных трассах распространения. Движение неоднородностей или изменение их интенсивности флуктуаций электронной концентрации отображаются в спектральном составе сигнала интерферометра [15, 16].

Параллельно с исследованием ионосферы в ее естественном состоянии выполнялись эксперименты по исследованию искусственной ионосферной турбулентности, вызванной воздействием на среду радиоизлучением мощного передатчика.

Основной научной задачей экспериментов являлось получение динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации в исследуемой области — показателя пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации, скорости перемещения неоднородностей, а также оценки интенсивности флуктуаций и ее зависимости от режима внешнего воздействия.

В 2012 г. радиотелескоп РТ-32 в Иrbене был оснащен специально изготовленным высокочастотным блоком приемника и облучателем для приема сигналов навигационных космических аппаратов GPS и GLONASS в диапазоне 1.6 ГГц. Кроме того, РТ-32 оснащен ВЧ-блоком приемника на 327 МГц для выполнения исследований ионосферы методом радиопросвечивания сигналами естественных космических источников и исследований вспышечного радиоизлучения Солнца.

В НИРФИ создан собственный РСДБ-комплекс, включающий антенны 14, 15 и 8 м, расположенные в радиоастрономических обсерваториях НИРФИ в Нижегородской области, и три малые антенны в НИРФИ и Нижегородском государственном университете (ННГУ) в Нижнем Новгороде [17]. Весной 2012 г. проведены первые совместные эксперименты на интерферометре, включающем РТ-32 «Иrbене» и РСДБ-пункты НИРФИ.

В рамках одной сессии выполнялись эксперименты по двум направлениям: задаче уточнения положения КА и калибровки базы интерферометра и задаче исследования ионосферы Земли при зондировании ее сигналами НКА.

Во время наблюдений излучение от космического аппарата или удаленного естественного радиоисточника распространялось через ионосферный слой и принималось сетью антенн в РСДБ-режиме. В экспериментах по исследованию возмущенной ионосферы был задействован нагревный стенд «Сура» (НИРФИ), предназначенный

для мониторинга верхней атмосферы Земли при воздействии на нее коротковолновым излучением [18, 19]. Под воздействием радиоизлучения мощностью 500 кВт, генерируемого в непрерывном режиме, на высоте 250 км создавалась область искусственной ионосферной турбулентности с поперечным размером около 50 км. Сигналы НКА распространялись через область искусственной турбулентности и принимались одним из телескопов комплекса. Излучение до других радиотелескопов проходило через зону слабой турбулентности или через область, свободную от возмущений. Схема взаимного расположения антенн приемного РСДБ-комплекса и нагревного стенда «Сура» приведена на рис. 1.

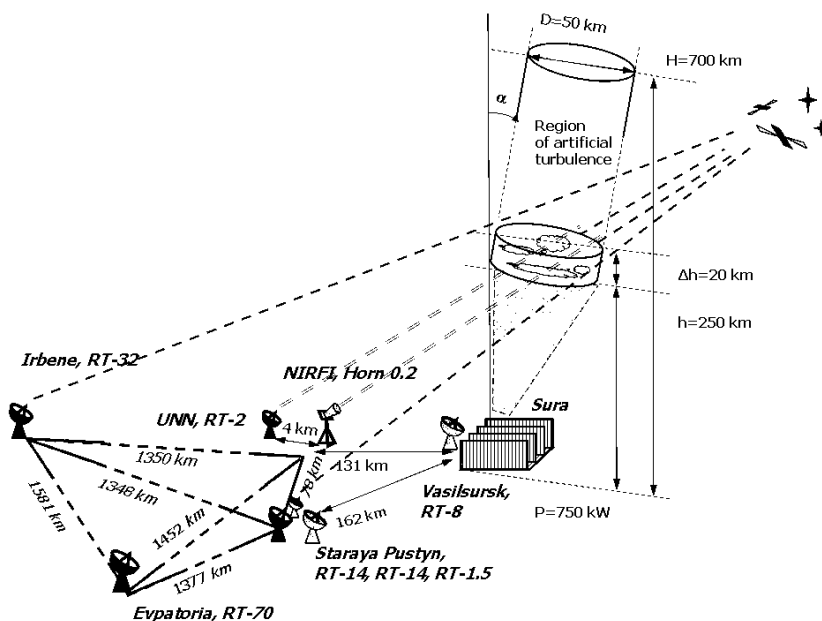


Рис. 1. Схема интерферометрического комплекса, предназначенного для приема сигналов НКА, прошедших через область искусственной ионосферной турбулентности

Одной из задач экспериментов является исследование характера выходного сигнала интерферометра в зависимости от режима воздействия на ионосферу. На первом этапе анализировались изменения амплитуды и формы спектра корреляционного отклика от времени

при прохождении излучения от аппарата через спокойную ионосферу и область искусственной турбулентности. Зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра от режима работы нагревного стенда во время наблюдения НКА GPS 26605 показан на рис. 2. График включения передатчика установки «Сура» показан жирными горизонтальными линиями (положение линии выше нулевого уровня означает включение стенда). Начало временной оси соответствует первому за сутки включению передатчика стенда «Сура». При начале воздействия на ионосферу увеличиваются амплитудные флуктуации спектра мощности более чем в шесть раз. После окончания излучения заметно снижение колебаний почти до минимума. При следующем включении стенда «Сура» аппарат уже находится вне зоны повышенной турбулентности, и влияние возмущенной среды на сигнале не сказывается.

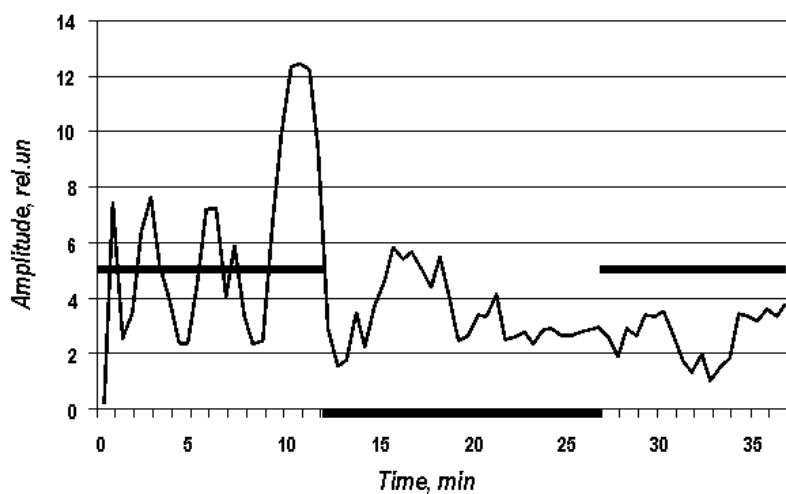


Рис. 2. Зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра от режима работы нагревного стенда во время прохождения НКА GPS 26605 в течение 40 мин через зону повышенной турбулентности. Жирной линией показаны интервалы работы передатчика. Эксперимент NIRFI 12.2. 23 марта 2012 г. База: ННГУ—НИРФИ

В задаче калибровки базы интерферометра и определения положения КА основными измеряемыми параметрами является задержка и частота интерференции. На рис. 3 приведен пример выходного сигнала интерферометра в осях «амплитуда — задержка — частота» при приеме сигнала ГЛОНАСС 37868 на базе Иrbене — ННГУ. Жирной кривой обозначена корреляционная функция, тонкой кривой — спектр мощности сигнала интерферометра при полностью компенсированной задержке. Корреляционная функция имеет характерную для сигнала НКА ГЛОНАСС форму: отчетливо просматривается узкий пик на фоне более широкой части. Наличие пьедестала объясняется тем, что максимальная мощность излучаемого аппаратами ГЛОНАСС сигнала сосредоточена в узкой частотной полосе. Узкий пик корреляционной функции обусловлен полосой регистрации приемной системы (8 МГц), его ширина составляет 125 нс. Кросс-корреляционная функция имеет максимум на задержке, равной разности времен распространения сигнала от НКА до двух приемных пунктов интерферометра. Частота максимума спектра соответствует частоте интерференции и определяется скоростью перемещения НКА через диаграмму направленности интерферометра.

В эксперименте достигнута погрешность измерений задержки 4 нс, что соответствует линейной мере 1 м. Достижимая погрешность измерения частоты интерференции равна 0.03 % за время наблюдения космического аппарата в течение 20 мин.

В настоящее время совершенствуются алгоритмы обработки и методика измерений для достижения предельных погрешностей в решении поставленных задач. Предполагается продолжение участия VIRAC в международной РСДБ-кооперации, включая совместные работы с РСДБ-сетью НИРФИ.

Заключение

В последние годы с участием Вентспилсского международного радиоастрономического центра осуществлено более 20 РСДБ-экспериментов, которые показали актуальность радиоинтерферометрического метода в решении таких проблем, как обеспечение космической безопасности, повышение точности определения положения космических аппаратов, исследование ионосферы Земли.

Благодаря усилиям сотрудников VIRAC разработаны и изготовлены элементы приемной РСДБ-аппаратуры на частоту 1 600 МГц, создано программное обеспечение центра обработки РСДБ-данных,

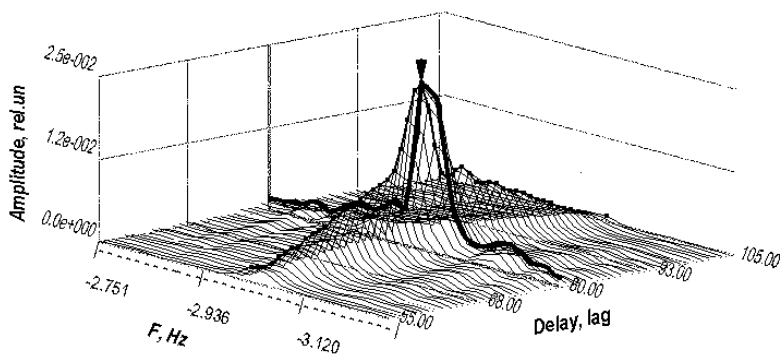


Рис. 3. Спектрально-корреляционный отклик интерферометра Ирбене—ННГУ на сигнал навигационного космического аппарата GPS 26605. Эксперимент NIRFI 12.4, 04.09.2012 г., 13:22:00 UT

отработаны методики проведения экспериментов по решаемым задачам.

После реконструкции РТ-32 предполагается возобновление международных экспериментов в рамках перечисленных проблем, а также новых возникающих задач радиоастрономии.

Представленные результаты получены на основе наблюдений с помощью радиотелескопов Ирбене РТ-32 (Вентспилсский международный радиоастрономический центр (VIRAC), Латвия), Евпатория РТ-70 (НЦУ-ИКС, Крым), Медичина РТ-32 (INAF — Istituto di Radioastronomia, Италия), Урумчи РТ-25 (Xinjiang Astronomical Observatory, Китай), ННГУ РТ-2 (Нижегородский госуниверситет, Россия), радиотелескопов Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ, Россия), уникальной установки стенд «Сура» (НИРФИ, Россия).

Исследования поддержаны Европейским социальным фондом (проект № 2009/0231/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/151 «Технологии для приема, передачи и обработки сигналов, связанных со спутниками Земли») и Российским фондом фундаментальных исследований (10-02-00875, 13-02-97080, 13-02-00586).

Библиографические ссылки

1. *Molotov I. et al.* Astrometry of the Solar System Bodies with VLBI Radar. // Proc. of the Fifth IVS General Meeting / ed. by D. Behrend A. Finkelstein : StPb : Nauka, 2008. — P. 30.
2. *Nechaeva M. B. et al.* VLBI Studies at the Radiophysical Research Institute // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2007. — Vol. 50, № 7. — P. 527.
3. *Нечаева М. Б., Дугин Н. А., Шмелд И. К.* Метод РСДБ в приложении к задаче радиолокации объектов в околоземном космическом пространстве // Вестн. СибГАУ. — 2011. — Т. 39, № 6. — С. 196.
4. *Nechaeva M.* Analysis of the VLBI Signal in Radar Experiments // Space research review. — Engineering Research Institute "Ventspils International Radioastronomy Centre" of the Ventspils University College, 2012. — Vol. 1. — P. 98.
5. *Nechaeva M. et al.* An Experiment on Radio Location of Objects in the Near-Earth Space with VLBI in 2012 // Baltic Astronomy. — 2012. — Vol. 22, № 1. — P. 35.
6. *Benner L.* — 2013. http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2012DA14/2012DA14_planning.html.
7. *Vierinen J.* — 2013. http://kaira.sgo.fi/2013_02_01_archive.html.
8. *de León J. et al.* Visible and near-infrared observations of asteroid 2012 DA14 during its closest approach of February 15, 2013 // Astron. Astrophys. — 2013. — Vol. 55. — P. L2.
9. *Gary Bruce L.* Asteroid 2012 DA14 Rotation Light Curve // Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. — 2013. — Vol. 40, № 3. — P. 122.
10. *Nechaeva M. et al.* First results of the VLBI-experiment on radar of the asteroid 2012 DA14 // Baltic Astronomy. — 2013. — Vol. 22. — P. 341.
11. *Нечаева М. Б. и др.* РСДБ-локация астероида 2012 DA14 // Изв. вузов. Радиофизика. — 2014. — Т. 57, № 10. — В печати.
12. International Earth Rotation and Reference Systems Service. <http://www.iers.org/>.

13. *Алексеев В. А. и др.* Длиннобазовая узкополосная радиоинтерферометрия для космической навигации. I. Межпланетные аппараты: измерения координат АМС «Вега» // Космич. исслед. — 1989. — Т. 27, № 3. — С. 447.
14. *Алексеев В. А. и др.* Длиннобазовая узкополосная радиоинтерферометрия для космической навигации. II. Орбитальные аппараты: измерения координат ИСЗ «Астрон» // Космич. исслед. — 1989. — Т. 27, № 5. — С. 765.
15. *Яковлев О. И.* Космическая радиофизика. — М. : Наука, 1998. — 432 с.
16. *Гавриленко В. Г. и др.* Результаты теоретических и экспериментальных исследований солнечного ветра и активных ядер галактик на РСДБ-сети LFVN с использованием системы регистрации S2 // Изв. вузов. Радиофизика. — 2007. — Т. 50, № 4. — С. 275.
17. *Дугин Н. А. и др.* Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ—НИРФИ—Ирбене. Первые результаты // Вестн. Нижегород. гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского (раздел «Радиофизика»). — 2013. — № 1. — С. 79.
18. Многофункциональный радиокomплекс «Сура». <http://sura.nirfi.sci-nnov.ru/indexe.html>.
19. *Belikovich V. V. et al.* The «Sura» facility: Study of the atmosphere and space (a review) // Radiophysics and Quantum Electronics. — 207. — Vol. 50, № 7. — P. 497.

В. В. Орлов

Санкт-Петербургский государственный университет,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

Обсуждаются некоторые вопросы, связанные со звездной астрономией: динамика и устойчивость кратных звезд; происхождение и эволюция звездных скоплений; структура и кинематика Галактики; иерархия групп, скоплений и сверхскоплений галактик; особенности крупномасштабной структуры Вселенной в свете наблюдательной космологии.

We discuss some issues related to stellar astronomy: dynamics and stability of multiple stars; origin and evolution of star clusters; structure and kinematics of the Galaxy; hierarchy of groups, clusters and superclusters of galaxies; features of large-scale structure of the Universe in the light of observational cosmology.

Введение

Современная звездная астрономия берет начало с работ сэра Уильяма Гершеля. Она имеет более чем двухсотлетнюю историю. В качестве некоторых из основных вех звездной астрономии можно отметить первую модель Галактики, построенную самим Гершелем в 1780 г.; обнаружение орбитальных движений у двойных звезд (Гершель, 1802); открытие поглощения света в Галактике (Струве, 1847); диаграмму Герцшпрунга—Рессела, впервые построенную этими авторами в 1910 г.; определение местоположения Солнца в Галактике (Шепли, 1918); открытие вращения Галактики Оортом в 1927 г.; обнаружение ассоциаций молодых звезд (Амбарцумян, 1948). Этот список можно было бы продолжить, однако цель нашей работы не история звездной астрономии, а ее современное состояние и проблемы, требующие своего решения.

Определение звездной астрономии как раздела науки дал Татеос Артемьевич Агемян в статье в Большой Советской Энциклопедии: «*Звездная астрономия* — раздел астрономии, исследующий общие закономерности строения, состава, динамики и эволюции звездных

систем. . . ». Звездную астрономию условно можно разделить на три большие части:

- звездная статистика — изучает распределения различных характеристик звезд;
- звездная кинематика — изучает наблюдаемые движения звезд;
- звездная динамика — изучает силовое взаимодействие звезд друг с другом в звездных системах.

Звездная астрономия по своим задачам и методам стыкуется с астрофизикой и дополняет ее. Если астрофизика, как правило, имеет дело с отдельными объектами — звездами, газозвездными комплексами, галактиками и т. п., то звездная астрономия рассматривает ансамбли объектов — кратные звезды, звездные скопления, галактики и скопления галактик как звездные системы.

В основе звездной астрономии лежит статистический анализ различных популяций астрономических объектов: например, звезд в Галактике, галактик в Местном Сверхскоплении, гамма-всплесков в локальной Вселенной и т. п. На основе такого анализа звездные астрономы делают определенные выводы о происхождении, эволюции и судьбе астрономических объектов определенного класса.

В нашей статье мы затронем несколько классов звездных систем. Это кратные звезды, звездные скопления, наша Галактика Млечный Путь и системы галактик на разных уровнях иерархии (начиная от групп галактик и завершая наблюдаемой частью Вселенной или Метагалактикой). Мы коснемся не столько достижений и результатов, сколько тех проблем, которые предстоит решить звездной астрономии.

Кратные звезды

Кратные звезды с числом компонентов от трех и более — довольно интересный класс астрономических объектов. Представляет интерес как происхождение таких систем, так и их эволюция. Изучение свойств кратных звезд можно проводить статистическими методами, а также посредством детального анализа избранных систем.

Для статистического анализа нам нужна представительная выборка звезд, свободная от эффектов наблюдательной селекции. Для создания таких выборок лучше всего использовать звезды из ближайшего окружения Солнца. С этой целью Токовинин [1] рассмотрел 4847 звезд спектральных классов от F5V до G6V в окрестности Солнца радиусом 67 пк. Звезды данной выборки являются ли-

бо одиночными, либо главными компонентами двойных и кратных систем. Статистический анализ свойств этих систем проведен в [2]. Оказалось, что отношение чисел одиночных, двойных, тройных, четверных систем и систем большей кратности приблизительно равно $54 : 33 : 8 : 4 : 1$, т. е. $(13 \pm 1)\%$ систем являются кратными с числом компонентов не менее трех.

В подавляющем большинстве случаев кратные системы в окрестности Солнца обладают сильной иерархией, что свидетельствует об их динамической устойчивости на космогонических временах. Этот результат согласуется с оценками возрастов компонент, составляющих, как правило, миллиарды лет. По-видимому, компоненты в этих системах образовались одновременно и генетически связаны друг с другом.

В то же время нами было отмечено несколько кратных звезд со слабой иерархией [3]. Детальное исследование динамики этих систем выявило ряд интересных явлений. Во-первых, была обнаружена иерархическая четверная система ι Большой Медведицы, которая с вероятностью 0.98 распадется в течение миллиона лет (см. [4] и [5]). Во-вторых, было установлено, что в иерархической четверной системе ADS 9626, вероятно, имеет место прохождение двух гравитационно связанных двойных звезд мимо друг друга по гиперболической орбите [6]. В-третьих, было найдено, что широкая тройная система α Centauri+Proxima распадается в галактическом поле [7].

Все эти неожиданные результаты требуют наблюдательной проверки и теоретической интерпретации. Насущная задача звездной астрономии в этой области — уточнение наблюдательных данных и исследование динамической эволюции и устойчивости кратных звезд.

Заметим, что в последние годы вектор интереса многих специалистов по небесной механике и звездной динамике обратился в сторону внесолнечных звездно-планетных систем (см., например, обзор [8]). В этой области исследований были разработаны ряд новых методов статистической обработки наблюдательных данных и исследования динамики таких систем. Некоторые из развитых подходов могут найти применение при изучении динамики кратных звезд.

Звездные скопления

Рассеянные (или открытые) звездные скопления содержат сотни и тысячи звезд. Как правило, они «тонут» в звездном фоне и их

реальные границы определить нелегко. Рассеянные скопления сконцентрированы в диске нашей Галактики. Оценка полного числа рассеянных скоплений в Галактике составляет $\sim 10^5$ штук. Диапазон их возрастов довольно широк — от 10^6 лет для самых молодых формирующихся на наших глазах скоплений типа скопления туманности Ориона [9] до $\sim 10^{10}$ лет для самых старых типа NGC 6791 и Ве 17 [10]. Интересный вопрос: за счет чего уцелели столь старые рассеянные скопления в диске Галактики? Представляет интерес оценка начальных масс этих скоплений на основе численных экспериментов в рамках задачи N тел.

Шаровые скопления содержат сотни тысяч и миллионы звезд. Они четко выделяются на фоне звезд поля и имеют форму, близкую к сферической. Шаровые скопления сильно концентрируются к центру Галактики. По оценкам, полное число шаровых скоплений в Галактике составляет всего около 200 штук. Диапазон возрастов шаровых скоплений довольно узок и составляет 10–13 млрд лет. Возможно, было две эпохи формирования шаровых скоплений: на красных смещениях $z > 6$ (возраст более 12 млрд лет) и на $z = 2-3$ (возраста 10–11 млрд лет) [11]. Возникает вопрос: не противоречат ли эти оценки возраста современной космологической модели, в которой возраст Вселенной оценивается в 13.8 млрд лет [12]?

Наряду со звездными скоплениями в Галактике наблюдаются звездные потоки: группы звезд, движущиеся в пространстве приблизительно в одном и том же направлении. Вопрос о происхождении звездных потоков стоит перед звездными астрономами уже почти полтора века [13].

Высказывались различные гипотезы на этот счет. Звездные потоки — это.

- реликты корон звездных скоплений [14];
- остатки разрушенных карликовых галактик, поглощенных нашей Галактикой [15];
- «постаревшие» звездные комплексы.

Окончательного ответа на данный вопрос нет. Возможно, одновременно действуют несколько механизмов генерации звездных потоков.

Другие проблемы, касающиеся изучения звездных скоплений:

1. Происхождение рассеянных звездных скоплений и их связь с газовыми облаками и спиральными ветвями.
2. Как образовались шаровые скопления: коллапс единого объекта, слияние нескольких более мелких скоплений или обдира-

ние карликовых галактик, залетевших внутрь нашей гигантской Галактики?

3. Каковы продукты разрушения скоплений: это быстро летящие звезды, тесные двойные, широкие пары, что еще?
4. Что такое кратные звездные скопления — эффект проекции, случайно оказавшиеся рядом несвязанные объекты или генетически и, возможно, физически связанные системы?

Особый интерес представляют вопросы формирования и эволюции молодых звездных скоплений, здесь можно проследить несколько стадий иерархии — от газозвездных комплексов до протоскоплений, погруженных в газопылевые облака [16].

Галактика

Если бы мы смогли взлететь над плоскостью Галактики и взглянуть на Млечный Путь со стороны, то в первую очередь мы обратили бы внимание на диск Галактики и ее спиральную структуру. К сожалению, мы не можем осуществить такой полет, поэтому нам приходится судить о структуре диска, спирального узора, бара, балджа и других подсистем Галактики изнутри. Такое «внутреннее исследование» строения Галактики довольно своеобразно: мы можем в деталях изучить локальные структуры в ближайшей окрестности Солнца, однако можем составить лишь приближенное, порой весьма ненадежное представление о глобальной структуре Млечного Пути. В частности, мы не можем точно определить даже полное число ветвей в спиральном узоре и надежно установить морфологический тип нашей Галактики.

Наряду со светящейся материей в Галактике должна находиться темная материя, или скрытая масса. Она проявляет себя исключительно через гравитацию. Предпринимаются многочисленные (пока, увы, безрезультатные) попытки зарегистрировать частицы темной материи в наблюдениях и на ускорителях [17]. С другой стороны, есть ряд наблюдательных фактов, которые можно объяснить в рамках гипотезы о существовании темного гало у нашей Галактики. Одним из таких фактов является плоская или даже возрастающая с расстоянием от центра кривая вращения Галактики [18]. Альтернативное объяснение возможно в рамках модифицированных теорий гравитации, в которых ньютоновский закон всемирного тяготения претерпевает изменение при очень малых ускорениях (см., например, [19]).

Исследованию структуры, кинематики и динамики нашей Галактики посвящено множество работ. Тем не менее ряд вопросов остаются открытыми. Вот только некоторые из них:

1. Сколько ветвей в спиральном узоре Галактики?
2. Как ведет себя кривая вращения на больших расстояниях от центра — остается плоской, растет или спадает?
3. Присутствует ли в диске Галактики кольцевая структура?
4. Почему кривая вращения Галактики растет с увеличением расстояния от центра, если этот рост действительно имеет место?

Системы галактик и космология

Галактики, как и звезды, предпочитают жить не поодиночке (в этом плане наше Солнце скорее уникально, чем типично), а группами разной кратности. Приведем приблизительную иерархию систем галактик по числу членов и по размеру:

- группа $N \sim 10$, размер ~ 1 Мпк;
- скопление $N \sim 10^3$, размер ~ 5 Мпк;
- сверхскопление $N \sim 10^4$, размер ~ 100 Мпк.

Наиболее детально исследованы структура и кинематика Местной Группы галактик, членом которой является и наша родная Галактика Млечный Путь [20]. Оказалось, что за пределами сферы радиусом около 1 Мпк галактики показывают систематическое убегание от центра группы — локальный хаббловский поток. Авторы [20] оценили локальное значение параметра Хаббла $H_{loc} = (78 \pm 2)$ км/с/Мпк и стандарт пекулярных скоростей галактик в потоке $\sigma_v \approx 25$ км/с. То есть поток исключительно холодный. Подобные явления были обнаружены и в других близких группах галактик, а также в скоплениях галактик Virgo и Coma. Интерпретация этого явления в стандартной Λ CDM модели была представлена в работах Чернина с соавторами (см., например, [21]). Интересно было бы сопоставить наблюдения с результатами моделирования в рамках других моделей, например модифицированных теорий гравитации (сопоставление Λ CDM модели и модифицированной ньютоновской динамики MOND дается в [22]).

Переходя к масштабам скоплений и сверхскоплений галактик, мы сталкиваемся с проблемой неоднородностей: чем дальше мы проникаем вглубь Вселенной, тем большие структуры мы обнаруживаем. Например, недавно было установлено, что Местная Группа совместно с близким скоплением галактик Virgo и другими соседними груп-

пами и скоплениями галактик входит в структуру диаметром около 160 Мпк и массой $\sim 10^{17}$ масс Солнца, названную авторами открытия Laniakea (в переводе с гавайского языка — Необъятные Небеса) [23]. Еще один пример структуры размерами в сотни мегапарсек представляет собой Слоановская Великая Стена (Sloan Great Wall) длиной примерно 400 Мпк [24]. Еще более обширные структуры обнаруживаются в распределении источников гамма-всплесков — размеры структур достигают 800 Мпк [25] и 2–3 Гпк [26]. Встает вопрос: как успели сформироваться подобные структуры в рамках стандартной Λ CDM модели за столь короткое время (~ 4 – 6 млрд лет)?

Кроме того, крупномасштабная структура Вселенной обладает свойствами самоподобия (или фрактальности) [27]. Признаки фрактальности обнаруживаются даже на картах микроволнового фонового излучения СМВ, полученных на космических телескопах WMAP [28] и Planck [29]. Не может ли это свидетельствовать в пользу того, что Вселенная не так уж молода (возраст всего 13.8 млрд лет), как следует из Λ CDM модели?

Перечислим некоторые проблемы, связанные с изучением систем галактик и крупномасштабной структуры Вселенной:

1. Где предел структурности и переход к однородности?
2. И существует ли предел?
3. Существует ли самоподобие структур на масштабах в десятки и сотни мегапарсек?
4. Фрактальны ли карты изотерм микроволнового фона и если да, то о чем может говорить такое самоподобие карт СМВ?

Заключение

В заключение сформулируем некоторые глобальные проблемы звездной астрономии:

1. Все ли старые кратные звезды динамически устойчивы?
2. Как образовались шаровые скопления нашей Галактики и почему их так мало?
3. Почему кривые вращения дисковых галактик почти плоские — эффект массивного темного гало или модифицированной теории гравитации (MOND или MOG)?
4. Каков масштаб ячейки однородности в крупномасштабной структуре?
5. Какова природа темной материи и притягивает ли она сама себя?

Библиографические ссылки

1. *Tokovinin A. A.* From Binaries to Multiples I: Data on F and G Dwarfs within 67 pc of the Sun // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147, № 67.
2. *Tokovinin A. A.* From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147, № 68.
3. *Орлов В. В., Жучков Р. Я.* Динамика кратных звезд: новое и хорошо забытое старое // *Физика космоса: Тр. 42-й Международ. студ. науч. конф., 28 янв. — 1 февр. 2013 г., Екатеринбург.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — С. 42–53.
4. *Жучков Р. Я., Малоголовец Е. В., Кияева О. В. и др.* Физические параметры и динамические свойства кратной системы ι UMa (ADS 7114) // *Астрон. журн.* — 2012. — Т. 89. — С. 568–580.
5. *Мельников А. В., Орлов В. В., Шевченко И. И.* Об устойчивости кратной звездной системы ι UMa (ADS 7114) // *Астрон. журн.* — 2014. — Т. 91. — С. 735–744.
6. *Кияева О. В., Жучков Р. Я., Малоголовец Е. В. и др.* Кратная система ADS 9626: четверная звезда или сближение двух двойных звезд? // *Астрон. журн.* — 2014. — Т. 91. — С. 943–956.
7. *Matvienko A. S., Orlov V. V.* Dynamic Status of the Wide Multiple System α Centauri+Proxima // *Astrophys. Bull.* — 2014. — Vol. 69. — P. 205–210.
8. *Beaugé C., Ferraz-Mello S., Michtchenko, T. A.* Multi-planet extrasolar systems — detection and dynamics // *Research in Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 12. — P. 1044–1080.
9. *Reggiani M., Robberto M., Da Rio N. et al.* Quantitative evidence of an intrinsic luminosity spread in the Orion nebula cluster // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 534, № A 83.
10. *Salaris M., Weiss A., Percival S.* The age of the oldest Open Clusters // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 414. — P. 163–174.
11. *Katz H., Ricotti M.* Two epochs of globular cluster formation from deep field luminosity functions: implications for reionization and the Milky Way satellites // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 432. — P. 3250–3261.

12. *Ade P. A. R., Aghanim N., Armitage-Caplan C. et al.* Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571, № A 16.
13. *Antoja T., Figueras F., Torra J. et al.* The Origin of Stellar Moving Groups // *Lecture Notes and Essays in Astrophysics.* — 2010. — Vol. 4. — P. 13–31.
14. *Агекян Т. А., Белозерова М. А.* Диссипация звездных скоплений и формирование корон и движущихся скоплений // *Астрон. журн.* — 1979. — Т. 56. — С. 9–15.
15. *Deg N., Widrow L.* Incorporating streams into Milky Way models // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 439. — P. 2678–2686.
16. *Elmegreen B. G.* Formation of stars and clusters over cosmological time. [arXiv:1410.1075](https://arxiv.org/abs/1410.1075).
17. *Conrad J.* Statistical issues in astrophysical searches for particle dark matter // *Astroparticle Physics.* — 2015. — Vol. 62. — P. 165–177.
18. *Sofue Y.* The Mass Distribution and Rotation Curve in the Galaxy // *Planets, Stars and Stellar Systems. Vol. 5* / ed. by T. D. Oswalt, G. Gilmore. — Dordrecht : Springer, 2013. — P. 985–1037.
19. *Man Ho Chan.* Reconciliation of modified Newtonian dynamics and dark matter theory // *Phys. Rev. D.* — 2013. — Vol. 88, № 103501.
20. *Karachentsev I. D., Kashibadze O. G., Makarov, D. I.* The Hubble flow around the Local Group // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 393. — P. 1265–1274.
21. *Chernin A. D., Teerikorpi P., Valtonen M. J. et al.* Dark energy and extended dark matter halos // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 539, № A 4.
22. *McGaugh S. S.* A Tale of Two Paradigms: the Mutual Incommensurability of Λ CDM and MOND. [arXiv:1404.7325](https://arxiv.org/abs/1404.7325).
23. *Tully R. B., Courtois H., Hoffman Y., Pomarède D.* The Laniakea supercluster of galaxies // *Nature.* — 2014. — Vol. 513, iss. 7516. — P. 71–73.
24. *Gott J. R. III, Jurić M., Schlegel D. et al.* A Map of the Universe // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 624. — P. 463–484.
25. *Райков А. А., Орлов В. В., Бекетов О. Б.* О неоднородностях в пространственном распределении гамма-всплесков // *Астрофизика.* — 2010. — Т. 53. — С. 441–454.

26. *Horváth I., Hakkila J., Bagoly Z.* Possible structure in the GRB sky distribution at redshift two // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 561, № L12.
27. *Baryshev Yuriy, Teerikorpi Pekka.* Fundamental Questions of Practical Cosmology. Exploring the Realm of Galaxies. — Springer, 2012.
28. *Kobayashi N., Yamazaki Y., Kuninaka H. et al.* Fractal Structure of Isothermal Lines and Loops on the Cosmic Microwave Background // *J. of the Physical Society of Japan.* — 2011. — Vol. 80. — P. 074003–074003–5.
29. *Myllari A. A., Orlov V. V., Raikov A. A. et al.* On the fractality of isotherms of the cosmic microwave background using Planck data. — In preparation.

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА МИЛЛИМЕТРОН

Лекция посвящена некоторым задачам космологии, которые могут решаться с помощью наблюдений планируемой космической обсерватории Миллиметрон в диапазонах спектра от дальнего инфракрасного до миллиметрового.

This lecture is devoted to the particular cosmological science cases which can be addressed by the observations with the help of the planned space observatory Millimetron in the spectral bands from the far infrared to millimetres.

Введение

Дальний инфракрасный (50—300 мкм), субмиллиметровый (0.1—1 мм) и миллиметровый (1—10 мм) диапазоны представляют большой интерес для астрономии по следующим причинам:

- максимум интенсивности реликтового излучения, оставшегося от эпохи горячей Вселенной, находится на длине волны около 1 мм. Исследование его анизотропии на сегодня — наиболее точный способ определения космологических параметров;
- в дальнем ИК и субмиллиметровом диапазонах расположен максимум теплового излучения самых холодных объектов Вселенной: пыли, комет и астероидов, газопылевых комплексов;
- около длины волны 300 мкм расположен минимум интенсивности излучения фона неба, что позволяет исследовать в этом диапазоне наиболее слабые и далекие объекты;
- в перечисленных выше диапазонах имеется большое число важных спектральных линий атомов, ионов и молекул. Эти линии позволяют диагностировать состояние межзвездной среды;
- среда в этих диапазонах является более прозрачной по сравнению как с радиодиапазоном, так и с оптическим и ближним ИК. Это позволяет исследовать объекты, закрытые от наблюдателя в других диапазонах.

Однако наблюдения в указанных диапазонах осложняются влиянием атмосферы Земли. Наблюдения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах возможны только в высокогорных районах. На длинах волн короче 300 мкм земная атмосфера становится непреодолимым препятствием и наблюдения возможны только из стратосферы (шары-зонды, высотные самолеты) или из космоса.

Космические обсерватории являются более дорогостоящими, чем наземные, а создание крупных зеркал в космосе представляет сложную проблему. На сегодня крупнейшей обсерваторией дальнего ИК диапазона является космический телескоп «Гершель», обладающий главным зеркалом диаметром 3.5 м. Из-за ограничений размеров обтекателей ракет-носителей более крупные зеркала могут быть только складными, как, например, у телескопа «Радиоастрон», имеющего 10-метровое зеркало и работающего в сантиметровом диапазоне.

Другой важной особенностью телескопов дальнего ИК и субмиллиметрового диапазонов является необходимость охлаждения зеркала и приемной аппаратуры для достижения высокой чувствительности. Например, зеркало «Гершеля» имело температуру около 70 К, достигаемую за счет экранирования телескопа от излучения Солнца.

Создаваемая в России совместно с международной коллаборацией обсерватория Миллиметрон будет следующим шагом в развитии дальней ИК и субмиллиметровой астрономии. Она будет обладать 10-метровым складным зеркалом, охлажденным до температуры в несколько кельвинов за счет применения холодильных машин, работающих на жидком гелии. Это позволит достичь беспрецедентной чувствительности и гораздо лучшего разрешения, чем у «Гершеля».

Задачи космологии

Долгое время основной задачей космологии было изучение закона расширения Вселенной. Однако сейчас к космологии относят также и вопросы образования и эволюции галактик. При описании многих процессов вместо времени в космологии используют красное смещение, так как это непосредственно наблюдаемая величина. Красное смещение определяется как

$$z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_0} - 1,$$

где λ_{obs} — наблюдаемая длина волны какой-либо спектральной линии; λ_0 — лабораторная длина волны.

z	0	0.5	1	2	3	5	6	8	10	20
t , млрд лет	13.8	8.6	5.8	3.2	2.1	1.15	0.92	0.63	0.47	0.18

Красное смещение однозначно связано со временем, за которое свет прошел расстояние от источника до наблюдателя, а также с возрастом Вселенной на тот момент, в который мы видим источник. Эта связь зависит от космологической модели, и для Λ CDM модели, удовлетворяющей измерениям спутника «Планк» [1], некоторые значения красного смещения и возраста Вселенной приведены в таблице.

Всю эволюцию Вселенной можно поделить на несколько эпох. До возраста примерно 380 000 лет (красное смещение 1100) длится горячая эпоха и Вселенная заполнена плазмой, затем происходит рекомбинация протонов и электронов, образуются нейтральные атомы. Около сотни миллионов лет длится эпоха «темных веков», когда ничего особенного не происходит, затем, при красных смещениях 40–15, должны были образоваться первые звезды и галактики. При красном смещении 6–10 их излучение становится столь сильным, что весь межгалактический газ снова оказывается ионизован. Интенсивность звездообразования в галактиках нарастает до красного смещения около 2, затем постепенно ослабевает.

Наиболее интригующим для изучения является период от конца «темных веков» ($z \sim 40$) до конца вторичной ионизации ($z \sim 5$). Здесь имеется ряд вопросов, ответы на которые еще не получены.

Какими свойствами обладали первые звезды? При звездообразовании, происходящем в настоящую эпоху, важную роль играют атомы элементов тяжелее гелия («металлы»). Они способствуют остыванию вещества. Остывание приводит к сжатию и повышению плотности, и в конце концов плотность достигает необходимой величины для начала ядерных реакций в ядре звезды. Плотность звезды на 25 порядков превышает плотность межзвездного газа, и для такого сильного сжатия остывание должно быть эффективным. Газ из водорода и гелия остывает гораздо менее эффективно, чем газ с малой (доли процента) примесью металлов.

Пока не наблюдалось ни одной звезды, не содержащей металлы, выработанные в недрах других звезд. Различные теоретические и численные модели показывают, что масса первой звезды может

сильно отличаться от обычных звезд и достигать нескольких сотен масс Солнца.

Когда и как образовались сверхмассивные черные дыры в центрах галактик? Уже при красных смещениях 6–7, т. е. менее миллиарда лет после Большого взрыва, наблюдаются яркие квазары, в которых присутствуют черные дыры с массой около миллиарда солнечных масс. Известно, что в конце эволюции массивных звезд образуются черные дыры массой в несколько масс Солнца. Могут ли они слиться и образовать одну гигантскую черную дыру? Современные численные расчеты показывают, что миллиарда лет для этого не хватит, поэтому «затравочные» черные дыры должны были иметь массу не менее 100–1 000 масс Солнца. Такие объекты могли образоваться либо в результате коллапса первых звезд, если они имели очень большие массы, либо непосредственно при коллапсе газового облака, минуя стадию звезды. В этом случае первыми источниками света во Вселенной могли стать не звезды, а черные дыры.

С этими двумя связан и вопрос о том, какие объекты в основном привели ко вторичной ионизации Вселенной: звезды или черные дыры?

Субмиллиметровые галактики

В настоящую эпоху галактики с активным звездообразованием (более 100 масс Солнца в год) довольно редки. Ближайшая из них — *Arp 220* — находится на расстоянии 250 млн световых лет. Исследование спектра этой галактики показало, что он имеет максимум на длине волны около 100 мкм (рис. 1). Этот максимум связан с излучением пыли с температурой около 40 К, которая образуется в основном после взрывов массивных молодых звезд. Однако пыль подвержена разрушению ультрафиолетовым излучением, поэтому после окончания вспышки звездообразования в галактике количество пыли вскоре значительно уменьшается. Так, обычная галактика типа нашей излучает в области 100 мкм на 3–4 порядка слабее, чем *Arp 220*.

Считается, что многие галактики (а возможно, все) на определенном этапе своей эволюции прошли через стадию интенсивного звездообразования. Наблюдения субмиллиметровых обсерваторий показали, что плотность субмиллиметровых галактик, таких как *Arp 220*, максимальна при красных смещениях около 2. Их плотность быстро спадает к меньшим красным смещениям и постепенно спадает к

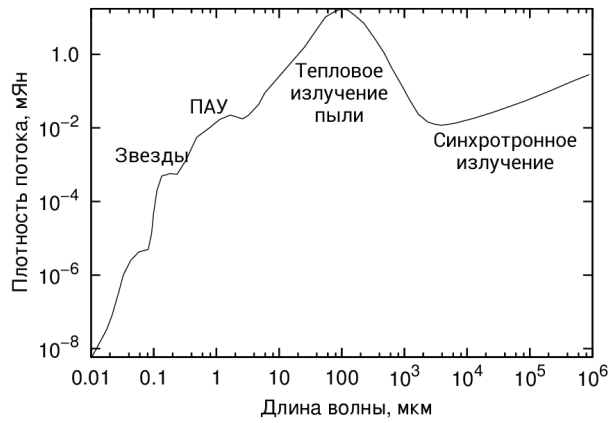


Рис. 1. Типичный спектр субмиллиметровой галактики на красном смещении $z = 2$ [2]. Длина волны приведена в собственной системе отсчета галактики. ПАУ — полициклические ароматические углеводороды. $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/Гц/м}^2$

большим. Количество субмиллиметровых галактик на красном смещении $z \sim 2$ так велико, что они представляют серьезную проблему для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне. Угловые размеры галактик малы (доли угловой секунды), но размер изображения галактики в телескопе определяется приблизительно дифракцией:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D},$$

где λ — длина волны; D — диаметр телескопа. Например, для «Гершеля» с $D = 3.5 \text{ м}$ и $\lambda = 500 \text{ мкм} = 36''$. Этот размер оказывается сравним с расстоянием между соседними галактиками, в результате чего галактики образуют неоднородный фон, из которого тяжело выделить отдельный источник. Эта проблема получила название «проблемы путаницы», и она является веским аргументом в пользу необходимости увеличения размеров телескопа.

Кроме излучения в континууме от далеких галактик наблюдается ряд спектральных линий. Важнейшими из них являются вращательные переходы молекулы CO с длиной волны $\lambda = 2.6/n \text{ мм}$, где n — целые числа (обычно $n < 10$). Другой важной линией является линия иона углерода [CII] с $\lambda = 158 \text{ мкм}$. Эта линия обеспечивает

один из основных механизмов остывания облаков газа при температуре 100—300 К, которое приводит к звездообразованию. Наблюдения субмиллиметровых линий галактик можно использовать для определения их красных смещений. Это может быть особенно важно для наиболее далеких галактик, так как их оптическое излучение может в значительной степени поглощаться пылью, что затрудняет определение красного смещения «классическим» способом, по ультрафиолетовым и оптическим линиям.

Поиск «первых» галактик

Поскольку в субмиллиметровом диапазоне наблюдаются линии элементов тяжелее гелия, а также излучение пыли, содержащей «металлы», одним из признаков галактик, не обогащенных металлами, должно быть отсутствие излучения в этом диапазоне. Следовательно, наблюдения кандидатов в галактики без металлов должны вестись в нескольких диапазонах: оптическом, ближнем ИК и субмиллиметровом. Такие наблюдения уже ведутся в настоящее время. Проиллюстрируем полученные результаты на примере исследований галактики Himiko [3].

Этот объект с красным смещением $z = 6.4$ был открыт по его оптическому излучению на телескопе Subaru. Наблюдения линии Лайман- α , сдвинутой за счет красного смещения в ближний ИК, позволили определить красное смещение. Полученное на космическом телескопе Хаббла изображение в ультрафиолетовом диапазоне показало значительную светимость объекта, что должно означать интенсивное звездообразование. Вместе с тем наблюдения на наиболее чувствительной наземной субмиллиметровой обсерватории Альма не позволили обнаружить ни излучение пыли в континууме, ни линии [СII] (сдвинутой в миллиметровую область за счет красного смещения). Полученные верхние пределы на содержание металлов в этом объекте говорят о том, что галактика Himiko может представлять собой как раз пример «первой» галактики, не обогащенной металлами.

Для подтверждения статуса данной галактики необходимы ее дальнейшие наблюдения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах с еще лучшей чувствительностью. Есть и другой принципиально важный источник информации о свойствах подобных объектов. В отсутствие «металлов» остывание газа с температурой несколько сотен кельвинов должно происходить за счет излучения

молекул H_2 , HD, иона H_3^+ и др. Молекулы H_2 и HD имеют линии в дальнем ИК диапазоне: 28, 17, 12, 9.7 мкм для H_2 и 56, 112 мкм для HD. За счет красного смещения эти линии для галактики Himiko попадут в диапазон, в котором у Миллиметрона будет наилучшая чувствительность, и поэтому можно надеяться зарегистрировать эти линии, что позволит исследовать свойства газа в Himiko и других кандидатах в «первые» галактики и проверить вывод о том, что газ остывает без участия «металлов».

Возможности Миллиметрона

Основу телескопа (рис. 2) составляет параболическое зеркало диаметром 10 м. Зеркало является складным и состоит из центральной части диаметром 3 м и 24 лепестков. Для достижения требуемой точности поверхности (не хуже 10 мкм) зеркало снабжено системой адаптации и контроля, которая автоматически подстроит положение элементов зеркала после его раскрытия и охлаждения до расчетной температуры. Зеркало изготовлено из специального углепластика и покрыто отражающим слоем. Вторичное гиперболическое зеркало формирует изображение в отсеке научных инструментов.

Для наблюдения слабых объектов, таких как галактики на красных смещениях $z > 5$, необходима сверхвысокая чувствительность, на уровне микроянских на длине волны 300 мкм. Для достижения такой чувствительности зеркало и приемная аппаратура должны быть охлаждены до температуры 4–5 К. Чтобы обеспечить такое охлаждение, телескоп окружен несколькими экранами пассивного охлаждения. Ближайший к главному зеркалу экран охлаждается с помощью криогенной машины замкнутого цикла. Само зеркало тоже охлаждается машинами. В силу такой конструкции телескоп не сможет вести наблюдения под углом менее 95 град. от Солнца.

Также в целях уменьшения засветки со стороны Земли аппарат должен находиться в сотнях тысяч километров от нее. Наиболее удобной является орбита вблизи противосолнечной точки Лагранжа L2. Подобную орбиту имели спутники «Гершель» и «Планк».

Научная аппаратура обсерватории будет включать в себя:

1. Спектрометр высокого разрешения для диапазона 55–600 мкм, построенный на гетеродинном принципе. Благодаря спектральному разрешению не менее $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 10^6$, или 0.3 км/с, с этим прибором можно будет исследовать кинематику различных объектов по их спектральным линиям.

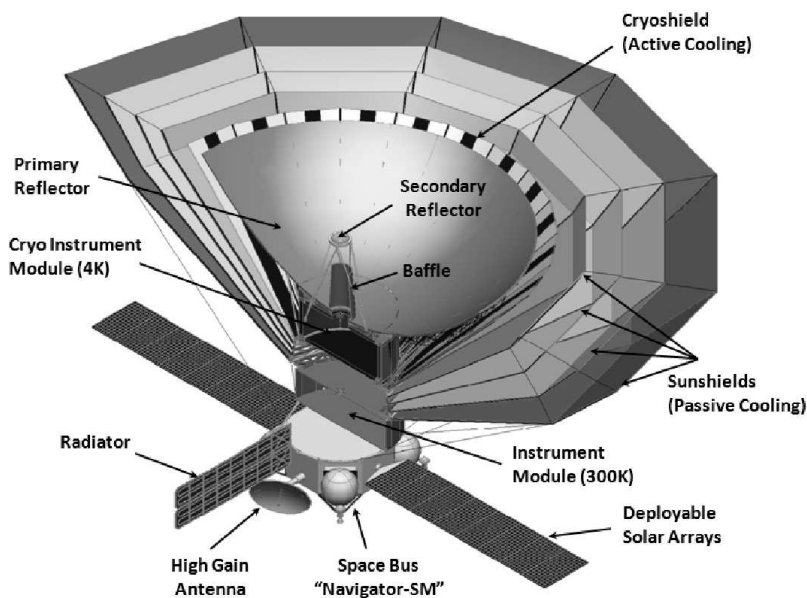


Рис. 2. Схема обсерватории Миллиметрон [4]

2. Коротковолновая камера-спектрометр для диапазона 20—500 мкм будет служить двум целям. В режиме камеры можно будет получать изображения астрономических объектов в нескольких спектральных фильтрах с помощью матрицы, содержащей несколько тысяч пикселей. В режиме спектрометра (построенного на основе дифракционной решетки) планируется получать спектры с разрешением $R \sim 1000$. Угловое разрешение камеры будет не хуже 5 угловых секунд, а возможно, достигнет 2 секунд, если удастся улучшить точность поверхности зеркала с 10 до 5 мкм. Поле зрения камеры составит не менее 6 угловых минут. Этот прибор будет обладать наивысшей чувствительностью, и именно с его помощью будут исследоваться далекие галактики.
3. Длинноволновая камера-спектрометр для диапазона 0.3—3 мм. В этом диапазоне яркость неба велика благодаря мощному реликтовому излучению. Чтобы выделять отдельные источники на этом фоне, длинноволновый инструмент будет *дифференци-*

альным, т. е. будет измерять разницу потоков между двумя областями на небе. С помощью данного прибора можно будет получать как изображения, так и спектры.

4. Приемники для радиоинтерферометрии в диапазонах 22, 43, 100, 240, 640, 870 ГГц. Кроме проведения наблюдений в одиночном режиме, как обычный телескоп, Миллиметрон сможет также участвовать в интерферометрических наблюдениях совместно с наземными телескопами (например, обсерваторией Альма). При этом база интерферометра может достигать 1.5 млн км, что обеспечит угловое разрешение (λ/D , где D — база) около 40 угловых наносекунд! Столь высокие разрешения необходимы для исследования черных дыр.

Следует, однако, отметить, что построение двумерных изображений в этом режиме будет затруднено и возможно лишь при априорных предположениях о структуре и спектре источника. Без таких предположений Миллиметрон сможет получать одномерные распределения интенсивности и оценивать угловые размеры источников.

Более подробно параметры обсерватории представлены в работе [4].

Заключение

Для изучения галактик на ранних этапах их существования необходимы наблюдения в различных диапазонах. Уже построенная обсерватория Альма обеспечит данные в диапазоне длиннее 0.3—0.5 мм. Планируемый космический телескоп Джеймса Веба будет вести наблюдения от 5 до 20 мкм. Миллиметрон является единственной обсерваторией ближайшего будущего, которая покрывает диапазон от 20 мкм до 0.5 мм и позволит изучать состояние «теплой» межзвездной среды в этих галактиках.

Главными особенностями Миллиметрона по сравнению с предшествующими миссиями является большой диаметр зеркала и его охлаждение до гелиевых температур. Диаметр зеркала является критически важным для устранения «проблемы путаницы». Десятиметровое зеркало позволит выделять на два порядка более слабые объекты, чем «Гершель». Охлаждение позволит исследовать эти объекты со сравнительно небольшими временами экспозиции.

Кроме исследования далеких галактик обсерватория будет решать большое количество других задач, связанных с изучением областей звездообразования, межзвездной среды, протопланетных дис-

ков, атмосфер планет, спутников и малых тел Солнечной системы и т. д. Предварительная научная программа обсерватории приведена в обзоре [5].

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН 21П и научной школы НШ-2915.2012.2 «Образование крупномасштабной структуры Вселенной и космологические процессы».

Библиографические ссылки

1. *Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al.* Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571. — P. A16.
2. *Michalowski M., Hjorth J., Watson D.* Cosmic evolution of submillimeter galaxies and their contribution to stellar mass assembly // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 514. — P. A67.
3. *Ouchi M., Ellis R., Ono Y. et al.* An Intensely Star-forming Galaxy at $z=7$ with Low Dust and Metal Content Revealed by Deep ALMA and HST Observations // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 778.
4. *Smirnov A. V., Baryshev A. M., Pilipenko S. V. et al.* Space mission Millimetron for terahertz astronomy // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2012. — Vol. 8442. — P. 4.
5. *Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др.* Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // *УФН.* — 2014. — Т. 184. — С. 1.

Н. Н. Самусь
Институт астрономии РАН,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга,
Международная общественная организация
«Астрономическое Общество»

ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ С МАЛЫМИ ТЕЛЕСКОПАМИ И ОБЩЕДОСТУПНЫМИ БАЗАМИ ДАННЫХ

Любители астрономии, студенты, сотрудники небольших обсерваторий имеют все возможности внести существенный вклад в исследование переменных звезд. Для этого достаточно малых телескопов и стандартных ПЗС-фотометров. Значительных результатов можно достичь и при использовании наблюдений из фотометрических баз данных, доступных по сети Интернет.

Amateur astronomers, students, scientists from minor observatories are completely able to significantly contribute to variable star studies. To this aim, small telescopes with standard CCD photometers are sufficient. Considerable success is also possible when using observations from public-domain Internet photometric databases.

Введение

Исследования переменных звезд — достаточно традиционное направление отечественной астрономии. Такие корифеи советской астрономической науки, как П. П. Паренаго, Б. В. Кукаркин, В. П. Цесевич, П. Н. Холопов, М. С. Зверев, Д. Я. Мартынов, В. А. Амбарцумян и многие другие либо постоянно занимались изучением переменных звезд, либо включали эту тематику в сферу своих научных интересов на некоторых этапах деятельности.

Астрофизика начиналась как наука о планетах Солнечной системы. Затем была эпоха активных исследований в области физики звезд, внегалактической астрофизики, а в последние десятилетия виток спирали вывел нас на повышенный интерес к изучению

экзопланет. Приходится слышать, что переменные звезды стали периферийной областью научного поиска. Это, однако, недоразумение. Практически все действительно интересные для астрофизики объекты в звездном мире меняют свой блеск в оптическом диапазоне или на других частотах электромагнитного спектра. Одним из эффективных методов поиска экзопланет является метод планетных транзитов, когда планету обнаруживают по изменениям блеска звезды при прохождении планеты по ее диску.

Астрономия становится все более дорогой наукой. Это верно, в частности, и для исследований звезд. Спектры звезд изучают на самых больших наземных телескопах. Все больший объем фотометрических исследований приходится на телескопы, выведенные в космос. Однако не следует забывать, что изучение самого интересного для астрофизики объекта начинается с установления его интересной природы, а это чаще всего делается методами открытия и фотометрического исследования переменных звезд. Опыт показывает, что возможности малых телескопов на этих ранних этапах астрофизического исследования еще далеко не исчерпаны, а полезный вклад в науку могут внести астрономы на малых обсерваториях, аспиранты и студенты, любители астрономии.

Малые телескопы и *data mining*

Смысл, который вкладывают в понятие «малый телескоп», заметно меняется на протяжении жизни одного поколения астрономов. Когда я после 3 курса астрономического отделения МГУ в 1970 г. проходил летнюю практику на Крымской станции ГАИШ, ни один профессиональный телескоп (даже 40-см астрограф, на котором я наблюдал больше всего) мне маленьким не казался. Не так давно верхняя граница диаметра объектива малого телескопа проходила где-то в районе 1 м. Сейчас и двухметровый телескоп многим кажется небольшим. В этой лекции я произвольно считаю малыми инструментами телескопы метрового класса и меньше.

Термин *data mining*, общепринятый в современной англоязычной литературе, не имеет хорошего русского эквивалента. К сегодняшнему дню имеется полностью свободный или несколько ограниченный доступ к многочисленным фотометрическим базам данных, благодаря чему удается открывать новые переменные звезды и проводить их первичное исследование. Из числа баз данных, наиболее часто используемых для таких работ, назовем ROTSE-I/NSVS [1], ASAS-

3 [2], SuperWASP [3], Catalina [4]. У каждого из этих обзоров есть свои особенности: покрытие по времени от нескольких месяцев до нескольких лет, количество оценок блеска от нескольких десятков до многих тысяч, различные фотометрические системы (к сожалению, ни один из перечисленных обзоров не является многоцветным).

Несколько примеров

Одним из блестящих примеров программы, целиком основанной на сети малых телескопов, является проект МАСТЕР [5]. Переменные звезды не являются главным направлением проекта, ориентированного на обнаружение транзитных явлений, однако его выполнение уже привело к многочисленным интересным открытиям. Разумеется, чаще всего выявляются карликовые новые, вспыхивающие звезды. Но, как мне кажется, к числу наиболее эффектных открытий последнего времени относится затменная переменная звезда с рекордно большой амплитудой и рекордно продолжительным периодом. У «антитранзиента» OT J095310.04+335352.8 обнаружены затмения глубиной примерно в *пять* звездных величин, причем предполагаемый орбитальный период составляет 25 245 сут., т. е. почти 70 лет (Д. В. Денисенко, В. Л. Афанасьев, Д. И. Макаров, доклад на Общемосковском семинаре астрофизиков им. Я. Б. Зельдовича 31 октября 2014 г.). Период предыдущего рекордсмена, знаменитой переменной звезды ε Aur, по данным ОКПЗ, составляет «всего» 9884^d.

Среди групп исследователей, занятых в проекте МАСТЕР, весьма активно заняты поиском переменных звезд астрономы Уральского федерального университета. По наблюдениям в Коуровке открыты сотни новых переменных звезд разных типов [6].

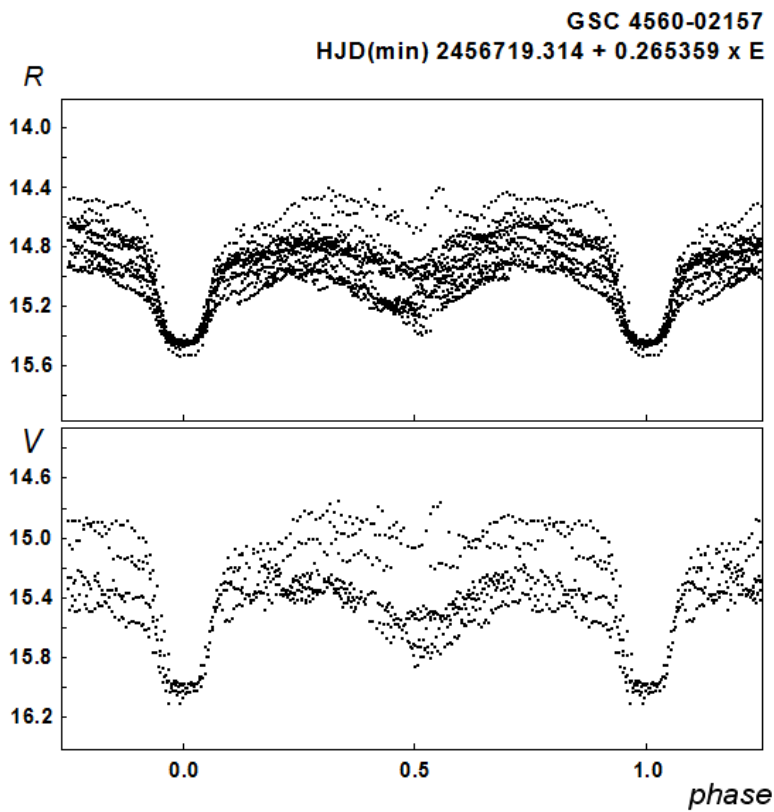
В Красноярске, в городской черте, в условиях сильной городской засветки, летних белых ночей и зимних туманов от незамерзающего Енисея, установлен 40-см телескоп системы Гамильтона. И на этом инструменте, расположенном в предельно неблагоприятных условиях, удается открывать и исследовать сотни новых переменных звезд (см., например, [7]).

Группа любителей астрономии высокого уровня установила 30-см рефлектор на обсерватории «Астротел-Кавказ», на территории станции Казанского (Приволжского) федерального университета на верхней площадке САО РАН, недалеко от БТА. ПЗС-наблюдения ведутся в дистанционном режиме, например, А. Самохваловым из

города Сургута. Одна из последних публикаций их многочисленных открытий и исследований переменных звезд — [8]. К сожалению, к работам и этой, и красноярской группы можно сделать довольно важное замечание. Обычно такие группы наблюдают какое-либо звездное поле 1–2 месяца и больше к нему не возвращаются. При такой схеме наблюдений не только невозможно вывести точные элементы изменения блеска периодических переменных звезд, но и не всегда удается распознать «пятенные» переменные звезды типа ВУ Дракона, «мимикрирующие» под другие типы периодических переменных звезд.

Поиском переменных звезд методами *data mining* много лет занимается А. В. Хруслов, начинавший свою работу как любитель, а затем пришедший в профессиональную астрономию (сейчас он аспирант ИНАСАН); его исследования характеризуются большой тщательностью и высокой достоверностью результатов. В качестве примера работы А. В. Хруслева, где поиск и исследование переменных звезд проводились по большому количеству разных обзоров, что позволило перепроверить данные, вывести наиболее достоверные элементы изменения блеска, можно указать статью [9].

Еще в 2009 г. А. В. Хруслов открыл по данным обзора ROTSE-I/NSVS переменность звезды GSC 4560–02157 в созвездии Малой Медведицы. Однако в этом обзоре реальное угловое разрешение не лучше 30'' и переменная неотделима от соседки, GSC 4560–2269, находящейся от нее на расстоянии всего 14''. В 2013–2014 гг. Хрусловым [10] были организованы ПЗС-фотометрические наблюдения сначала на одном, а затем и на двух метровых телескопах Тяньшанской высокогорной обсерватории Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова недалеко от г. Алматы, Казахстан. Оказалось, что звезда — затменная переменная типа Алголя с весьма коротким периодом (0.265 сут.). В то время как ее звездная величина во время затмения очень хорошо воспроизводится от цикла к циклу, звездная величина в максимуме подвержена очень сильным изменениям (см. рисунок). Помимо изменений общего уровня блеска наблюдается квазипериодическая переменность с коротким характерным временем. Такое поведение характерно для взрывных (катаклизмических) переменных звезд. Природу звезды удалось подтвердить, получив типичный для взрывных переменных эмиссионный спектр на 6-м телескопе БТА САО РАН, однако этот спектральный результат к малым телескопам, разумеется, не относится. Интересно, что больших вспышек у звезды пока не зарегистрировано.



Фазовая кривая блеска затменной катаклизмической переменной звезды GSC 4560—02157

Ряд других примеров успешной деятельности астрономов на малых обсерваториях, аспирантов и студентов, любителей астрономии по открытию и исследованию переменных звезд на малых телескопах или методами *data mining* будет представлен в устном варианте этой лекции в Коуровской обсерватории в феврале 2015 г.

Работы по исследованию и каталогизации переменных звезд частично поддержаны РФФИ (проект 13-02-00664) и программой Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной» (П-21).

Библиографические ссылки

1. *Woźniak P. R., Vestrand W. T., Akerlof C. W. et al.* Northern Sky Variability Survey: public data release // *Astron. J.* — 2004. — Vol. 127. — P. 2436–2449.
2. *Pojmanski G.* The All Sky Automated Survey // *Acta Astronomica.* — 1997. — Vol. 47. — P. 467–481.
3. *Butters O. W., West R. G., Anderson D. R. et al.* The first WASP public data release // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 47. — P. L10.
4. *Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A. et al.* First results from the Catalina Real-Time Transient Survey // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 696. — P. 870–884.
5. *Lipunov V., Kornilov V., Gorbousov E. et al.* Master Robotic Net // *Advances in Astronomy.* — 2010. — Vol. 2010. — P. id. 349171.
6. *Popov A. A., Burdanov A. Y., Krushinsky V. V. et al.* 300 new variable stars discovered by the Kourovka Planet Search in the first target field // *Peremennye Zvezdy Supplement.* — 2015. — Vol. 15.
7. *Lapukhin E. G., Veselkov S. A., Zubareva A. M. et al.* New variable stars in Lacerta: area of $2.3^\circ \times 2.3^\circ$, centered at $\alpha = 22^h 50^m$, $\delta = 50^\circ 00'$ (2000.0), Part III // *Peremennye Zvezdy Supplement.* — 2015. — Vol. 15.
8. *Kryachko T., Samokhvalov A., Satosvkiy B.* New variable stars in Perseus // *Peremennye Zvezdy Supplement.* — 2013. — Vol. 13. — P. 8.
9. *Khruslov A. V.* New Variable Stars II // *Peremennye Zvezdy Supplement.* — 2013. — Vol. 13. — P. 16.
10. *Khruslov A. V., Kusakin A. V., Barsukova E. A. et al.* GSC 4560–02157: a new long-period eclipsing cataclysmic variable star // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2015. — Vol. 15.

СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАДИГМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ

Представления научного сообщества о том, как происходит образование звезд в нашей Галактике, претерпели значительные изменения в последние годы. Во многом это связано с развитием наблюдательной базы астрономии в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах. Получение и анализ новых наблюдательных данных в рамках проекта *Herschel* существенно продвинули наше понимание строения областей образования звезд и дали практически исчерпывающие данные о функции масс протозвездных объектов в ряде звездообразующих комплексов Галактики. Картографирование комплексов в радиолиниях молекул позволило исследовать их пространственно-кинематическую структуру на пространственных масштабах в десятки и сотни парсек. При этом использование чувствительных радиоинтерферометров позволило исследовать детали процессов образования звезд на малых пространственных масштабах — до размеров Солнечной системы — при помощи ALMA и даже Солнца в рамках космического проекта РадиоАстрон. В совокупности с теоретическими достижениями эти данные позволили существенно развить наши представления о процессах звездообразования. В докладе будут описаны современные парадигмы образования звезд в Галактике.

Л. Л. Соколов¹, В. Ш. Шайдулин^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ И РЕЗОНАНСНЫЕ ВОЗВРАТЫ

Рассматриваются возможные соударения астероида Апофис с Землей в XXI в. Несмотря на уточнение орбиты в 2012—2013 гг., ряд вариантов соударений до сих пор возможен, так что Апофис продолжает оставаться опасным. Обычно после уточнения орбиты астероида он пропадает из списка опасных объектов; примерами могут послужить астероиды 2011 AG5, 2007 VK184 и множество других. Апофис в данном случае является исключением. Здесь представлен ряд возможных соударений астероида Апофис с Землей. Обсуждается стабильность характеристик этих соударений при малых изменениях в модели движения и области начальных условий Апофиса.

Possible collisions of asteroid Apophis with the Earth in the 21st century are considered. In spite of the refinement of its orbit in 2012—2013, a number of collisions are still possible, so that Apophis should continue to be considered as a hazardous asteroid. Usually after the refinement of an asteroid's orbit, the object can be removed from the list of hazardous objects; examples are asteroids 2011 AG5, 2007 VK184 and many others. Apophis is an exception to this trend. A list of possible collisions of asteroid Apophis with the Earth is presented. The stability of collision characteristics under small changes in the motion model and in Apophis' initial conditions is discussed.

Введение

Мы обсуждаем некоторые небесномеханические задачи, связанные с проблемой астероидно-кометной безопасности. Актуальность этой проблемы сегодня признана не только специалистами. Астероидами, которые могут упасть на Землю, интересуется общественность, а также правительства ведущих государств мира, включая Россию. После падения астероида под Челябинском в 2013 г. этот интерес

© Соколов Л. Л., Шайдулин В. Ш., 2015

значительно усилился. Актуальность проблемы связана, с одной стороны, с осознанием и лучшим ее пониманием, чему способствовало развитие техники астрономических наблюдений, с другой — с появляющимися возможностями противодействия угрозе, связанными с прогрессом космической техники. Число публикаций на тему астероидно-кометной опасности огромно, они посвящены как общим вопросам [1–4], так и специальным задачам, в частности небесно-механическим [5–8]. Целые выпуски журналов, содержащие публикации [3, 5, 9], посвящены этой теме; выпуск, содержащий [3], — Челябинскому событию.

Проблема астероидно-кометной безопасности комплексная. Она включает в себя, в частности, следующие астрономические компоненты: открытие новых потенциально опасных астероидов и наблюдения потенциально опасных астероидов, определение и уточнение их орбит по наблюдениям, прогнозирование траекторий, выделение траекторий возможных соударений и исследование их характеристик. В настоящей статье мы ограничимся последней задачей.

Другие компоненты проблемы связаны с мероприятиями по линии МЧС, минимизирующими ущерб в случае неизбежного падения астероида на Землю, а также с предотвращением соударений с использованием космических средств. Последнее подразумевает изменение орбиты астероида (кометы) тем или иным способом либо разрушение астероида (кометы). Планирование, подготовка и осуществление соответствующих мероприятий весьма ресурсозатратны. Однако необходимо подчеркнуть, что если в случае падения астероида размером до 100 м (Тунгусский метеорит, Челябинский метеорит) предотвращать его нет необходимости, падение астероида размером порядка километра и более необходимо предотвратить: столкновение с ним может привести к серьезнейшей региональной или даже глобальной катастрофе.

К счастью, большие астероиды падают на Землю существенно реже, чем маленькие. Практически безопасные объекты размером порядка метра могут входить в атмосферу каждый месяц. Среднее время между падениями «Тунгусского метеорита» — сотни лет. А для по-настоящему опасного объекта размерами порядка километра и больше — миллионы лет.

Опасность соударения определяется в основном двумя характеристиками: энергией соударения (массой и скоростью астероида) и вероятностью соударения. Часто используют синтетический крите-

рий, составленный из этих (или им подобных) характеристик. Примером являются Туринская и Палермская шкалы.

С учетом катастрофических последствий соударений с массивными астероидами задачу поиска возможных соударений нужно решать в полном объеме и заблаговременно, для того чтобы можно было своевременно принять меры противодействия. Очевидно, что выделение опасных траекторий — первый необходимый этап работ по предотвращению последствий столкновений астероидов с Землей.

Орбиты опасных астероидов, получаемые по результатам наблюдений, а также полученные в НАСА характеристики возможных соударений с Землей приведены, в частности, на регулярно обновляемом сайте <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/> (далее — сайт НАСА). Этот сайт регулярно пополняется вновь открытыми опасными объектами, их орбиты уточняются по мере поступления новых наблюдений. Отметим, что на сайте НАСА приведены не все возможные соударения, а только некоторые из числа наиболее опасных. Одна из основных причин состоит в том, что выделение возможных соударений — весьма трудная задача. Можно порекомендовать молодым астрономам и всем интересующимся проблемой регулярно заходить на этот сайт. Примерно раз в несколько месяцев там появляется вновь открытый опасный астероид больших размеров (порядка километра), с которым возможно соударение в обозримой перспективе (менее 100 лет). Естественно, вначале его орбита определена с очень низкой точностью. По мере уточнения орбиты вероятность соударений вначале обычно немного растет, потом (примерно через несколько недель) резко падает. Когда она становится меньше 10^{-10} , объект исключается из списка опасных на сайте. Так пока и происходит: «астероиды летят мимо». Сейчас в списке опасных около 500 объектов. Важно, что немало действительно опасных объектов имеют сравнительно низкую точность орбиты и давно не наблюдались. Найти их и уточнить орбиты — исключительно актуальная задача.

О прогнозировании соударений

Поиск траекторий соударения различные исследователи осуществляют разными методами. Краткий обзор основных используемых приемов приведен, например, в [10]. Как правило, фактически дело сводится к тому или иному варианту варьирования начальных данных в допустимой области изменения и численному интегрированию уравнений движения. Технология нахождения возможных

соударений, используемая в наших работах [11–14], по сути сводится к тому же. Мы используем интегратор Эверхарта [15] и (как правило) модель Солнечной системы DE 405 [16].

Отметим два существенных момента.

Мы варьируем начальные данные на 1-мерном (например, среднее движение), а не на 6-мерном многообразии, что существенно упрощает работу. Этот прием хорошо известен специалистам и подробно обсуждается в [10]. В общем случае это упрощение дает не все множество соударений, а только его значительную часть. Для Апофиса оно работает неплохо, это следует, в частности, из проведенных численных экспериментов. Нами найдено очень много соударений в области возможных движений Апофиса, они требуют подробного исследования, и почти наверняка их список может быть продолжен даже с использованием обсуждаемого упрощения.

Трудность принципиального характера при прогнозировании движения связана с потерей точности при тесных сближениях астероидов с Землей. Эта потеря может составлять 2–4 значащие цифры за одно сближение. Для того чтобы эту трудность преодолеть, использовались перенос начальных данных на более позднюю эпоху и варьирование начальных данных в новой области [11]. Мы использовали для этого юлианскую дату 2464448.5, или 1 мая 2035 г. Эксперименты показывают, что эту дату можно выбрать с большой степенью произвола. Важно лишь, чтобы она была после 13 апреля 2029 г. — момента тесного сближения Апофиса с Землей.

При вычислениях использовался компьютерный кластер Ресурсного центра СПбГУ, его применение оказалось эффективным. Этого следовало ожидать: вычисления траекторий с различными начальными данными можно проводить независимо.

Метод точечных гравитационных сфер и резонансные возвраты

При поиске возможных соударений может быть полезна аппроксимация траекторий сближения методом точечных гравитационных сфер (ТГС) как для получения обобщаемой картины в целом, так и в качестве начального приближения. Приближение ТГС состоит в том, что взаимодействие астероида с планетой сводится к мгновенному повороту вектора планетоцентрической скорости «в момент со-

ударения» на некоторый угол, модуль планетоцентрической скорости сохраняется. Тем самым сложная задача трех тел сводится к комбинации простых задач двух тел (подробнее см., например, [11]).

Для любого возможного соударения астероида с Землей, как правило, возможны также их тесные сближения, в том числе с переходом на резонансные орбиты, с последующими сближениями (резонансными возвратами) и соударениями. Причина в том, что трубка возможных траекторий существенно шире, чем размеры Земли (иначе о соударении было бы достоверно известно, произойдет ли оно). В результате для множества возможных соударений должна возникать структура фрактального типа. Последующие возможные соударения имеют существенно меньшую вероятность, чем предыдущие.

Метод ТГС позволяет просто получить множество резонансных возвратов в первом приближении. Для того чтобы выяснить, на какое расстояние произойдет новое сближение и возможно ли соударение, нужно решать неупрощенную задачу, численно интегрировать уравнения движения.

Характеристики возможных соударений

Каждое найденное семейство траекторий фиксированного соударения характеризуется, кроме даты, своим расположением и размерами. Расположение соударения можно задать, например, сдвигом большой полуоси от значения, ведущего к «основному» соударению, в окрестности которого происходит рассеяние траекторий, или сдвигом большой полуоси от номинального значения. Существенно, что сравнительно надежно определяется только относительное положение щели, или разность начальных значений больших полуосей, ведущих к соударениям.

Размеры семейства (трубки) траекторий, ведущих к данному соударению, можно задать диапазоном начальных (или промежуточных, в некоторый момент времени) больших полуосей в трубке либо диапазоном минимальных расстояний до центра Земли в трубке при некотором «основном» сближении, которое имеет место для всех рассматриваемых траекторий. Оба способа задания размеров дают согласованные результаты, что косвенно свидетельствует об их правильности.

Кроме того, фиксированное соударение характеризует минимальное геоцентрическое расстояние, минимум берется по траекториям этого соударения. Естественно, оно меньше радиуса Земли.

Все эти характеристики естественно использовать для отождествления найденных возможных соударений.

Исключительно важно исследовать устойчивость найденных соударений и их характеристик к изменению модели движения астероида: используемая теория движения планет (DE405 [16], DE423, EPM [17] и т. д.) и начальные данные астероида (для Апофиса это, например, номинальная орбита до и после 2013 г.). Такого рода исследования проведены в [13]. Оказалось, что характеристики соударений практически устойчивы. Это обстоятельство совсем не кажется тривиальным с учетом сильнейшей ляпуновской неустойчивости исследуемых траекторий.

Кроме того, найденные нами соударения надежно отождествляются с соответствующими соударениями, полученными в НАСА. При этом абсолютно независимо использовались различные модели движения, включая, видимо, и интеграторы.

Все это позволяет относиться с доверием к полученным для Апофиса результатам, а также к результатам, получаемым для других опасных астероидов.

Астероид Апофис: история

Апофис, хоть и не самый опасный на сегодня, но очень интересный АСЗ из-за установленного сближения в 2029 г. и последующего рассеяния возможных траекторий со множеством опасных альтернатив.

Астероид Апофис был открыт летом 2004 г. в обсерватории Китт Пик (США). Сразу обратила на себя внимание возможность соударения с Землей 13 апреля 2029 г. По мере уточнения орбиты вероятность этого соударения вначале возрастала, а затем стала резко убывать, как это обычно бывает у вновь открытых объектов. Максимальная вероятность в конце 2004 г. составляла примерно 3 %, что является своеобразным рекордом. Следует учесть, что тогда диаметр его оценивался в 400 м (сейчас — чуть меньше, 330 м). После проведения дорогостоящих радарных наблюдений в начале 2005 г. стало ясно, что 13 апреля 2029 г. будет иметь место не соударение, а сближение на расстояние 36–39 тыс. км.

Исследование возможных соударений Апофиса с Землей, связанных с резонансными возвратами, было начато в НАСА практически сразу после открытия этого астероида, как только выяснилось, что в 2029 г. будет иметь место тесное сближение его с Землей, а не со-

ударение [18]. Среди возможных траекторий (а их тогда было много из-за сравнительно неточной орбиты) нашлись несколько траекторий резонансного возврата после сближения в 2029 г., включая соударение в 2036 г. По мере уточнения орбиты и уменьшения трубки возможных траекторий скоро осталось только соударение в 2036 г.

Это соударение, а также близкие траектории, интенсивно исследовались в НАСА (а также в наших и многих других работах) в период с 2006 по 2011 г. Если в 2036 г. будет иметь место не соударение, а сближение, после одного из резонансных возвратов возможны другие сближения или даже соударения [11]. В работе [12] приводятся характеристики траекторий 67 возможных соударений с Землей астероида Апофис в текущем столетии, связанных с «гравитационным маневром» в 2036 г.: минимальное геоцентрическое расстояние при соударении, минимальное геоцентрическое расстояние в 2036 г., положение «щели» относительно «щели» 2036 г. (сдвиг начальной полуоси). Отметим, что «щель» 2036 г. находилась тогда сравнительно далеко от номинальной орбиты. Однако вблизи номинальной траектории Апофиса существует возможное тесное сближение с Землей в 2051 г. вместе с множеством резонансных возвратов, включая соударения. На важность этого обстоятельства обратил внимание автор работы [19] на конференции в Бухаресте в мае 2011 г. Уточнение орбиты Апофиса в конце 2011 г. с использованием появившихся в открытом доступе наблюдательных данных (включая мартовские 2011 г. наблюдения) значительно сузило трубку возможных траекторий [8]. Вероятность соударения в 2036 г. «стремилась к нулю», однако это очень неустойчивая величина. Совсем отбросить возможность этого соударения было нельзя, в частности, из-за неопределенностей эффекта Ярковского [8]. Еще меньше была в конце 2011 г. вероятность вышеупомянутых соударений после 2036 г. В конце 2011 г. на сайте НАСА было указано пять возможных соударений Апофиса: в 2036, 2056, 2068 (два соударения) и 2076 гг. Четыре последних связаны со сближением в 2051 г.

В 2012–2013 гг. имело место очередное сближение Апофиса с Землей. Была проведена интенсивная наблюдательная кампания, трубка возможных траекторий существенно сузилась после уточнения орбиты, номинальная орбита изменилась незначительно, как и ожидалось. В частности, соударение 2036 г. стало практически невероятным и было исключено из списка на сайте НАСА. После пересчета возможных соударений их список на этом сайте содержит сегодня 12 соударений, из них 9 в текущем столетии. Подчеркнем нетри-

виальность ситуации: трубка возможных траекторий существенно сузилась, а число возможных соударений, наоборот, возросло. Как правило, после значимого уточнения орбиты астероиды вообще исключаются из списка опасных. Примерами могут быть астероиды 2011 AG5, 2007 VK 184, не так давно бывшие в числе самых опасных, а также многие-многие другие. Причинами указанной нетривиальности является исключительная близость орбиты Апофиса ко многим орбитам соударения, а также, возможно, повышенное внимание, обращенное в НАСА на Апофис. Во всяком случае, Апофис остается опасным и после уточнения орбиты, только возможные соударения переносятся на более поздние сроки.

Когда Апофис достиг минимального расстояния до Земли 9 января 2013 г. и соответствующие наблюдения были обработаны, в Интернете появилась публикация [20], содержащая, в частности, новые возможные соударения и их вероятности. Эта публикация появилась в двух версиях: сначала первая, потом довольно скоро исправленная. Любопытно, что при исправлении существенно изменились вероятности соударений, в то время как положения и размеры соответствующих областей начальных данных остались практически неизменными. Это еще раз напоминает нам о неустойчивости такой важной характеристики, как вероятность соударения, — обстоятельстве, хорошо известном специалистам. В настоящее время после обработки всех наблюдений 2012—2013 гг. окончательные результаты содержат несколько меньше соударений, чем в работе [20].

Отметим еще огромное число сближений, связанных с резонансными возвратами, отмечаемое как в работах коллег из НАСА, так и в [12, 13]. Сближений в несколько раз больше, чем соударений.

Важно, что сценарий Апофиса может повториться для других АСЗ. Для астероидов 2011 AG5, 2007 VK 184, только недавно переставших быть опасными, в [14] было получено множество возможных соударений, связанных с резонансными возвратами, включая ранее неизвестные соударения.

Астероид Апофис все еще опасен

В таблице приведены возможные на сегодня соударения Апофиса в текущем столетии, имеющие большие размеры «щелей». Звездочкой отмечены соударения, приведенные сегодня на сайте НАСА, указаны как характеристики, независимо полученные нами, так и характеристики с этого сайта (вероятности и положения соударений).

Характеристики наиболее опасных траекторий соударения Апофиса с Землей

N	Дата	Δa , м	δa , м	Вероятность ($\cdot 10^7$), НАСА	Положение, НАСА
1	2055	114.	12.		
2	2056	108.	80.		
3*	2060	112.	21.	0.52	-0.723
4	2064	-11.8	13.		
5*	2065	137.	40.	1.4	-0.700
6	2066	136.	19.		
7*	2068	179.	1500.	39.	-0.663
8*	2068 _о	1790.	69.	1.5	+0.345
9*	2069 _о	4880.	270.	0.11	+3.495
10	2074	133.	19.		
11	2075	-14.8	28.		
12*	2076	213.	150.	3.3	-0.633
13*	2077	178.	38.	1.1	-0.664
14*	2078	138.	41.	1.2	-0.699
15	2078	121.	18.		
16*	2091	139.	9.3	1.2	-0.698
17	2098 _о	133.	44.		

Примечание. Δa (м) — относительное начальное положение большой полуоси щели; δa (м) — размер щели в 2035 г., или диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели).

Положения соударений определялись совсем по-разному, но видна хорошая корреляция. Видна также корреляция размеров областей, ведущих к соударениям (определенных нами), и вероятностей соударений с сайта НАСА. Символы «о» после 2068 и 2069 гг. в этой таблице обозначают, что соударения происходят не в апреле, а в октябре, в другой точке пересечения орбит астероида и Земли. Таких случаев мало.

Всего нами было найдено несколько сотен возможных соударений с Землей астероида Апофис. Более сотни из них остаются возможными и сегодня, после уточнения орбиты из наблюдений в 2012—2013 гг.

Таким образом, на сайте НАСА указаны основные (по размерам областей и вероятностям) соударения Апофиса, однако опущены соударения с вероятностями того же порядка, что и указанные.

Опущено очень много «мелких» соударений. Их положения имеют «кластерно-фрактальную» структуру, причем очень много соударений группируются вблизи номинальной орбиты. Эту структуру необходимо учитывать при планировании, разработке и осуществлении мер противодействия соударениям, а значит, ее необходимо тщательно изучать.

Заключение

Каждое тесное сближение астероида с планетой порождает вторичные сближения (резонансные возвраты), включая соударения. В результате получается множество ведущих к соударениям начальных данных с очень сложной структурой фрактального типа.

Возможные соударения и основные характеристики соответствующих траекторий сохраняются при «малых шевелениях» динамической системы (малых изменениях действующих сил, использовании других интеграторов и т. п.).

При разработке методов предотвращения соударений следует учитывать сложную структуру их множества, связанную с резонансными возвратами.

В отличие от многих других астероидов Апофис после уточнения из наблюдений его орбиты остается опасным объектом.

При проведении поисков возможных соударений Апофиса с Землей использовался компьютерный кластер Ресурсного центра Санкт-Петербургского государственного университета.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-00804, а также гранта СПбГУ 6.0.162.2010.

Авторы благодарны Никите Александровичу Петрову и Андрею Александровичу Васильеву за плодотворное сотрудничество.

Библиографические ссылки

1. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В.* Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. — М. : Физматлит, 2010.
2. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В.* О концепции комплексной программы «Создание российской системы противодействия космическим угрозам (2012—2020)» // Вестн. СибГАУ. — 2011. — Т. 6(39). — С. 4—8.

3. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В., Кулешов Ю. П. и др.* Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрон. вестн.* — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 327—340.
4. *Хюбнер У. Ф. и др.* Широкомасштабная программа защиты от потенциально опасных объектов // *Астрон. вестн.* — 2009. — Т. 43, вып. 4. — С. 348—356.
5. *Галушина Т. Ю., Раздымакина О. Н.* О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли // *Вестн. СибГАУ.* — 2011. — Т. 6(39). — С. 9—14.
6. *Ивашкин В. В., Стихно К. А.* Гравитационная коррекция орбиты астероида Апофис // *Вестн. СибГАУ.* — 2011. — Т. 6(39). — С. 51—55.
7. *Стихно К. А.* Метод поиска траекторий опасных небесных тел, приводящих к столкновению с Землей // *Вестн. СибГАУ.* — 2011. — Т. 6(39). — С. 46—50.
8. *Шор В. А., Чернетенко Ю. А., Кочетова О. М., Железнов Н. Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 2. — С. 131—142.
9. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А.* Траектории соударения астероидов с Землей и резонансные возвраты // *Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества.* — 2013. — Т. 2, вып. 4. — С. 148—153.
10. *Галушина Т. Ю.* Методы прогнозирования движения опасных для Земли астероидов и оценки вероятности столкновения // *Физика космоса : Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., 30 янв. — 3 февр. 2012 г., Екатеринбург.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 57—70.
11. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П.* Особенности движения астероида 99942 Apophis // *Астрон. вестн.* — 2008. — Т. 42, вып. 1. — С. 20—29.
12. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Петров Н. А. и др.* Траектории возможных соударений астероида Апофис // *Вестн. СибГАУ.* — 2011. — Т. 6(39). — С. 39—42.
13. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Борисова Т. П. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 4. — С. 311—320.

14. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // Астрон. вестн. — 2013. — Т. 47, вып. 5. — С. 441–447.
15. *Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 1974. — Vol. 10. — P. 35–55.
16. *Standish E. M.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405 : Interoffice Memorandum 312.F-98-048 : JPL, 1998.
17. *Pitjeva E. V.* EPM ephemerides and relativity // *Relativity in fundamental astronomy* : Proc. IAU Symp. N 261. — Cambridge : Cambridge University Press, 2010. — P. 170–178.
18. *Chesley S. R.* Potential Impact Detection of Near-Earth Asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors* : Proc. IAU Symp. 229th, 2005, Cambridge : Cambridge University Press, 2006. — P. 215–228.
19. *Chesley S. R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // *From Threat to Action* : IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania : 2011.
20. *Farnocchia D. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. — arXiv:1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.

ДИССИПАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА

Солнечное пятно при его диссипации не расплывается, теряя контраст, как капля масла на бумаге, но «тает» с боков, подобно льдинке, сохраняя в своей центральной части, в тени, низкую температуру и сильное магнитное поле за счет постоянного бокового поджатия разностью газовых давлений между пятном и окружающей средой. Представлена модель процесса диссипации магнитного поля солнечного пятна через тонкий граничный слой на боковой поверхности магнитной силовой трубки пятна. Получена как основная стадия диссипации, при которой площадь тени сокращается со временем по линейному закону, так и эффект замедления диссипации в малых пятнах. Показано, что учет дискретного характера диссипации поля в виде тонких волоконцев, отщепляющихся от основного магнитного массива, не меняет существенно полученных результатов.

Sunspot during its dissipation does not spread in the photosphere, losing contrast, like a drop of oil on paper, but "melts" from the sides, like icicles, keeping in its central part, in the umbra, low temperature and strong magnetic field due to permanent lateral compression by the gas pressure difference between the spot and the environment. The model of the process of magnetic field dissipation through a thin boundary layer on the lateral side of a magnetic flux tube of sunspot is presented. As the main stage of the dissipation, when the umbra area decreases linearly with time, and the effect of retarded dissipation in small spots are derived. It is shown that the account of the discrete nature of the field dissipation in the form of thin fibrils, successively cleaved from the main magnetic body of sunspot, does not change significantly the results obtained.

Введение

Проблема диссипации солнечных пятен — одна из классических проблем солнечной физики. Каулинг [1, 2] первым поставил вопрос о

роли омических потерь в распаде солнечных пятен. Уравнение диффузии магнитного поля в неподвижной среде с проводимостью σ

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \Delta \mathbf{B} \quad (1)$$

дает оценку характерного времени диссипации объекта поперечного радиуса a :

$$\tau = 4\pi\sigma a^2 c^{-2}. \quad (2)$$

Принимая для проводимости плазмы ее фотосферное значение ($\sigma_{ph} \approx 10^{12} c^{-1}$) и беря для радиуса круглого солнечного пятна (с полутенью) оценку $a = a_p = 10^9$ см, получаем $\tau = 10^{10} \text{ с} = 300$ лет. На этом основании Каулинг заключил, что омические потери не играют существенной роли в распаде солнечных пятен, и оценка (2) до сих пор используется при обсуждении проблемы омической диссипации пятен [3]. Фундаментальное решение уравнения (1) для осесимметричного случая (цилиндрические координаты r, φ, z) в виде

$$B_{(r,t)} = \frac{\Phi_0}{4\pi Dt} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right), \quad (3)$$

где $D = c^2(4\pi\sigma^{-1})$ — магнитная вязкость; Φ_0 — полный магнитный поток вдоль вертикальной оси z , было также использовано в известной работе [4] для моделирования процесса диссипации пятна. Оно описывает плавное расплывание в пространстве магнитного потока, первоначально сосредоточенного с бесконечно большой плотностью на оси симметрии. В этом процессе рост площади, занятой потоком Φ_0 , сопровождается соответствующей убылью напряженности поля в центре. Но проблема в том, что реальная картина явления, наблюдаемая при распаде солнечных пятен, разительно отличается от той, что представлена решением (3) уравнения (1). В процессе своей диссипации

- пятно сохраняет четкие очертания, его границы «тень—полутень» и «полутень—фотосфера» не размываются, геометрический размер пятна (радиус тени) не увеличивается, а, напротив, уменьшается со временем;
- низкая температура и соответственно пониженная яркость тени пятна практически не меняются со временем;
- напряженность поля в центре пятна B_0 не меняется вовсе или меняется слабо, главным образом в соответствии с эволюцион-

ной зависимостью $B_0(a)$, согласно которой напряженность поля в малых пятнах систематически меньше, чем в крупных [5].

Эти важнейшие особенности распада пятна ясно указывают на то, что магнитное поле пятна уменьшается не за счет роста (расплывания) его площади и соответствующего ослабления напряженности поля на оси, а за счет ухода магнитного потока из области тени через тонкий граничный слой на боковой границе между магнитной силовой трубкой пятна и окружающей средой [6–10] (рис. 1). Этот тонкий слой автоматически поддерживается на границе пятна благодаря тому, что внешняя среда (фотосфера и конвективная зона) постоянно поджимает магнитную силовую трубку пятна в радиальном направлении, обеспечивая горизонтальный баланс давлений

$$P_{ex}(z) - \{P_{in}(z)\} = \{B_z^2\}(8\pi)^{-1}, \quad (4)$$

обусловленный тем, что из-за охлаждения плазмы в пятне и опускания холодного газа на уровень вильсоновской депрессии ($\Delta h \approx (300-500)$ км) давление газа внутри магнитной силовой трубки пятна значительно, на величину магнитного давления, меньше, чем газовое давление внешней среды на том же геометрическом уровне. (В формуле (4) фигурные скобки означают усреднение по площади поперечного сечения тени пятна.) Этот поперечный баланс давлений устанавливается очень быстро, со скоростью $\sqrt{V_a^2 + c_s^2}$, где V_a — альвеновская скорость; c_s — скорость звука, что значительно превышает скорость диффузии магнитного поля в граничном слое. Это означает, что диффузионный процесс в пятне следует рассматривать как квазистатический: система проходит непрерывную последовательность равновесий, при этом магнитная трубка пятна, сохраняя свою внутреннюю структуру, относительно медленно сокращается, $V_D \ll \sqrt{V_a^2 + c_s^2}$. В данном случае, очевидно, имеет место сложный самоподдерживающийся процесс в нелинейной диссипативной структуре. Для его описания уравнение диффузии магнитного поля в неподвижной среде (1) с его фундаментальным решением (3) совершенно непригодно. Здесь необходимо использовать полное уравнение индукции с обязательным учетом поля скорости:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = D\Delta \mathbf{B} + \text{rot}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]. \quad (5)$$

В данном случае под скоростью плазмы во втором члене правой части надо понимать именно скорость радиального самоподобного поджатия пятна, обусловленного поддержанием баланса (4). Эти

идеи были использованы автором для моделирования распада солнечных пятен в работах [7–9], где был получен как основной закон наблюдаемого медленного распада пятен — линейная фаза диссипации, так и эффект замедления скорости сокращения площади тени в малых пятнах, подтвержденный наблюдательно [11, 12].

В данной работе предложен другой, более простой и наглядный, способ вычисления скорости диссипации пятна с использованием упрощенной модели распределения поля в пятне. Здесь также получается как линейная стадия диссипации в крупных пятнах, так и режим ее замедления — в малых.

Модель магнитной ступеньки

Согласно схематическому изображению пятна, представленному на рис. 1, его магнитное поле в квазицилиндрической части магнитной силовой трубки имеет только одну вертикальную составляющую, $\mathbf{V} = \{\mathbf{B}_z(\mathbf{r}, t), \mathbf{0}, \mathbf{0}\}$, радиальную зависимость которой можно представить в виде «ступеньки» со слабо размытым краем:

$$B_z(r, t) \equiv B(r, t) = \frac{B_0}{\exp\left(\frac{r-a(t)}{\delta}\right) + 1}, \quad (6)$$

где $a(t)$ — радиус тени пятна (магнитного цилиндра), отсчитываемый от оси симметрии до середины граничного слоя — точки А на рис. 1 (это точка перегиба функции $B_z(r, t)$); δ — толщина тонкого граничного слоя на боковой поверхности магнитного цилиндра (рис. 1). Строго говоря, за границей магнитной силовой трубки реального солнечного пятна, при $r > a(t) + \delta$, магнитное поле падает не до нуля, а только до некоторого значения порядка 300–400 Гс, значительно меньшего напряженности поля в тени пятна. Однако эта деталь в данном случае не имеет принципиального значения, и мы для большей наглядности и простоты модели не станем ее учитывать. В модели магнитной ступеньки мы также пренебрегаем зависимостью поля от радиального расстояния внутри тени пятна, которая была учтена в более сложной модели [8, 9], т. е. считаем, что изменение поля в масштабе радиуса a пренебрежимо мало по сравнению с его изменением на границе, в масштабе δ . При условии $\delta \ll a$ такое приближение вполне оправданно.

Описанная выше картина диссипации солнечного пятна дает все основания полагать, что радиальное поджатие пятна сохраняет его

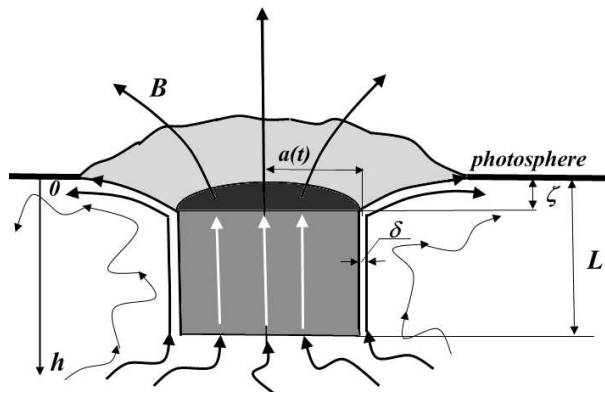


Рис. 1. Схематический разрез солнечного пятна. На глубинах ниже уровня вильсоновской депрессии, $h > \xi$, но выше нижней границы пятна, $h < L \approx 4$ Мм, магнитную трубку пятна можно, согласно Паркеру (1979), считать цилиндрической. Ниже уровня $h = L$ находится зона перегретой плазмы, здесь магнитная силовая трубка пятна резко расширяется, поле ослабевает и запутывается конвекцией, теряя регулярную структуру. Магнитные силовые линии, продиффундировавшие через граничный слой толщины δ , изображены тонкими запутанными линиями

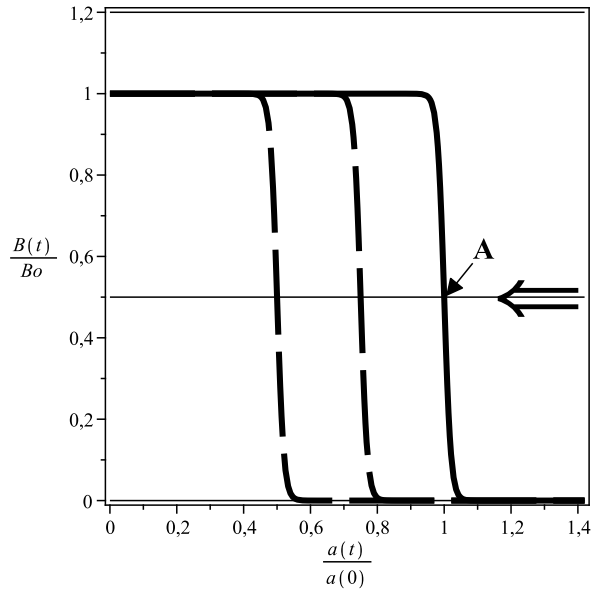


Рис. 2. Радиальное распределение вертикального поля в тени пятна в виде магнитной ступеньки. А — точка перегиба на уровне 0.5. Фигурной стрелкой показано направление радиального поджатия магнитной силовой трубки пятна в процессе его диссипации. Сплошная линия — распределение магнитного поля в начальный момент времени, пунктирные — в последующие моменты времени. В данном расчете принято $\delta = 0.01a(0)$

структуру самоподобной, и на краю пятна в области перегиба функции (6) магнитное поле в элементе плазмы, движущемся радиально к центру пятна со скоростью $V = V_D$, остается неизменным, т. е. полная (лагранжева) производная от магнитного поля по времени в этой точке равна нулю:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{B} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

С учетом данного условия уравнение (5) для окрестности точки А примет вид

$$-(\mathbf{V} \nabla) \mathbf{B} = -\mathbf{D} \text{rot}(\text{rot} \mathbf{B}) + \text{rot}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] \quad (8)$$

и его единственная отличная от нуля составляющая запишется следующим образом:

$$-V_D \frac{\partial B}{\partial r} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B V_D). \quad (9)$$

Отсюда, с учетом того что в точке перегиба вторая производная обращается в нуль, получаем простое уравнение для нахождения скорости радиального поджатия пятна в точке А:

$$D \frac{\partial B}{\partial r} = B V_D. \quad (10)$$

Подставляя в (10) распределение поля (6) и учитывая, что $V_D = \frac{\partial a(t)}{\partial t}$ и что в точке А при $r = a(t)$, $B = 0.5 B_0$, мы получаем основное уравнение нашей задачи

$$\frac{\partial a(t)}{\partial t} = -\frac{D}{2\delta(t)}. \quad (11)$$

Линейная стадия диссипации пятна

Далее рассмотрим два различных случая относительно зависимости $\delta(t)$. Как было показано в работах [7–9], для крупных пятен, у которых магнитный поток, прошедший через граничный слой, не успевает рассеиваться в окружающем пятно пространстве за счет турбулентной диффузии, возникает линейная зависимость толщины граничного слоя от размера пятна: $\delta(t) = \epsilon a(t)$, где ϵ — малый постоянный коэффициент: $\epsilon \approx 0.01$. Gokhale и Zwaan [6] полагали, что данный коэффициент может быть еще на 2–3 порядка меньше. Суть

этого эффекта в том, что, расширяясь, граничный слой автоматически подстраивает скорость ухода магнитного потока из пятна под скорость диффузионного рассеяния поля турбулентными движениями плазмы во внешней среде. В этом случае

$$\frac{\partial \pi a^2(t)}{\partial t} \equiv \frac{\partial S_U}{\partial t} = -\frac{\pi D}{\epsilon}, \quad (12)$$

т. е. скорость убывания площади тени пятна оказывается не зависящей от его размера, и мы получаем линейный закон ее уменьшения со временем:

$$\frac{S_U(t)}{S_U(0)} = \frac{a^2(t)}{a^2(0)} = 1 - \frac{t}{\tau_1}, \quad (13)$$

где

$$\tau_1 = 4\pi\sigma\epsilon a^2(0)c^{-2}. \quad (14)$$

От формулы Каулинга (2) эта оценка отличается тремя численными величинами: во-первых, множителем ϵ , учитывающим малую толщину граничного слоя; во-вторых, тем, что для проводимости плазмы здесь следует брать не фотосферное ее значение ($\sigma_{ph} \approx 10^{12}c^{-1}$), а пятенное, которое, за счет низкой степени ионизации плазмы в поверхностных слоях пятна, меньше фотосферного примерно на два порядка [13, 14]. В монографии [10] приведена оценка $\sigma_u = 9 \times 10^9 c^{-1}$. Для численных расчетов примем, что проводимость плазмы в граничном слое равна $\sigma_u = 10^{10}c^{-1}$; в-третьих, в качестве характерного размера в формуле (13) стоит квадрат радиуса тени, а не радиуса всего пятна с полутенью, что уменьшает оценку еще примерно в шесть раз [15]. В целом эти поправки снижают время жизни пятна на 4–5 порядков, т. е. получается $\tau_1 = \frac{12 \times 10^{10} \times 0.01 \times 10^{17}}{10^{21}} = 1.210^5$ с — около полутора дней для малого пятна с радиусом тени 3.3 Мм, до 4–5 дней при $a_u = (7–8)$ Мм и до месяца при $a_u = 15$ Мм, что вполне согласуется с наблюдательными данными.

Эффект замедления диссипации в малых пятнах

Для малых пятен эффект расширения граничного слоя пропорционально радиусу тени отсутствует, и потому следует считать, что для них толщина граничного слоя определяется только физическими

процессами на его границе и не зависит от размера пятна: $\delta = \delta_0 = \text{const} \approx \epsilon a(0)$. Тогда $\frac{\partial a(t)}{\partial t} = -\frac{c^2}{8\pi\sigma\delta_0}$ и соответственно

$$\frac{S_u(t)}{S_u(t^*)} = \frac{a^2(t)}{a^2(t^*)} = \left(1 - \frac{t - t^*}{\tau_2}\right)^2, t > t^*, \quad (15)$$

где t^* — момент времени, начиная с которого закон линейной диссипации (13) сменяется нелинейным законом (15);

$$\tau_2 = 8\pi\sigma\delta_0 a(t^*) c^{-2}. \quad (16)$$

Если принять $\delta_0 a(t^*) \approx \epsilon a^2(0)$, то получается, что $\tau_2 = 2\tau_1$. В точке $t = t^*$ функция $S_u(t)$ должна быть непрерывна. Из этого следует $S_u(t^*) = S_u(0)(1 - \frac{t^*}{t_1})$. На рис. 3 функция $S_u(t)$ представлена в относительных единицах для случая $\tau_1 = 4^d, \tau_2 = 8^d$ и $t^* = 3^d$. На этом же графике в качестве типичного примера представлены результаты измерения площади тени для пятна № 233.56 (1973) по гринвичскому каталогу (начальное значение площади тени этого пятна составляло 64 м.д.п., что соответствует площади всего пятна с полутенью, равной примерно 380 м.д.п.) и для пятна № 220.23 (1969), у которого начальное значение площади тени было равно 40 м.д.п. Эти данные взяты из работы Соловьева и Кузнецовой [12] (рис. 5, нижняя панель). Приведенная в этой же работе на рис. 4 сводная зависимость $S_u(t)$ для 95 солнечных пятен достаточно правильной формы, обнаруживающих на диске стадию медленной регулярной диссипации, имеет форму, аналогичную приведенным на рис. 3 примерам: в течение первых 3–4 дней четко обозначается линейный спад площади тени пятна до значений 15–20 м.д.п., а затем скорость диссипации пятна значительно замедляется. Аналогичный ход кривой $S_u(t)$ был получен ранее для 19 пятен по фотоматериалам Горной астрономической станции ГАО РАН [11].

Учет дискретного характера диссипации поля

Согласно изложенной модели пятно диссипирует за счет непрерывного просачивания магнитного потока из пятна в окружающую фотосферу через самоподдерживающийся граничный слой малой толщины. Однако тонкая волокнистая структура полутени пятна наводит на мысль, что диссипация его магнитного поля происходит не непрерывно, а дискретным образом, путем отрыва от основного магнитного «ствола» тонких вертикальных волоконцев, образующихся

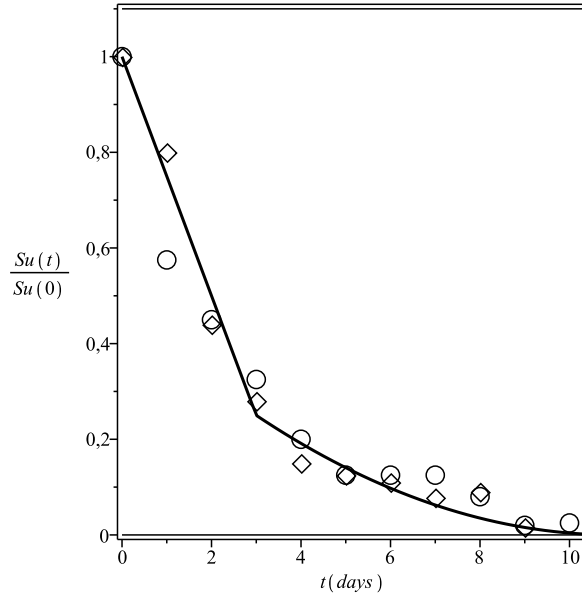


Рис. 3. Сплошная линия — теоретическая кривая $\frac{S_u(t)}{S_u(0)}$ при значениях параметров: $\tau_1 = 4^d$, $\tau_2 = 8^d$ и $t^* = 3^d$. По горизонтальной оси — время в сутках. Ромбиками отмечены результаты измерений для пятна № 233.56 (1973), кружками — данные для пятна № 220.23 (1969) по гринвичскому каталогу

при расщеплении граничного токового слоя. Отделившись от пятна, эти тонкие волоконца, так же как и отдельные силовые линии, рассеиваются хаотическими конвективными движениями в окружающей пятно среде [8]. Рассмотрим, к какому закону диссипации приведет данное предположение. Конкретный механизм расщепления токового граничного слоя на тонкие волоконца в данном случае не важен. Пусть за время δt на периферии пятна с площадью тени $S_u = \pi a^2$ образуется N тонких вертикальных магнитных волокон с малым поперечником δ каждое. Очевидно, $N = 2\pi a \delta^{-1}$. При этом площадь тени уменьшится на величину $\Delta S_u = -N \frac{\pi \delta^2}{4}$. Следовательно, $\frac{\Delta S_u}{\Delta t} = -N \frac{\pi \delta^2}{4 \Delta t} = -\frac{\pi^2 a \delta}{2 \Delta t}$. Отсюда $\frac{da}{dt} = -\frac{\pi \delta}{4 \Delta t}$. Если малое дискретное время Δt имеет смысл скин-времени ($\Delta t = \delta^2 D^{-1}$), что представляется наиболее естественным, то мы приходим к формуле

$$\frac{da}{dt} = -\frac{\pi D}{4\delta}, \quad (17)$$

которая отличается от нашей основной формулы (11) лишь численным коэффициентом: в знаменателе вместо 2 стоит $\frac{4}{\pi} = 1.273$, т. е. скорость дискретной диссипации поля оказывается в полтора раза (в 1.57) больше, чем в приведенном выше анализе непрерывного просачивания. Эту разницу легко учесть: для того чтобы с использованием формулы (17) вернуться к полученным выше результатам, достаточно для численных оценок взять величину проводимости равной $\sigma_u = 1.57 \times 10^{10} \text{c}^{-1}$ вместо принятой выше $\sigma_u = 10^{10} \text{c}^{-1}$. Отметим, что вывод формулы (17) не связан с конкретной формой радиального профиля поля внутри тени пятна, достаточно лишь, чтобы магнитная силовая трубка пятна имела отчетливо выраженную боковую границу.

Обсуждение

Приведенные выше численные расчеты проделаны нами для наблюдаемых слоев пятна с оптической толщиной порядка единицы. Как видим, они хорошо соответствуют наблюдениям. Но в более глубоких слоях, на глубине 3—4 Мм, температура и соответственно проводимость плазмы пятна заметно увеличиваются и время его жизни должно возрастать. Этого не случится, если допустить, что толщина граничного слоя уменьшается с глубиной пропорционально росту проводимости, так что произведение $\sigma_u \delta$, величиной которого

определяется скорость диссипации поля, остается неизменным и примерно равным его поверхностному значению. Кроме того, учитывая дискретный характер диссипации поля, можно полагать, что более быстрое расщепление границы магнитной силовой трубки пятна в ее поверхностных слоях облегчает этот процесс для нижних слоев по чисто динамическим причинам: верхняя часть магнитного волокна, отделившись от основного магнитного массива, будет увлекаться турбулентным движением внешней среды прочь от пятна и тянуть за собой нижнюю, еще не полностью отщепленную от пятна часть волокна, ускоряя тем самым весь процесс диссипации.

Приведенные соображения представляются вполне разумными для модели мелкого пятна, схематически изображенной на рис. 1. Основа этой модели [5] состоит в том, что, согласно данным локальной гелиосейсмологии, солнечное пятно, как область, занятая сильным магнитным полем и относительно холодной плазмой, проникает в конвективную зону Солнца на очень небольшую глубину, всего около 4 Мм. В более глубоких слоях газ под пятном оказывается перегретым по сравнению с окружающей средой примерно на 1 000 К [16–20]. Собственно говоря, сама идея о горячей зоне под пятном возникла задолго до появления локальной гелиосейсмологии: ее обсуждали Пономаренко [21, 22] и Паркер [23, 24], а в монографии Обридко [10] она была сформулирована во введении как одно из основных свойств пятна.

Действительно, физическая причина образования перегретой зоны под пятном вполне очевидна: пятно, как холодная структура с сильным магнитным полем, эффективно блокирует идущий снизу поток конвективного тепла. Это тепло, не имея выхода наверх, аккумулируется в обширной зоне под пятном, создавая здесь дополнительный разогрев плазмы. Новым в данных локальной гелиосейсмологии было то, что они дали количественную оценку глубины, начиная с которой возникает горячая зона ($L = 4$ Мм), и степени перегретости газа в этой зоне $\Delta T \approx 1\,000$ К, показали, что переходный слой между холодной плазмой пятна и горячей зоной очень тонок — не более нескольких сотен километров, а также установили характер крупномасштабных подфотосферных течений газа под пятном и его окрестности.

Автор признателен проф. В. Н. Обридко за полезное обсуждение затронутых выше проблем. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-02-00714.

Библиографические ссылки

1. *Cowling T. G.* The growth and decay of the sunspot magnetic field // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1946. — Vol. 106. — P. 218.
2. *Cowling T. G.* Solar Electrodynamics // The Sun / ed. by G. P. Kuiper. — 1953. — P. 532.
3. *Priest E. R.* Solar magneto-hydrodynamics. — 1982.
4. *Meyer F., Schmidt H. U., Wilson P. R., Weiss N. O.* The growth and decay of sunspots // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1974. — Vol. 169. — P. 35–57.
5. *Solovév A., Kirichek E.* Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations // Astrophys. Space. Sci. — 2014. — Vol. 352. — P. 23–42.
6. *Gokhale M. H., Zwaan C.* The Structure of Sunspots. I: Observational Constraints: Current Sheet Models // Sol. Phys. — 1972. — Vol. 26. — P. 52–75.
7. *Solovév A. A.* Ohmic dissipation of sunspots // Soviet Astronomy. — 1976. — Vol. 20. — P. 75.
8. *Solovev A. A.* The Problem of Sunspot Dissipation // Soviet Astronomy. — 1991. — Vol. 35. — P. 83.
9. *Solovev A. A.* Area and Magnetic Field of a Sunspot during Slow Dissipation // Soviet Astronomy. — 1991. — Vol. 35. — P. 306.
10. *Obridko V. N.* Sunspots and activity complexes. — 1985.
11. *Solovév A. A.* On the problem of sunspot decay. // Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk SSSR. — 1976. — Vol. 1976. — P. 73–78.
12. *Соловьев А. А., Кузнецова М. А.* Уменьшение площади тени пятна на стадии регулярной диссипации // Солнечная активность как фактор космической погоды : Тр. 9-й Пулков. конф., Санкт-Петербург, 4 июля — 9 июля 2005 г., СПб : ГАО РАН, 2005. — С. 4.
13. *Bray R. J., Loughhead R. E.* Sunspots. — 1964.
14. *Kopecký M., Kuklín G. V.* On the decay time of sunspot magnetic fields // Bull. of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia. — 1966. — Vol. 17. — P. 45.
15. *Allen C. W.* Astrophysical quantities. — 1973.

16. *Kosovichev A. G., Duvall T. L., Jr., Scherrer P. H.* Time-Distance Inversion Methods and Results — (Invited Review) // *Sol. Phys.* — 2000. — Vol. 192. — P. 159–176.
17. *Zhao J., Kosovichev A. G., Duvall T. L., Jr.* Investigation of Mass Flows beneath a Sunspot by Time-Distance Helioseismology // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 557. — P. 384–388.
18. *Kosovichev A. G.* Subsurface structure of sunspots // *Astronomische Nachrichten.* — 2002. — Vol. 323. — P. 186–191.
19. *Kosovichev A. G.* Subsurface characteristics of sunspots // *Advances in Space Research.* — 2006. — Vol. 38. — P. 876–885.
20. *Kosovichev A. G.* Local Helioseismology of Sunspots: Current Status and Perspectives // *Sol. Phys.* — 2012. — Vol. 279. — P. 323–348.
21. *Ponomarenko Y. B.* Mechanism for the Formation of Sunspots. // *Астрон. журн.* — 1972. — Vol. 49. — P. 148.
22. *Ponomarenko Y. B.* Heating and Decay of Sunspots. // *Астрон. журн.* — 1972. — Vol. 49. — P. 568.
23. *Parker E. N.* The Nature of the Sunspot Phenomenon. I: Solutions of the Heat Transport Equation // *Sol. Phys.* — 1974. — Vol. 36. — P. 249–274.
24. *Parker E. N.* The Nature of the Sunspot Phenomenon. II: Internal Overstable Modes // *Sol. Phys.* — 1974. — Vol. 37. — P. 127–144.

К. В. Холшевников^{1,2},
Т. Н. Санникова¹, Н. Батмунх¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
²Институт прикладной астрономии РАН

СВЯЗЬ ВОЗМУЩЕНИЙ КООРДИНАТ И ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ

Стандартная оценка приращений координат по приращениям элементов чрезвычайно груба. Нам удалось получить точную оценку, используя евклидову (среднеквадратичную) норму уклонения. Для этого сначала выведено относительно простое выражение для квадрата уклонения радиуса-вектора $d\mathbf{r}$ через уклонения элементов. Это соотношение применено для оценки нормы $\|d\mathbf{r}\|$ в следующей модельной задаче. Точка нулевой массы движется под действием притяжения к центральному телу и возмущающего ускорения \mathbf{P} . Вектор \mathbf{P} считается постоянным в сопутствующей системе отсчета с осями, направленными по радиусу-вектору, трансверсали и вектору площадей. Обозначим через $d\mathbf{r}$ разность векторов положения на оскулирующей и средней орбите. Оказалось, что $\|d\mathbf{r}\|^2$ является взвешенной суммой квадратов компонент \mathbf{P} , коэффициенты которой зависят лишь от большой полуоси и эксцентриситета средней орбиты. Результаты применены к двум задачам о движении ИСЗ и астероида.

Standard estimate of coordinates perturbations via perturbations of elements is drastically rough. We succeed to obtain an exact estimate using Euclidean (mean-squared) norm of a variance. For this a relatively simple expression for the squared variance of the radius-vector via variances of elements was firstly derived. This expression was applied to estimate the norm $\|d\mathbf{r}\|$ in a following model problem. A zero-mass point moves under attraction to a central body and a disturbing acceleration \mathbf{P} . The vector \mathbf{P} is constant in an accompanying reference frame with axes directed along the radius, the transversal, and the angular momentum vector. Let $d\mathbf{r}$ be a difference between position vectors on the osculating orbit, and on the mean one. It turns out that $\|d\mathbf{r}\|^2$ is a weighted sum of squared components of \mathbf{P} , and the corresponding coefficients depend on semi-major axis and eccentricity of the nominal orbit only. The results are applied to the two problems on the motion of a sputnik, and of an asteroid.

Введение

Аналитические теории движения небесных тел можно разделить на два класса в зависимости от используемых переменных. Построения первого класса имеют дело с координатами и скоростями, построения второго класса — с элементами орбит, т. е. с координатами в фазовом пространстве, где координаты конфигурационного пространства и пространства скоростей перемешаны. В теории второго класса мы получаем возмущения элементов, оценку величины которых получить нетрудно. Однако на практике нам надо получить возмущения координат и скоростей. Это тоже нетрудно. Поскольку оценку величины возмущений достаточно знать с невысокой точностью, можно заменить приращения дифференциалами

$$dx_i = \sum_j p_{ij} d\epsilon_j, \quad p_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial \epsilon_j}, \quad (1)$$

где через x_i обозначены три декартовы координаты вектора положения $\mathbf{r}(x_1, x_2, x_3)$, а через ϵ_j — шесть независимых элементов орбиты. Разумеется, можно пользоваться не только декартовыми координатами, и выбор элементов весьма обширен. Но с декартовыми координатами все формулы получаются более простыми и симметричными. Если через ϱ обозначить длину дифференциала вектора положения

$$\varrho^2 = \sum_i dx_i^2, \quad (2)$$

то согласно (1)

$$\varrho^2 \leq \sum_i \left(\sum_j |p_{ij}| |d\epsilon_j| \right)^2. \quad (3)$$

Однако практика показывает, что правая часть (3) обычно превышает левую на несколько порядков. В случае круговых или слабонаклоненных орбит завышение ϱ становится чудовищным, поскольку возмущения некоторых элементов содержат в знаменателях эксцентриситеты и синусы наклона.

В этой работе мы приведем аналитические формулы, дающие точную оценку ϱ . Аналогичные построения можно выполнить и для оценки дифференциала вектора скорости, но эту серьезную работу отложим на будущее.

Выражение ϱ^2 через дифференциалы элементов

В небесной механике используется множество различных оскулирующих элементов. Наиболее просто декартовы координаты выражаются через пять кеплеровских элементов, постоянных в невозмущенном движении, плюс истинная или эксцентрическая аномалия. Наш опыт показал, что для указанных во введении целей предпочтительнее истинная аномалия. Если же вариации элементов даются в функции эксцентрической аномалии, проще переходить к ней на заключительном этапе.

Примем за основу формулы [1–3]:

$$\begin{aligned}x_1 &= r(\cos u \cos \Omega - c \sin u \sin \Omega), \\x_2 &= r(\cos u \sin \Omega + c \sin u \cos \Omega), \\x_3 &= rs \sin u,\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}r \cos \theta &= a(\cos E - e), \\r \sin \theta &= a\eta \sin E.\end{aligned}\tag{5}$$

Здесь и ниже $\omega, e, i, g, \Omega, M, \theta, E, u, a$ — среднее движение, эксцентриситет, наклон, аргумент перицентра, долгота восходящего узла, средняя, истинная и эксцентрическая аномалии, аргумент широты, большая полуось; $c = \cos i$, $s = \sin i$, $\eta = \sqrt{1 - e^2}$.

Дифференцируя (4), получим

$$\begin{aligned}dx_1 &= (\cos u \cos \Omega - c \sin u \sin \Omega) dr + rs \sin u \sin \Omega di - \\&\quad - r(\sin u \cos \Omega + c \cos u \sin \Omega) du - r(\cos u \sin \Omega + c \sin u \cos \Omega) d\Omega, \\dx_2 &= (\cos u \sin \Omega + c \sin u \cos \Omega) dr - rs \sin u \cos \Omega di - \\&\quad - r(\sin u \sin \Omega - c \cos u \cos \Omega) du + r(\cos u \cos \Omega - c \sin u \sin \Omega) d\Omega, \\dx_3 &= s \sin u dr + rc \sin u di + rs \cos u du.\end{aligned}\tag{6}$$

Найдем квадрат дифференциала радиуса-вектора:

$$\begin{aligned}\varrho^2 \stackrel{\text{def}}{=} (d\mathbf{r})^2 &= dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = dr^2 + r^2 \sin^2 u di^2 + r^2 du^2 + \\&\quad + r^2(1 - s^2 \sin^2 u) d\Omega^2 - 2r^2 s \cos u \sin u di d\Omega + 2r^2 c dud\Omega.\end{aligned}\tag{7}$$

При выводе (7) использованы тождества

$$\cos^2 u + c^2 \sin^2 u = c^2 + s^2 \cos^2 u = 1 - s^2 \sin^2 u,$$

$$\sin^2 u + c^2 \cos^2 u = 1 - s^2 \cos^2 u.$$

В общем случае квадратичная форма от четырех переменных содержит четыре квадрата и шесть попарных произведений. Форма (7) содержит лишь два произведения, что говорит о ее близости к ортогональной. Часто более удобным оказывается представление, содержащее сумму трех полных квадратов:

$$g^2 = dr^2 + r^2(du + c d\Omega)^2 + r^2 (\sin u di - s \cos u d\Omega)^2. \quad (8)$$

Быстрая переменная (аргумент широты) явно входит лишь в последнее слагаемое (8). Переход к истинной аномалии прост: $u = g + \theta$. Для перехода к эксцентрической аномалии годятся формулы

$$\begin{aligned} (r/a) \cos u &= (\cos E - e) \cos g - \eta \sin g \sin E, \\ (r/a) \sin u &= (\cos E - e) \sin g + \eta \cos g \sin E. \end{aligned} \quad (9)$$

Разности оскулирующих и средних элементов для одной задачи небесной механики

Рассмотрим одну задачу небесной механики, впервые доложенную на предыдущей 43-й нашей конференции [4] и более подробно разобранный в [5, 6].

Пусть точка нулевой массы \mathcal{A} движется под действием притяжения к центральному телу \mathcal{S} и возмущающего ускорения \mathbf{P} . Введем систему отсчета \mathcal{O} с началом в \mathcal{S} и осями, направленными по радиусу-вектору, трансверсали (перпендикулярю к радиусу-вектору в плоскости оскулирующей орбиты в сторону движения) и бинормали (направленной по вектору площадей). Пусть компоненты S, T, W вектора \mathbf{P} постоянны, а их отношение к основному ускорению, вызванному притяжением центрального тела \mathcal{S} , не превосходит значения $\mu \ll 1$. В указанных источниках проведено осреднение правых частей уравнений Эйлера изменения оскулирующих элементов и выведены выражения для разностей оскулирующих и средних элементов $\omega, e, i, g, \Omega, M$ с точностью до первого порядка малости относи-

тельно μ :

$$\begin{aligned}
d\omega &= \frac{3e}{2\omega a} [(e + 2 \cos E) S - 2 \sin E \eta T], \\
de &= \frac{1}{4\omega^2 a} \{-2(e + 2 \cos E) \eta^2 S + [2(4 - 3e^2) \sin E - e \sin 2E] \eta T\}, \\
di &= \frac{1}{4\omega^2 a \eta} \{[2(2 - e^2) \sin E - e \sin 2E] \cos g + \\
&\quad + \eta[2e + 4 \cos E - e \cos 2E] \sin g\} W, \\
d\Omega &= \frac{1}{4\omega^2 a \eta \sin i} \{[2(2 - e^2) \sin E - e \sin 2E] \sin g - \\
&\quad - \eta[2e + 4 \cos E - e \cos 2E] \cos g\} W, \\
dg &= -\frac{1}{4\omega^2 a e} \left\{ 4\eta^3 \sin E S + [2e(2 - e^2) + 4(2 - e^2) \cos E - \right. \\
&\quad \left. - e \cos 2E] T \right\} - \cos i d\Omega, \\
dM &= \frac{1}{4\omega^2 a e} \left\{ [2(2 + 6e^2 - 3e^4) \sin E - 5e^3 \sin 2E] S + \right. \\
&\quad \left. + [4e(1 + e^2) + 8(1 + e^2) \cos E - e(1 + 3e^2) \cos 2E] \eta T \right\}. \quad (10)
\end{aligned}$$

Мы хотим воспользоваться формулой (8). Нам понадобятся аналогичные разности (дифференциалы) для a, E, θ, u, r , а также входящие в (8) комбинации $di, d\Omega$. В первом порядке малости по малому параметру они даются дифференцированием стандартных соотношений

$$\begin{aligned}
a &= \varkappa^{2/3} \omega^{-2/3}, \quad E - e \sin E = M, \quad r = a(1 - e \cos E), \\
\cos \theta &= \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}, \quad \sin \theta = \frac{\eta \sin E}{1 - e \cos E}, \quad (11)
\end{aligned}$$

где \varkappa^2 — произведение постоянной тяготения на массу \mathcal{S} . Отсюда

$$\begin{aligned}
da &= -\frac{2a}{3\omega} d\omega, \quad dE = \frac{a \sin E}{r} de + \frac{a}{r} dM, \quad d\theta = \frac{a \sin E}{r\eta} de + \frac{a\eta}{r} dE, \\
dr &= \frac{r}{a} da - a \cos E de + ae \sin E dE. \quad (12)
\end{aligned}$$

Подставляя (10) в (12), получим

$$\begin{aligned}
da &= \frac{e}{\omega^2} [-(e + 2 \cos E) S + 2 \sin E \eta T], \\
dE &= \frac{1}{8r\omega^2 e} \left\{ [4(2 + 5e^2 - 2e^4) \sin E - 2e(2 + 3e^2) \sin 2E] S + \right. \\
&\quad \left. + [2e(8 + e^2) + (16 + 15e^2) \cos E - 10e \cos 2E + e^2 \cos 3E] \eta T \right\}, \\
d\theta &= \frac{a}{16r^2\omega^2 e} \left\{ 4[(4 + 9e^2 - 4e^4) \sin E - 2e(2 + e^2) \sin 2E + e^2 \sin 3E] \eta S + \right. \\
&\quad \left. + [e(48 - 39e^2 - 4e^4) + 4(8 - 3e^2 - 6e^4) \cos E - 4e(9 - 8e^2) \cos 2E + \right. \\
&\quad \left. + 4e^2(3 - 2e^2) \cos 3E - e^3 \cos 4E] T \right\}. \\
dr &= \frac{a}{8r\omega^2} \left\{ [2(4 + 6e^2 - 3e^4) - e(20 - 3e^2) \cos E + 2e^4 \cos 2E + \right. \\
&\quad \left. + e^3 \cos 3E] S + [e(42 + 3e^2) \sin E - 4e^2 \sin 2E + e^3 \sin 3E] \eta T \right\}. \tag{13}
\end{aligned}$$

Чтобы получить $du = d\theta + dg$, представим сначала dg в виде

$$\begin{aligned}
dg &= \frac{a}{16r^2\omega^2 e} \left\{ -4\eta^3 [(4 + e^2) \sin E - 4e \sin 2E + e^2 \sin 3E] S + \right. \\
&\quad \left. + [e(16 - 15e^2 + 4e^4) - 4(8 - 5e^2 + e^4) \cos E + \right. \\
&\quad \left. + 2e(18 - 11e^2 + 2e^4) \cos 2E - 4e^2(3 - e^2) \cos 3E + e^3 \cos 4E] T \right\} - \\
&\quad - \cos id\Omega.
\end{aligned}$$

В результате

$$\begin{aligned}
du + \cos id\Omega &= \frac{a}{16r^2\omega^2} \left\{ 4e[3(4 - e^2) \sin E - 6e \sin 2E + e^2 \sin 3E] \eta S + \right. \\
&\quad \left. + [(64 - 54e^2) + 4e(2 - 7e^2) \cos E + 2e^2(5 + 2e^2) \cos 2E - 4e^3 \cos 3E] T \right\}. \tag{14}
\end{aligned}$$

Мы получили выражения

$$\begin{aligned}
dr &= \frac{a}{8r\omega^2} \Psi_1, \quad r(du + \cos id\Omega) = \frac{a}{8r\omega^2} \Psi_2, \\
r(\sin u di - \sin i \cos u d\Omega) &= \frac{1}{4\omega^2} \Psi_3, \tag{15}
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= [2(4 + 6e^2 - 3e^4) - e(20 - 3e^2) \cos E + 2e^4 \cos 2E + e^3 \cos 3E] S + \\ &\quad + [e(42 + 3e^2) \sin E - 4e^2 \sin 2E + e^3 \sin 3E] \eta T, \\ \Psi_2 &= 2e[3(4 - e^2) \sin E - 6e \sin 2E + e^2 \sin 3E] \eta S + \\ &\quad + [(32 - 27e^2) + 2e(2 - 7e^2) \cos E + e^2(5 + 2e^2) \cos 2E - 2e^3 \cos 3E] T, \\ \Psi_3 &= [(4 - 3e^2) - 3e \cos E + 2e^2 \cos 2E] W.\end{aligned}$$

Замечание. Обратим внимание, что тригонометрические многочлены Ψ_1, Ψ_2 не делятся на $1 - e \cos E$. В противном случае они бы обращались в нуль при

$$\cos E = \frac{1}{e}, \quad \sin E = \frac{\sqrt{e^2 - 1}}{e}. \quad (16)$$

Это легко проверить, поскольку необходимые для этого тригонометрические функции считаются элементарно: из (16) следует

$$\begin{aligned}\cos 2E &= \frac{2 - e^2}{e^2}, \quad \cos 3E = \frac{4 - 3e^2}{e^3}, \quad \cos 4E = \frac{8 - 8e^2 + e^4}{e^4}, \\ \sin 2E &= \frac{2}{e^2} \sqrt{e^2 - 1}, \quad \sin 3E = \frac{4 - e^2}{e^3} \sqrt{e^2 - 1}, \\ \sin 4E &= \frac{4(2 - e^2)}{e^4} \sqrt{e^2 - 1}.\end{aligned}$$

Таким образом, присутствие r в двух из трех знаменателей в (15) неустранимо.

Норма разности оскулирующих и средних элементов

Стандартной нормой для функций небесной механики служит среднеквадратическая норма по средней аномалии

$$\begin{aligned}\|f\|^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2 dM = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2 (1 - e \cos E) dE = \\ &= \frac{(1 - e^2)^{3/2}}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f^2}{(1 + e \cos \theta)^2} d\theta.\end{aligned} \quad (17)$$

Нормировка в (17) выбрана из условия $\|C\| = |C|$.

Вычислим норму уклонения $\varrho = |d\mathbf{r}|$. Согласно (8, 15)

$$\varrho^2 = \frac{a^2}{64r^2\omega^4}\Psi_4, \quad \Psi_4 = \Psi_1^2 + \Psi_2^2 + 4\frac{r^2}{a^2}\Psi_3^2. \quad (18)$$

Последнюю величину представим в виде

$$\Psi_4 = \Psi_5 S^2 + \Psi_6 T^2 + \Psi_7 W^2 + \Psi_8 ST.$$

Здесь Ψ_5, Ψ_6, Ψ_7 — четные тригонометрические многочлены:

$$\begin{aligned} \Psi_5 = & 4e^2(1 - e^2)[3(4 - e^2)\sin E - 6e\sin 2E + e^2\sin 3E]^2 + \\ & + [2(4 + 6e^2 - 3e^4) - e(20 - 3e^2)\cos E + 2e^4\cos 2E + e^3\cos 3E]^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_6 = & [(32 - 27e^2) + 2e(2 - 7e^2)\cos E + e^2(5 + 2e^2)\cos 2E - 2e^3\cos 3E]^2 + \\ & + (1 - e^2)[e(42 + 3e^2)\sin E - 4e^2\sin 2E + e^3\sin 3E]^2, \end{aligned}$$

$$\Psi_7 = 4\frac{r^2}{a^2}[(4 - 3e^2) - 3e\cos E + 2e^2\cos 2E]^2,$$

тогда как Ψ_8 — нечетный многочлен, пропадающий при осреднении.

Присутствие r в знаменателе (18) затрудняет на первый взгляд вычисление интеграла для нормы (см. замечание на с. 133). Однако внимательное рассмотрение многочленов Ψ_5, Ψ_6 снимает эту трудность. Несложные выкладки показывают, что они обращаются в нуль при условии (16), так что они делятся на $1 - e\cos E$. Таким образом, вычисление стандартной нормы ϱ сводится к интегрированию тригонометрических многочленов. Громоздкие выкладки мы провели, используя средства компьютерной алгебры:

$$\begin{aligned}
\Psi_5 &= (64 + 680e^2 - 372e^4 - 47e^6 + 18e^8) - \\
&\quad - 4e(80 + 180e^2 - 152e^4 + 19e^6) \cos E - \\
&\quad - (e^2/2)(176 - 864e^2 + 333e^4 - 12e^6) \cos 2E + \\
&\quad + 2e^3(152 - 188e^2 + 33e^4) \cos 3E - \\
&\quad - 5e^4(28 - 27e^2 + 2e^4) \cos 4E + \\
&\quad + 2e^5(12 - 11e^2) \cos 5E - (e^6/2)(3 - 4e^2) \cos 6E = \\
&= (1 - e \cos E)[2(32 + 276e^2 - 255e^4 + 50e^6) - \\
&\quad - 2e(128 + 138e^2 - 147e^4 + 18e^6) \cos E - \\
&\quad - 8e^2(27 - 49e^2 + 15e^4) \cos 2E + e^3(196 - 201e^2 + 24e^4) \cos 3E - \\
&\quad - 6e^4(7 - 6e^2) \cos 4E + e^5(3 - 4e^2) \cos 5E],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_6 &= (1/2)(2048 - 1676e^2 - 125e^4 - 38e^6 - 6e^8) + \\
&\quad + 4e(64 - 315e^2 + 209e^4 - 4e^6) \cos E - \\
&\quad - (e^2/2)(1108 - 1184e^2 - 201e^4 - 3e^6) \cos 2E + \\
&\quad + 10e^3(6 - 11e^2 - 4e^4) \cos 3E - \\
&\quad - (e^4/2)(91 - 170e^2 - 10e^4) \cos 4E - 2e^5(3 + 4e^2) \cos 5E + \\
&\quad + (e^6/2)(3 + e^2) \cos 6E =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (1 - e \cos E)[2(512 - 99e^2 - 385e^4 - e^6) + \\
&\quad + e(1280 - 1415e^2 + 34e^4 + 6e^6) \cos E + \\
&\quad + 2e^2(43 - 32e^2 + 24e^4) \cos 2E + e^3(103 - 139e^2 - 9e^4) \cos 3E + \\
&\quad + 2e^4(3 + 7e^2) \cos 4E - e^5(3 + e^2) \cos 5E].
\end{aligned}$$

Теперь норма вычисляется без труда:

$$\begin{aligned}
\|\varrho\|^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varrho^2(1 - e \cos E) dE = \\
&= \frac{1}{128\pi\omega^4} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\Psi_5}{1 - e \cos E} S^2 + \frac{\Psi_6}{1 - e \cos E} T^2 + \frac{\Psi_7}{1 - e \cos E} W^2 \right) dE.
\end{aligned}$$

Окончательно,

$$\|\varrho\|^2 = \frac{1}{32\omega^4}(A_1S^2 + A_2T^2 + A_3W^2) = \frac{a^6}{32\omega^4}(A_1S^2 + A_2T^2 + A_3W^2), \quad (19)$$

где

$$A_1 = 32 + 276e^2 - 255e^4 + 50e^6, \quad A_2 = 512 - 99e^2 - 385e^4 - e^6, \\ A_3 = 32 - 15e^2 + 10e^4.$$

Поразительно, что $\|\varrho\|^2$ зависит только от компонент вектора возмущающего ускорения (квадратично), большой полуоси (пропорционально кубу) и эксцентриситета (четный многочлен шестой степени) оскулирующего эллипса!

Формула (19) позволяет легко найти наибольшее значение $\|\varrho\|$ для данного эллипса при фиксированном модуле возмущающего ускорения $P = \sqrt{S^2 + T^2 + W^2}$:

$$\max \|\varrho\|^2 = \frac{1}{32\omega^4}P^2 \max\{A_1, A_2, A_3\}. \quad (20)$$

Многочлен $A_1 - A_3 = e^2(291 - 265e^2 + 50e^4)$ в промежутке $0 \leq e \leq 1$ неотрицателен, обращаясь в нуль лишь при $e = 0$. Многочлен $A_2 - A_3 = 480 - 84e^2 - 395e^4 - e^6$ там неотрицателен, обращаясь в нуль лишь при $e = 1$. Многочлен $A_2 - A_1 = 480 - 375e^2 - 130e^4 - 51e^6$ положителен при $e = 0$, отрицателен при $e = 1$, и его коэффициенты имеют одну переменную знака. Следовательно, он имеет единственный положительный корень $e_0 < 1$. Вычисления дают $e_0 = 0.948698$. Поэтому

$$\max \|\varrho\| = \begin{cases} \frac{P}{8\omega^2} \sqrt{2A_2}, & \text{если } e \leq e_0, \\ \frac{P}{8\omega^2} \sqrt{2A_1}, & \text{если } e > e_0. \end{cases} \quad (21)$$

Поведение производных (для простоты положено $x = e^2$)

$$\frac{dA_1}{dx} = 2(138 - 255x + 75x^2), \quad \frac{dA_2}{dx} = -99 - 770x - 3x^2$$

показывает, что $\max \|\varrho\|$ убывает с ростом e . Зависимость от эксцентриситета слаба. Если фиксировать все параметры, кроме эксцентриситета, то отношение наибольшего по всем эксцентриситетам к наименьшему значению $\max \|\varrho\|$ составит $\sqrt{A_2(0)/A_1(1)} = 2.23$.

О равномерной норме

Наряду с евклидовой (среднеквадратической) нормой $\|\cdot\|$ представляет интерес и чебышевская (равномерная) норма

$$\langle f \rangle = \sup |f(M)|, \quad (22)$$

где f предполагается периодической функцией и верхняя грань берется по отрезку $[0, 2\pi]$. Вычислить $\langle \varrho \rangle$ аналитически не представляется возможным. Однако представление об этой величине можно составить, оценивая сверху отношение $\xi = \langle f \rangle / \|f\|$ для функций $f_1 = r/a$ и $f_2 = a/r$ (снизу ξ для любой функции ограничено единицей). Согласно [1, 2]

$$\langle f_1 \rangle = 1 + e, \quad \|f_1\| = \sqrt{1 + \frac{3}{2}e^2}, \quad \langle f_2 \rangle = \frac{1}{1 - e}, \quad \|f_2\| = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - e^2}},$$

откуда

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{(1 + e)^2}{1 + (3/2)e^2}}, \quad \xi_2 = \sqrt[4]{\frac{1 + e}{(1 - e)^3}}. \quad (23)$$

Величина ξ_1 принимает наибольшее значение в промежутке $0 \leq e \leq 1$, значение $\xi_1 = \sqrt{5/3} = 1.29$ при $e = 2/3$.

Величина ξ_2 в промежутке $0 \leq e \leq 1$ возрастает от единицы до бесконечности, что отражено в табл. 1.

Таблица 1. Значения ξ_2 в функции от эксцентриситета

e	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
ξ_2	1	1.11	1.24	1.40	1.60	1.86	2.24	2.82	3.87	6.60	∞

Заключение

В заключение применим полученные результаты к двум задачам.

1. Рассмотрим движение сближающегося с Землей астероида, на котором установлен двигатель малой тяги, обеспечивающий постоянное ускорение $\mathbf{P} = (0, T, 0)$. Выберем три АСЗ: 99 942 Афопис, 101 955 Бенну, 410 777 (2009 FD). Положим $\varkappa = 1.152 \cdot 10^{10} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$. Пусть тяга во всех случаях равна 1 Н. Значения орбитальных и фи-

зических параметров найдем на сайте [7] и приведем их в табл. 2, в последней строке которой дается значение $\|\varrho\|$ согласно (19).

Таблица 2. Значения орбитальных и физических параметров астероидов

Астероиды	99 942 Афопис	101 955 Бенну	410 777 (2009 FD)
a (а. е.)	0.9222	1.1264	1.1631
a (м)	$1.3834 \cdot 10^{11}$	$1.6896 \cdot 10^{11}$	$1.7447 \cdot 10^{11}$
ω (рад/с)	$2.2388 \cdot 10^{-7}$	$1.6587 \cdot 10^{-7}$	$1.5808 \cdot 10^{-7}$
e	0.1911	0.2037	0.4930
Диаметр (м)	330	490	470
Масса (кг)	$4 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$8.3 \cdot 10^{10}$
$ T = \text{тяга/масса}$ (м/с ²)	$0.250 \cdot 10^{-10}$	$0.167 \cdot 10^{-10}$	$0.121 \cdot 10^{-10}$
P/ω^2 (м)	498.780	606.989	484.208
$\ \varrho\ $ (км)	1.987	2.417	1.846

Пересчет для других значений T и ω тривиален. Как уже отмечалось, $\|\varrho\|$ пропорционально $|T|$ и обратно пропорционально квадрату ω (или, что то же, прямо пропорционально кубу a).

2. Рассмотрим движение геостационарного спутника-ретранслятора. Пусть он непрерывно излучает на Землю поток электромагнитной энергии мощностью w . Космическому аппарату массой m тем самым дается возмущающее ускорение $S = w/(mc)$, где c — скорость света. Перечислим несколько спутников с наибольшей мощностью излучения: Молния-3К, Экспресс-АМ5, Sirius-FM6, IntelSat-17, QuetzSat-1. Найдем значение $\|\varrho\|$ для трех из них, полагая $\mathbf{P} = (S, 0, 0)$, $S > 0$. Для геостационарных спутников $\omega = 7.292 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $e = 0$. Значения физических параметров, размещенные на сайтах [8–10], приведены в табл. 3, в последней строке которой дается значение $\|\varrho\|$ согласно (19).

Таблица 3. Значения физических параметров спутников

Спутники	Молния-3К	Экспресс-АМ5	КветцСат-1
Масса (кг)	1 780	3 400	5 514
w (Вт)	1 470	14 000	20 000
$P = w/(mc)$ (м/с ²)	$0.2753 \cdot 10^{-8}$	$1.3725 \cdot 10^{-8}$	$1.2090 \cdot 10^{-8}$
$\ \varrho\ = S/\omega^2$ (м)	0.518	2.581	2.274

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-02-00804-а) и СПбГУ (грант 6.0.162.2010).

Библиографические ссылки

1. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М. : Наука, 1968.
2. *Холшевников К. В., Титов В. Б.* Задача двух тел : учеб. пособие. — СПб. : Изд. СПбГУ, 2007.
3. *Battin R. H.* An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics. Reston. — Virginia, USA : AIAA educ. ser., 1987.
4. *Холшевников К. В., Санникова Т. Н.* Движение с постоянным в различных системах отсчета возмущающим ускорением // Физика космоса : Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3–7 февр. 2014 г., Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — С. 129.
5. *Санникова Т. Н.* Осредненные уравнения движения в поле постоянного по модулю возмущающего ускорения // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. — Сер. 1. — 2014. — Т. 1 (59), № 1. — С. 171–179.
6. *Санникова Т. Н., Холшевников К. В.* Осредненные уравнения движения при постоянном в различных системах отсчета возмущающем ускорении // Астрон. журн. — 2014. — Т. 91, № 12. — С. 1060–1068.
7. NASA. Near Earth Object Program. — <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.
8. Википедия. Молния-3К. — <http://ru.wikipedia.org/?oldid=65863051>.
9. Википедия. Экспресс-АМ5. — <http://ru.wikipedia.org/?oldid=63011054>.
10. Вестник ГЛОНАСС. — <http://vestnik-glonass.ru/images/sputnik/1-1.jpg>.

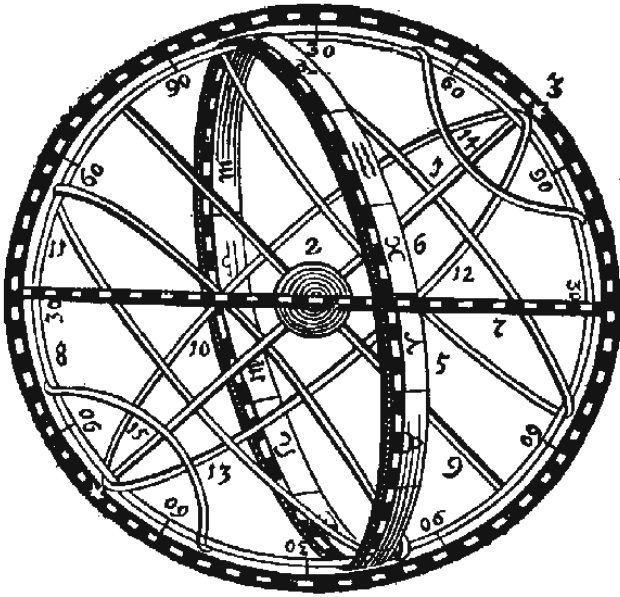
УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Ничто в мире не совершенно. Наша замечательная земная атмосфера охраняет нас от действия опасных излучений, приходящих из космоса, но она же не позволяет получать бесценную информацию о Вселенной, которую эти излучения несут. Только методы внеатмосферной астрономии дают возможность изучать Вселенную в гамма-, рентгеновском, среднем и дальнем инфракрасном и, конечно, в ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра.

Космические «ультрафиолетовые» обсерватории предоставляют уникальные возможности для изучения межгалактической среды, в частности для поиска скрытого барионного вещества; выяснения реальной картины образования звезд в галактиках; точного определения химического состава межзвездной среды и атмосфер других планет; исследования внутренних областей аккреционных дисков и т. д. Это объясняет, почему за последние десятилетия в мире проведено около сотни кратковременных космических экспериментов и было запущено около двух десятков долговременных космических аппаратов (обсерваторий) для наблюдений объектов Вселенной в ультрафиолетовом диапазоне, включая знаменитый Космический телескоп им. Хаббла.

В лекции рассказывается об этих интереснейших астрофизических проблемах, о роли ультрафиолетового излучения в эволюции Вселенной и о современных космических УФ-обсерваториях, среди которых особое место занимает проект «Спектр-УФ». Эта создаваемая под руководством России космическая обсерватория будет в следующем десятилетии главным «ультрафиолетовым» окном во Вселенную.

Тезисы студенческих докладов



СПОСОБЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ПЛАНЕТАМИ

В работе рассматривается проблема оценивания вероятности столкновений астероидов с планетами, в частности с Землей, и приводится анализ методов решения этой задачи. Так как наблюдения, используемые для определения параметров орбит астероидов, отягощены неизбежными ошибками измерений, мы можем получить из них лишь оценки параметров и указать в параметрическом пространстве область, каждая точка которой согласуется с имеющимися наблюдениями. В такой постановке вероятность столкновения исследуемого объекта с Землей определяется, как правило, в виде отношения числа столкновительных точек к общему числу точек такой вероятностной области. Нами было проведено исследование этой задачи для случая, когда вероятностные (доверительные) области имеют большие размеры, что характерно при наблюдаемости астероидов в одной оппозиции. Рассмотрены различные варианты формирования доверительных областей в виде множества точек. Результаты, полученные путем моделирования, показывают, что численное значение вероятности столкновения существенным образом зависит от размеров доверительной области и способов задания доверительных областей. Достоверность оценок вероятности столкновения в целом зависит от многих факторов: используемой модели движения астероида, длины интервала, охваченного наблюдениями, способа построения доверительной области и т. д. Для АСЗ, наблюдавшихся в одной оппозиции, оценки вероятности столкновения с Землей всегда отличны от нуля и малы по величине. Получить однозначные выводы о столкновении или об его отсутствии можно только тогда, когда наблюдения покрывают дугу не менее одного оборота астероида.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ И ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ СФЕРУ ХИЛЛА ЮПИТЕРА

Астероиды, сближающиеся с Землей, обращают на себя все больше внимания. С каждым днем автоматические средства обнаружения открывают сотни новых объектов. Часть уже открытых объектов присоединяется к популяции АСЗ после сближения с планетами Солнечной системы. Среди таких астероидов особый интерес представляют те, на которые сильное возмущение оказывает Юпитер. Такие небесные тела могут кардинально изменить свою орбиту при прохождении сферы Хилла Юпитера из-за мощных гравитационных воздействий.

Для исследования подобных объектов мы изучили всю популяцию АСЗ по состоянию на сентябрь 2014 г. и выделили 17 объектов, которые в ближайшие 100 лет проходят через сферу Хилла Юпитера, — 2002 GJ8, 2009 WN25, 2012 HM8, 2002 GJ8, 2007 XL18, 2010 AD3, 2009 CR2, 2014 QA33, 2005 WN3, 2009 CR2, 2002 GJ8, 2014 NV64, 2010 XB73, 2011 BX59, 2013 QH10, 2002 GJ8, 2006 EA. Все выявленные астероиды являются нумерованными, что говорит о том, что их орбиты плохо определены. Самое ближайшее и тесное сближение ожидает Юпитер 2 июня 2015 г., когда астероид 2002 GJ8 пройдет на расстоянии 0.05 а. е.

Нами было проведено исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции некоторых из перечисленных выше объектов. Расчеты велись на кластере СКИФ Cyberia НИ ТГУ, решалась возмущенная задача двух тел, модель сил включала влияние всех восьми планет Солнечной системы, возмущения от Цереры, Паллады, Весты, релятивистских эффектов от Солнца, сжатия Земли, Юпитера и Солнца. Кроме того, было проведено исследование движения этих астероидов в прошлом с целью выявить, какие из них ранее не принадлежали популяции АСЗ.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ
ДО ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ
ПО СЕГМЕНТАМ СПИРАЛЬНЫХ РУКАВОВ**

По данным о пространственном распределении мазеров получена оценка расстояния до центра Галактики как расстояния до полюса логарифмических спиральных моделей рукавов Персея и Щита: $R_0 = 8.44 \pm 0.45$ кпк. Полученная оценка хорошо согласуется с результатом Reid et al., $R_0 = 8.34 \pm 0.16$ кпк, выведенным на основе данных о кинематике тех же объектов [1]. Использован метод, заключающийся в нахождении медианы значений R_0 по всем возможным тройкам мазеров, принадлежащих одному сегменту спирального рукава. Оценены параметры пяти сегментов спиральных рукавов.

Методом Монте-Карло изучено влияние различных факторов на статистические свойства оценки R_0 по сегментам рукавов. Полученные результаты свидетельствуют в пользу состоятельности оценки R_0 . Наибольшее смещение оценки R_0 получается при малых угловых размерах сегмента спирального рукава, малом количестве представляющих сегмент мазеров и большом значении ошибки параллакса. На эффективность оценки наибольшее влияние оказывает угловой размер сегмента; остальные параметры, кроме угла закрутки, оказывают одинаково существенное, но меньшее влияние.

Полученные результаты говорят в пользу работоспособности подхода даже при использовании для оценивания R_0 L-статистики. Это делает осмысленной разработку аналогичных методов на основе M-статистик, способных дать более точные оценки в случае корректного учета неопределенности расстояний и поперечной протяженности спирального рукава.

Библиографические ссылки

1. Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A. et al. Trigonometric parallaxes of high mass star forming regions: the structure and kinematics of the Milky Way // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 783. — P. 130.

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB120811C
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПЕ РТТ-150**

Представлены результаты фотометрических наблюдений оптического послесвечения гамма-всплеска GRB120811C на российско-турецком 1.5-м телескопе РТТ-150 с использованием Rc-фильтра.

Получены подробные измерения кривой блеска послесвечения, начиная с момента около 3 ч после гамма-всплеска и на протяжении трех последующих ночей. Во временном промежутке от 3 до 7 ч после всплеска происходит плавное падение потока излучения, примерно по степенному закону с наклоном -2.06 ± 0.05 . Более детальное рассмотрение участка кривой, значения которого получены в первую ночь на РТТ-150, показывают, что закон падения блеска отличается от степенного: обнаруживаются микровсплески длительностью порядка 15–20 мин. Проведен анализ быстрой переменности оптического послесвечения.

**ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ АККРЕЦИИ
НА ЗАМАГНИЧЕННУЮ НЕЙТРОННУЮ ЗВЕЗДУ**

В 1969 г. Бисноватым-Коганом и Фридманом было показано, что для появления ударной волны в аккрецирующем потоке, тормозящей вещество на пути к поверхности звезды, необходимо наличие магнитного поля с напряженностью порядка $B \sim 10^8$ Гс. В работах 1970—1980-х гг. обычно постулировалось наличие бесстолкновительной ударной волны, а ее высота являлась параметром модели. Лишь Аронс и Клейн в 1989 г. показали, что при сверхэдингтоновской аккреции появляются и эволюционируют нестационарные радиационно-доминированные ударные волны. Важно, что наличие волны не постулировалось, а являлось следствием модельной эволюции системы.

В 2004 г. Быковым и Красильщиковым была представлена численная модель *одномерной* нестационарной гидродинамической аккреции на замагниченную нейтронную звезду. В модели использовался модифицированный метод Годунова, позволяющий решать систему гидродинамических уравнений с учетом внешних дополнительных сил.

В настоящей работе построена численная модель *двумерной* нестационарной гидродинамической аккреции на замагниченную нейтронную звезду. Аккрецирующий поток и соответственно связанные с ним физические процессы рассматриваются в дипольных координатах. Метод Годунова был соответствующим образом переработан с целью применения в рамках дипольных координат.

Данная модель последовательно учитывает кинетику электронных потоков в сильном магнитном поле. Также учитывается радиационное давление, создаваемое как континуальным нерезонансным, так и циклотронным резонансным излучением.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ КОЛЬЦА F САТУРНА СПУТНИКОМ ПРОМЕТЕЙ

«Спутник-пастух» Прометей, расположенный близко к кольцу F, на каждом обороте при прохождении в окрестности своего апоцентра вызывает сильные возмущения в кольце F. Моделирование гравитационного взаимодействия Прометей с кольцом F является основной задачей в данной работе.

Для исследования возмущений кольца F использованы методы задачи N-тел. На языке Fortran составлена программа интегрирования, в которой учитывается гравитационное притяжение со стороны Сатурна и Прометей на цепочку частиц, моделирующих прядь кольца F. Программа позволяет интегрировать движение невесомых частиц и массивных тел, в ней можно смоделировать возмущения нескольких прядей или поведение кольца конечной ширины, что важно при будущей обработке снимков реальных возмущений на нескольких прядях с конечной шириной.

Моделирование осуществлялось при следующих условиях:

- система Прометей-кольцо рассматривалась в сатурноцентрической системе координат. При моделировании Сатурн рассматривался как сжатое тело. При взаимодействии с частицами кольца Прометей считался вытянутым телом, при взаимодействии с Сатурном — точечной массой;
- моделировался участок кольца, с которым Прометей сближается при нескольких прохождениях апоцентра. Моделируемый участок кольца считался круговым. Движение частиц на участке также принималось круговым;
- участок представлялся цепочкой материальных точек нулевой массы;
- движение всех частиц и Прометей считалось происходящим в одной плоскости.

Получены результаты, наглядно описывающие модель возмущений, схожих с реально наблюдаемыми. Результаты работы дают возможность дальнейшего усовершенствования модели и ее применения в более сложных задачах.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ДВОЙНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ СИСТЕМЫ GX339-4

GX339-4 — двойная рентгеновская система с маломассивной черной дырой и звездой-компаньоном. Такие объекты проводят большую часть своего времени в состоянии покоя, когда нет ни аккреции на компактный объект, ни рентгеновского излучения, а только очень слабое оптическое/инфракрасное излучение от звезды-донора. Они демонстрируют всплески, когда излучение в инфракрасном, оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах значительно повышается. Физически это означает начало эпизода аккреции на черную дыру.

Исследована природа рентгеновской двойной GX339-4. Использовались оригинальные данные с телескопа SMARTS (1.3 м, Чили) в четырех фильтрах: V, I, J, H , а также рентгеновские данные с ASM RXTE. Для коррекции данных за поглощение использовались модели Cardelli [1] и O'Donnell [2]. Выполнен комплексный анализ наблюдательных данных GX339-4: исследована кривая блеска объекта, изучены спектральные свойства за 8-летний период, обнаружена двухкомпонентная природа излучения, излучение одной из компонент отождествлено с чернотельным [3]. Получена оценка эффективного радиуса излучаемой области.

Библиографические ссылки

1. Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 345. — P. 245–256.
2. O'Donnell J. E. R_{nu} -dependent optical and near-ultraviolet extinction // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 422. — P. 158–163.
3. Poutanen J., Veledina A. Colours of black holes: infrared flares from the hot accretion disc in XTE J1550-564 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014.

А. А. Загидуллин
Казанский (Приволжский) федеральный университет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛУНЫ
НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ
ДВИЖЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ ЛИБРАЦИИ**

Представлены результаты моделирования поведения параметров физической либрации Луны (ФЛЛ) от времени. Выявлены некоторые особенности в изменении скорости угловых переменных: быстропериодический характер изменения в p_2 и долгопериодический — в p_3 . Ставится проблема поиска динамического объяснения этого явления.

Моделирование проводилось на основе аналитической теории ФЛЛ [1] в среде программирования VBA.

Библиографические ссылки

1. *Petrova N.* Analytical Extension of Lunar Libration Tables // Earth Moon and Planets. — 1996. — Vol. 73. — P. 71–99.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД В КРАТНОЙ СИСТЕМЕ ADS 7438

В работе для звезды ADS 7438, которая является сложной системой, состоящей из пяти физически связанных компонентов, так как компоненты Аа и В — спектроскопические системы с периодом обращения 1.7 и 28 дней соответственно, были обработаны ПЗС снимки, полученные на телескопе FTN (Гавайи) как результат общей работы с Пулковской обсерваторией, дополнен и проанализирован ряд общемировых и Пулковских наблюдений. По данным из каталога WDS методом параметров видимого движения (ПВД) были построены орбиты тесной пары АаАб ($\rho = 0.3''$) с периодом 52 г. Также были вычислены параметры видимого движения пар АВ и АС.

В нашей работе расчеты по построению орбиты и вычислению параметров видимого движения компонентов звезды проводились с использованием пакета программ Ольги Вениаминовны Кияевой; также в процессе выполнения работы по вычислению относительных положений (ρ, Θ) для первичной обработки ряда снимков, полученных на телескопе FTN, нами был написан дополнительный пакет программ.

Финальным этапом нашей работы было построение орбиты пары АаАб методом параметров видимого движения (ПВД). Также были вычислены параметры видимого движения пар АВ и АС. Для повышения точности результатов в ряду наблюдений АВ и АС делалась поправка на движение фотоцентра относительно центра масс с учетом полученных параметров орбиты АаАб и масс компонентов из каталога MSC. При этом мы считали, что наблюдался фотоцентр АаАб. Используя данные о массах звезд А и В из каталога MSC, мы определили положение центра масс АВ и параметры видимого движения (АВ—С). Зная скорости движения В относительно А и С относительно предполагаемого центра масс АВ, было получено, что скорость (АВ)С больше скорости (А)В. То, что движение в широкой паре больше, чем в тесной, является доказательством того, что светило С является оптическим спутником, а не физическим компонентом сложной кратной системы.

РАЗРАБОТКА СРЕДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ДАННЫХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ PYTHON-MIRIAD

В последнее время мощности вычислительной техники значительно возросли, что позволяет повысить эффективность анализа астрономических данных. Со временем поддержка традиционно используемого языка Fortran ухудшается, что ставит вопрос о переходе к новым программным средствам при возможности использования старых наработок. Нами разработан набор процедур, автоматизирующих обработку, анализ и визуализацию данных.

В качестве основы для обработки взят программный пакет Python-miriad. Использовались также библиотеки Numpy, Scipy, matplotlib, astropy и язык программирования Python. Проводился анализ данных наблюдений области образования массивных звезд S255 в линиях различных молекул. В частности, была проведена аппроксимация линии N_2H^+ (3–2). Этот переход состоит из 38 компонент в трех перекрывающихся или слабоперекрывающихся группах в зависимости от физических условий в излучающей области. В некоторых направлениях наблюдаются по крайней мере две области с разными скоростями, что удваивает число спектральных компонент линии.

Известные процедуры аппроксимации, такие как GILDAS FIT/lines, не позволяют накладывать условия на параметры, что в нашем случае довольно важно. Процедуры визуализации были построены по модульному принципу, дав возможность встроить в них алгоритм аппроксимации, что позволило просматривать привязанные к карте результаты. Гибкость языка Python дала возможность использовать библиотеки, написанные на языках Fortran и C, для работы с форматом данных MIRIAD без особых осложнений. Процедуры визуализации были оформлены в класс, который может быть легко расширен и дополнен.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 12-02-00861.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ОБЛАКОВ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА

Проведено детальное компьютерное моделирование на сетках с высоким пространственным разрешением неупругих столкновений облаков HI в МЗС в рамках самосогласованного подхода, при котором рассматривается совместная динамическая, химическая и тепловая эволюция МЗС. Ввиду сложности подобных моделей была включена в существующую гидродинамическую модель редуцированная химическая модель Нельсона—Лангера 1997 (НЛ-97) [1].

Тепловая модель МЗС включает основные процессы тепловых потерь и нагрева, характерные для межзвездного газа. При расчете скоростей диссоциации молекулярного водорода H_2 и молекул CO учитывались эффекты поглощения на пыли, самоэкранировка молекул H_2 и CO, а также экранировка CO молекулами H_2 [2].

Рассматривались лобовые столкновения идентичных облаков межзвездного газа. Химический состав МЗС и облаков имеет различия; мы полагали, что облака на 10 % состоят из H_2 , обилие CO в облаках выше, чем в межзвездном газе.

На основе численного моделирования показано, что сверхзвуковые столкновения облаков приводят к их разрушению и переходу их плотного и холодного газа в теплую фазу. В радиативном режиме происходит образование плотных холодных филаментов.

Библиографические ссылки

1. *Nelson R. P., Langer W. D.* The dynamics of low-mass molecular clouds in external radiation fields // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 482. — P. 796–826.
2. *Glover S. C. O., Federrath C., Mac Low M. M., Klessen R. S.* Modelling CO formation in the turbulent interstellar medium // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 404. — P. 2–29.

**ОБ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА
СВЕРХБЫСТРОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ
СКОРОСТИ ОПАСНОГО ДЛЯ ЗЕМЛИ АСТЕРОИДА
СРЕДСТВАМИ РЛС С ПОМОЩЬЮ
ДРОБНО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО ФИЛЬТРА**

В рамках программ противодействия астероидно-кометной опасности важнейшей является задача сокращения временных затрат на определение параметров движения быстродвижущегося космического тела. В работе [1] был предложен алгоритм быстрой оценки радиальной скорости движущегося объекта по обработке отраженного от его поверхности радиолокационного сигнала с помощью дробно-дифференцирующего фильтра. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет рассчитать центр тяжести спектра отраженного сигнала (ЦТСОС) без применения процедуры спектральной обработки сигнала, что позволяет ускорить оценивание положения ЦТСОС на порядки [2]. В настоящей работе показано, что фильтр можно реализовать аппаратным способом, используя стандартные технические звенья первого порядка. Предложена оптимальная схема аппаратной реализации фильтра и исследована устойчивость алгоритма по отношению к шуму.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-97001-р_поволжье_а «Высокоточная оценка скоростей и размеров астероидов по радиолокационным портретам».

Библиографические ссылки

1. *Захарченко В. Д.* Оценка средней частоты доплеровских сигналов методом дробного дифференцирования // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 1999. — Т. 2. — С. 39–41.
2. *Zakharchenko V. D., Kovalenko I. G.* On protecting the planet against cosmic attack: ultrafast real-time estimate of the asteroid's radial velocity // Acta Astronautica. — 2014. — Vol. 98. — P. 158–162.

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОДЛЕНИЯ
ПРИГОДНОСТИ АЛЬМАНАХОВ СПУТНИКОВОЙ
СИСТЕМЫ ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА
ОРБИТАЛЬНОГО РЕЗОНАНСА**

Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС является частью государственной инфраструктуры координатно-временного и навигационного обеспечения. Созданная как составляющая оборонного комплекса, на сегодняшний день ГЛОНАСС полностью развернута и активно используется в навигационной аппаратуре большого числа потребителей.

Для специфической навигационной аппаратуры потребителей, не имеющей возможности регулярно входить в сеанс навигации, актуальна задача продления срока действия альманаха в целях замены «холодного» старта «теплым».

Исследована возможность увеличения времени пригодности альманахов системы ГЛОНАСС на основе использования эффекта орбитального резонанса. Проанализирована информация об элементах орбит спутников данной системы, содержащаяся в неоперативных навигационных данных. На основе аппроксимации временных изменений орбитальных элементов будут построены алгоритмы корректировки существующих альманахов на выбранный срок.

Разработано программное обеспечение для загрузки альманахов на выбранную дату из файлового хранилища информационно-аналитического центра ФГУП ЦНИИМАШ. Написан скрипт для поиска элементов орбит и поправок к ним в имеющихся альманахах.

Настоящий этап исследования заключается в анализе временных изменений орбитальных элементов спутников системы ГЛОНАСС, проектировании алгоритмов коррекции альманахов системы на выбранную дату. Дальнейшая работа будет включать в себя программную реализацию данных алгоритмов и оценку расхождения между численной коррекцией и реальными альманахами спутниковой системы.

В. А. Кочев, Г. Т. Кайзер,
А. Б. Островский, Ю. З. Вибе
Уральский федеральный университет

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ТЕЛЕСКОПЕ СВГ АО УРФУ

Разработана и реализована структура базы данных наблюдений малых тел Солнечной системы. База данных (БД) хранит и позволяет проводить поиск и отбор следующей информации об объектах: ПЗС-кадры с изображениями объектов в FIT-формате с указанием даты и времени наблюдения, длительности экспозиции, координат центра снимка и др.; номера (или обозначения) и типы объектов, точные моменты наблюдения (UTC), топоцентрические координаты (α , δ) и оценки блеска объектов, код обсерватории, где они были получены. Для реализации базы данных была использована СУБД Microsoft *SQL Server* 2008 R2 Express с пакетом обновления 1.

Создана клиентская программа для автоматического выполнения основных операций при работе с базой данных и для объединения нескольких сервисных программ под одной оболочкой. Клиент представляет собой приложение, выполненное на платформе .NET Framework. Для работы с базой данных клиент имеет следующие функции: добавление в БД и извлечение из нее FITS-файлов и результатов астрометрической обработки для последующей обработки, составление отчета об астрометрической обработке наблюдений в формате MPC, а также обращение к сервисным программам при необходимости их использования.

Программный комплекс содержит следующие сервисные инструменты для автоматизации процессов обработки наблюдений: программы для конвертации заголовков FITS-файлов, для идентификации и группировки полученных FITS-файлов и результатов астрометрической обработки по объектам, для выборки результатов наблюдений по заданному критерию точности.

В базу данных введены результаты наблюдений астероидов (FITS-файлы и координатная информация) за 2012–2014 гг. База данных позволяет систематизировать результаты наблюдений и увеличить оперативность доступа к материалам при их дальнейшем использовании.

© Кочев В. А., Кайзер Г. Т., Островский А. Б., Вибе Ю. З., 2015

ПЫЛЬ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ГЛОБУЛАХ БОКА

Глобулы Бока, небольшие изолированные молекулярные облака, являются местами образования звезд малых масс. Несмотря на интенсивные исследования процесса звездообразования, многие аспекты этого важного явления остаются пока неясными [1].

Мы изучаем свойства пылевых частиц и магнитных полей во внешних частях глобул. В основе подхода лежат наблюдения поляризации и поглощения излучения звезд, просвечивающих сквозь внешние слои глобул, и анализ получаемых результатов с использованием других наблюдательных данных. Наши поляризационные карты дают сведения о геометрии магнитного поля, окружающего глобулу, а рассмотрение зависимостей поляризации и поглощения излучения от длины волны позволяет определить средние характеристики пылевых частиц и открывают путь для определения направления поля в трехмерном пространстве [2].

Ключевым моментом при этом является определение расстояния до наблюдаемых звезд, что необходимо для оценки вкладов локальной среды, глобулы и ее окрестностей и вещества на луче зрения за глобулой. Мы обсуждаем современные подходы к фотометрической спектральной классификации звезд и приводим результаты, полученные нами для нескольких глобул и позволившие сделать важные выводы о свойствах пыли и магнитных полей в них.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-02-00138 и СПбГУ 6.0.122.2010, 6.38.669.2013.

Библиографические ссылки

1. *Bergin E. A., Tafalla M.* Could dark clouds: The initial conditions for star formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 339–96.
2. *Voshchinnikov N. V., Hirashita H.* Effects of grain growth on the interstellar polarization curve // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 445. — P. 301–8.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТОРОВ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ЗОНЕ ГЕО

В настоящее время околоземное пространство является технически сильно загруженным. Особенно это касается геостационарной зоны (или зоны ГЕО). Эта область пространства представляет наибольший интерес с точки зрения исследования динамической эволюции космического мусора, поскольку в ней отсутствуют эффективные механизмы самоочистки, и, кроме того, в этой зоне заметно проявляется тенденция к образованию хаоса в движении объектов. В геостационарной зоне существуют области с различными типами движения околоземных объектов [1]. Это объекты с периодическими орбитами, либрационными орбитами и неустойчивыми орбитами.

Цель данной работы — исследование долговременной орбитальной эволюции торов частиц, образовавшихся в результате распада космического аппарата (КА), в зависимости от типа движения родительского тела.

Для моделирования фрагментов распада и прогнозирования их движения использовалось программное обеспечение, разработанное сотрудниками НИИ ПММ ТГУ [2, 3]. Кроме исследования общей динамики фрагментов КА проводилась оценка типа движения фрагментов с помощью усредненного параметра MEGNO [1].

Библиографические ссылки

1. Александрова А. Г., Чувашов И. Н., Бордовицына Т. В. MEGNO-анализ орбитальной эволюции объектов зоны ГЕО // Изв. вузов. Физика. — 2011. — Т. 54, № 6/2. — С. 39–46.
2. Бордовицына Т. В., Александрова А. Г. Численное моделирование процесса образования орбитальной эволюции и распределения фрагментов космического мусора в околоземном пространстве // Астрон. вестн. — 2010. — Т. 44. — С. 259–272.
3. Бордовицына Т. В. и др. Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // Изв. вузов. Физика. — 2009. — Т. 24, № 12/2. — С. 5–11.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ И КОРРЕКЦИЯ ШКАЛ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ ПОДСИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

В работе реализован алгоритм кинематической калибровки шкал расстояний до планетарных туманностей диска Галактики (Nikiforov, Bobrova, 1999). В качестве кинематической модели для подсистемы планетарных туманностей использовалось разложение линейной скорости вращения центроидов планетарных туманностей в ряд по степеням $\frac{R-R_0}{R_0}$, где R — галактоосевое расстояние туманности; R_0 — расстояние от Солнца до центра Галактики.

Применение указанного алгоритма показывает систематическую заниженность масштабов шкал расстояний до ПТ, используемых в настоящее время (см., например, Акимкин, 2009). Чтобы повысить надежность данного вывода, алгоритм кинематической калибровки был доработан с целью достижения максимальной формализации и объективности при составлении промежуточных выборок, выборе порядка разложения и получения решения.

С этой целью в работе был реализован критерий оценки ожидаемого смещения решения для метода «складного ножа», позволяющий формализовать прекращение исключения объектов, приводящих к максимальному смещению; был реализован критерий Фишера и использована мера Мэллоуза C_p , позволяющие выбрать оптимальный порядок разложения; было исследовано ограничение снизу на относительные галактоосевые расстояния ПТ на предмет выбора оптимальной границы. Калибровка шкал осуществлялась путем сопоставления полученной формальной оценки R_0 для данного каталога с «наилучшей» оценкой $R_0 = 7.9 \pm 0.2$ кпк, найденной по всей совокупности измерений этого параметра (Nikiforov, 2004).

Полученные в итоге скорректированные шкалы расстояний существенно исправляют систематическое смещение используемых шкал, что позволяет составить из них сводный каталог скорректированных расстояний до ПТ. Возможно дальнейшее использование исправленных шкал в других работах, посвященных планетарным туманностям.

КОЛЛИМАТОР ДЛЯ ДВУВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО СПУТНИКОВОГО ДАЛЬНОМЕРА

Измерение расстояния до космических аппаратов с помощью спутниковых лазерных дальномеров позволяет уточнять орбиты КА, а наблюдение специализированных спутников, оснащенных ретро-рефлекторами, дает возможность определять параметры вращения Земли.

В 2001 г. сотрудниками отдела траекторных измерений ФГУП СНИИМ (Н. А. Мещеряков, В. М. Тиссен) был модернизирован спутниковый дальномер ЛД-2. Штатный лазерный излучатель был заменен на компактный лазерный излучатель импульсов наносекундной длительности с активным элементом на ИАГ:Nd с длиной волны генерации 1.064 мкм и частичным преобразованием излучения во вторую гармонику с длиной волны 0.532 мкм. Длина волны 532 нм модернизированного дальномера являлась рабочей. После модернизации дальномер следовало отнести к дальномерам третьего поколения.

Одновременное использование лазерных импульсов на различных длинах волн (дисперсионный метод) позволяет рассчитать поправку, вносимую атмосферой при прохождении луча через ее толщину.

Нами был произведен расчет расширителя (коллиматора) лазерного луча для длин волн 532 и 1064 нм. Расчет коллиматора был осуществлен с учетом габаритных размеров штатного коллиматора ЛД-2 с целью минимизации изменений в конструкции дальномера.

Расчет коллиматора был осуществлен по схемам Кеплера и Галилея. Коэффициент пропускания составил 0.84 и 0.86 соответственно. Поверхности всех линз сферические. Угол расхождения луча определяется дифракцией входящей апертуры коллиматора и равен 13 и 26'' соответственно для длин волн 532 и 1064 нм.

Таким образом, использование рассчитанных коллиматоров на модернизированных ЛД-2 делает возможным уменьшение погрешности определения расстояний до КА, что позволяет перевести данный дальномер в разряд дальномеров четвертого поколения.

К ВОПРОСУ О НАБЛЮДАЕМОСТИ РЯДА АСТЕРОИДОВ

Больше наблюдений — точнее определена орбита, значит, тем больше мы знаем о характере перемещения в пространстве астероида, чтобы более точно рассчитать эволюцию его движения. Следовательно, ожидание новых наблюдений выгодно. А если небесное тело открыто сравнительно недавно или, наоборот, давно, но было потеряно, испытывает сближение с большими планетами или является астероидом, сближающимся с Землей, то число наблюдений играет далеко не последнюю роль в исследовании его движения. Но как можно узнать, что возможно скорое появление новых данных по объекту или еще лет 5—10 таковых не будет вовсе и тогда можно строить эволюцию по имеющимся данным?

Модуль HUNTER (с англ. «охотник») разрабатываемого программного обеспечения (ПО) EROS (Ephemeris Researches and Observation Services) позволяет определить первый момент видимости объекта, удовлетворяющий настройкам пользователя, такм как высота объекта, элонгация и абсолютная звездная величина. Принцип работы основан на пошаговом вычислении эфемерид астероида в промежутке времени, заданном пользователем, и сравнении с условием окончания поиска. Если вычислить видимость для нескольких наблюдательных станций Земли, будет возможность построить карту видимости для объекта или объектов, для того чтобы была хотя бы малая возможность поймать его в поле зрения телескопа какой-либо обсерватории и, следовательно, получить новые данные для исследования.

В данной работе описан принцип функционирования модуля ПО, а также представлена в качестве рекомендательного материала для наблюдателей и исследователей движения астероидов «карта видимости» ряда интересных объектов для нескольких обсерваторий Земли.

А. П. Ляпцев¹, Д. А. Кононов², В. Б. Пузин²,
В. П. Кожевников³, А. Ю. Сытов²

¹Уральский федеральный университет,

²Институт астрономии РАН,

³Астрономическая обсерватория УрФУ

О РЕЗУЛЬТАТАХ ОДНОВРЕМЕННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ТДС V455 AND

В работе [1] была предложена модель формирования двугорбых кривых блеска катаклизмических переменных звезд типа WZ Sge, суть которой состоит в том, что горбы на кривой блеска возникают вследствие последовательного усиления ударных волн в аккреционном диске в результате взаимодействия этих волн с прецессионной волной плотности. Для проверки предложенной модели в сентябре 2014 г. были проведены одновременные спектральные и фотометрические наблюдения катаклизмической переменной V455 Andromedae (подкласс WZ Sge). Фотометрия производилась в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Спектральные наблюдения проводились в обсерватории пика Терскол (ТФ ИНАСАН).

С использованием профилей эмиссионной линии H_{α} , полученных при наблюдениях в десяти различных интервалах орбитальных фаз, построено 10 доплеровских томограмм системы V455 And. Анализ полученных томограмм выявил наибольшие поярчания некоторых участков на определенных фазах и позволил отождествить их с ударными волнами, описанными в предложенной модели. В этих же самых интервалах орбитальных фаз наблюдаются горбы на кривых блеска, полученных одновременно со спектрами. Эти два наблюдательных факта позволяют нам утверждать, что предложенная в [1] модель формирования кривых блеска верна.

Библиографические ссылки

1. Кононов Д. А., Бисикало Д. В., Пузин В. Б. и др. О возможном механизме формирования горбов на орбитальных кривых блеска в катаклизмических переменных звездах типа WZ Sge // Астрон. журн. — 2015. — В печати.

© Ляпцев А. П., Кононов Д. А., Пузин В. Б., Кожевников В. П.,
Сытов А. Ю., 2015

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ХАОТИЧНОСТИ В ДИНАМИКЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В работе представлены результаты сравнения двух методов анализа особенностей движения околоземных космических объектов. Рассмотрены параметр хаотичности MEGNO, который дает представление о расхождении в фазовом пространстве первоначально близких орбит, а также интегральная автокорреляционная функция, которая позволяет выявить наличие или отсутствие стохастичности в изменении элементов орбиты. Сопоставление методов проведено на примере исследования динамики 200 моделей околоземных объектов. Для всех моделей были определены особенности их орбитальной эволюции, включая оценки параметра MEGNO. Используя равномерно распределенные на интервале 100 лет данные об эволюции орбитальных параметров объектов, для всех моделей были получены значения интегральной автокорреляционной функции по трем позиционным орбитальным параметрам: большой полуоси — I_a , эксцентриситету — I_e и наклонению — I_i .

Общий анализ полученных результатов позволил выявить ряд закономерностей:

- в большинстве случаев оценки регулярности движения по параметру MEGNO и с помощью автокорреляционных функций совпадают;
- высокая регулярность изменения одного из позиционных параметров сопровождается малым изменением параметра MEGNO;
- наличие стохастичности по всем трем позиционным параметрам сопровождается быстрым ростом параметра MEGNO;
- в сложных случаях, когда наблюдается очень быстрый рост параметра MEGNO, такой, что компьютерная программа не успевает его отслеживать, оценки, сделанные с помощью интегральной автокорреляционной функции, восполняют отсутствие необходимой информации.

СЕДИМЕНТАЦИЯ ПЫЛИ В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД С ОСТАТОЧНЫМ КРУПНОМАСШТАБНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В работе исследуется влияние крупномасштабного магнитного поля на динамику пыли в аккреционных дисках молодых звезд. Рассчитываются скорости седиментации заряженных пылинок с учетом влияния магнитного поля. Структура аккреционного диска рассчитывается в рамках МГД модели Дудорова и Хайбрахманова [1]. Диск считается стационарным, геометрически тонким и аксиально-симметричным. Скорость седиментации пылинок рассчитывается из z -компоненты уравнения движения с учетом трения, гравитации и электромагнитной силы.

Оценки показывают, что магнитное поле может препятствовать седиментации заряженных пылинок. Основное влияние оказывает азимутальная компонента магнитного поля во внешних областях аккреционного диска. В областях эффективной диффузии магнитного поля — «мертвых» зонах — не происходит генерации азимутальной компоненты магнитного поля. В этих областях влиянием магнитного поля можно пренебречь, что способствует накоплению пыли и образованию зародышей планет.

Работа выполнена при поддержке гранта ФПНИ-11/14 ФГБОУ ВПО «ЧелГУ», а также РФФИ 14-02-31837/14.

Библиографические ссылки

1. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121.

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТИХИХ И РАДИОГРОМКИХ ПУЛЬСАРОВ

Проведено сравнение периодов, их производных, магнитных полей на поверхности и вблизи светового цилиндра, а также скоростей потери энергии вращения для двух групп пульсаров, обнаруженных в гамма-диапазоне. Для первой группы зарегистрировано радиоизлучение, для второй — радиоизлучение не обнаружено. Показано, что средние значения указанных параметров близки друг к другу, но их распределения отличаются. Так, у объектов с измеренным радиопотоком индукция магнитного поля на световом цилиндре B_{lc} распределена по закону, близкому к гауссову, в то время как у радиотихих гамма-пульсаров распределение почти равномерное. При этом первая группа обладает, как правило, более высокими значениями B_{lc} . Найдена корреляция между светимостью пульсара в гамма-диапазоне и B_{lc} , что свидетельствует о генерации излучения в этой области вблизи светового цилиндра, и это излучение обусловлено, по-видимому, синхротронным механизмом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-02-00661, а также Программы Президиума РАН «Нестационарные явления в объектах Вселенной».

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТРОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ

Благодаря современным высокоточным наблюдениям недавно был обнаружен новый класс объектов в Солнечной системе — тройные астероиды, движение которых описывается в рамках ньютоновской задачи трех тел. Первые тройные астероиды были обнаружены около десяти лет назад. Исследования данного класса объектов позволяют улучшить понимание космогонии Солнечной системы.

В нашей работе мы исследовали динамическую эволюцию пяти тройных астероидов, для которых известны орбитальные параметры и массы компонентов. С целью определения устойчивости данных систем мы использовали два подхода: применение аналитического критерия устойчивости Голубева и численные расчеты движения тел.

Применение критерия Голубева показало, что рассмотренные тройные системы устойчивы в смысле Хилла, т. е. обмена в системе трех тел происходить не будет. Но критерий не гарантирует, что удаленный компонент не покинет систему. Затем было проведено численное интегрирование уравнений движения, по результатам которого также был сделан вывод об устойчивости тройных астероидов на временах порядка 10^4 лет. Причем моделирование показало, что внешнее тело не покидает систему.

С целью более детального рассмотрения эволюции параметров было произведено интегрирование на временах порядка нескольких лет. По зависимостям параметров от времени было отмечено, что наряду с колебаниями с периодами, сравнимыми с орбитальными периодами, эксцентриситет внутренней двойной и взаимный наклон орбит внутренней и внешней двойных показывают долгопериодические изменения. В связи с этим было выдвинуто предположение о присутствии эффекта Лидова—Кодзай, которое в дальнейшем подтвердилось численными расчетами для тройного астероида Евгения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЗИСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ НА КАНАРСКИХ ОСТРОВАХ

Базисные наблюдения метеоров с целью определения их орбит ведутся с двух или более станций, направленных на заранее вычисленную точку радианта. Используются только те метеоры, которые попали в поле зрения двух или трех станций, т. е. в некоторую область пространства, образованную пересечением конусов наблюдения. Отсюда может возникнуть ситуация, когда одни метеоры попадают в эту область с меньшей вероятностью, чем другие. В этом и заключается геометрический фактор селекции.

Цель исследования — выяснить, является ли наблюдаемая выборка метеоров представительной. Вполне возможно, что на статистические характеристики выборки оказывает влияние наблюдательная селекция, в частности геометрический фактор.

В работе рассматривается задача о встрече метеороида с Землей: моделирование входа метеороида в атмосферу, траектории метеора и видимости его с двух станций на Канарских островах [1]. В данном исследовании использована упрощенная модель взаимодействия: полагаем Землю эллипсоидом, не учитываем влияние притяжения Земли на траекторию метеороида, не учитываем влияние на метеороид негравитационных сил. Модель метеороидного потока Геминид дана научным руководителем (Г. О. Рябовой) в виде пучка орбит (30 000 орбит), каждая из которых задана пятью элементами [2].

Библиографические ссылки

1. *Koschny D., Bettonvil F., Licandro J. et al.* A double-station meteor camera set-up in the Canary Islands – CILBO // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. — 2013. — № 2. — P. 339–348.
2. *Ryabova G. O.* Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // Mon. Not. R. Astr. Soc. — 2007. — Vol. 375. — P. 1371–1380.

О ДИНАМИКЕ НЕКОТОРЫХ АСЗ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ

Данная работа посвящена исследованию структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции ряда астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), с перигелийными расстояниями менее чем 0.15 а. е. — 3200 Phaethon, 137924 2000 BD19, 374158 2004 UL и 2008 FF5. Оценка возмущений проводилась пятью различными методами [1], в набор оцениваемых возмущающих ускорений включены возмущения от больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли и Солнца и релятивистские эффекты от Солнца. Целью работы являлось исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции избранных АСЗ с малыми перигелийными расстояниями.

Используя программный комплекс «ИДА», разработанный в НИИ ПММ ТГУ, выполнены улучшение и исследование эволюции орбит, исследованы структуры возмущений рассматриваемых объектов. Результаты, полученные пятью различными методами, хорошо согласуются между собой. Предложена модель возмущений, рекомендуемая авторами для изучения динамических свойств объектов данной группы: влияние больших планет, Луны, релятивистских эффектов от Солнца и сжатия Солнца.

С использованием рекомендованной модели сил выполнено исследование вероятностной орбитальной эволюции на интервале времени, доступном при использовании фонда DE406 и ограниченном точностью интегрирования. Рассчитывалась эволюция 10 тысяч виртуальных частиц из начальной вероятностной области. В работе также выявлялись тесные сближения и орбитальные резонансы низких порядков с большими планетами.

Библиографические ссылки

1. Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю., Шагабутдинов А. А. Исследование структуры возмущений некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями // Изв. вузов. Физика. — 2014. — Т. 57, вып. 10/2. — С. 27–35.

А. С. Шаповалова¹, С. Ю. Парфенов¹, J. Krelowski²,
Г. А. Галазутдинов³, А. В. Бондарь⁴, Ф. А. Мусаев⁵,
Ю. А. Белецкий⁶, С. Ю. Горда¹, А. М. Соболев¹

¹Уральский федеральный университет,

²Nicolaus Copernicus University,

³Universidad Catolica del Norte,

⁴International Center for Astronomical
and Medico-Ecological Research,

⁵Специальная астрофизическая обсерватория РАН,

⁶European Southern Observatory

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ AE Aur

Звезда AE Aur — убегаящая звезда спектрального класса O9.5 V в созвездии Возничего. Покраснение света звезды значительно превышает покраснение света окружающей звезду отражательной туманности. Это говорит о наличии сгустков межзвездной пыли на луче зрения. Предыдущие исследователи отмечали переменность межзвездных линий CN, CN⁺ и CN в оптических спектрах данной звезды. Целью работы являлось исследование переменности линий межзвездных молекул CN и CN⁺ в период времени с 1997 по 2014 г. по оптическим спектрам высокого разрешения. Данные были получены на инструментах различных организаций, включая ИНАСАН, САО РАН, ВАОО (Южная Корея), Las Campanas Observatory (Чили) и УрФУ. Обработка спектров и оценка эквивалентных ширин (EW) проводились с помощью пакета DECH и программы автоматического приближения непрерывного спектра полиномом.

Получено, что за исследованный период EW(CN⁺) и соответственно лучевая концентрация этой молекулы уменьшились на ~17 %, в то время как изменение EW(CN) происходило в пределах точности измерений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что физические характеристики газа на луче зрения изменяются на масштабах порядка десятков астрономических единиц.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный индикатор проекта RFMEFI59114X0003).

© Шаповалова А. С., Парфенов С. Ю., Krelowski J.,
Галазутдинов Г. А., Бондарь А. В., Мусаев Ф. А., Белецкий Ю. А.,
Горда С. Ю., Соболев А. М., 2015

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛА ДЕЙСТВИЯ В ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

Изучение периодических орбит представляет собой важную часть в исследовании общей задачи трех тел. Первые периодические решения были найдены в работах Эйлера и Лагранжа: три тела все время находятся на одной прямой или в вершинах равностороннего треугольника.

В этой работе для численного поиска периодических орбит использовался метод минимизации функционала действия. Используя данный метод, мы можем найти большое количество различных траекторий. Рассматриваются периодические орбиты с некоторыми симметриями, в этом случае уравнения движения удобно представлять в симметричной форме, используя, например, координаты Якоби. Интересно также рассмотрение задачи в так называемом пространстве форм.

Поскольку рассматриваемые траектории являются периодическими функциями с периодом 2π , то можно представить их в виде разложения на гармоники. Хореография определяется как решение задачи трех (в данном случае) тел, при котором все тела имеют общую орбиту, движутся друг за другом по одной и той же общей кривой. Хореографии и некоторые другие траектории легче всего найти, используя принцип наименьшего действия: вместо того чтобы рассматривать ряды Фурье для каждой отдельной орбиты, можно рассматривать один общий и написать функционал действия через него. Таким образом, при решении задачи минимизации функционала ищутся коэффициенты гармоник, это задача нелинейной оптимизации.

Расчеты выполнялись в среде MATLAB с использованием пакета для решения задач нелинейной оптимизации KNITRO. В результате численного моделирования были получены такие орбиты, как «восьмерка», «ducati», орбиты Хилла и их вариации.

Тезисы кратких сообщений



ОБНАРУЖЕНИЕ 13-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ ЗВЕЗДЫ 55 РАКА

В работе проведен статистический анализ временного ряда из более 1 000 доплеровских измерений лучевой скорости звезды 55 Рака, обладающей известной пятипланетной системой. Анализ включал данные обсерваторий Кеск, Lick и ряда других. Нами обнаружено, что доплеровский шум у этой звезды не является белым, а демонстрирует концентрацию на низких частотах («красный шум»). При этом влияние красного шума на оценки планетных параметров значительно превосходит, например, эффект ньютоновых возмущений в планетной системе. Характеристики коррелированной компоненты шума зависят от спектрографа и обсерватории, но также демонстрируют циклическую переменность во времени, находящуюся в фазе с различными индикаторами активности звезды, доступными в литературе (мониторинг Ca II H&K S-индекса, прецизионный фотометрический мониторинг). Эту переменность мы интерпретируем как признак наличия цикла активности 55 Рака, аналогичного солнечному 11-летнему циклу. Для периода цикла 55 Рака получается оценка $12.6^{+2.5}_{-1.0}$ года, довольно близкая к периоду обращения внешней, наиболее массивной, планеты d. Это также напоминает солнечный цикл, который близок к периоду обращения Юпитера. Периоды максимума активности 55 Рака наблюдались около 1995 и 2008 гг., а минимума — около 2002 г. Новый минимум активности ожидается, по нашей оценке, в 2015 г.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-733.2014.2), Российского фонда фундаментальных исследований (14-02-92615 КО_а), программы Президиума РАН П21.

**ПОИСК НОВЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ В ДАННЫХ
ПРОЕКТА «EXOPLANET TRANSIT DATABASE»
МЕТОДОМ ТАЙМИНГА
ПЛАНЕТНЫХ ПРОХОЖДЕНИЙ**

В работе проведена обработка 266 кривых блеска прохождений для 10 экзопланет, обращающихся у звезд HD 189733, TrES-1, CoRoT-2, GJ 436, Kelt-1, XO-2, WASP-2, -4, -5, -52. Кривые блеска взяты преимущественно из базы данных Exoplanet Transit Database (<http://var2.astro.cz/ETD/>). Суммарное количество включенных в анализ фотометрических измерений превысило 60 000. Анализ включал учет ряда тонких явлений: чистку выбросов, проверку нормальности шума, редукцию красного шума в фотометрии.

Получены уточненные параметры указанных экзопланет, а также временные ряды моментов прохождений, которые можно использовать для поиска у этих звезд новых планет, возмущающих движение наблюдаемых планет (метод тайминга планетных прохождений, или TTV — Transit Timing Variations). Проведена обработка полученных данных TTV с целью поиска в них периодических сигналов, возможно, принадлежащих ранее неизвестным планетам. Статистически значимых отклонений от белого шума почти во всех этих TTV рядах найдено не было, за исключением данных для WASP-4 b. У последней найдены неуверенные признаки периодичностей разных периодов на границе обнаружимости.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-733.2014.2), Российского фонда фундаментальных исследований (14-02-92615 КО_а), программ Президиума РАН П21 и П22.

О. Ю. Барсунова¹, В. П. Гринин¹,
С. Г. Сергеев², А. О. Семенов¹, С. Ю. Шугаров³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

²Крымская астрофизическая обсерватория,

³Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ

ПЕРЕМЕННЫЕ ТИПА UX ORI В IC 348

Представлены результаты многолетних фотометрических (VRI) наблюдений четырех переменных звезд типа Т Тельца из скопления IC 348: V695 Per, V712 Per, V719 Per и V909 Per. Все четыре звезды демонстрируют фотометрическую активность, характерную для звезд типа UX Ori. Периодограммный анализ кривых блеска не подтвердил наличие периодов у трех из них, найденных ранее другими авторами на основе более коротких рядов наблюдений. У четвертой же, V695 Per, был подтвержден период в 7.6 дня. Звезда относится к классу CTTS, и стабильность этого периода на протяжении многих лет наблюдений в совокупности с фотометрической активностью типа UX Ori говорит в пользу того, что по аналогии с поведением звезды AA Tau эта активность является следствием экранирования звезды искривленным внутренним краем околос звездного диска, прилегающим к магнитосфере звезды. Причиной сильной деформации диска является дипольное магнитное поле звезды, ось которого наклонена относительно оси вращения звезды. По наклону цветовых треков на диаграммах «цвет—величина» определены параметры закона покраснения исследуемых звезд, обусловленного селективным поглощением околос звездной пылью. Моделирование этих параметров на основе теории Ми для силикатных частиц показало, что характерный размер пылинок в атмосфере протопланетных дисков исследуемых звезд существенно больше, чем в межзвездной среде.

А. П. Бисярина¹, Д. А. Семенов²,
А. М. Соболев³

¹Уральский федеральный университет,
²Институт астрономии им. Макса Планка,
³Астрономическая обсерватория УрФУ

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ДВУХЦВЕТНАЯ
ДИАГРАММА (J–H)–(H–K)
ДЛЯ ЗВЕЗД Т ТЕЛЬЦА И АЕ/ВЕ ХЕРБИГА**

Наблюдаемые инфракрасные (ИК) цвета классических звезд Т Тельца образуют собственную последовательность на двухцветной диаграмме (J–H)–(H–K). Эта последовательность в настоящий момент интерпретируется в рамках модели аккреционного диска с внутренней областью, свободной от пыли до радиуса сублимационного фронта, при всех возможных углах наклона дисков вокруг звезд Т Тельца.

Звезды Ae/Be Хербига по многим свойствам являются массивными аналогами звезд Т Тельца. Тем не менее последовательность звезд Ae/Be Хербига на (J–H)–(H–K) диаграмме отличается по положению и имеет существенно больший разброс. Следует отметить, что звезды Ae/Be Хербига имеют большее значение радиуса сублимационного фронта. Так как значения J, H и K величин определяются в основном внутренними областями диска, яркость звезд Ae/Be Хербига в ИК сильно зависит от геометрии и наклона диска.

В данной работе положения звезд Т Тельца и Ae/Be Хербига на двухцветной диаграмме рассчитаны в модели пассивного диска, на сублимационном фронте которого возникает увеличенное по высоте внутреннее кольцо. Расчеты выполнены с помощью пакета RADMC–3D, широко используемого для 3D-расчета переноса излучения (автор — С. Р. Dullemond). Проанализировано изменение положения на диаграмме (J–H)–(H–K) в зависимости от таких характеристик звезды, как спектральный класс, угол наклона диска, радиус сублимационного фронта, высота внутреннего кольца и т. д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ВЫСОКОТОЧНЫХ АПОСТЕРИОРНЫХ ЭФЕМЕРИД

Исследовано влияние резонансов высоких порядков на орбитальную эволюцию объектов в окрестности областей движения спутников глобальных навигационных систем. Основные результаты получены на основе данных численного интегрирования, выполненного с помощью численной модели движения искусственных спутников Земли, разработанной в НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. На основе результатов численного моделирования не выявлено существенных изменений позиционных элементов орбит при входе, выходе и прохождении спутника через зоны резонансов высоких порядков.

Исследована орбитальная эволюция спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС с целью определения возмущений орбит при прохождении через области резонансов высоких порядков на основе анализа высокоточных апостериорных эфемерид. Качественных изменений в эволюции элементов орбит спутников системы ГЛОНАСС при входе и выходе из резонансных зон высоких порядков не выявлено. Это обусловлено тем, что области резонансов высоких порядков обладают слишком малыми потенциальными ямами, чтобы оказывать существенное влияние на орбитальную эволюцию объектов. Для некоторых объектов зафиксировано попадание в резонансные области под влиянием возмущений.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ В ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМАХ С КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

В докладе представляется модель распределения массы в звездных системах. Предполагается существование третьего квадратичного по скоростям интеграла движения [1], в результате чего потенциал является штеккелевским. Модели с такими потенциалами широко распространены в современной литературе (см., например, [2]).

Предполагается, что в экваториальной плоскости потенциал совпадает с квазиизотермическим. Основываясь на теории построения моделей с третьим квадратичным интегралом, было получено выражение для пространственной плотности, а также исследованы некоторые свойства данной модели [3]. Кроме того, построены модели с потенциалами Яффе и Шустера—Пламмера, которые являются предельными случаями для квазиизотермического потенциала.

Рассмотрена возможность применения модели к нашей Галактике. Оценка модельных параметров производится путем сравнения кривой круговых скоростей со значениями круговых скоростей, полученных в результате наблюдений нейтрального водорода [4].

Библиографические ссылки

1. *Кузмин Г. Г.* Третий интеграл движения звезд и динамика стационарной Галактики // Публ. Тарт. астрон. обсерв. — 1952. — Т. 32. — С. 332—368.
2. *de Zeeuw T., Peletier R., Franx M.* Mass model with Stäckel potentials // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1986. — Vol. 221. — P. 1001—1022.
3. *Громов А. О.* Модели галактик со штеккелевским потенциалом // Вестн. С.-Петербург. ун-та. — Сер. 1. — 2014. — Т. 2. — С. 322—330.
4. *Nikiforov I. I., Petrovskaya I. V.* Distance of the sun from the galactic center and the rotation curve from kinematic H I and H II data // Astr. Rep. — 1994. — Vol. 38. — P. 642—653.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОДЕЛЕЙ РАСSEЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОВ ВОЛНОВЫХ ЧИСЕЛ

Вычисление спектров волновых чисел k для колебаний фазовой плотности f и модулей скоростей звезд v в моделях рассеянных скоплений (РЗС) выполняется с помощью пространственного преобразования Фурье взаимных корреляционных функций для флуктуаций f и v при нулевом сдвиге по времени. Спектр волновых чисел колебаний f является более простым по сравнению со спектром волновых чисел колебаний v , в котором наблюдаются многочисленные экстремумы. Спектр волновых чисел колебаний v не является колмогоровским. Поэтому рассматриваемые модели РЗС на временах $t \leq \tau_{v.r.}$ еще не достигли состояния локально изотропной, однородной и стационарной турбулентности с установившимся потоком энергии от малых k к большим. Основные по мощности колебания f и v приходятся на длины волн $\lambda \in [1, 10]$ пк. Значительный вклад в среднюю мощность колебаний f и v вносят гомологические колебания. Сравнение вида спектров при двух значениях n_{st} — числа звезд в окрестности данной точки для оценки f и v — показывает, что использование большего значения n_{st} позволяет исследовать колебания большего масштаба с большими длинами волн в моделях РЗС. Спектры волновых чисел колебаний f и v при изменении величины параметра сглаживания потенциала меняются значительно меньше, чем спектры частот колебаний f . Во всех рассмотренных моделях, за исключением наиболее плотной, в спектрах волновых чисел имеются серии равноотстоящих по k локальных максимумов, причем $R_t \Delta k \simeq 1$, где R_t — приливный радиус скопления. Длины волн, соответствующие этим максимумам, связаны между собой и с размерами скоплений, что указывает на дискретный характер длин волн, формирующихся в моделях РЗС. В случае согласия наблюдательных данных о радиальных зависимостях средних модулей скоростей движения звезд в РЗС и результатов численного моделирования динамики РЗС длины волн двух или нескольких соседних по k колебаний v могут быть использованы для оценок величин R_t и полных масс РЗС.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ОКОЛОЗВЕЗДНОЙ ЭКСТИНКЦИИ В МОДЕЛЯХ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ С МАЛОМАССИВНЫМИ КОМПАНЬОНАМИ

Рассматривается модель молодой звезды, погруженной в протяженный газопылевой диск, в веществе которого движется маломассивный компаньон (коричневый карлик или планета-гигант). Расчет газодинамических течений, вызванных движением компаньона, выполнен с помощью модифицированного нами кода GADGET 2 [1, 2]. При моделировании протопланетного диска вычислялась колонковая плотность околозвездной пыли на луче между центральной звездой и наблюдателем. Секущая колонка проходила сквозь вещество диска в различных направлениях, что позволило нам оценить влияние ориентации диска на кривую блеска и исследовать вклад различных частей диска в экстинкцию излучения молодой звезды. Результаты данной работы применялись для объяснения кривых блеска звезд типа UX Ori, околозвездные диски которых наклонены под небольшим углом к лучу зрения [3].

Библиографические ссылки

1. *Springel V., Yoshida N., White S. D. M.* GADGET: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations // *New Astronomy*. — 2001. — Vol. 6. — P. 79–117.
2. *Springel V.* The cosmological simulation code GADGET-2 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 364. — P. 1105–1134.
3. *Grinin V. P., Kiselev N. N., Chernova G. P. et al.* The investigations of 'zodiacal light' of isolated AE-Herbig stars with nonperiodic algol-type minima // *Astrophys. Space. Sci.* — 1991. — Vol. 186. — P. 283–298.

РОЛЬ ШИРОКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ В ОБРАЗОВАНИИ СВЕРХСКОРОСТНЫХ ЗВЕЗД

Среди известных сценариев образования сверхскоростных звезд (СЗ) при участии черных дыр наиболее реалистичным остается сценарий динамического захвата одного из компонентов тесной двойной системы (ТДС) гравитационным полем сверхмассивной черной дыры (СМЧД), в результате которого оставшийся компонент ТДС выбрасывается из системы со скоростью порядка нескольких тысяч километров в секунду [1]. Этот сценарий вероятен и с точки зрения согласования статистики открываемых СЗ и количества наблюдаемых В-звезд вблизи галактического центра в предположении, что это бывшие компаньоны СЗ в родительских ТДС, разрушенных полем СМЧД.

В отличие от ТДС, которые дают «гарантированный» выброс СЗ полем СМЧД на малых перицентрических расстояниях ($r_p < 1250 R_\odot$), широкие двойные системы изначально игнорировались из-за высокой вероятности их распада до того, как они достигнут приливного радиуса СМЧД. Но, как показали результаты моделирования в задаче трех тел, полученные для статистических ансамблей из 10 000 вариантов начальных орбитальных конфигураций двойных систем, рассчитываемых на произвольных параболических орбитах, привлечение широких двойных систем с большими полуосями от 56.57 до 425 R_\odot существенно увеличивает протяженность «коридора» для вылета СЗ до 40 000 R_\odot . Полученный результат кардинально расширяет область пространства в окрестности СМЧД, в которой могут быть сгенерированы СЗ.

Библиографические ссылки

1. *Hills J.* Hyper-velocity and tidal stars from binaries disrupted by a massive Galactic black hole // *Nature*. — 1988. — Vol. 331. — P. 687–689.

**ПОСТРОЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ
ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В БОРТОВЫХ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ
НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В настоящее время на космических аппаратах достаточно широко применяются оптико-электронные приборы наблюдения космических объектов. Во-первых, это звездные датчики для определения ориентации КА. Во-вторых, оптико-электронные системы КА-инспекторов. В-третьих, оптико-электронные комплексы космических систем мониторинга околоземного космического пространства.

Как правило, данные оптико-электронные приборы осуществляют наблюдения космических объектов в интегральном свете, что требует создания инструментальной фотометрической системы.

В работе предлагается использовать для формирования инструментальной фотометрической системы метод группового учета аргументов.

В результате обработки формируются полиномы оптимальной сложности, определяющие инструментальные звездные величины наблюдаемых космических объектов от суммарной интенсивности изображения космического объекта, с учетом значений фоновой и сигнальной составляющих, а также режимов работы оптико-электронного прибора.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЙОНА ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД БОЛЬШОЙ МАССЫ S255 ПО КОМБИНИРОВАННЫМ ДАНЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ОДИНОЧНОЙ АНТЕННЫ

До сих пор процесс формирования звезд массой более $8-10 M_{\odot}$ недостаточно известен. Отчасти это связано с тем, что регионы образования звезд высокой массы сильно удалены от нас.

Достаточным угловым разрешением среди современных инструментов обладают только интерферометры. Однако они имеют ряд существенных недостатков, основным из которых является невозможность наблюдать протяженные структуры. Частично решить проблему позволяют методы комбинирования данных наблюдений на интерферометре и на одиночной антенне.

Нами была рассмотрена область активного образования звезд большой массы S255 в непрерывном спектре излучения пыли, а также в линиях излучения молекул N_2H^+ , CO, SiO и др. [1]. На основе комбинированных данных наблюдений на интерферометре SMA и 30-м телескопе IRAM были получены карты источника, содержащие важную информацию о крупных и мелких деталях. Комбинирование проводилось методом преобразования в функцию видности карты источника по наблюдениям на одиночной антенне и совмещения с данными интерферометра для лучшего заполнения области пространственных частот. Полученные карты показали, что использование только интерферометрических данных может привести к ошибкам в выводах о морфологии объекта. Также нами были получены оценки физических параметров источника.

Работа частично была поддержана грантом РФФИ № 12-02-00861.

Библиографические ссылки

1. Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al. A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 755. — P. 177.

А. М. Зубарева^{1,2}, Д. М. Колесникова¹,
К. В. Соколовский^{3,2}, С. В. Антипин^{2,1},
Н. Н. Самусь^{1,2}

¹Институт астрономии РАН,

²Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ,

³Астрокосмический центр ФИАН

ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА ДЕЛЬТА ЩИТА НА ФОТОПЛАСТИНКАХ МОСКОВСКОГО АРХИВА

Программа сканирования фототеки ГАИШ МГУ начата в 2004 г. К 2015 г. на отсканированных изображениях трех избранных площадок, каждая из которых охватывает $10 \times 10^\circ$ неба вблизи Млечного Пути, обнаружено более тысячи неизвестных ранее переменных звезд. Среди них 27 пульсирующих переменных типа дельта Щита с амплитудами изменения блеска не менее 0.3^m . Одна из звезд пульсирует в двух модах, отношение периодов составляет 0.760.

К началу XXI в. в Общем Каталоге Переменных Звезд содержались записи всего о 121 звезде типа дельта Щита с амплитудами изменения блеска более 0.2^m .

Обсуждаются причины резкого изменения количества известных звезд типа дельта Щита и особенности их поиска с использованием различных методов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-02-00664.

НАГРЕВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ «ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА»

Мы представляем результаты моделирования нагрева верхней атмосферы «горячего юпитера» HD 209458b с учетом вклада от над-тепловых частиц. Были проведены расчеты для различных вариантов распределения энергии в спектре звезды. Экзопланета на низкой орбите окружена газовой оболочкой, которая испытывает интенсивный газодинамический отток. Темп этого оттока зависит от интенсивности нагрева верхней атмосферы планеты излучением звезды в диапазоне 1–100 нм. Такое излучение называется жестким УФ-излучением (XUV). В работе исследован нагрев излучением из двух диапазонов: крайним ультрафиолетом (10–100 нм) и мягким рентгеном (1–10 нм). Обнаружено, что высотный профиль интенсивности нагрева имеет два максимума. УФ-излучение поглощается на высоте 1.06 радиуса планеты. Мягкое рентгеновское излучение поглощается на высоте 1.02 радиуса планеты. Вычислены профили эффективности нагрева отдельно для УФ и рентгеновского излучения. Средняя эффективность нагрева составляет 0.12–0.20 в зависимости от диапазона.

Для звезд главной последовательности интенсивность в диапазоне 1–10 нм в ходе эволюции существенно меняется. У молодых звезд она может на несколько порядков превосходить интенсивность для Солнца. Поэтому в работе был рассчитан нагрев атмосферы «горячего юпитера» для такого спектра звезды, в котором интенсивность излучения в диапазоне 1–10 нм превосходит солнечную в 10 и в 100 раз. Обнаружено, что данное изменение спектра влечет за собой фундаментальные изменения в скорости нагрева, причем высотный профиль эффективности нагрева меняется незначительно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-02-31605) и программы Президиума РАН № 22 «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

М. С. Кирсанова¹, А. М. Соболев²,
М. Томассон³

¹Уральский федеральный университет,

²Институт астрономии РАН

³Онсальская обсерватория, Швеция

КИНЕМАТИКА ГАЗА В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД ИЗ СПИРАЛЬНОГО РУКАВА ПЕРСЕЯ

Представлены результаты наблюдений радиолиний $^{13}\text{CO}(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$ в направлении на 16 областей звездообразования из спирального рукава Персея, содержащих мазеры метанола на частоте 6.7 ГГц. Это около 80 % от общего числа таких источников в данном рукаве. Проведено сравнение скоростей тепловых линий $\text{CS}(2-1)$ и мазерных метанольных. Показано, что только для двух источников интервал скоростей мазерных деталей полностью перекрывает интервал скоростей тепловых линий. В трех источниках «мазерные» и «тепловые» интервалы скоростей не пересекаются вовсе, а в остальных источниках эти интервалы пересекаются частично. Показано, что для большинства источников (примерно 60 %) мазерные линии смещены в сторону больших скоростей относительно линий CS (т. е. в «красную» сторону). Всего имеется 11 «красных», 7 «синих» и 3 источника, где скорости мазерных и тепловых линий близки. Наибольшее превышение числа «красных» над «синими» наблюдается во втором галактическом квадранте. Показано, что «цвет» мазерного источника не зависит от того, синие или красные крылья наблюдаются у линий $^{13}\text{CO}(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$, в большинстве источников присутствуют оба крыла. Построены карты лучевых скоростей ряда наблюдавшихся областей звездообразования в линиях $^{13}\text{CO}(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$. Области, яркие в линии $\text{CS}(2-1)$, выделяются по скорости (скорость там меньше) по отношению к другим областям карт. Такой характер пространственного распределения лучевых скоростей в областях звездообразования может быть вызван их обтеканием крупномасштабной ударной волной.

МК благодарит за поддержку Совет по грантам Президента Российской Федерации (МК-2570.2014.2).

**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ
ОБНАРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ЭЛЕМЕНТОВ
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

Рассматривается адаптивный алгоритм идентификации различных классов космических объектов в широкоугольных оптико-электронных системах обнаружения элементов космического мусора.

Процесс обнаружения в данном случае разбивается на три этапа:

- предварительная обработка регистрируемых кадров;
- выделение изображений;
- идентификация различных классов космических объектов.

На первом этапе стандартными процедурами оцениваются значения темнового тока, неравномерности коэффициентов усиления, выявляются неисправные пиксели.

На втором этапе реализованы процедуры анализа фоновосигнальной составляющей в цифровом кадре, на основе которого осуществляется адаптивная обработка с использованием модифицированного метода Оцу [1], алгоритма поиска связанных областей и процедур оценивания параметров выделенных изображений.

На третьем этапе реализуются алгоритмы идентификации совокупности опорных звезд (звездных образований), различных классов небесных тел Солнечной системы, космических объектов искусственного происхождения. При этом используются адаптивные процедуры, в которых учитываются режимы работы оптико-электронной системы.

Библиографические ссылки

1. *Otsu N.* A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1979. — Vol. 9. — P. 62–66.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФРАГМЕНТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ГСО

Объект 33458 (NORAD) является фрагментом космического аппарата Fengyun 2D и находится на геостационарной орбите на высоте рабочих искусственных спутников Земли в режиме либрации около точки с долготой 75° . Начиная с июня 2009 г. объект 33458 наблюдается на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН для изучения его орбитальной эволюции и фотометрических измерений.

Цель данной работы — исследовать орбитальное движение объекта 33458 на длительном интервале времени. Известно, что для решения этой задачи нужно не только иметь высокоточную численную модель движения, но и учитывать негравитационные эффекты, прежде всего световое давление. Световое давление сильно зависит от физических характеристик объекта (формы и размера) и от особенностей вращения вокруг центра масс, влияющего на миделево сечение. Данные параметры неизвестны для фрагментов космического мусора. Метод определения параметра парусности объекта на длительном интервале времени малоэффективен, так как значение парусности, определенное из наблюдений, — это осредненное значение на всем интервале времени. При таком подходе сходимость итерационного процесса уточнения орбиты — достаточно редкое явление вследствие невозможности осреднения этого параметра на всей наблюдательной дуге. Поэтому в данном случае стоит прибегать к определению из наблюдений дополнительных сил.

В работе исследуется ряд моделей учета таких сил: уточнение коэффициента парусности из наблюдений; нахождение дополнительных ускорений вдоль осей вращения объекта; определение значений вдоль трех компонент ускорения (радиальной, тангенциальной и нормальной).

С. Ю. Парфенов¹, С. Ю. Горда¹, М. Szymczak²,
А. М. Соболев¹

¹Уральский федеральный университет,

²Институт Николая Коперника

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ИСТОЧНИКА V645 Cyg В ОПТИКЕ И МАЗЕРНОЙ ЛИНИИ МЕТАНОЛА НА 6.7 ГГц

V645 Cyg (AFGL 2789) — предположительно молодой звездный объект. Этот источник демонстрирует переменность в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах.

В данной работе представлены предварительные результаты мониторинга V645 Cyg, который проводился в оптике в фильтрах V и R и в мазерной радиолнии метанола на 6.7 ГГц. Важно, что впервые для переменного источника мазерного излучения мониторинг в оптическом и радиодиапазонах производился в течение одного и того же периода времени. Оптические данные были получены на телескопе АЗТ-3 Коуровской астрономической обсерватории. Данные в радиодиапазоне получены на радиотелескопе РТ-32 в Торуне. Представленные наблюдения проведены в период с 2009 по 2012 г. Наблюдения в оптике производились в среднем раз в 2 месяца, в радиодиапазоне — 4 раза в 2 месяца.

Из данных наблюдений следует, что V645 Cyg демонстрирует переменность в фильтрах V и R и в мазерной линии. Максимальное изменение блеска в V и R составляет 0.4 звездной величины, максимальное изменение плотности потока излучения на 6.7 ГГц составляет 40 %. На основе представленных данных можно предположить равенство характерных времен переменности в оптике и мазерной линии. Увеличение и уменьшение потока в мазерной линии соответствуют увеличению и уменьшению блеска в оптике в ближайшую дату. Это может свидетельствовать в пользу того, что переменность мазерного излучения V645 Cyg связана с переменностью центрального источника излучения, а не с изменениями в структуре диска вокруг центрального источника или в структуре биполярного истечения, связанного с этим диском.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, РК № 01201465056).

© Парфенов С. Ю., Горда С. Ю., Szymczak М., Соболев А. М., 2015

РАЗЛОЖЕНИЕ ГАМИЛЬТониАНА ПЛАНЕТНОЙ ЗАДАЧИ В РЯД ПУАССОНА ПО ЭЛЕМЕНТАМ ОРБИТЫ

В работе рассмотрен алгоритм разложения гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона по элементам орбиты. Рассмотрена четырехпланетная задача. Гамильтониан записывается в системе координат Якоби. Это иерархическая система координат, которая является наиболее удобной при изучении орбитальной эволюции планетных систем. Разложение в ряд строится во второй системе элементов Пуанкаре. Эта система содержит только одну угловую переменную — среднюю долготу, что значительно упрощает угловую часть разложения [1].

Разложение гамильтониана проводится в системе компьютерной алгебры Piranha [2]. Это специализированная компьютерная система, предназначенная для аналитических вычислений в области небесной механики. Сделана попытка перехода к использованию новой усовершенствованной версии данной системы [3]. Для сокращения числа слагаемых и экономии оперативной памяти в разложении в символьном виде сохраняются полиномы Лежандра.

Получено разложение гамильтониана в ряд до первой (в некоторых случаях до второй) степени малого параметра и до различных степеней по элементам орбиты. На примере Солнечной системы и нескольких внесолнечных систем даны оценки точности, полученных разложений.

Библиографические ссылки

1. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — Москва : Наука, 1968.
2. *Biscani F.* The Piranha algebraic manipulator. — 2009. — P. 24. [arXiv:0907.2076v1](https://arxiv.org/abs/0907.2076v1).
3. *Biscani F.* The Piranha computer algebra system. — <https://www.github.com/bluescarni/piranha>.

И. С. Потравнов¹, В. П. Гринин¹,
Д. Н. Шаховской², С. Г. Шульман^{1,3}, С. П. Белан²
¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
²Крымская астрофизическая обсерватория,
³Санкт-Петербургский государственный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА НЕОБЫЧНОЙ ЗВЕЗДЫ ТИПА UX Ori RZ Psc

В докладе представлены результаты исследования спектральной переменности одной из самых холодных звезд типа UX Ori RZ Psc ($S_p = K0IV$), находящейся на переходной стадии эволюции между звездами с протопланетными и молодыми debris дисками. Спектральные наблюдения проводились в обсерваториях Nordic Optical Telescope и Крымской астрофизической обсерватории, фотометрическая поддержка наблюдений осуществлялась в КраО. В спектре звезды впервые обнаружены признаки околос звездного газа в линиях резонансного дублета Na I D в виде дискретных абсорбционных компонент, смещенных в синюю сторону. Лучевые скорости этих компонент достигают 120 км/с. Отсутствие эмиссионных деталей в линиях натрия указывает на то, что потоки газа, в которых образуются дискретные абсорбционные компоненты, заполняют лишь небольшую часть телесного угла 4π . Это означает, что истечение вещества из окрестностей звезды носит резко анизотропный характер. В ходе спектральных наблюдений в режиме мониторинга мы обнаружили, что область, в которой происходит ускорение газа, вращается с угловой скоростью, близкой к скорости вращения звезды. Это позволяет предположить, что в образовании наблюдаемых потоков газа ключевую роль играет взаимодействие остатков протопланетного диска с магнитосферой звезды в режиме магнитного пропеллера. Оценки показывают, что при низком темпе аккреции ($< 10^{-10} M_\odot$ в год), характерном для поздних стадий эволюции звезд типа Т Тельца, фаза аккреции в режиме пропеллера возможна, если напряженность магнитного диполя на поверхности RZ Psc порядка 0.5 кГс.

В. Б. Пузин¹, И. С. Саванов¹,
А. Ю. Бурданов², Н. А. Парахин³

¹ Институт астрономии РАН,

² Уральский федеральный университет,

³ Международный центр астрономических и
медико-экологических исследований НАН Украины

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗД ТИПА FK COM

В работе представлены результаты анализа фотометрических рядов для звезды FK Com и возможных кандидатов в звезды типа FK Com.

Для исследования фотометрической переменности звезды FK Com использовались ряды данных, полученные различными авторами в период с 1966 по 2014 г. По отдельным сетам наблюдений построены карты поверхностных температурных неоднородностей. На основании карт получены положения активных долгот. По амплитудному анализу переменности переключения (эффект флип-флоп) активных долгот найдены периоды изменения активных долгот. Амплитудный анализ переменности амплитуды переменности и переменность среднего значения блеска в фильтре V позволил оценить циклы активности звезды FK Com.

Класс звезд FK Com крайне малочисленный. В работе был проведен анализ фотометрических данных с космического телескопа Кеплер на предмет поиска звезд — кандидатов в звезды типа FK Com. Для четырех объектов, удовлетворяющих по параметрам звездам типа FK Com (эффективная температура, логарифм силы тяжести, период переменности), был проведен анализ, подобный проведенному для звезды FK Com. Для исследуемых объектов обнаружен эффект флип-флоп, найдены циклы активности. Характер изменения положения активных долгот, периоды циклов активности соответствуют обнаруженным для звезды FK Com. Знание циклов активности, периодов переменности переключения активных долгот поможет более полно изучать механизмы звездного динамо, которые ответственны за активность магнитного поля. Знание механизмов, ответственных за переменность звезд FK Com, поможет в уточнении их неоднозначного эволюционного статуса.

С. В. Репин, Д. А. Литвинцева,
В. А. Зуга, Т. И. Ларченкова
Астрокосмический центр Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН

**НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ОБЪЕКТА
В ПОЛЕ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ КЕРРА**

В докладе рассмотрена возможность наблюдения видимого движения излучающего объекта в поле сверхмассивной Керрской черной дыры. Построены видимые траектории движения излучающих пятен аккреционного диска сверхмассивной черной дыры в метрике Керра и определена интенсивность излучения на траектории.

ОЦЕНИВАНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ УСКОРЕНИЙ В ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

В работе приводятся оценки влияния возмущающих факторов на точность построения доверительных областей движения потенциально опасных астероидов. Оценивание точности модели движения объектов основывается на вычислении показателя смещения доверительных областей [1], построенных для альтернативных моделей движения. Данный показатель имеет геометрически ясный и простой вид. Если его значение меньше некоторого порогового значения, то можно считать смещение НК-оценок малым в сравнении с размерами доверительных областей. В таком случае исключение малых возмущающих факторов из более полной модели не окажет заметного влияния на точность вероятностного описания движения рассматриваемого объекта. Полная модель движения включала гравитационные возмущения от больших планет, Луны, Плутона, сжатия Земли и релятивистских эффектов от Солнца. Все результаты оценивания смещения доверительных областей получены на основе реальных наблюдений объектов. Исследование показало, что влияние возмущающих факторов может быть разным и зависит от интервалов времени, на которых объект наблюдался и на которых определяются вероятностные области его движения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

Библиографические ссылки

1. Сюсина О. М., Самбаров Г. Е., Черницов А. М., Тамаров В. А. Исследование влияния ошибок модели движения астероидов на точность построения начальной доверительной области // Известия вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 50–59.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПЛОТНОСТИ РАСSEЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ФУНКЦИИ-ЯДРА

Метод функции-ядра используется для построения профилей поверхностной и пространственной плотности в рассеянных звездных скоплениях. Получены формулы, позволяющие учесть вклад каждой звезды в оценку пространственной плотности.

Применение метода к оценке пространственной плотности проверяется на результатах численного моделирования рассеянных звездных скоплений в рамках задачи $N = 500$ тел. Профили поверхностной плотности построены для семи рассеянных звездных скоплений по данным каталога точечных источников PSC 2MASS.

Обсуждается вопрос выбора оптимальной ширины ядра. Показывается, что результат определения радиуса скопления по профилю плотности слабо зависит от полуширины ядра.

Обсуждаются такие особенности структуры рассмотренных скоплений, как признаки сегрегации звезд по массе, наличие структурных деталей, свидетельствующих о нестационарности скоплений в регулярном поле. Для аппроксимации профилей поверхностной плотности скоплений используется комбинация функции распределения плотности Кинга и однородного шара, представляющего корону скопления. Сравнение с результатами других авторов показывает, что очень часто в литературе приводятся заниженные данные о размерах рассеянных скоплений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, РК № 01201465056).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОРОТАЦИОННОЙ СВЕРХНОВОЙ

Выяснение механизмов взрыва сверхновых является одной из актуальных проблем современной астрофизики. Для сверхновых типа Ia этот механизм на сегодняшний день считается в целом ясным. Сложнее дело обстоит со сверхновыми с коллапсирующим ядром (типов Ib, Ic и II). Взрыву таких сверхновых предшествует коллапс ядра, вызванный выгоранием термоядерного топлива. Одним из вариантов дальнейшего развития взрыва является нейтринный механизм, однако расчеты по этой модели либо не приводят к взрыву, либо энергия такого взрыва оказывается слишком мала.

В данной работе моделирование проводится на основе другого механизма развития взрыва, а именно магниторотационного. Его идея состоит в преобразовании энергии вращения ядра в энергию разлета оболочки звезды посредством магнитного поля. Ввиду чрезвычайной сложности задачи единственным способом ее исследования является численное решение соответствующих уравнений.

В данном исследовании рассматривается одномерная цилиндрически симметричная модель сверхновой. Применяется неявная разностная схема для уравнений магнитной гидродинамики в лагранжевых массовых координатах. Используемые уравнения состояния учитывают нейтронизацию вещества и давление излучения. Кроме того, учтены потери энергии на нейтринное излучение. Благодаря использованию неявной схемы расчеты удалось провести для достаточно малых отношений магнитной энергии к гравитационной, имеющих место в реальных звездах.

Результаты расчетов показывают, что развитие коллапса по данной модели приводит к расслоению оболочки, основная часть которой начинает вращаться твердотельно вместе со звездой, однако внешняя часть оболочки разлетается с большой скоростью, что и может быть интерпретировано как взрыв сверхновой. Кроме того, вычисленная энергия взрыва близка к полученной из наблюдений. Полученные результаты хорошо согласуются с наблюдаемой картиной взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром.

ПОСТРОЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ЭФЕМЕРИД РЯДА НЕНУМЕРОВАННЫХ АСЗ

Для осуществления позиционных наблюдений малых тел Солнечной системы в большинстве случаев требуется эфемеридная поддержка. Если не касаться обзорных наблюдений, производимых с целью обнаружения неизвестных астероидов, для получения новых экваториальных сферических координат исследуемых объектов требуется знание элементов орбит, построенных на более ранних наблюдениях. Очевидно, что от точности начальных параметров будет зависеть и погрешность при вычислении эфемерид.

Для большинства астероидов элементы орбит известны с достаточной точностью, такой, что область возможных положений объекта в проекции на небесную сферу не превысит нескольких угловых секунд. С другой стороны, существует значительное число объектов, имеющих малое число наблюдений и/или наблюдавшихся внутри незначительного интервала времени — в одной оппозиции. Если присовокупить к этим ограничениям еще и потенциально возможную низкую точность отдельно взятых позиционных наблюдений, область возможных движений исследуемого астероида на момент наблюдений может оказаться крайне велика, а именно — больше поля зрения используемого телескопа.

В данной работе были получены обзорные эфемериды (области возможных движений объекта в сферических координатах на момент наблюдений) для ряда астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Представленные результаты позволяют оценить вероятность успешных эфемеридных наблюдений тех или иных АСЗ, а также провести обзорные наблюдения внутри заданной области. Фактически при использовании данного метода эфемеридной поддержки эфемериды строятся не только на основании номинального (наиболее вероятного) набора элементов орбит, но и при включении в вычисления параметров начальной вероятностной области, что само по себе увеличивает шансы успешного наблюдения исследуемого объекта.

К. И. Смирнова¹, М. С. Мурга²,
Д. З. Вибе², А. М. Соболев¹
¹Уральский федеральный университет,
²Институт астрономии РАН

СВЯЗЬ МОЛЕКУЛЯРНОГО И АТОМНОГО ВОДОРОДА С ПАРАМЕТРАМИ ПЫЛИ ВО ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НII

В межзвездной среде (МЗС) протекает большое количество астрофизических процессов, включая образование и разрушение пыли, ее взаимодействие с газом, полем излучения и т. д. Все эти процессы протекают с разными скоростями в зависимости от условий и параметров среды. Данная работа посвящена определению параметров МЗС в комплексах НII с помощью наблюдательных данных в инфракрасном (ИК) (космические телескопы Spitzer и Herschel) и радиодиапазонах (IRAM и VLA), а также сопоставлению полученных параметров между собой. Для исследования отобрано несколько сотен внегалактических комплексов НII в десяти галактиках, принадлежащих выборкам обзоров THINGS (линия НI), KINGFISH и SINGS (длинноволновая и ближняя/средняя ИК-области соответственно) и HERACLES (линии CO). На основе данных, взятых из архивов указанных обзоров, проведена апертурная фотометрия комплексов НII и найден ряд параметров: массовая доля ПАУ, масса пыли, средняя интенсивность поля излучения, доля областей фотодиссоциации, масса молекулярного и атомарного водорода. Была примерно оценена металличность для каждой области. Рассмотрены возможные соотношения между массами молекулярного, атомарного водорода и пыли. Исследована зависимость перечисленных параметров межзвездной среды от галактоцентрического расстояния.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-02-00231, а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

ЭВОЛЮЦИЯ ОСТАТОЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Исследуется эволюция остаточного магнитного поля аккреционных дисков молодых звезд. В кинематическом приближении рассматривается задача о генерации радиальной и азимутальной компонент магнитного поля в геометрически тонком аккреционном диске. Нестационарное уравнение индукции записывается в пределе идеальной магнитной газодинамики (МГД). Для профилей скорости используются аналитические степенные зависимости от расстояния, полученные в рамках авторской МГД модели аккреционных дисков [1].

Получено аналитическое решение, описывающее эволюцию компонент магнитного поля вне областей низкой степени ионизации и эффективной диффузии магнитного поля («мертвых» зон). Оценки при типичных для аккреционных дисков звезд типа Т Тельца параметрах показывают, что за несколько орбитальных периодов на заданном расстоянии от звезды магнитное поле в аккреционном диске приобретает квазиазимутальную геометрию. Скорость аккреции существенно меньше угловой скорости вращения, и магнитное поле становится квазирадialным медленнее — за время порядка 10^5 – 10^6 орбитальных периодов. Полученные оценки показывают, что геометрия остаточного магнитного поля качественно меняется на протяжении эволюции аккреционных дисков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-31837/14.

Библиографические ссылки

1. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121.

ТОЛЩИНА ЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ

Предложен и обоснован новый фотометрический метод оценки относительных толщин дисков галактик, видимых под произвольным углом. Преимущество метода в том, что для галактик, видимых не с ребра, он позволяет по двумерному распределению яркости диска галактики в картинной плоскости определить индивидуальную относительную толщину диска и затем сравнивать типичные толщины дисков для галактик с разными радиальными профилями яркости и морфологическими особенностями (барами, кольцами и т. д.).

Метод был применен нами для нескольких небольших выборок дисковых галактик ранних типов: мы анализировали изображения в фильтрах r , g и i из обзора SDSS для галактик, чей радиальный профиль яркости классифицировался ранее Эрвином с соавт. (2008, 2011); изображения в полосах 3.6 и 4.5 мкм из обзора S4G для галактик, чей радиальный профиль яркости описан Муньос-Матеосом и др. (2014), а также для выборки изолированных линзовидных галактик, для которых мы собрали изображения из нескольких источников.

Статистика полученных распределений относительных толщин дисков галактик обнаруживает ряд интересных свойств.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-02-00059а, а также гранта РНФ № 14-22-00041.

О ГРАВИТАЦИОННОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ШАРОВОГО СЕКТОРА И ШАРОВОГО СЕГМЕНТА

Современные задачи космонавтики в части навигации в близкой окрестности малых тел Солнечной системы: астероидов, комет, спутников планет — требуют высокоточного представления гравитационного потенциала таких тел. Данная проблема может быть решена построением численной модели гравитационного потенциала, основанной на каком-либо разложении.

Для построения численной модели желательно знать форму тела и распределение вещества внутри. К сожалению, данные о распределении вещества могут быть получены только при измерениях на поверхности тела. Приближенное же представление о форме тела можно получить из наблюдений. По форме тела и некоторым модельным представлениям о его плотности можно построить численную модель гравитационного потенциала.

Например, изучаемое тело можно представить суммой элементарных тел, расположенных друг относительно друга таким образом, чтобы повторить с некоторой точностью известную нам форму тела. Тогда по принципу суперпозиции гравитационный потенциал тела является суммой потенциалов элементарных тел, которые можно считать известными.

В данном докладе представлены два модельных тела, которые можно использовать в качестве элементарных. Демонстрируются особенности их гравитационного потенциала и его представления рядом Лапласа, которое полезно для построения численных моделей.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-02-00804 и 14-02-92615, а также гранта СПбГУ 6.0.162.2010.

ОРБИТЫ ЗВЕЗД, ВЫЛЕТАЮЩИХ ИЗ ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ

В данной работе оценивается вероятность образования сверхскоростных звезд посредством предложенного в 1988 г. механизма взаимодействия тесной двойной системы со сверхмассивной черной дырой [1].

Рассматривается движение помещенной на расстояние 1 пк от черной дыры звезды, вылетающей под выбранным случайным образом углом к плоскости Галактики. Модуль начальной скорости звезды соответствует значениям, полученным Дремовыми и Тутуковым [2] в результате моделирования взаимодействия двойной системы с черной дырой.

Для нескольких случаев тесноты двойной системы было рассмотрено по 1 000 вариантов начальных скоростей звезды. В результате были оценены вероятности образования сверхскоростного объекта, определены максимальные достигнутые скорости для каждой выборки, построен ряд зависимостей характеристик орбит от начальной скорости, определена пограничная начальная скорость между уходящими и остающимися в Галактике звездами.

Библиографические ссылки

1. *Hills J. G.* Hyper-velocity and tidal stars from binaries disrupted by a massive Galactic black hole // *Nature*. — 1988. — Vol. 331. — P. 687–689.
2. *Dremova G. N., Dremov V. V., Tutukov A. V.* The disruption of close binaries in the gravitational field of a supermassive black hole and the formation of hypervelocity stars // *Astron. Rep.* — 2014. — Vol. 58. — P. 291–301.

Стеновые доклады



РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ОБНОВЛЕНИЯ КАТАЛОГА ПОЛОЖЕНИЙ АСТЕРОИДОВ

При исследовании динамических свойств тел Солнечной системы чрезвычайно важно иметь доступ к актуальным элементам орбит, так как точность решения подобных задач зависит от точности начальных параметров. Для изучения движения астероидов в качестве источника начальных данных можно использовать, например, каталог элементов орбит Боуэлла. Если требуется высокая точность начальных параметров, то при появлении новых наблюдений необходимо оперативно обновлять каталог, что обеспечивает доступ к самым современным элементам орбит. К сожалению, сам каталог Боуэлла обновляется не так оперативно, как хотелось бы. С другой стороны, процедура обновления каталога поддается автоматизации.

Данная работа посвящена созданию автоматизированного комплекса обновления каталога элементов орбит астероидов. Для реализации данной задачи, программный комплекс осуществляет синхронизацию базы данных наблюдений с базой данных международного центра малых планет МРС. По запросу пользователя модуль сверяет количество наблюдений, по которому построена орбита, с количеством записей в базе данных МРС и принимает решение о необходимости обновления. Если такая необходимость имеется, скачивается набор наблюдений данного объекта, производится процедура улучшения орбиты и вновь полученные данные записывают в каталог.

Задачи, которые способен выполнять данный комплекс:

- управление каталогом элементов орбит астероидов, каталогом обсерваторий, каталогом наблюдений, фондом DE405;
- синхронизация с базой данных МРС;
- автоматическое обновление элементов орбит в каталоге.

Таким образом, пользователь избавлен от рутинной необходимости следить за версией каталога, начальные данные при решении задач динамики астероидов всегда актуальны.

SOLARSUIT — ПРОЕКТ НАУЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Астрономические исследования являются фундаментальной частью науки. В условиях современного мира и рыночной экономики исследования, научные миссии и коммерческие проекты приходится презентовать бюджетным организациям, инвесторам. К сожалению, далеко не на каждом предприятии, не в каждой научной группе есть человек с опытом подготовки материалов для выставок, презентаций, форумов, конференций и других мероприятий.

SolarSuit — это проект по созданию видео- и интерактивных презентаций, а также приложений для астрономических исследований. За время работы над приложением для визуализации космических объектов образовались договоренности с профессиональными дизайнерами, 3d- и видеоспециалистами, разработчиками для создания презентационных материалов. На базе Томской компании Triaxes была организована команда, которая занимается созданием видеороликов, интерактивных презентаций и разработкой приложений.

Командой проекта SolarSuit созданы видеоролики для частной космической компании Dauria Aergospace. Ролики демонстрируют запуск, работу на орбите, рассказывают о предназначении нескольких космических аппаратов компании.

Разработана альфа-версия приложения для визуализации космических объектов и их вероятностных областей, которая является интерактивной презентацией тел нашей Солнечной системы с возможностью добавлять свои объекты. Работа приложения показана на примере нескольких астероидов, сближающихся с Землей, в том числе на объектах, проходящих через сферу Хилла Юпитера. Кроме того, за время разработки создана библиотека для работы с фондами эфемерид больших планет NASA, используемая в проекте ЭРОС, разрабатываемом в УрФУ и ТГУ.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ МИССИИ PLANCK

Говоря о микроволновом фоне, следует понимать, что наблюдать его непосредственно не представляется возможным, и любая карта реликтового излучения в реальности не является таковой в полной мере: это лишь часть наблюдаемого тем или иным образом излучения, выделенная фиксированным и, возможно, недостаточно точным способом. Поэтому любые данные, прежде чем пытаться интерпретировать их с научной точки зрения, необходимо изучить на репрезентативность.

В случае реликтового излучения одной из методик анализа данных на предмет их качества может служить рассмотрение наличествующей в них фрактальной структуры. В частности, вычисление фрактальной размерности может дать представление о том, насколько правдоподобными являются выделенные значения и соответственно насколько хорош был метод их выделения.

В работе [1] были проанализированы данные WMAP и Planck при помощи построения изотерм, что дало оценку на фрактальную размерность около 1.8. Это значение слишком велико для межзвездной среды или для крупномасштабного распределения вещества, из чего может быть сделан один из трех возможных выводов: либо это реальная анизотропия реликтового фона неясной природы, что маловероятно, либо плохо вычищенное нефоновое излучение, либо, наконец, неправильный результат выбранного метода обработки данных, который необходимо улучшить.

Основной задачей текущей работы является проверка вышеописанного результата другими методами при рассмотрении всех предложенных руководством миссии Planck карт компонент, а не только CMB.

Библиографические ссылки

1. *Myllari A. A., Orlov V. V., Raikov A. A. et al.* On the fractality of isotherms of the cosmic microwave background using Planck data. — In press.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Интеллектуальные информационные системы в настоящее время охватывают все возрастающее количество областей применения. Использование, к примеру, нейронных сетей и генетических алгоритмов значительно упрощает решение задач распознавания образов, прогнозирования, оптимизации и проч., которые обладают высокой трудоемкостью при использовании классических методов. В том случае если требуется создание программного обеспечения, в функционал которого заложен механизм выбора между близкими вариантами решения задачи, без применения интеллектуальных систем не обойтись. Возможность принятия решений — важнейшая функциональная особенность подобных систем, незаменимая для научных и прикладных задач.

В астрофизике генетические алгоритмы нашли широкое применение, к примеру, в задачах моделирования гравитационных линз, внутренней структуры звезд, в космологии и астродинамике. В астрометрии и небесной механике распространение подобных методов не столь значительно. Однако, поскольку интеллектуальные системы имеют непосредственное отношение к робототехнике, а современные астрономические наблюдения все более склоняются к роботизированному режиму, появление и широкое распространение генетических алгоритмов и нейронных сетей представляется наиболее вероятным.

В работе представлены результаты разработки модуля программного обеспечения, задачей которого является формирование программы наблюдений — списка инструкций для телескопа из начального объема эфемерид малых тел Солнечной системы. В функционал программы заложен механизм «умных» конфигураций, позволяющий пользователю настроить модуль под собственные критерии составления программы наблюдений. Генетический алгоритм, заложенный в данном модуле, позволяет создать программу наблюдений, оптимальную с точки зрения пользовательских настроек.

**ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ
ЭВОЛЮЦИОННОЙ СТАДИИ
МОЛЕКУЛЯРНОГО ОБЛАКА**

Химическое моделирование — один из самых эффективных и широко используемых методов диагностики процессов, происходящих в областях звездообразования. Многочисленные работы по химическому моделированию демонстрируют высокую способность теоретических моделей воспроизводить полученные наблюдения спектральных линий.

В данной работе исследованы возможности диагностики физических условий в протозвездных облаках путем моделирования кинетики химических реакций в них и возможности использования этой методики для определения возраста.

Выявлено, что методика оказывается важным инструментом для диагностики возраста на поздних стадиях звездообразования, а для ранних стадий требуется привлечение дополнительной информации. Процесс прогрева, происходящий в облаке, может быть идентифицирован по спектральным линиям отдельных молекул, например метанола.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-31400).

ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УГЛЕВОДОРОДЫ

Широкие эмиссионные полосы, наблюдаемые в ближней и средней инфракрасной областях, принято ассоциировать с излучением ароматических соединений за счет различных колебаний связей. Планарные молекулы, которые состоят только из бензольных колец и атомов водорода, присоединенных к краевым атомам углерода, называются полициклическими ароматическими углеводородами. Однако в последнее время ставится под сомнение гипотеза о том, что такие молекулы присутствуют в чистом виде в межзвездной среде. Выдвигается предположение, что ароматические соединения или отдельные бензольные кольца входят в состав более сложных органических соединений. Такие соединения содержат в основе углеводородные цепочки с ароматическими и алифатическими связями, однако могут иметь дополнительные радикалы (гидроксильную группу и др.); также атомы других химических элементов (кислород, азот и др.) могут замещать атомы углерода в решетке.

В лабораториях проводятся эксперименты, в которых углеводородные соединения подвергаются излучению ультрафиолетового поля. В результате экспериментов установлено, что алифатические связи между атомами углерода и водорода эффективно разрушаются ультрафиолетовыми квантами, а появившиеся свободные связи углерода объединяются, образуя замкнутое углеродное кольцо или, по-другому, ароматическое кольцо. По всей видимости, такой процесс ароматизации углеводородных соединений может иметь место в межзвездной среде. Его наибольшая эффективность должна достигаться в областях с повышенным ультрафиолетовым полем, к примеру в областях ионизованного водорода вблизи массивных звезд. В данной работе проводятся расчеты того, как меняется инфракрасный спектр на длинах волн 2–20 мкм при варьировании поля излучения с учетом процесса ароматизации углеводородных соединений.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-31456.

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ
АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ,
В КОУРОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УрФУ В 2014 г.**

На телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета регулярно проводятся позиционные ПЗС-наблюдения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). В программу наблюдений включаются в основном недавно открытые АСЗ, слабые АСЗ и АСЗ, орбиты которых определены по малому числу наблюдений. В 2014 г. наблюдались 63 АСЗ, из них 27 — потенциально опасных.

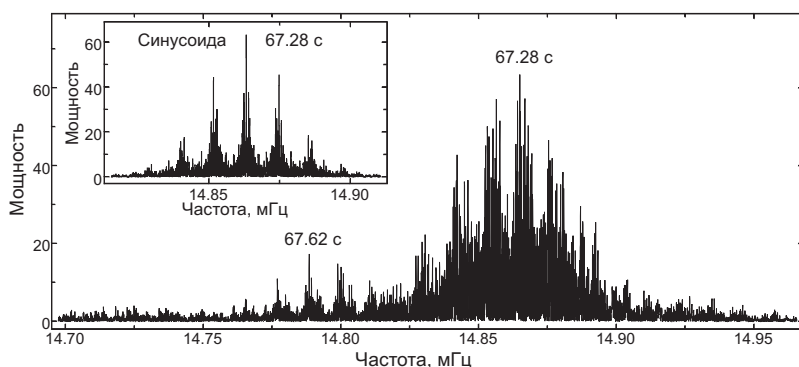
Обработка наблюдений выполнялась с помощью программ ЭПОС и Izmscd, разработанных в ГАО РАН. Всего определено 773 точных положения АСЗ. Помимо эфемеридных объектов определялись положения и других астероидов, зарегистрированных на ПЗС-кадрах. Так были определены координаты 1087 положений 137 астероидов главного пояса (ГП), 23 положения астероидов других типов (Jupiter Trojan, Mars-crosser, Hungaria).

Основной характеристикой качества позиционных наблюдений является точность координат наблюдаемых объектов. По наблюдениям нумерованных астероидов ГП, имеющих большую наблюдательную историю, были определены усредненные внешние ошибки наблюдений астероидов, которые показывают суммарное влияние на результаты наблюдений АСЗ всей системы (атмосфера + телескоп СБГ + ПЗС-матрица + метод обработки изображений + точность измерений + астрометрическая редукция). Показано, что ошибки координат зависят от блеска объектов: средние ошибки одного наблюдения астероидов, имеющих блеск от 11.0 до 12.5^m, равняются примерно 0.05–0.06'' по α и по δ , затем они постепенно увеличиваются до 0.6'' при 19.0^m. Средние ошибки координат АСЗ превышают средние ошибки нумерованных астероидов ГП примерно на 0.15–0.20''.

Результаты наблюдений занесены в базу данных по наблюдениям астероидов АО УрФУ, переданы в международный Центр малых планет, занесены в базы данных MPC и NEODYS и опубликованы в Minor Planet Circ. 2014. № 88088, 88464, 88807, 89139, 89896.

ФОТОМЕТРИЯ КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ V455 AND

V455 And показывает все типы колебаний блеска, наблюдающиеся в других катаклизмических переменных. Это затмения, перманентные свехгорбы, пульсации белого карлика и колебания с периодом 67.62 с, вызываемые вращением белого карлика. Лучевые скорости показывают период неизвестной природы 3.5 ч, который намного больше орбитального периода и не является когерентным. Предполагалось, что он может быть связан со свободной прецессией белого карлика. С этим периодом связан период биений 67.28 с, поскольку разность соответствующей частоты и частоты вращения равна частоте периода 3.5 ч. Из наших наблюдений, полученных в течение 14 ночей в сентябре 2013 — январе 2014 г., следует, что период 67.28 с существенно некогерентен (см. рисунок), что прямо указывает на его связь с периодом 3.5 ч. Однако этот период короче периода вращения. Отсюда следует, что период 3.5 ч не может вызываться прецессией белого карлика, поскольку свободная прецессия является прямой и не может генерировать периоды меньше, чем период вращения.



Спектр мощности всех данных V455 And

А. В. Кожевникова¹, И. Ю. Алексеев²

¹ Уральский федеральный университет,

² Научно-исследовательский институт
«Крымская астрофизическая обсерватория»

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ У РЯДА ЗАПЯТНЕННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ТИПА RS CVn

С помощью усовершенствованной зональной модели запятненности звездных фотосфер, которая позволяет теперь рассматривать присутствие на звезде не одной, а одновременно двух активных долгот, были переопределены параметры запятненности (площадь, широта, скважность, температура пятен) для 16 избранных хромосферно-активных двойных звезд типа RS CVn.

Выполнен анализ изменения характеристик пятенной активности этих систем с течением времени с целью выявления возможной цикличности. Для исследования были выбраны звезды, для которых имелось большое количество однородных наблюдений, охватывающих для некоторых систем временные периоды до 46 лет. Используются наблюдения фотометрического многоцветного мониторинга шести запятненных активных систем типа RS CVn, проводящегося нами в Коуровской АО УрФУ и в КрАО с 2003 г. (CG Cyg, WY Snc, BH Vir, MS Ser, IN Com, V711 Tau), а также данные из литературных источников для десяти систем (IM Peg, EI Eri, BY Cet, VI Cet, IL Hya, V478 Lyr, YZ Men, V1355 Ori, HU Vir, AR Psc). В результате обнаружены циклические изменения активности у девяти звезд длительностью от 6 до 23 лет, выраженные в изменениях общего блеска от времени и иногда в синхронных изменениях полной площади и средней широты пятен. Большинство звезд показывают дрейф пятен по широте как в сторону экватора, так и в сторону полюса на определенных временных интервалах, однако скорости широтного дрейфа пятен меньше по модулю аналогичного значения для солнечных пятен в 1.5–3 раза.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (проект № 3.1781.2014/К).

Э. Д. Кузнецов, П. Е. Захарова,
Д. В. Гламазда
Астрономическая обсерватория УрФУ

**ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ
ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
В ОКРЕСТНОСТИ ЗОН РЕЗОНАНСОВ
ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ**

Рассматривается динамическая эволюция объектов на орбитах типа «Молния» в окрестности зон резонансов высоких порядков. Начальные условия соответствуют высокоэллиптическим орбитам с эксцентриситетом 0.65 и критическим наклоном 63.4° . Значения большой полуоси варьируются от 26 000 до 27 100 км. В этой области расположены 17 областей резонансов высоких порядков $p : q$ между средним угловым движением орбитальных элементов и угловой скоростью вращения Земли ($15 < |p| < 26$, $32 < |q| < 50$, порядки резонансов $48 < |p| + |q| < 75$).

Динамическая эволюция на коротких интервалах времени исследована на основе позиционных наблюдений высокоорбитальных объектов на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. В 2014 г. определено свыше 4 100 положений для более чем 190 объектов. Построено 240 улучшенных орбит.

Изучение динамической эволюции на длительных интервалах времени выполнялось на основе результатов численного моделирования. Использовалась «Численная модель движения искусственных спутников Земли», разработанная в НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. Модель возмущающих сил учитывает основные возмущающие факторы: гравитационное поле Земли, притяжение Луны и Солнца, приливы в теле Земли, световое давление с учетом тени Земли, эффект Пойнтинга—Робертсона, сопротивление атмосферы.

Положение и размер резонансных зон были уточнены по результатам численного моделирования. Эффект Пойнтинга—Робертсона вызывает вековое уменьшение большой полуоси орбиты сферически симметричного спутника, что ведет к формированию слабостохастических траекторий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-02-00026-а).

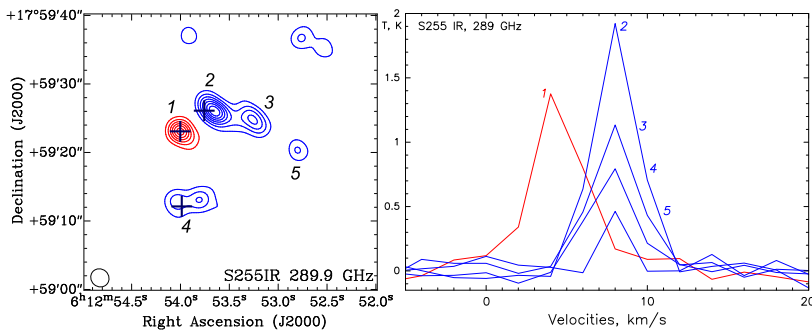
© Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В., 2015

МОЛЕКУЛЯРНОЕ ЯДРО S255 IR В КВАЗИТЕПЛОВЫХ ЛИНИЯХ МЕТАНОЛА

В молекулярном ядре S255 IR в линиях метанола (по наблюдениям на интерферометре SMA) выделяются пик излучения с $V_{lsr} \simeq 4$ км/с (1) и группа пиков с $V_{lsr} \simeq 8$ км/с (2–5) (см. рисунок). Пик 1 совпадает с компактным источником излучения в континууме, SMA1 (Zinchenko, 2012). Пики 2 и 4 расположены вблизи пиков SMA2 и SMA4, пики 3 и 5 не наблюдаются ни в континууме, ни в линиях других молекул (Zinchenko, 2012).

Согласно проведенным оценкам значения физических параметров в пиках 2 и 3 лежат в диапазонах: $T_K = 30\text{--}80$ К, $n_{H_2} < 10^8$ см⁻³, $N_{CH_3OH}/\Delta V \sim 10^{10}$ см⁻³с. В пиках 4 и 5 большинство квазитепловых линий метанола не видны, что не позволяет количественно оценить физические условия.

Близкие физические условия в пиках 2 и 3 и равные лучевые скорости линий в пиках 2–5 позволяют предположить сходство природы этих объектов. Возможно, пики соответствуют сгусткам, расположенным по границе истечения, наблюдаемого в линиях CO.



S255 IR: карта излучения в линии метанола на частоте 289.9 ГГц (слева) и спектры линии в указанных пиках (справа). Знаками «+» отмечены положения источников SMA1, SMA2 и SMA4 (Zinchenko, 2012)

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ
В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ
МОЛОДЫХ ЗВЕЗД**

В работе исследуются условия формирования планет в аккреционных дисках молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем. Используется авторская МГД-модель аккреционных дисков, включающая уравнения Шакуры и Сюняева, уравнение индукции с учетом омической и магнитной амбиполярной диффузии, балансные уравнения тепловой и ударной ионизации [1].

Показано, что магнитное поле оказывает стабилизирующее влияние на развитие гравитационной неустойчивости во внутренних и внешних областях аккреционных дисков. В «мертвых» зонах магнитное поле ослаблено вследствие эффективной диффузии магнитного поля и не препятствует развитию гравитационной неустойчивости.

Произведенные в рамках данной работы численные расчеты показывают, что в аккреционных дисках молодых звезд с крупномасштабным магнитным полем возможно формирование планет на расстояниях более 5 а. е.

Работа выполнена при поддержке гранта ФПНИ-11/14 ФГБОУ ВПО «ЧелГУ».

Библиографические ссылки

1. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121.

ХАРАКТЕР ВЫСВЕЧИВАНИЯ ПЛАЗМЫ В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ НИЗКОЙ АКТИВНОСТИ

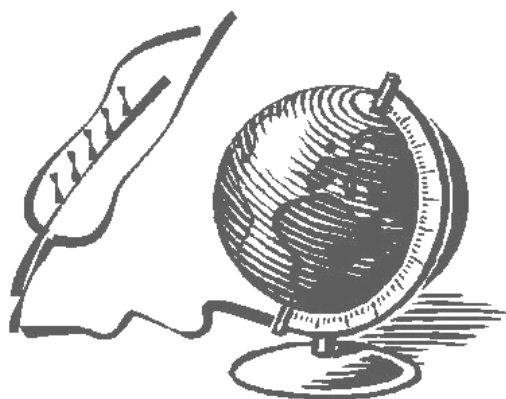
К настоящему времени наблюдается большой прогресс в изучении геоэффективных рентгеновских вспышек баллов X, M и C — самых мощных проявлений солнечной активности. Основные усилия направлены на изучение мощных активных областей (аг) с большими магнитными полями (до 4000 Гс), в которых произошли или ожидаются вспышки высоких баллов. Возрос интерес и к изучению петельных систем активных областей, в которых в основном наблюдаются солнечные вспышки.

Однако представляет интерес также изучение петельных систем над аг малых мощностей, в которых часто отсутствуют солнечные пятна и рентгеновские вспышки высоких баллов. Их изучение может оказаться полезным для выявления источников нагрева солнечной короны.

7 и 8 августа 2013 г. в Коуровской обсерватории УрФУ были проведены спектральные наблюдения линий H и K CaII в двух петельных системах над двумя малоактивными аг (1790 на восточном и 1784 на западном лимбе Солнца), которые наблюдались в южной полусфере Солнца вблизи экватора. В обеих аг практически отсутствовали пятна.

Для наблюдений использовались телескоп АЦУ-5 и ПЗС-система SXV-H9 Starlight Xpress, установленная в фокальной плоскости спектрографа АСП-20. Разрешение по спектру 0.0306 \AA на один пиксель и разрешение по времени 0.5–2 мин. Всего получено 115 ПЗС-кадров линий H и K CaII, каждый из которых представляет собой участок спектра протяженностью 21 \AA . Были выявлены структурные особенности высвечивания плазмы в петлях — штрихи, а также яркие узлы, в основном одиночные. Отмечена структурность плазмы — присутствие в каждом фотометрическом разрезе не менее двух компонент с разными доплеровскими сдвигами. Измерены доплеровские скорости, соответствующие смещениям, параллельным диску Солнца. Наблюдались взрывные процессы малой мощности с доплеровскими скоростями до $53 \pm 1.7 \text{ км/с}$.

Из истории науки



КОСМОДРОМЫ — КОСМИЧЕСКИЕ ГАВАНИ

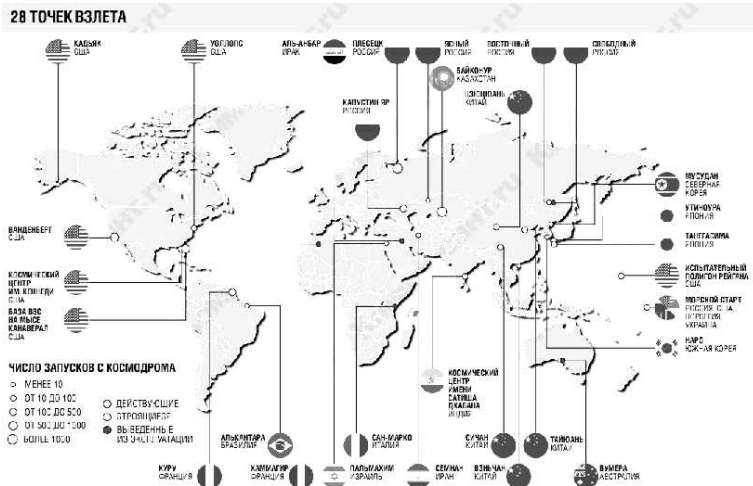
На Земле есть места, где космос становится ближе. Космодромы — там, где до орбиты несколько минут. В этой общеобразовательной лекции приводится обзор космодромов мира. Приведены сведения о космодроме «Байконур» как о главном пусковом полигоне нашей страны на сегодняшний день и о космодроме завтрашнего дня — Восточном».

There are places on the Earth where space is very close. These are the cosmodromes, where is a few minutes to space. This review lecture provides an overview of cosmodromes around the world. More details are given information about the cosmodrome Baikonur, as the main launch range of our country today and of the cosmodrome tomorrow — Vostochny.

Введение. Космодромы мира

Сегодня лишь несколько стран мира имеют космодромы: США, Китай, Индия, Бразилия, Израиль, Австралия, Япония, Ирак, КНДР, Европа (как единое космическое агентство), Южная Корея и, конечно, Россия — всего около трех десятков космодромов (<http://svpressa.ru/post/article/83215/>) (см. рисунок). В России расположены космодромы Северный» (или Плесецк), Капустин Яр, Восточный, строящийся на месте Свободного, и Байконур, ныне находящийся на территории Республики Казахстан.

Все они похожи друг на друга, имеют примерно одинаковый набор элементов и различаются в основном размерами. Причина такой схожести проста: для запуска космических аппаратов используются носители с жидкостными ракетными двигателями. Это обстоятельство диктует особую процедуру сборки и подготовки к запуску ракет, предполагает определенную конструкцию и габариты пусковых сооружений и соответствующие меры безопасности. Структура космодрома оказалась бы иной, если бы космические ракеты были, скажем, твердотопливными. Однако сейчас только реактивные двигатели на жидком топливе способны по своим энергетическим ха-



Космодромы мира

рактикам обеспечить вывод на орбиту тяжелых космических аппаратов, и именно они определяют вид современного космодрома.

Если взглянуть на карту мира с обозначенными местами расположения космодромов, можно заметить, что лидерами по пускам являются Байконур и Плесецк (<http://www.forbes.ru/tekhnologii-photogallery/tekhnika-i-biznes/244639-krupneishie-kosmodromy-mira/photo/2>).

Строющийся Восточный — космодром научного, социально-экономического и коммерческого назначения для обеспечения подготовки и запуска космических аппаратов различного назначения, транспортных грузовых кораблей и модулей орбитальных станций (платформ), выполнения программ пилотируемых космических полетов и перспективных космических программ по изучению и освоению небесных тел, а также осуществления международного сотрудничества в данной сфере (<http://www.pravda.ru/society/how/03-07-2012/1120890-vostochniy-0/#>).

Космодром Морской старт — еще один потрясающий способ запуска. Это мобильная платформа — стартовая установка, позволяющая производить запуски РН «Зенит-3SL» из самых выгодных точек планеты — в океане на нулевой широте. Однако судьба Мор-

ского старта очень непроста. Этот крайне дорогостоящий проект был реализован консорциумом четырех стран: Россией, США, Норвегией и Украиной. Ожидания по числу пусков не оправдались, и в 2009 г. консорциум обанкротился. Понимая ценность Морского старта и его перспективность, несмотря на существующие проблемы, РКК «Энергия» и ее дочерние предприятия выкупили 95 % активов консорциума.

Сегодня будущее проекта зависит от того, будет ли государство заинтересовано в масштабной программе, предлагаемой РКК «Энергия»: потребуются переоборудовать береговую инфраструктуру на другой берег Тихого океана — из США во Владивосток. Для окупаемости программы необходимо обеспечивать не менее трех запусков в год. Кроме того, важнейшей проблемой сегодня становится судьба РН «Зенит-3SL», так как в случае невозможности ее использования по каким-либо причинам, придется переоборудовать сам Морской старт под другую. Возможно, потребуются разработать новую ракету, что сулит огромные затраты. Информацию о деятельности проекта можно отслеживать на официальном сайте Морского старта <http://www.sea-launch.com/> или на русскоязычном сайте <http://sea-launch.narod.ru/>.

База ВВС США на мысе Канаверал (США) существует в штате Флорида с 1949 г. Первоначально там проходили испытания военных самолетов, а позже запуски баллистических ракет. Как полигон для космических запусков используется с 1957 г. Не прекращая военных испытаний, в 1957 г. часть стартовых площадок предоставили в распоряжение NASA. Здесь стартовали первые американские спутники, отсюда уходили в полет первые американские астронавты — Алан Шепард и Вирджил Гриссом (суборбитальные полеты по баллистической траектории), Джон Гленн (орбитальный полет). После чего программа пилотируемых полетов переместилась на вновь отстроенный Космический центр, которому в 1963 г. после гибели президента присвоили имя Кеннеди. С этого момента база стала использоваться для запуска беспилотных кораблей, которые доставляли космонавтам на орбиту необходимые грузы, а также отправляли автоматические исследовательские станции на другие планеты и за пределы Солнечной системы.

Космический центр им. Кеннеди (США) был создан во Флориде в 1962 г. Комплексом безраздельно владеет NASA. Именно отсюда стартовали все пилотируемые корабли, начиная с полета в мае 1962 г. четвертого астронавта Скотта Карпентера. Здесь была реализована

программа «Аполлон». Отсюда улетали и сюда же возвращались все американские корабли многоразового действия — челноки. Сейчас все пусковые площадки находятся в режиме ожидания новой техники. Последний пуск состоялся в 2011 г. Однако Центр продолжает напряженно работать и по управлению полетом МКС и над разработкой новых космических программ.

Куру (Франция, Европейское космическое агентство) находится в Гвиане — заморском департаменте Франции, расположенном на северо-востоке Южной Америки. Космодром Куру был открыт Французским космическим агентством в 1968 г. В 1975 г. французы пригласили Европейское космическое агентство (ESA) для использования Куру в целях реализации своих программ. В результате сейчас на содержание и развитие космодрома Франция отпускает третью часть необходимых средств, все остальное лежит на ESA. При этом ESA является собственником трех из четырех пусковых установок. Отсюда в космос уходят европейские узлы МКС и спутники. Из ракет здесь преобладает производящаяся в Тулузе европейская ракета «Ариан». Всего было произведено более 60 пусков. С этого космодрома стартуют и наши РН «Союз» с коммерческими спутниками.

КНР владеет четырьмя космодромами. Два из них решают только военные задачи, производя испытания баллистических ракет, запуск спутников-шпионов, испытания техники перехвата иностранных космических объектов. Два имеют двойное назначение, обеспечивая не только реализацию милитаристских программ, но и мирное освоение космического пространства. Крупнейший и старейший из них — космодром Цзюцюань. Действует с 1958 г. В 1960 г. отсюда была запущена первая ракета ближнего действия — советская. Вскоре удачно стартовала ракета китайского производства, в создании которой также участвовали советские специалисты. После того как произошел разрыв дружеских отношений между странами, деятельность космодрома застопорилась. Лишь в 1970 г. с космодрома был успешно запущен первый китайский спутник. Через 10 лет стартовала первая межконтинентальная баллистическая ракета. А в конце столетия отправился в космос первый спускаемый космический корабль без пилота. В 2003 г. на орбите оказался первый тайквонавт. Сейчас на космодроме действуют 4 из 7 стартовых площадок. Две из них отведены исключительно для нужд Министерства обороны. Ежегодно с космодрома Цзюцюань стартует 5–6 ракет.

Космический центр «Танэгасима» (Япония) основан в 1969 г. Управляется Японским агентством аэрокосмических исследований. Расположен на юго-восточном побережье острова Танэгасима, на юге префектуры Кагосима. Первый примитивный спутник был выведен на орбиту в 1970 г. С тех пор Япония, владея мощной технологической базой в области электроники, сильно преуспела в деле создания как эффективных орбитальных спутников, так и гелиоцентрических исследовательских станций. На космодроме две пусковые площадки отведены под запуски суборбитальных геофизических аппаратов, две обслуживают тяжелые ракеты Н-ПА и Н-ПВ. Именно эти ракеты доставляют на МКС научное оборудование и необходимое снаряжение. Ежегодно производится до пяти пусков.

Где построить космодром?

Чтобы понять, на чем основан выбор места для строительства космодрома, надо сказать несколько слов о факторах, влияющих на размещение космодромов в конкретных точках земной поверхности. Одним из самых важных является баллистика полета. Дело в том, что с минимальными энергетическими затратами груз выводится на орбиту, наклонение которой соответствует географической широте космодрома. Наиболее критична широта космодрома при выведении на геостационарные орбиты, лежащие в плоскости экватора. На них размещают спутники связи и ретрансляторы телепередач, т. е. прежде всего коммерческие космические аппараты.

Космодром для запуска геостационарных спутников должен располагаться в более низких широтах. Каждый градус отклонения от экватора обходится примерно в 100 м/с дополнительного набора скорости космическим аппаратом. В этом отношении лучшие места занимают новый европейский космодром Куру, расположенный на широте около 5°, бразильский космодром Алькантара с широтой всего 2,2° и плавучий космодром Морской старт. Строящийся на Дальнем Востоке космодром Восточный расположен в районе 52° северной широты и потому по наклонениям орбит не имеет преимуществ перед Байконуром. Еще один российский космодром, Плесецк, находится на широте 63°, и для него минимальное наклонение орбит прямого выведения еще больше. Зато он лучше других подходит для запуска космических аппаратов на полярные орбиты, полезные в тех случаях, когда надо обеспечить охват спутниковыми наблюдениями всей поверхности Земли [1].

Дополнительное преимущество при старте с экватора состоит в том, что ракета сразу получает скорость 465 м/с в направлении на восток, что обусловлено вращением Земли. Поэтому, кстати, траектории запуска ракет обычно прокладываются в восточном направлении. Исключение составляет Израиль: с востока с ним соседствуют недружественные страны, и он вынужден производить запуски в обратном направлении, преодолевая вращение Земли. Отсюда еще один критерий выбора — политический.

Другое соображение, тоже вытекающее из баллистики полета, связано с размещением так называемых «полей падения», куда падают отработанные ступени ракет. Меньше всего проблем возникает в том случае, когда эти опасные зоны приходятся на акваторию океана. Запуски космических аппаратов сопровождаются падением на землю отделяющихся частей ракет-носителей (отработавшие ступени, головные обтекатели, соединительные отсеки и т. п.), обеспечивающих их выведение на орбиты. Размеры и местоположение районов падения этих частей для каждой ракеты-носителя определяются требованиями к орбитам космических аппаратов, их массой, энергетическими характеристиками ракеты-носителя. Районы падения располагаются в местностях наименее заселенных и с отсутствием или минимальным ведением хозяйственной деятельности.

Районы падения расположены на территории десяти субъектов Российской Федерации: в Алтайском, Пермском и Хабаровском краях, Свердловской, Новосибирской, Омской, Томской областях, Республиках Алтай, Тыва, Хакасия.

Строящийся в Амурской области космодром Восточный потребует как минимум четыре участка на территории края, где по плану будут падать отработавшие части ракеты-носителя «Союз-2». Это Тугуро-Чумиканский район в верховьях реки Тугур, Верхнебуреинский район, севернее поселка Чегдомын, Ульчский район, южнее Де-Кастри, и Аяно-Майский район, южнее села Аян, — труднодоступные места, населения там практически нет, возможно лишь эпизодическое посещение охотниками и рыбаками (http://khabtime.info/news/show/?id_blog=9778). Кроме того, районы падения расположены на территориях Республики Казахстан и Туркменистана в пустыне Каракум.

Таким образом, все точки, отмеченные на карте мира как космические гавани — результат масштабного анализа совокупности факторов, каждый из которых необходимо учитывать при рассмотрении возможного расположения космодрома.

Космодром Байконур

Байконур занимает площадь почти в 7 000 кв. км. — 90 на 75 км, располагается в долине реки Сырдарья, в казахстанской пустынной степи близ поселка Тюра-Там. Название этого комплекса — отдельная история. Изначально, в 1955 г., назван поселком Заря, в 1958-м переименован в поселок Ленинский, затем в 1966 г. был присвоен статус города и вплоть до 1995 г. именовался городом Ленинск. Со слов местных жителей, им бы очень хотелось, чтобы город называли Звездоградом. Но комплекс получил совсем другое название.

Для дезориентирования вероятного противника, для отвода глаз и ради соблюдения секретности в то непростое время были построены камуфляжные сооружения («ложный космодром») в Карагандинской области на северных отрогах хребта Алатау в Казахстане вблизи поселка Байконур или, по-русски, Байконур. После старта космического корабля «Восток» с Ю. А. Гагариным на борту это название в открытой печати закрепилось и за настоящим космодромом. Именно поэтому в 1995 г. город был переименован в город Байконур, и теперь весь комплекс — и город, и космодром — именуется так (<http://www.baikonuradm.ru/>).

Для того чтобы понять, как работает космодром, попробуем проследить путь космического аппарата до отправки на орбиту. Изготовленные на заводах ступени ракеты и космический аппарат доставляют на космодром. Там все компоненты проходят приемочные испытания на специальном оборудовании и поступают на хранение, для чего на космодроме предусмотрены складские помещения. Подготовка к запуску начинается в монтажно-испытательном корпусе с соединения ступеней ракеты-носителя, после чего к ее верхней части крепят космический аппарат и закрывают обтекателем. Примечательно, что российские специалисты производят сборку ракет-носителей в горизонтальном положении. На Западе ракету собирают вертикально. Это различие традиционное и связано в основном с климатическими условиями. Например, в богатой Флориде сборку ракеты-носителя вели непосредственно на месте старта. В степях Капустиного Яра, где был построен первый советский ракетный полигон, и на Байконуре вести такую работу на открытом воздухе, особенно зимой и при сильных ветрах, было бы затруднительно. Поэтому для снижения ветровых нагрузок ракету собирали в горизонтальном положении.

При сборке все компоненты ракетно-космической системы подвергаются новой тщательной проверке — сначала по отдельности, а потом в комплексе. После этого можно транспортировать ракету космического назначения (так называется собранная ракета-носитель с полезной нагрузкой, например, спутником) на старт. Для этого на космодроме предусмотрены соответствующая транспортная инфраструктура и транспортно-установочные агрегаты. На Байконуре перевозки ведут по железнодорожным путям со скоростью до 5 км/ч — не быстрее пешехода. Это позволяет защитить от возможных сотрясений и ударов нежную «начинку» ракеты и космического аппарата. На западе, где принята вертикальная сборка ракеты, например в Космическом центре имени Дж. Ф. Кеннеди, используют многоколесные платформы, которые мощные тягачи тянут по дорогам, схожим с автомобильными, но способным выдержать намного большую нагрузку. Особые требования предъявляются и к качеству поверхности дороги, ведь стоящая свечой ракета обладает сравнительно небольшим запасом устойчивости. Скорость перемещения платформы здесь примерно такая же, как и на российском космодроме.

Практически все космодромы мира занимают довольно большие территории в связи с тем, что фактически для каждого типа ракет здесь приходится иметь отдельный комплекс сооружений, причем располагаться они должны достаточно далеко друг от друга, чтобы в случае аварии на одном комплексе не были повреждены другие [2].

Итак, доставив ракету к пусковой установке (ее еще иногда называют — не вполне точно — «стартовым столом»), транспортно-установочный агрегат выводит ее в вертикальное положение. Далее для конкретности будем рассматривать пример ракеты-носителя «Союз». Стартовый комплекс, спроектированный В. П. Барминым, — гениальное сооружение. Простое, безотказное и потому гениальное. Построили его — лишь бы выдюжил с десятков стартов. . . На сегодняшний день порядка пятисот пусков при всего-навсего одном капитальном ремонте пережил этот комплекс! Принцип работы такой: четыре фермы-опоры пусковой установки с помощью приводов сдвигаются к центру, пока ракета специальными силовыми узлами своей конструкции не обопрется на них. Никакого дополнительного крепления не требуется: ракета висит на опорах, удерживаемая только собственным весом. При старте, когда тяга двигателей превосходит вес ракеты, опоры просто разбрасываются в стороны под тяжестью противовесов. Известно, что гениальность — в простоте, и на космодроме это проявляется очень ярко: работа стартового стола,

спроектированного еще в 1957 г. для запуска Р-7, положившей начало всему семейству ракет-носителей «Союз», основана на фундаментальных законах физики. «Самый надежный механизм — который отсутствует» — слова В. П. Бармина. У американцев, например, этим «занимается» механический привод, который не отличается такой надежностью. Спустя многие десятилетия принцип работы стартового стола, разработанного В. П. Барминым, остается прежним [3].

После установки на опоры к ракете подводят ферму обслуживания. С ее «балконов» специалисты выполняют все операции подготовки к пуску. «Пятая нога» пусковой установки — кабель-мачта. По ней на борт ракеты подается электропитание, с ее же помощью к ракете подводятся многочисленные кабели для информационного обмена с пунктом управления. Непосредственно перед подъемом ракеты кабель-мачта, как и опоры, отбрасывается в сторону. На пусковой установке ракета проходит еще одну проверку. На этот раз проверяются не только агрегаты, обеспечивающие автономный полет, но и прогоняются все стартовые процедуры, не происходит лишь запуск двигателей. Наконец, начинается заправка самой ракеты. В ракете-носителе «Союз» в качестве основного топлива используется керосин, а в качестве окислителя — жидкий кислород. Если керосин для заправки ракеты на космодром привозят с нефтеперегонного завода, то жидкий кислород вырабатывают непосредственно на Байконуре. Здесь построен крупнейший в мире завод, который может за час произвести 6 т жидкого кислорода и 7,2 т жидкого азота. Азот используется в системах термостатирования приборных отсеков и для наддува баков с керосином. С учетом того что в баки «Союза» нужно закачать около 190 т жидкого кислорода, процесс подготовки «одной порции» окислителя занимает чуть меньше полутора суток. «Топливозаправщики» на Байконуре тоже представляют собой специальные поезда, в которых помимо цистерн имеется оборудование для перекачки соответствующего компонента топлива.

Готовящаяся к старту ракета оплетена многочисленными шлангами. По ним в баки поступают топливо и окислитель. Причем нередко требуется заливать в ракету более двух компонентов топлива. Еще одна группа шлангов связывает ракету с мобильной (рельсовой) установкой охлаждения и кондиционирования. По ним в отсеки приборного оборудования (а если «Союз» несет пилотируемый космический корабль — то и в кабину корабля) поступают очищенные, осушенные и охлажденные газы.

Важнейший компонент космодрома — Центр управления полетом ракет-носителей. Не следует путать его с ЦУПом, который регулярно показывают по телевидению. Привычный ЦУП управляет космическим аппаратом на орбите. Центр управления космодрома отвечает только за полет ракеты-носителя. Его задача считается выполненной, когда космический аппарат оказывается на заданной орбите, и только тогда подключается «второй» ЦУП. Есть на космодроме и еще одна служба — поисково-спасательная. Она существует на случай аварий при пилотируемых полетах. При возгорании ракеты на стартовой позиции или на ранних фазах полета срабатывает система аварийного спасения космонавтов (зрительно она выглядит как «грибок» с соплами, размещенный на вершине ракеты). Она с большой перегрузкой поднимает корабль и отводит его в сторону. Такой случай на Байконуре приключился в 1983 г., когда при возгорании ракеты-носителя спаслись космонавты Г. С. Титов и Г. М. Стрекалов. Естественно, что после этого космонавтам, перенесшим ускорение до 18 g, нужно помочь как можно скорее покинуть корабль.

Поисково-спасательная служба имеет на вооружении авиационные и наземные транспортные средства, а также специальное оборудование для поиска спускаемого аппарата космического корабля и эвакуации космонавтов. Аналогичные поисково-спасательные операции проводятся и при штатных приземлениях.

Помимо механических узлов, агрегатов и приспособлений весьма сложной является и конструкция ее основания, которое сделано из высокопрочного бетона, рассчитанного на большие механические, термические, акустические и вибрационные нагрузки. Температура реактивной струи такова, что верхний слой бетона оплавляется! Соответственно конфигурация лотка выбирается таким образом, чтобы максимально снижать нагрузки на пусковую установку.

Вообще для разных типов ракет детали конструкции стартовых комплексов отличаются. Так, например, ракета-носитель «Протон» устанавливается на стартовый стол, имеющий устройства фиксации, а вместо откидной фермы обслуживания, как у пускового устройства ракеты-носителя «Союз», используется башня обслуживания. Другую форму имеет и основание пусковой установки с газоотводами, они размещены по кругу, а их входы расположены непосредственно под соплами двигателей первой ступени. В момент старта и в первые мгновения полета шесть поворотных опор стола отслеживают движение ракеты-носителя до высоты примерно 100—150 мм, а затем убираются в индивидуальные ниши и закрываются защит-

ными створками. Механизм стыковки разъемов, так же как и опоры, поднимается, отслеживая движение ракеты, а затем отбрасывается пневмоускорителем вниз, герметично закрываясь специальной стальной бронекрышкой, образующей рассекающую газовую струю. Закрывание механизма происходит за доли секунды! Впрочем, схема подготовки к пуску может отличаться даже для одного и того же типа ракет.

Всего Байконур имеет 9 стартовых комплексов с 15 пусковыми установками, 34 технических комплекса, 3 заправочные станции для ракет-носителей. Это оборудование дает возможность запускать ракеты-носители типа «Протон», «Зенит», «Союз» (или «Молния» — другая модификация знаменитой королевской ракеты Р-7), а также «Циклон». Еще два типа ракет — «Днепр» и «Рокот» — запускаются из шахтных установок. Ничего удивительного в этом нет: «Рокот» создан на основе межконтинентальной баллистической ракеты типа РС-18 (по классификации НАТО — «Стилет»), а «Днепр» — на базе РС-20 («Сатана»). Испытания боевых ракет сейчас на Байконуре не проводят, поскольку теперь это территория другого государства. Но в Плесецеке, наряду с запуском космических аппаратов, продолжают испытательные, контрольные и учебно-боевые пуски баллистических ракет.

Перспективы. Космодром Восточный

На сегодняшний день российские военные покинули комплекс Байконур, арендованный Россией у Казахстана на период до 2050 г. Космодром полностью передан гражданским (этот процесс поэтапно шел с 1997 г.). Эксплуатация космодрома стоит около 5 млрд руб. в год (стоимость аренды комплекса Байконур составляет 115 млн долларов в год; еще около 1.5 млрд руб. в год Россия тратит на поддержание объектов космодрома). Кроме того, из федерального бюджета России в бюджет города Байконура ежегодно осуществляется безвозмездное поступление порядка 1 млрд руб. В общей сложности космодром и город обходятся бюджету России примерно в 6 млрд руб. в год (<http://tengrinews.kz/russia/rossiya-v-2012-godu-vlojila-v-razvitie-baykonura-116-millionov-dollarov-227733/>).

Россия считает для себя перспективным перенос пилотируемых пусков на строящийся российский космодром Восточный. По плану к 2030 г. 90 % космических запусков Россия будет проводить с собственных космодромов Пле-

сецк и Восточный, доля Байконура упадет с 75 % до 10 % (http://nvo.ng.ru/forces/2008-09-26/5_Baikonur.html).

Казахстан прорабатывает вопросы самостоятельной эксплуатации Байконура после окончательного переноса стартов в Амурскую область и прекращения аренды космодрома Байконур Российской Федерацией (на период после 2050 г.). В октябре 2010 г. президент АО «Казакстан гарыш сапары» (дочернее предприятие «Казкосмоса») заявил, что казахстанская сторона считает возможным приступить к самостоятельной эксплуатации Байконура Казахстаном уже в 2014 г. Однако сегодня совершенно ясно, что ни поставленные сроки, ни принципиальная возможность самостоятельной эксплуатации космодрома без кадровой поддержки российской стороны недостижимы. В декабре 2012 г. глава Национального космического агентства Казахстана Талгат Мусабаев заявил о том, что договор об аренде космодрома 1994 г. устарел и может быть пересмотрен в сторону юрисдикцию Казахстана. По мнению экспертов из РФ, такое развитие событий приведет к массовому отъезду российских специалистов с комплекса Байконур и породит большие кадровые проблемы. Для России уход с Байконура целесообразен лишь после 2020 г., когда будет полностью введен в строй новый космодром Восточный.

Что касается космодрома Восточный, строительство и ввод в эксплуатацию объектов первой очереди, обеспечивающих подготовку и запуск космических аппаратов научного, социально-экономического, двойного и коммерческого назначения, транспортных грузовых кораблей и модулей орбитальных станций (платформ), запланированы на 2015 г. Строительство и ввод в эксплуатацию объектов второй очереди, обеспечивающих выполнение программ пилотируемых космических полетов, — на 2018 г. Таким образом, при соблюдении поставленных сроков Российская Федерация вскоре сможет осуществлять космическую деятельность по всему спектру решаемых задач — от научных и социально-экономических до пилотируемых программ.

Заключение

Среди всех космодромов мира по количеству пусков Байконур лидирует и поныне. О том, что Россия не собирается отказываться от эксплуатации Байконура, несмотря на ведущееся сейчас в Амурской области строительство космодрома Восточный, в октябре 2014 г. сообщил начальник управления стратегического планирования и це-

левых программ Роскосмоса Юрий Макаров: «Пока у нас есть договорные обязательства, мы платим аренду за землю, которая отведена под космическую инфраструктуру. Договор аренды рассчитан до 2050 г. (<http://base.garant.ru/2560320/>). Мы пока в эти сроки арендуем» (<http://tass.ru/kosmos/1499598>). Однако в случае каких-либо обстоятельств, препятствующих ведению штатной эксплуатации космодрома Байконур, Россия сможет осуществлять свои космические программы и гарантированное выполнение международных и коммерческих космических программ уже с 2020 г.

Библиографические ссылки

1. *Черток Б. Е.* Ракеты и люди : в 4 т. — 2-е изд. — М. : Машиностроение, 1999.
2. *Руденко М. И.* Операция «Стадион»: Неизвестное об истории стартовых сооружений Байконура // Воздушный транспорт. — 2003. — Т. 6, вып. 22.
3. *Уманский С.* Ракеты-носители. Космодромы. — М. : Рестарт+, 2001.

СЛОВО ОБ УЧИТЕЛЕ

Приближается знаменательная дата — столетие со дня рождения Клавдии Александровны Бархатовой, знаменитого звездного профессора Уральского университета. Это событие произойдет 7 ноября 2017 г., однако впереди 2015 г., который непосредственно связан с именем К. А. Бархатовой и развитием астрономии на Урале. Два важных события произойдут в наступающем году: 12 января исполняется 50 лет со дня основания Астрономической обсерватории, которая носит ее имя, и в конце сентября — 55 лет кафедре астрономии и геодезии. Создание кафедры, открытие специализации по астрономии и астрономо-геодезии, строительство самой восточной в Европе университетской обсерватории, оснащение ее современным оборудованием, научная работа, подготовка кадров — вот самые главные этапы жизненного пути Клавдии Александровны Бархатовой!

Круг интересов Клавдии Александровны был обширен. Она серьезно изучала творчество М. Ю. Лермонтова, знала много его стихотворений, любила оперу, балет, постоянно посещала премьеры спектаклей в оперном театре, концерты в филармонии, художественные выставки. Все это характеризует ее как разносторонне развитого человека.

Для меня важным и незабываемым моментом в жизни было знакомство с К. А. Бархатовой, которое произошло осенью 1963 г. Период учебы с 1963 по 1968 г. на кафедре астрономии и геодезии оставил неизгладимый след в моей памяти, это были счастливые годы для меня и для моих сокурсников. Мы стали третьим пополнением студентов кафедры после ее открытия. С первых дней нашей учебы мы были в поле ее доброжелательного отношения, заботы, внимания к студентам, к их жизни, возникающим проблемам и трудностям. Клавдия Александровна всегда приходила на помощь, помогала в разрешении многочисленных проблем в учебе, выборе места практики, будущей работы. Каждая встреча с Клавдией Александровной на лекциях оставляла восхищение ее увлеченностью астрономией, умением просто и доступно объяснить трудные вопросы, была примером самоотверженного отношения к работе и науке. Наша группа в годы строительства обсерватории неоднократно выезжала

в Коуровку на субботники по благоустройству территории. Ребята копали ямы, делали фундамент для будущих павильонов, укладывали кирпичи в стены, прокладывали дорожки между зданиями и павильонами, а девочки занимались озеленением, высаживали кустарник, яблони, сирень и даже дубки. Позже ими очень гордилась Клавдия Александровна, любила проходить по дорожке, обсаженной дубочками, которые прижились на уральской земле. Клавдия Александровна была уникальной личностью, тем добрым волшебником, которая для многих моих сокурсников, выпускников кафедры помогла осуществить заветную детскую мечту — стать астрономом, астрономо-геодезистом. Мы благодарны Клавдии Александровне за это. Чувство огромной признательности ей сопровождает всю нашу жизнь.

В моих руках книга И. Давыдова «К. А. Бархатова», известная всем астрономам, вышедшая в Средне-Уральском книжном издательстве в 1985 г. В ней рассказывается об основных вехах жизненного пути К. А. Бархатовой, о ее учителях, родителях, семье, друзьях, коллегах, студентах и выпускниках.

Мне хотелось поделиться воспоминаниями о последних часах жизни Клавдии Александровны. В далеком январе 1990 г. мной на чистой странице этой книги была сделана следующая запись. Привожу без исправлений, такой, какая она есть. «Я была последним человеком из коллег, учеников К. А., кто видел Бархатову живой. Я последняя говорила с ней, слышала ее неповторимый голос. И мне нести эту ношу...ношу невосполнимой утраты. 19.01.90 г.». Попробую уточнить, каким образом появилась эта запись в книге о К. А. Бархатовой. 19 января я должна была дежурить у К. А. Бархатовой в 40-й больнице нашего города с 14 часов дня. Однако невестка Клавдии Александровны — Лариса Тарлинская попросила меня подойти утром, поскольку ей надо было пойти с дочками Ириной и Анечкой на прием к врачу. Так все и получилась. Утром в палате я встретила Сергея, ее сына. Он уже накормил Клавдию Александровну завтраком, приходила терапевт, измерила давление, которое оказалось в норме, ничего плохого не предвещал тот день. Сергей ушел домой. Разговорами старалась не утомлять Клавдию Александровну, хотя она интересовалась делами кафедры и студентами. Прочитала ей несколько статей из журнала «Наука и жизнь». Клавдия Александровна задремала, я была рада, что ей стало лучше.

Вновь приходила врач-терапевт, поинтересовалась самочувствием Клавдии Александровны, измерила ей давление, которое было

невысоким, пожелала ей хорошо отдохнуть. Время приближалось к обеду, я следила за Клавдией Александровной, поправляла ей одеяло, ждала Ларису, чтобы рассказать ей, как прошла первая половина дня. В два часа дня Клавдия Александровна внезапно открыла глаза, лицо ее покраснело. Она хотела встать с кровати, и я пыталась ее удержать (ей нельзя было вставать, так рекомендовала лечащий врач, об этом она говорила и мне). В открытую дверь я увидела проходящую сестру и попросила, чтобы немедленно пришел врач, так как больной стало плохо. Клавдию Александровну увезли в реанимацию. Пошли тревожные минуты. Сидела около палаты в коридоре, видела, как в отделение реанимации забегают сестры и врачи. В 14:45 местного времени Клавдии Александровны не стало. Ко мне подошел доктор и об этом сказал. Спросил, кем я прихожусь Клавдии Александровне. Ответила, что я коллега, работаю на кафедре астрономии и геодезии, ученица Клавдии Александровны. Я спросила врача, что привело к смерти Клавдии Александровны. Ответ был следующим: «Тромбоэмболия легочной артерии, остановка сердца». Вот и все!

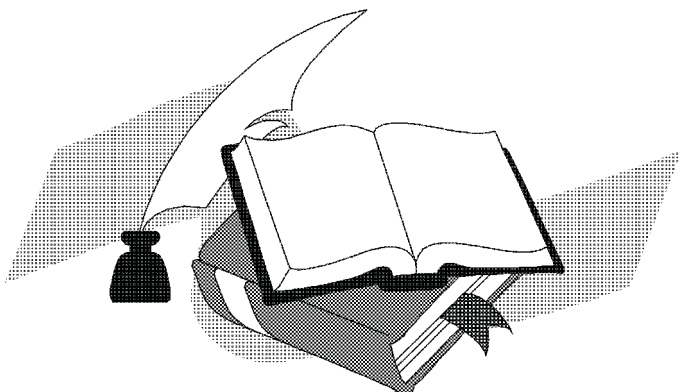
Так закончился земной путь Клавдии Александровны. До прихода Ларисы позвонила на кафедру, чтобы сообщить печальную весть. Ответил Л. Ф. Истомин. Попросила его всех поставить в известность, в первую очередь сообщить в ректорат. Позвонила мужу, попросила меня встретить. Тяжесть, опустошенность сковали меня, слез не было. Было все потом. Подошел Коля. Вышли на улицу, падал медленно январский снежок. Как обычно, около 40-й больницы было многолюдно, куда-то все спешили: люди, трамваи, автобусы. Так хотелось всем сказать, поделиться своей скорбной вестью, что сейчас мы потеряли уникальную личность, хорошего человека, педагога, ученого — Клавдию Александровну Бархатову!

Похороны К. А. Бархатовой состоялись 23 января 1990 г. на Широкореченском кладбище. Гражданская панихида прошла в 14:30 на улице Куйбышева, 48а. Открыл митинг-прощание В. Е. Третьяков, проректор по научной работе в то время. Много было выступающих: А. Е. Василевский, Л. Я. Кобелев, Володя Зинин — один из первых выпускников кафедры и один из любимых учеников Клавдии Александровны, Р. Бакиров — студент кафедры и др.

Время стремительно летит вперед. 19 января 2015 г. исполнится 25 лет, как нет с нами Клавдии Александровны Бархатовой. Клавдию Александровну помнят коллеги, кто с ней работал, кто у нее учился и кто сейчас в меру сил продолжает начатое дело изуче-

ния строения нашей Галактики и любимых ею рассеянных звездных скоплений. Выпускники кафедры продолжают традиции уральской астрономической школы в обсерваториях России и за рубежом!

Литературные страницы



Коуровское братство

Одиноки ли мы в бескрайней Вселенной?
Пожалуй, что ДА, как ни грустно, признаюсь:
Не посидеть нам за влагою пенной,
Тау-китян рукою касаясь.

Как же так? Майор и Келó
Планет нам открыли — собьешься со счета!
Что из того — они так далекó,
Ста жизней не хватит на время полета!

Одиноки ли мы на одной из планет?
На этот вопрос ответить труднее.
Бывает, что ДА, бывает, что НЕТ.
Друг мой, тебе, наверно, виднее.

Одиноки ли мы на реке Чусовой,
Где Коуровки звезды, призывно блистая,
Смотрят, как спорят профессор седой
И студент, непростую задачу решая.

Колебаний не жди: только НЕТ, только НЕТ!
Под Коуровки светлым крылом всегда
Все мы — братство на тысячу лет,
Не распасться ему никогда!

А. А. Соловьев

ЗОДИАК (поэма)

Весы

О, Весы! Вы — гармония Мира,
Соразмерность немереных сил,
Точность циркуля и транспортира
В пестром хаосе звездных светил!
Все измерить и взвесить пора:
Меру всякому дать достиженью,
Меру — дали и меру — сближенью
Между завтра, сегодня, вчера. . .
Каждый Знак здесь, на чашах Весов,
Получает свой Смысл и Значенье,
Каждый символ понятен без слов,
Улови это чудо-мгновенье!

Дева

Вечно юная, вечно нежна. . .
И жена, и мечта, и подруга,
И сестрица, и дочь, и княжна. . .
Украшение небесного круга. . .
Утешенье для страждущих душ,
Ты для падшего — пристань спасенья. . .
Освещай эту звездную глушь
Вечным светом Любви и Терпенья!..
Мир на части распасться готов,
Если в плане вселенского зданья
Не хватает в основе основ
Милосердия и Состраданья!

Телец

Целый мир тебе кажется тесен —
Так могуч ты, так щедро телесен!
На рогах твоих — звезды блистают,
Под копытами — зарева тают. . .

Шерсть — расплавленный жаркий свинец,
Глаз сияет во тьме, как Юпитер,
Знак твой в сини холодных небес
Из алмазных слагается литер!

Широка твоя в небе обитель. . .
Средь блистающих звездных лугов,
Ты пасешься, Телец-Небожитель,
Как один из Вселенских богов!..

Овен

Особое есть в Зодиаке звено:
Здесь Овен свое золотое руно
На солнышке греет — шерсть радует взгляд,
Созвездие млеет: роскошный наряд!
Весь Овен такой молодой, завитой,
Рога выгибает спиралью крутой. . .
Библейская в небе живет пастораль:
И праздник, и небыль, и синяя даль. . .
Блаженствует Овен — овечий Эрот,
Он весь — безмятежного счастья оплот!
Сияй, воплощенье пастушьей мечты,
Наивно взирая на нас с высоты!

Рак

В созвездии Рака царит полумрак,
В туманных просторах скрывается Рак,
Он редко оттуда выходит на свет
Стареющих звезд и холодных планет.
Хитиновым панцирем прочно укрыт
От мелких укоров и крупных обид. . .
Он твердо ступает, спокоен и прям,
По звездно-колючим астральным полям! —
Железные клешни, защитный наряд
И будто нездешний, пронзительный взгляд. . .
Как страж полуночный, хранит Зодиак
Таинственный, мощный космический Рак!

Лев

По какой из охотничьих троп
Ты поднялся на звездное небо?
Здесь не бродят стада антилоп,
Здесь лишь Солнце под маскою Феба
Совершает годичный обход
По давно заведенному кругу,
Здесь другой обитает народ,
Звезды тянутся слабо друг к другу!..
Но и в Небе твой царственный вид —
Облик Силы, и Власти, и Гнева —
Трон Вождя для тебя сохранит —
И покорна тебе Королева!
Так паришь ты над сонмом светил
На кругах годовых каруселей,
Сколько надо властительных сил —
Ни покоя не знать, ни веселий!..
Ты всевластен в округе своей,
Ты прекрасен и в гневе, и в страсти,
И суров, как никто из зверей, —
Свое Чувство не делишь на части!

Рыбы

В начале Эры, трепетно-живые,
Под громы надвигавшейся грозы
На карту неба выплыли впервые,
Как две пролитых на песок слезы. . .

В них — память о явлении Мессии,
О чудесах, что в мире он творил,
Они в себе, немотствуя, вместили
Все Таинство невысказанных сил. . .

Два светлых, серебристых медальона
Таила на груди пресветлая Мадонна. . .
Ей в подражанье носит Зодиак
Такой же парный двуединый знак!

Стрелец

Хранитель и Сторож, бессонный Стрелец
Сквозь зыбкий, рассветный проносится лес —
Сквозь тернии к звездам зовет Следопыт,
Весь мир его зоркому глазу открыт!

Он видит рождение звезд молодых,
Он слышит галактик задышливый пых,
Следит появление Сверхновой звезды —
От этих Сверхновых жди страшной беды!

Стрелец терпеливо мгновения ждет,
Чудесные стрелы свои бережет.
Стрелец, охраняющий хрупкий наш дом,
Не силою славится — светлым умом!

И мирный над нами сияет венец,
Пока своих стрел не растратил Стрелец...

Водолей

Разливайся рекой, Зодиак,
Водолей — очень ласковый знак!
Весь в мерцании льющихся вод
Он по млечным просторам идет.
Тонок звук его чутких шагов,
Этот мир на друзей и врагов
Он не делит. . . Он просто живет:
Людам воду живую несет!
Он не знает ни споров, ни драк,
Он ладонь не сжимает в кулак. . .
Он приветлив и ласков всегда —
Животворная льется вода!

Козерог

Он не любит окольных дорог,
Он в нарядах изысканно строг. . .
Он не часто спускается с гор,
Где стоит его замок-шатер,
И по облаку легкий, как дым,
Пролетает ущельем седым.
Он летит, словно света поток,
В беге с ним состязаться б не мог
Самый лучший на свете бегун,
Отзвук ветром затронутых струн —
Вот следы золотых его ног!
Видно, так уж судил ему Рок:
Ни пред кем он не клонит свой рог —
Королевских кровей Козерог!

Скорпион

Порождение жарких пустынь
И — холодная звездная пустынь?..
Погоди, Скорпион, поостынь,
Здесь, на небе, не так уж и пусто:
Ходит Солнце по вечным кругам,
Звезды искрами блещут из мрака...
Люди молятся разным богам,
Но господствует — нимб Зодиака!
Ты — одна из небесных святынь,
Темпераментный, гордый, блестящий...
Не спеши, Скорпион, поостынь,
Мы же верим, что ты — настоящий!
Твой могучий, трепещущий хвост
Так воинственно-грозно нацелен...
Ты в бою не оставишь свой пост,
Долгу воина-рыцаря верен!

Близнецы

Меж нами — вечная любовь,
Жизнь — за сестру иль брата!
Ведь в нас одна струится кровь,
Одна за все расплата!
Во всем согласны и дружны,
Плывем под общим парусом,
Вдвоем и бури не страшны,
И крен опасным градусом
Не опрокинет наш ковчег,
В любые штормы выстоим...
Так мы плывем, за веком век,
Путями звездно-мглистыми...
Мы — Близнецы и тем горды,
И это — наше звание!
Вперед и в будущее мы
Летим сквозь мироздание!

Змееносец

Осторожно ходи, Змееносец,
Мудрый Змей тебя ищет во мгле. . .
Над провалами черных полосиц
Звездный мост протянулся к Земле.

Ты ступай по незримым ступеням,
По звенящим обломкам ступай
И руками, обвитыми Змеем,
Облака черноты раздвигай!

А когда вдруг замрешь, холодея,
Ты у сердца дорогу спроси,
Мудрость Древнего Доброго Змея
Неразменной до нас донеси. . .

Прямая речь
(сонет памяти М. Ю. Лермонтова)

Когда б вы знали,
Из какого сора растут стихи. . .

А. Ахматова

Из ерунды, невнятицы и вздора
Встают с упорством дикого ростка
И Гамлетов вопрос, и поступь Командора,
И Демона полночная тоска!
Пусть пустыня не внимала Богу
И путь был просто гол и каменист,
И юноша, что вышел на дорогу,
Был ростом мал, угрюм и неказист —
Что из того?! Под оболочкой брэнной,
Под вызовом бравады напускной
Томился дух, насильственной лозой
Не сломленный. . . И зов трубы военной
Перекрывая вспыхнувшей грозой,
Рождался стих — прямая речь Вселенной!

Н. Д. Калинина

На 70-летие ГАО НАНУ

Пусть 70 — квант времени всего
В масштабе окружающей Вселенной,
Но он объединил Тебя, Его,
Дом, школу, жизнь монетой неразменной.

Солидный путь — отмечен сотней вех:
Галактики, обзоры, наблюдения.
В геодинамике — прорыв, успех,
Признание заслуг и награждение!

Кто б ни хотел поспорить нас сейчас,
Преодолеем мы и этот перевал!
Есть нить незримая, что связывает нас,
И ею Авенир Яковкин стал.

Бесспорно, жизнь стоит на трех китах:
Добро, Любовь, Наука НАВСЕГДА!
Обсерватория пусть славится в веках,
И «Светит незнакомая звезда»!..

2014

Юбилей

Забвения иль славы
Раскручен маховик —
Жизнь раскаленной лавой
Заполнит каждый миг.
И есть ли жизнь на Марсе?
Еще успеть решить
И пережить катарсис
Израженной души. . .
И, утомлен прозрением,
Забудешься когда?
Восстанут откровением
Ушедшие года. . .
20.01.2014

Стасу на 60-летие

О, Стас! Достойно восхищения,
Что где-то в возрасте седин,
Уже не ведая смущения,
Как хитроумный Насреддин,
Ты жизнь распробовал, изведal
Ее коварство и искус
И научился «ждать» победы,
Как джентльмен, «не дуя в ус».
Тебе не страшны сожаления
О невозвратном, о былом.
Не осеняют сомненья
Павлинье-ласковым крылом.
Художник истину рисует,
Поэт спешит ее воспеть,
Философ истину толкует,
А ты пытаешься успеть
Обнять все эти ипостаси —
Путь проложить среди светил!
И это право, мудрый Стасик,
Ты заработал! Заслужил!
19.06.2014

Список участников конференции



Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Аввакумова Екатерина Анатольевна	УрФУ	ekaterina.avvakumova@urfu.ru
Алексеев Илья Юрьевич	НИИ КрАО	ilya-alekseev@mail.ru
Антипин Сергей Витальевич	ГАИШ МГУ	antipin@sai.msu.ru
Балануца Павел Владимирович	ГАИШ МГУ	—
Балуев Роман Владимирович	ГАО РАН	r.baluev@spbu.ru
Баранников Егор Андреевич	ТГУ	yegor-barannikov@mail.ru
Барсунова Ольга Юрьевна	ГАО РАН	monoceros@mail.ru
Батмунх Нямсурэн	СПбГУ	monastro@yandex.ru
Безгодов Константин Андреевич	УрФУ	kos.bez@yandex.ru
Белан Сергей Павлович	КрАО	sbelan17@gmail.com
Белей Дмитрий Андреевич	ТГУ	promo@solarsuit.net
Белецкий Юрий	ЕИО	ybialets@eso.org
Бисярина Анастасия Павловна	УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Боли Пол	МРИФ	pboley@gmail.com
Бондарев Роман Викторович	ЮФУ	rom-bond@mail.ru
Бондарь Аркадий	IC AMER	arctur@inet.ua
Борисова Ксения Андреевна	УрФУ	borisovakseniaandreevna@mail.ru
Бочкарев Николай Геннадьевич	ГАИШ МГУ	boch@sai.msu.ru
Бурданов Артем Юрьевич	УрФУ	burdanov.art@gmail.com
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa1907@icloud.com
Васюнин Антон Иванович	УрФУ	anton.vasyunin@gmail.com
Веселова Ангелина Владимировна	СПбГУ	linav93@yandex.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Юлия Зигфридовна	АО УрФУ	wjulia@mail.ru
Вильянен Валентина Валентиновна	ТГУ	Vilyanen_valya@mail.ru
Волков Константин Валерьевич	УрФУ	kvvolkov@rambler.ru
Воторопин Дмитрий Дмитриевич	РАНХиГС	votoropin@gmail.com
Галазутдинов Газинур	UCN	runizag@gmail.com
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	tanastra@nxt.ru
Гильдин Евгений Юрьевич	УрФУ	eugene.gildin@yandex.ru
Гламазда Дмитрий Васильевич	УрФУ	antimuon@mail.ru
Глушков М. В.	КФУ	—
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	Stanislav.Gorda@urfu.ru
Григорьев Виталий Валерьевич	СПбГУ	vitalygrigoryev@yandex.ru
Гринин Владимир Павлович	ГАО РАН	vgcrao@mail.ru
Грислис Артем Сергеевич	ЮФУ	artyom013@gmail.com
Громов Анатолий Олегович	СПбГУ	granat08@yandex.ru
Данилов Владимир Михайлович	АО УрФУ	vladimir.danilov@urfu.ru
Демидова Татьяна Валерьевна	ГАО РАН	proxima1@list.ru
Довгалев Илья Сергеевич	СПбГУ	dovgall.il@mail.ru
Дремов Владимир Владимирович	РФЯЦ-ВНИИТФ	V.V.Dryomov@vniitf.ru
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	g.n.dryomova@mail.ru
Ежков Марк Юльевич	СПбГУ	markezhkov@gmail.com
Ерёмин Евгений Олегович	ОКБ МЭИ	e.o.eremin@gmail.com

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Ермаков Максим Юрьевич	УрФУ	myriad2006@ya.ru
Жилкин Андрей Георгиевич	ИНАСАН	zhilkin@inisan.ru
Жуйко Сергей Валентинович	ГАИШ МГУ	proofrun@mail.ru
Забелина Наталья Игоревна	СПбГУ	znattaly92@yandex.ru
Загидуллин Артур Александрович	КФУ	—
Заострожных Анна Мария Андреевна	КФУ	zaostrojnaia@yandex.ru
Захарова Полина Евгеньевна	АО УрФУ	Polina.Zakharova@urfu.ru
Землянуха Петр Михайлович	ИПФ РАН	g.pzemlyan@gmail.com
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Зубарева Александра Михайловна	ИНАСАН	zubareva.alex@gmail.com
Зубкова Наталья Евгеньевна	ДТДиМ	o.zubckowa2010@yandex.ru
Зуга Виктор Андреевич	АКЦ ФИАН	vzouga@gmail.com
Ивахненко Павел Витальевич	ВолГУ	ivakpavel@yandex.ru
Ионов Дмитрий Эрикович	ИНАСАН	ionovd@inasan.ru
Казанкова Екатерина Аркадьевна	ВолГУ	Katerina.kazanko@gmail.com
Казанцев Максим Борисович	ЧелГУ	kazant@pochta.ru
Казанцев Никита Владимирович	УрФУ	n.kazantcev@gmail.com
Кайзер Галина Тимофеевна	АО УрФУ	galina.kaiser@urfu.ru
Карицкая Евгения Алексеевна	ИНАСАН	karitsk@sai.msu.ru
Квашнина Альвира Васильевна	УрФУ	alvira.kvashnina@gmail.com
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Кискин Михаил Юрьевич	УрФУ	kiskin_m@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Кияева Ольга Вениаминовна	ГАО РАН	kiyaeva@list.ru
Кожевников Валерий Петрович	УрФУ	valery.kozhevnikov@urfu.ru
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	kozhevnikova-a@yandex.ru
Козлова Анастасия Владимировна	УрФУ	nastya.mail.ru_0@mail.ru
Колесникова Дарья Михайловна	ИНАСАН	poocha@yandex.ru
Колесов Дмитрий Николаевич	УрФУ	kolesovdn@gmail.com
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Константинов Александр Олегович	УрФУ	izecson82@yandex.ru
Косенков Илья Александрович	СПбГУ	ilia.kosenkov.at.gm@gmail.com
Кочев Василий Алексеевич	УрФУ	worack@ya.ru
Кочина Ольга Валерьевна	ИНАСАН	okochina@inasan.ru
Красавин Дмитрий Сергеевич	ТГУ	iosfixed@gmail.com
Крахмальский Игорь Олегович	МГТУ МИРЭА	igorsmile2006@yandex.ru
Краяни Хуссейн	СПбГУ	huseinkrayani@hotmail.com
Креловски Яцек	УНК	Jacek.Krelowski@astri.umk.pl
Кривошеин Сергей Борисович	СПбГУ	c.b.k@bk.ru
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	АО УрФУ	Eduard.Kuznetsov@urfu.ru
Кузьмин Алексей Николаевич	ЧелГУ	Alexey.Kuzmin@gmail.com
Кулешов Юрий Павлович	Комета	—
Куликова Нэлли Васильевна	ИАТЕ НИЯУ МИФИ	nelvaku@yandex.ru
Лагутов Сергей Петрович	УрФУ	Sereys121@yandex.ru
Лапухин Евгений Геннадьевич	СибГАУ	slovoktk@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	T.I.Levitskaya@urfu.ru
Левкина Полина Анатольевна	ИНАСАН	ayvazovskaya@inasan.ru
Логина Мария Олеговна	ТГУ	pin-gvin-ka@yandex.ru
Ляпцев Антон Павлович	УрФУ	anton.lyaptsev@gmail.com
Малов Игорь Федорович	ПРАО ФИАН	malov@prao.ru
Матвеева Екатерина Алексеевна	УрФУ	avelon@e1.ru
Мелких Екатерина Алексеевна	УрФУ	katsyarynka@yandex.ru
Менибаев Руслан Равильевич	ТГУ	marat-dnv@mail.ru
Микрюков Денис Викторович	СПбГУ	denastron@yandex.ru
Мингалиев Марат Габдуллович	САО РАН	marat@sao.ru
Моисеенко Сергей Григорьевич	ИКИ РАН	moiseenko@iki.rssi.ru
Мурга Мария Сергеевна	ИНАСАН	khramtsova@inasan.ru
Мусаев Фаик Адиль	САО РАН	faig@sao.ru
Назарова Ирина Алексеевна	УрФУ	irina.nazarova90@gmail.com
Накасима Джуничи	УрФУ	nakashima.junichi@gmail.com
Нечаева Мария Борисовна	НИРФИ	nech@nirfi.sci-nnov.ru
Никифорова Татьяна Петровна	УрФУ	Tatyana.Nikiforova@urfu.ru
Никова Ольга Павловна	УрФУ	alya-nikova@rambler.ru
Обридко Владимир Нухимович	ИЗМИРАН	obridko@izmiran.ru
Овчинников Александр Игоревич	УрФУ	a.i.ovchinnikov@urfu.ru
Орлов Виктор Владимирович	СПбГУ	vorvor1956@yandex.ru
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrey.Ostrovsky@urfu.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Парфенов Сергей Юрьевич	УрФУ	sergey.parfenov@urfu.ru
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	perminov12@yandex.ru
Пилипенко Сергей Владимирович	АКЦ ФИАН	spilipenko@asc.rssi.ru
Писклова Марина Алексеевна	ЧелГУ	pisklova10@gmail.com
Полушина Татьяна Сергеевна	УрФУ	tatyana.polushina@urfu.ru
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.popova@urfu.ry
Потравнов Илья Сергеевич	ГАО РАН	ilya.astro@gmail.com
Пружинская Мария Викторовна	ГАИШ МГУ	—
Пузин Василий Борисович	ИНАСАН	vpuzin@inasan.ru
Путков Станислав Игоревич	АО УрФУ	putkov_s@mail.ru
Роздьяконова Юлия Игоревна	УрФУ	YuliaRozdiakonova@yandex.ru
Ромашин Георгий Сергеевич	УрФУ	georgy.romashin@urfu.ru
Рыхлова Лидия Васильевна	ИНАСАН	—
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	Svetlana.Salii@urfu.ru
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli@vtomske.ru
Самусь Николай Николаевич	ИНАСАН	samus@sai.msu.ru
Санникова Татьяна Николаевна	СПбГУ	tnsannikova@gmail.com
Сатонкин Николай Артемович	УрФУ	virus909090@yandex.ru
Селезнев Антон Федорович	АО УрФУ	Anton.Seleznev@urfu.ru
Семенов Алексей Олегович	ГАО РАН	aleksem@mail.ru
Семенов Дмитрий Александрович	МРИА	dmitry.a.semenov@gmail.com
Сергеев Сергей Геннадьевич	КрАО	gss2003@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Сипатов Дмитрий Игоревич	ЧелГУ	sipatovdi@gmail.com
Скиба Евгений Александрович	ИКИ РАН	mykenigsberg@gmail.com
Скокова Анастасия Сергеевна	УрФУ	Supermorell@mail.ru
Скрипниченко Павел Вадимович	УрФУ	savl-silverheart@rambler.ru
Скрипниченко Марианна Сергеевна	ЮФУ	mariankazayka@mail.ru
Смирнов Андрей Владимирович	АКЦ ФИАН	asmirn@asc.rssi.ru
Смирнов Михаил Игоревич	ДТДиМ	smisha200064@gmail.com
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	Andrej.Sobolev@urfu.ru
Соков Евгений Николаевич	ГАО РАН	jenias06@gmail.com
Соколов Леонид Леонидович	СПбГУ	lsok@astro.spbu.ru
Соколовский Кирилл Владимирович	АКЦ ФИАН	kirx@kirx.net
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Старицин Евгений Игоревич	АО УрФУ	Evgeny.Staritsin@urfu.ru
Судов Леонид Николаевич	СПбГУ	l_sudov@mail.ru
Сюсина Ольга Михайловна	ТГУ	kleo77@sibmail.com
Тимиркеева Мария Андреевна	ПРАО ФИАН	Marika-ko@yandex.ru
Тимошенко Владимир Андреевич	СПбГУ	vladimir.timoshenko7@gmail.com
Ткаченко Роман Валерьевич	ЮФУ	Romariomcrostov@yandex.ru
Томассон Магнус	OSO	magnus.thomasson@chalmers.se
Трифопова Марина Александровна	ДТДиМ	golubev-d@mail.ru
Троянский Владимир Владимирович	НИИ "АО"ОНУ им. И. И. Мечникова	v.troianskyi@onu.edu.ua

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Филина Юлия Игоревна	УрФУ	drugoi.mir2011@yandex.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	ЧелГУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Хакимова Юлия Робертовна	УрФУ	juliasuena@mail.ru
Холшевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хремли Галина Павловна	УрФУ	Galina.Khremli@urfu.ru
Худяшев Никита Сергеевич	ТГУ	khudyashev@icloud.com
Царегородцева Полина Михайловна	УрФУ	polly_2010@mail.ru
Чувашов Иван Николаевич	ТГУ	chuvashovin@gmail.com
Чудакова Екатерина Михайловна	ГАИШ МГУ	artenik@gmail.com
Шагабутдинов Альфат Исмагилович	УрФУ	Alfat.Shagabutdinov@mail.urfu.r
Шагабутдинов Андрей Альфатович	УрФУ	shag-andrey@yandex.ru
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шаповалова Анастасия Сергеевна	УрФУ	anastasia149423@gmail.com
Шаховской Дмитрий Николаевич	КрАО	d.shakhovskoy@gmail.com
Шевцев Никита Станиславович	ДТДиМ	n122010n@yandex.ru
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	shematov@inasan.ru
Шимчак Мариан	ИНК	msz@astro.uni.torun.pl
Широкова Ксения Сергеевна	СПбГУ	xebusk@mail.ru
Шмелд Ивар	ВМРЦ	ivarss@venta.lv
Шомбина Любовь Александровна	СПбГУ	shombina@gmail.com
Шугаров Сергей Юрьевич	ГАИШ МГУ	sg_53@mail.ru

Список участников конференции

ФИО	Организация	E-mail
Шульман Сергей Георгиевич	СПбГУ	sgshulman@rambler.ru
Шумков Владислав Петрович	ДТДиМ	vlad61shumkov@mail.ru
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru

Содержание

Захарова П. Е. 50 лет Коуровской астрономической обсерватории им. К. А. Бархатовой	5
ОБЗОРНЫЕ ЛЕКЦИИ	13
Васюнин А. И. Лабораторная астрохимия	15
Вибе Д. Э. Диски коричневых карликов	16
Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В. Обзор популяции астероидов, сближающихся с Землей	25
Зинченко И. И. Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия на Земле и в космосе	37
Кононов Д. А. За дифракционным пределом, или... Как работает доплеровская томография	46
Мингалиев М. Г. Современная наземная радиоастрономия: новые телескопы и проекты	57
Nakashima J. Наблюдательная астрономия, основанная на обзорках околозвездных мазеров	58
Нечаева М. Б., Шмелд И. Радиointерферометрические исследования, проводившиеся в Вентспилсском международном радиоастрономическом центре в 2010–2014 гг.	60
Орлов В. В. Актуальные проблемы звездной астрономии	74
Пилипенко С. В., Смирнов А. В. Космологические задачи проекта Миллиметрон	84
Самусь Н. Н. Переменные звезды с малыми телескопами и общедоступными базами данных	94
Соболев А. М. Современные парадигмы образования звезд в Галактике	100
Соколов Л. Л., Шайдулин В. Ш. Прогнозирование возможных соударений астероидов с Землей и резонансные возвраты	101
Соловьев А. А. Диссипация магнитного поля солнечного пятна	113
Холшевников К. В., Санникова Т. Н., Батмунх Н. Связь возмущений координат и элементов орбиты	127
Щустов Б. М. Ультрафиолетовая Вселенная	140
ТЕЗИСЫ СТУДЕНЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ	141
Баранников Е. А. Способы оценивания вероятности столкновения астероидов с планетами	143
Белей Д. А., Галушина Т. Ю. Исследование движения астероидов, сближающихся с Землей и проходящих через сферу Хилла Юпитера	144
Веселова А. В. Исследование работоспособности метода определения расстояния до центра Галактики по сегментам спиральных рукавов	145

Глушков М. В., Загидуллин А. А. Фотометрические исследования послесвечения гамма-всплеска GRB120811C по наблюдениям на телескопе РТТ-150	146
Григорьев В. В. Двумерная модель нестационарной аккреции на замагниченную нейтронную звезду	147
Довгалец И. С. Моделирование возмущений кольца F Сатурна спутником Прометей	148
Забелина Н. И., Косенков И. А. Спектральные свойства двойной рентгеновской системы GX339-4	149
Загидуллин А. А. Моделирование параметров спин-орбитального движения Луны на основе аналитических теорий движения и физической либрации	150
Заострожных А. А., Кияева О. В. Исследование движения звезд в кратной системе ADS 7438	151
Землянуха П. М. Разработка среды автоматизации анализа данных радиоастрономических наблюдений на основе Python-MIRIAD	152
Ивахненко П. В. Моделирование динамической и химической эволюции сталкивающихся облаков межзвездного газа	153
Казанкова Е. А. Об аппаратной реализации алгоритма сверхбыстрого определения лучевой скорости опасного для Земли астероида средствами РЛС с помощью дробно-дифференцирующего фильтра	154
Колесов Д. Н. Разработка алгоритма продления пригодности альманахов спутниковой системы ГЛОНАСС на основе эффекта орбитального резонанса	155
Кочев В. А., Кайзер Г. Т., Островский А. Б., Виле Ю. З. Разработка базы данных наблюдений малых тел Солнечной системы на телескопе СБГ АО УрФУ	156
Краяни Х., Ильин В. Б., Прокопьева М. С. Пыль и магнитные поля в глобулах Бока	157
Красавин Д. С. Долговременная орбитальная эволюция торов частиц космического мусора в зоне ГЕО	158
Кривошеин С. Б. Формализация моделирования кинематики и коррекция шкал расстояний для подсистемы планетарных туманностей диска Галактики	159
Лапухин Е. Г. Коллиматор для двуволнового лазерного спутникового дальномера	160
Логинова М. О. К вопросу о наблюдаемости ряда астероидов	161
Ляпцев А. П., Кононов Д. А., Пузин В. Б., Кожевников В. П., Сытов А. Ю. О результатах одновременных спектральных и фотометрических наблюдений ТДС V455 And	162
Менибаев Р. Р. Сопоставление двух методов оценки хаотичности в динамике околоземных космических объектов	163

Писклова М. А., Хайбрахманов С. А. Седиментация пыли в аккреционных дисках молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем	164
Тимиркеева М. А. Сравнение параметров радиотихих и радиогромких пульсаров	165
Тимошенко В. А. Динамическая эволюция и устойчивость тройных астероидов	166
Худяшев Н. С. Моделирование базисных наблюдений метеоров на Канарских островах	167
Шагабутдинов А. А. О динамике некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями	168
Шаповалова А. С., Парфенов С. Ю., Krelowski J., Галазутдинов Г. А., Бондарь А. В., Мусаев Ф. А., Белецкий Ю. А., Горда С. Ю., Соболев А. М. Исследование переменности межзвездных молекулярных линий поглощения в спектре звезды AE Aug	169
Шомбина Л. А. Метод минимизации функционала действия в задаче трех тел	170
ТЕЗИСЫ КРАТКИХ СООБЩЕНИЙ	171
Балуев Р. В. Обнаружение 13-летнего цикла активности звезды 55 Рака	173
Балуев Р. В., Соков Е. Н. Поиск новых экзопланет в данных проекта «Exoplanet Transit Database» методом тайминга планетных прохождений	174
Барсунова О. Ю., Гринин В. П., Сергеев С. Г., Семенов А. О., Шугаров С. Ю. Переменные типа UX Ori в IC 348	175
Бисярина А. П., Семенов Д. А., Соболев А. М. Теоретическая двухцветная диаграмма (J–H)–(H–K) для звезд Т Тельца и Ae/Be Хербига	176
Гильдин Е. Ю., Кузнецов Э. Д. Исследование орбитальной эволюции спутников глобальных навигационных систем по данным анализа высокоточных апостериорных эфемерид	177
Громов А. О. Модель распределения массы в звездных системах с квазиизотермическим потенциалом	178
Данилов В. М., Путков С. И. Исследование колебаний моделей рассеянных звездных скоплений с помощью спектров волновых чисел	179
Демидова Т. В., Гринин В. П. Периодические вариации околозвездной экстинкции в моделях протопланетных дисков с маломассивными компаньонами	180
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Роль широких двойных систем в образовании сверхскоростных звезд	181

Ерёмин Е. О. Построение инструментальной фотометрической системы в бортовых оптико-электронных приборах наблюдения космических объектов	182
Землянуха П. М., Зинченко И. И. Исследование района образования звезд большой массы S255 по комбинированным данным наблюдений при помощи интерферометра и одиночной антенны	183
Зубарева А. М., Колесникова Д. М., Соколовский К. В., Антипин С. В., Самусь Н. Н. Высокоамплитудные звезды типа дельта Щита на фотопластинках Московского архива	184
Ионов Д. Э., Шематович В. И. Нагрев верхней атмосферы «горячего юпитера»	185
Кирсанова М. С., Соболев А. М., Томассон М. Кинематика газа в областях образования массивных звезд из спирального рукава Персея	186
Крахмальний И. О. Адаптивный алгоритм обнаружения космических объектов в широкоугольных оптико-электронных системах мониторинга элементов космического мусора	187
Левкина П. А., Чувашов И. Н. Исследование влияния светового давления на фрагмент космического мусора на ГСО	188
Парфенов С. Ю., Горда С. Ю., Szymczak M., Соболев А. М. Исследование переменности источника V645 Cyg в оптике и мазерной линии метанола на 6.7 ГГц	189
Перминов А. С., Кузнецов Э. Д. Разложение гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона по элементам орбиты	190
Потравнов И. С., Гринин В. П., Шаховской Д. Н., Шулман С. Г., Белан С. П. Результаты спектрального мониторинга необычной звезды типа UX Ori RZ Psc	191
Пузин В. Б., Саванов И. С., Бурданов А. Ю., Парухин Н. А. Фотометрические исследования звезд типа FK Com	192
Репин С. В., Литвинцева Д. А., Зуга В. А., Ларченкова Т. И. Наблюдательные проявления движения излучающего объекта в поле черной дыры Керра	193
Самбаров Г. Е., Сюсина О. М. Оценивание возмущающих ускорений в вероятностных моделях движения потенциально опасных астероидов	194
Селезнев А. Ф. Построение профилей плотности рассеянных звездных скоплений с помощью метода функции-ядра	195
Скиба Е. А., Моисеенко С. Г. Моделирование магниторотационной сверхновой	196
Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю. Построение поисковых эфемерид ряда нenumerованных АСЗ	197

Смирнова К. И., Мурга М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М. Связь молекулярного и атомарного водорода с параметрами пыли во внегалактических комплексах НП	198
Хайбрахманов С. А. Эволюция остаточного магнитного поля аккреционных дисков. Аналитические оценки	199
Чудакова М. Е. Толщина звездных дисков галактик ранних типов	200
Шайдулин В. Ш. О гравитационном потенциале шарового сек- тора и шарового сегмента	201
Широкова К. С. Орбиты звезд, вылетающих из центра Галак- тики	202
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	203
Безгодов К. А. Разработка автоматизированного комплекса об- новления каталога положений астероидов	205
Белей Д. А. SolarSuit — проект научной визуализации косми- ческих объектов	206
Ежков М. Ю. Фрактальные свойства реликтового излучения по данным миссии Planck	207
Казанцев Н. В. Применение интеллектуальных систем для ре- шения астрометрических задач	208
Кочина О. В., Вибе Д. З. Возможности диагностики эволю- ционной стадии молекулярного облака.	209
Мурга М. С. Воздействие ультрафиолетового излучения на уг- леводороды	210
Кайзер Г. Т., Вибе Ю. З. Астрометрические наблюдения асте- роидов, сближающихся с Землей, в Коуровской обсервато- рии УрФУ в 2014 г.	211
Кожевников В. П. Фотометрия катаклизмической переменной V455 And	212
Кожевникова А. В., Алексеев И. Ю. Циклы активности у ряда запятенных двойных звезд типа RS CVn	213
Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В. Орбиталь- ная эволюция высокоэллиптических объектов в окрестности зон резонансов высоких порядков	214
Салий С. В., Соболев А. М., Зинченко И. И. Молекулярное ядро S255 IR в квазипетловых линиях метанола	215
Сипатов Д. И., Хайбрахманов С. А. Формирование планет в аккреционных дисках молодых звезд	216
Хакимова Ю. Р., Никифорова Т. П. Характер высвечивания плазмы в корональных петлях низкой активности	217
Из истории науки	219
Вильянен В. В. Космодромы — космические гавани	221

Левитская Т. И. Слово об Учителе	234
Литературные страницы	239
Холшевников К. В. Коуровское братство	241
Соловьев А. А.	242
Калинина Н. Д.	250
Список участников конференции	253

Научное издание

Физика Космоса

Труды 44-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург,
2–6 февраля 2015 г.

Редактор Т. А. Федорова

Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 14.01.15. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 15,75.
Тираж 160 экз. Заказ 29.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343) 350-56-64.

ISBN 978-5-7996-1381-5

