

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 46-й Международной
студенческой научной конференции

(Екатеринбург,

30 января — 3 февраля 2017 г.)

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 52(063)
Ф503

Печатается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

Э. Д. Кузнецов (ответственный редактор), 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)

Ф503 **Физика** Космоса : тр. 46-й Международ. студ. науч. конф.
(Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2017 г.). — Екатеринбург :
Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 290 с.

ISBN 978-5-7996-1983-1

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 52(063)

ISBN 978-5-7996-1983-1

© Уральский федеральный
университет, 2017

ФИЗИКА КОСМОСА
46-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

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

30 января — 3 февраля 2017 г.

Екатеринбург, Россия

Научный организационный комитет:

А. М. Соболев (председатель, Уральский федеральный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), П. Е. Захарова (Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (ИПФ РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), О. Ю. Малков (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (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-Institut für Extraterrestrische Physik, Deutschland), Д. Э. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. А. Соловьев (Главная Пулковская астрономическая обсерватория РАН)

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований,
грант РФФИ 17–32–10007 мол_г

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района
г. Екатеринбурга

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

Посвящается 100-летию
Клавдии Александровны
Бархатовой



Светись, светись, далекая звезда,
Чтоб я в ночи встречал тебя всегда;
Твой слабый луч, сражаясь с темнотой,
Несет мечты . . .

М. Ю. Лермонтов

Обзорные лекции



Septem artes liberales.
Гравюра. XV в.

И. Ю. Алексеев¹, А. В. Кожевникова²
¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН
²Уральский федеральный университет

ПЯТНА И АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ В АТМОСФЕРАХ ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

Рассмотрены методы и результаты исследования холодных пятен и хромосферных неоднородностей звезд поздних спектральных классов.

We considered methods and results of the late type stellar spots and chromospheric inhomogeneities.

Введение

С момента официального обнаружения солнечных пятен Галилеем астрономы пытались применить гипотезу солнцеподобных звездных пятен к различным типам переменных звезд. Так, в XVIII в. пятнами пытались объяснить переменность всех типов звезд от мирид до Новых.

Однако настоящее открытие звездных пятен произошло уже в начале XX в., когда фотографические наблюдения затменных систем *HK Lac* и *W UMa* показали непонятную деформацию кривых блеска. Впрочем, этот эффект наблюдатели пытались объяснить чем угодно, но только не пятнами.

В 1947–1952 гг. американский астроном G. E. Kron отметил деформации кривых блеска затменных звезд *YY Gem (Castor C)*, *RT And*, *RS CVn* и *AR Lac* по фотоэлектрическим наблюдениям и связал этот эффект с влиянием холодных пятен.

В 1965 г. крымский астроном П. Ф. Чугайнов обнаружил слабую $\Delta V = 0.23^m$ вращательную модуляцию блеска с периодом 3.8^d у незатменной оранжевой звезды *BY Dra* и объяснил ее переменность в разных цветах со звездными пятнами.

Сейчас запятненность известна у холодных звезд с внешней конвективной оболочкой для разных эволюционных статусов — от молодых звезд типа *T Tau* к оранжевым и красным карликам типа *BY Dra*, а далее, при уходе с Главной Последовательности, — двойным гигантам и субгигантам типа *RS CVn* и, наконец, проэволюционировавшим АВГ звездам типа *W UMa* и *FK Com*.

Сейчас исследовано несколько сотен запятненных звезд, однако последние данные спутника «Кеплер» позволяют говорить о тысячах запятненных красных карликовых звезд, подобных Солнцу.

Фотометрия

Запятненность звезды проявляется прежде всего фотометрически, как вращательная модуляция блеска с типичной амплитудой около 0.10^m , доходящей у самых активных *T Tauri* звезд до 0.5^m (*V471 Tau*). Изменения конфигурации пятен дают медленные (с характерным временем около месяца) смены параметров вращательной модуляции, например уровня среднего блеска в данную эпоху. Такая переменность также составляет обычно $0.1–0.3^m$, доходя у некоторых звезд до 1.20^m (*PZ Mon*). Для Солнца, как запятненной звезды, такие эффекты составляют около 0.001^m .

Благодаря простоте наблюдений фотометрические методы не накладывают никаких ограничений на скорость вращения звезд и их яркость. Такие наблюдения не требуют крупных телескопов и современной приемной аппаратуры, давая хорошие результаты для обычного электрофотометра.

Фотометрические методы наблюдений запятненных звезд позволяют исследовать как многочисленные малоизученные карлики солнечного типа (например, с помощью телескопа «Кеплер»), так и осуществлять долговременные (свыше 50 лет) наблюдения запятненных звезд, в том числе и обладающих вековым циклом активности (*BY Dra*, *V833 Tau*, *PZ Mon*).

В настоящее время фотометрию холодных звезд изучают с помощью космических телескопов (Kepler, MOST, COROT, Gaia), наземных фотометрических телескопов-автоматов малого диаметра (Wolfgang-Amadeus, Phoenix 10, Fairborn, STELLA II/AIP, Strömgren APT) и обычных фотометрических телескопов различных обсерваторий (Обсерватория Катании, Южноафриканская, Крымская и др.).

Определение параметров пятен по фотометрическим наблюдениям сводится к решению для каждого момента наблюдений системы уравнений вида

$$\Delta m_\lambda = -2.5 \lg \left(1 - (a_\lambda I + b_\lambda J) / \left(1 - u_\lambda^{phot} / 3 \right) \right) \quad (1)$$

в каждой полосе используемой фотометрической системы. Здесь ве-

личина

$$\pi I = \int \cos \alpha \sin \theta d\theta dl \quad (2)$$

характеризует видимую площадь пятен,

$$\pi J = \int \cos^2 \alpha \sin \theta d\theta dl \quad (3)$$

зависит от концентрации пятен к центру диска звезды, а величины a_λ и b_λ определяются коэффициентами потемнения к краю u для фотосферы и пятна, и контрастом пятна относительно фотосферы β_λ : $a_\lambda = 1 - u_\lambda^{phot} - (1 - u_\lambda^{spot}) \beta_\lambda$ и $b_\lambda = u_\lambda^{phot} - u_\lambda^{spot} \beta_\lambda$.

Начиная с 1969 г. для решения этой некорректной обратной задачи были разработаны различные методы и упрощающие предположения. Сейчас наиболее перспективным считается восстановление изображений методом регуляризации Тихонова, максимальной энтропии, методом Оккама или методом наименьших квадратов. Очевидно, что для успешного применения такого метода требуются плотное фазовое перекрытие кривой блеска и высокая точность наблюдений. Распределение энергии в спектре пятна обычно считается подобным распределению энергии в фотосфере более холодной звезды.

Мы обычно используем более простой метод оценки параметров пятен, основанный на предположении о качественном сходстве картины запятненности звезды с солнечной. В нашем предположении многочисленные мелкие пятна расположены внутри двух симметричных относительно экватора поясов запятненности, занимающих области с широтами от $\pm\phi_0$ до $\pm(\phi_0 + \Delta\phi)$ (аналог королевских широт Солнца), где плотность заполнения пятнами изменяется по долготе по определенному закону. Такой метод позволяет получить правдоподобные оценки не только площадей и температур, но и средних широт пятен, используя только три экстремальные точки в кривой блеска: значения блеска звезды в максимуме и двух минимумах (главном и вторичном), соответствующих двум активным долготам. Таким методом нами было исследовано около 60 звезд разных спектральных классов (от $G0$ до $M4.5$), классов светимости (от II до V) и скоростей вращения на экваторе (до 170 км/с). Наша выборка включает как карлики типа *BY Dra* и звезды солнечного типа, так и запятненные *post T Tau* звезды, классические и короткопериодические системы типа *RS CVn* и быстровращающиеся гиганты типа *FK Com*.

Согласно нашим расчетам пятна расположены в низких (холодные M карлики) и средних (более горячие $G-K$ звезды различных типов) широтах. Хорошо видна тенденция роста возможных широт нахождения пятен $\langle \phi \rangle$ к более горячим (и более ярким) звездам. Зависимости средней широты пятен $\langle \phi \rangle$ от скорости вращения звезды и ее числа Россби не обнаружено. В найденную зависимость вписывается и область королевских широт на Солнце.

Площадь запятненных областей может достигать до 50 % поверхности звезды. Она показывает тенденцию роста к более быстровращающимся звездам (с уменьшением числа Россби) с достижением насыщения при $Ro \sim 0.1-0.2$, то есть показывает зависимость, сходную с известными соотношениями для других индикаторов активности. Более того, найденная критическая величина числа Россби попадает в известную зависимость Ro_{crit} от высоты формирования индикатора активности: в более высоких слоях атмосферы насыщение начинается быстрее. Отмечается также тенденция понижения максимальной за все время наблюдений звезды площади пятен S к красному (полностью конвективные звезды) и синему (звезды без внешней конвективной оболочки) концам выборки. Такие зависимости прослеживаются и у малозапятненных звезд солнечного типа.

Температура пятен T_{spot} составляет, независимо от типа переменности звезды, 2 500–4 500 К и растет к более горячим звездам. При этом разность температур невозмущенной фотосферы и пятен ΔT изменяется от 1 000–2 200 К у горячих G карликов, горячих компонент систем типа $RS CVn$ и переменных типа $FK Com$ до 200–300 К у самых холодных M звезд.

Во все найденные зависимости вписывается тень солнечных пятен. Отметим также, что наши оценки площадей и температур пятен согласуются с оценками, полученными другими методами.

Спектры запятненных звезд

Доплеровское картирование (DI)

Самым прогрессивным на сегодняшний день методом исследования звездных пятен является доплеровское картирование. Идея метода основана на различии профилей спектральной линии, даваемых различными элементами поверхности фотосферы: элементом с аномальной температурой или химическим составом и элементом нормальной фотосферы. Результирующий профиль звезды будет со-

держат особенность (обычно квазиэмиссионную), сдвинутую эффектом Доплера в зависимости от фазы вращения на некоторую величину.

Первые идеи доплеровского картирования были высказаны в 1958 г. Дейчем для химически пекулярных A_p звезд. Позднейшее развитие метода, включающее уже анализ профиля линии, начинается с работ В. Л. Хохловой для исследования химических пятен все у тех же A_p звезд, а его применение для картирования температурных неоднородностей холодных звезд — с работы Фогта и Перрода, которые впервые использовали численный расчет теоретического профиля запятанной звезды и его подгонку к наблюдаемому. Такая подгонка является классической некорректной обратной задачей и решается, как и в более простом случае фотометрии, тремя основными методами — регуляризацией Тихонова, методом максимальной энтропии и методом Оккама. Широтное распределение пятен получается из оцененной по серии спектров амплитуды изменения лучевых скоростей особенности (чем выше широта, тем меньше доплеровский сдвиг). Для получения правдоподобных температурных карт метод требует следующих условий:

- а) значительной ($V \sin i > 20$ км/с) скорости вращения, чтобы доплеровская ширина линии существенно превосходила все остальные источники уширения (например, ширину инструментального профиля). С другой стороны, при $V \sin i \sim 100$ км/с становится трудно отделить реальные изменения профиля от слабых неизвестных бленд в спектре. Также величиной скорости вращения определяется густота сетки интегрирования. Ошибки в определении скорости вращения звезды в пределах 5 км/с способны радикально изменить широтное распределение пятен от полярной шапки к экваториальному поясу;
- б) для угла наклона оси вращения звезды наиболее предпочтительным считается среднее ($20^\circ < i < 70^\circ$) значение, при котором не только видны все детали, но и возможно разделение между северным и южным полушарием. Ошибки в определении угла наклона (оценивается из скорости вращения звезды и радиуса) также способны радикально исказить восстанавливаемую картину звездной поверхности;
- в) высокое ($R > 40\,000$) спектральное разрешение.

Амплитуда изменений профиля линии составляет обычно около 1 % от интенсивности континуума, поэтому требуется высокое (не

менее 150) отношение сигнал/шум, которое в первых работах пытались заменить наблюдениями в более глубокой линии. В современных работах по доплеровскому картированию типичным является отношение сигнала к шуму около 400.

Необходимо плотное фазовое перекрытие наблюдений (иначе мы получим неустойчивое решение и просто «белые пятна» на карте). Фазовым перекрытием определяются также разрешение мелких деталей и дифференциация пятен между северным и южным полушарием.

Естественно, ошибки налагает и неточность в принятой теории переноса излучения. Для их минимизации необходимо использование нескольких спектральных линий, желательны формирующиеся в условиях ЛТР. Использование линий сразу нескольких различных элементов может хорошо сузить область возможных решений. Используемые линии должны быть неблендированными, и их параметры должны быть хорошо известны. Потребность доплеровского картирования в точных атомных данных привела к созданию Венской базы атомных данных *VALD*, на сегодняшний день наиболее точной и обширной. В современных исследованиях используются линии FeI (6 141, 6 151, 6 157, 6 165, 6 173, 6 180, 6 201, 6 393, 6 411, 6 431, 6 546 Å), NiI (6 175, 6 177, 6 178, 6 432 Å), VI (6 199, 6 430 Å), CaI (6 166, 6 439 Å). Отметим, что последняя линия очень часто используется, несмотря на сильные отличия от ЛТР.

Таким образом, доплеровское картирование налагает строгие ограничения не только на наблюдательную аппаратуру, но и на выбор объектов. В частности, оно применяется в основном к анализу запятненности звезд сравнительно большой светимости — типа *RS CVn*, *FK Com*, некоторых быстро вращающихся *PMS* (*T Tau* и *post T Tau*) звезд и почти не используется для исследования запятненных карликов.

Принципиальным недостатком доплеровского картирования является неспособность точной оценки температуры пятен (при температуре пятна ниже некоторой критической линии насыщаются, и их интенсивность от температуры не зависит, что приводит к недооценке разности температур). Вероятный выход — комбинирование спектральных методов с фотометрическими.

В настоящее время доплеровское картирование было проведено для шести десятков активных звезд разных типов, в том числе 22 переменных типа *RS CVn*, 15 запятненных *T Tau* и *post T Tau* звезд, 16 переменных типа *BY Dra* (из них четыре в скоплениях),

шести звезд типа *FK Com* и двух систем типа *W UMa*. У ряда звезд такое картирование было проведено для нескольких эпох: от 15 для *IM Peg* до 47 для *V711 Tau*. Однако у всех этих звезд перекрытие доплеровского картирования не составляет и трети временного перекрытия фотометрических наблюдений этих объектов.

Практически для всех переменных доплеровское картирование показывает присутствие гигантских околополярных пятен в сочетании с рядом других деталей, распределенных по всем широтам. Явных зависимостей широт пятен от каких-то параметров звезды не отмечается. Пятна холоднее окружающей фотосферы на 500—1 000 К. Для наиболее хорошо изученных переменных (*II Peg*, *V711 Tau*, *EI Eri*, *LQ Hya*) длительные ряды доплеровских карт позволяют делать выводы о циклической активности и дифференциальном вращении звезды. Однако стоит заметить, что такие выводы еще являются противоречивыми, и оценки параметров активности, полученные для одной и той же звезды разными авторами, часто существенно различаются друг от друга.

Зееман-доплеровское картирование (*ZDI*)

С 1991 г. техника доплеровского картирования дополняется зеемановской спектроскопией высокого разрешения. В этом методе рассматриваются профили линии для параметров Стокса *I*, *Q*, *V*, *U* поляризованного света, что позволяет картировать распределение не только температурных неоднородностей, но и магнитного поля по диску звезды (прежде всего долготной компоненты). Техника *ZDI* принципиально не отличается от обычного доплеровского картирования. Этот метод менее чувствителен к различным артефактам, чем обычное доплеровское картирование. Его основная трудность — разделение температурного и магнитного эффектов. Из-за малого вклада пятен в профиль линии метод чувствует прежде всего магнитное поле ярких областей, и реконструированные карты магнитных полей совсем не совпадают с картами холодных пятен. Техника *ZDI* требует очень большого (около $S/N \sim 900$) отношения сигнала к шуму для получения поля в 1 кГс с точностью 10 % и использует более тысячи спектральных линий для восстановления трехмерной структуры магнитного поля.

Отношения глубин линий (*LDR*)

Для медленновращающихся звезд температуры и площади пятен можно определять и по глубинам фотосферных линий. Предложенная Каталано и др. (2002) методика использует измерения глубин 16 фотосферных линий: FeI4 (6 200, 6 215, 6 256, 6 253, 6 265, 6 270 Å), FeII 6 247 Å, VI (6 199, 6 216, 6 243, 6 252, 6 266, 6 269, 6 275 Å), TiI 6 215 Å и ScI 6 211 Å. Для избранных пар линий отношения их глубин зависят от температуры пятен и их площадей, а подбор таких пар позволяет уверенно разделить температурный и геометрический эффекты. Такой метод по сути является вырожденным случаем доплеровского картирования.

Полученные температуры звездных пятен близки к фотометрическим.

Наблюдения молекулярных полос

К прямым спектральным методам измерения температур пятен можно отнести исследование молекулярных полос TiO, CO, OH, VO, которые образуются при низких температурах в звездных атмосферах и нехарактерны для спектров звезд классов *G–K*. Однако Рамсей и Нэйшнз обнаружили в 1980 г. в спектре системы *V711 Tau* (*G5IV + K1IV*) полосу TiO 8 860 Å, которая образуется при температуре ниже 3 500 К, и связали ее с наличием холодных пятен в фотосфере одной из звезд системы. Позднее Фогт (1981) нашел полосы TiO и VO у другой известной системы, *II Peg*, и показал их антикорреляцию с фотометрией звезды.

Очевидно, что для независимого определения площади и температуры пятен нам необходимо рассмотреть по крайней мере две полосы с различной температурной чувствительностью: отношения интенсивностей линий дают температуру пятен, а их величины — фактор заполнения. Наиболее употребительной является пара полос окиси титана 7 055 и 8 860 Å. Метод разработали Хюнемёрдер и Рамсей (1987), а начиная с 90-х гг. были получены оценки параметров пятен для пяти проэволюционировавших звезд (*EI Eri*, *II Peg*, *V1762 Cyg*, *ζ And*, *V1794 Cyg*) и четырех запятанных карликов (*LQ Hy*, *AG Dor*, *V833 Tau*, *EQ Hy*). Полученные «титановые» температуры пятен близки к фотометрическим и *LDR* оценкам, но в среднем холоднее на 200 К. Комбинация наблюдения полос окиси титана с фотометрией полезна еще с такой стороны: зависимость глубины полосы TiO 7 054 Å от блеска Бердюгина позволяет

оценить уровень блеска звезды для *IM Peg*, когда эта полоса исчезает, то есть звезда полностью свободна от пятен. Заметим, что это значение несколько превышает наибольший блеск переменной, полученный за 40 лет.

Помимо полос окиси титана используются линии колебательно-вращательных переходов молекулы $\text{OH } 15\,630 \text{ \AA}$. Согласно полученным результатам пятна на исследуемых звездах имеют температуры $3\,500\text{--}4\,000 \text{ K}$ и занимают $20\text{--}50 \%$ поверхности звезды. В этих работах спектр пятна задавался как спектр звезды более позднего спектрального класса. Применение синтетических спектров началось с работы Бердугиной, которая рассчитала по доплеровским картам ожидаемый синтетический спектр полос TiO для звезды *IM Peg* и отметила его хорошее сходство с наблюдаемым.

Активные области в хромосфере

Подобно Солнцу запятненные звезды обладают надфотосферными оболочками с температурами $6\,000\text{--}20\,000 \text{ K}$, которые прогреваются выходящими из подфотосферных слоев потоками магнитогидродинамических волн. Для запятненных карликов, молодых звезд и систем типа *RS CVn* такие области качественно аналогичны солнечной хромосфере, в то время как для гигантов типа *FK Com* картина несколько сложнее.

Солнечная хромосфера существенно неоднородна: в средней хромосфере видны сгустки хромосферных петель, а в верхней — короткоживущие спикулы. В лучах *HK CaII* видны яркие флоккулы в активных областях и яркая хромосферная сетка, очерчивающая супергранулы.

Хромосферы активных звезд были обнаружены по сильной эмиссии резонансного дублета CaII HK и водородной эмиссии, прежде всего в линии H_α . Изучение хромосферной эмиссии CaII HK запятненных звезд началось еще в конце 40-х гг. с работ О. Вильсона. Довольно быстро были обнаружены значимые изменения потоков в линиях с характерным временем от суток до нескольких месяцев. В 1980 г. последователи Вильсона обнаружили у 19 из 46 исследованных карликов вращательную модуляцию потоков в линиях кальция и связала ее с неравномерным распределением хромосферной эмиссии по поверхности звезды. Обнаруженные позднее медленные вариации периода от сезона к сезону были объяснены в рамках дифференциального вращения на разных широтах, притом у различных

звезд оно могло иметь как солнечный, так и антисолнечный характер. Также многолетние ряды наблюдений линий CaII НК привели к обнаружению циклов активности звезд, аналогичных 11-летнему солнечному циклу.

Другим индикатором хромосферной активности является эмиссия H_{α} , образующаяся в области температурного плато около 10 000 К. У холодных карликов это мощная эмиссионная линия с вызванной самопоглощением небольшой центральной депрессией и эквивалентной шириной в несколько ангстрем, в то время как у близких к Солнцу G звезд мы видим фотосферную линию поглощения, слегка залитую дополнительной эмиссией хромосферы. Такая кажущаяся качественная разница является прежде всего различной эффективностью фотосферной подложки, которая изменяется для карликов от $G2$ до $M7$ в 50 раз.

Первые оценки физических условий в области формирования линий показали, что хромосферы запятненных звезд превышают солнечные по электронной плотности в десятки раз. По интенсивностям бальмеровских линий и расстояниям между эмиссионными пиками были получены характерные оценки $n_e = 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Хромосферная эмиссия H_{α} также позволяет говорить о неоднородностях звездных хромосфер: у ряда запятненных звезд обнаружена вращательная модуляция параметров линии. Например, Алексеев и Козлова обнаружили вращательную модуляцию эквивалентных ширин, интенсивностей и расстояний между пиками у пяти запятненных звезд различного эволюционного статуса: $V775 \text{ Her}$, $LQ \text{ Hya}$ — запятненные K карлики, $EV \text{ Lac}$ — вспыхивающий M карлик, $MS \text{ Ser}$ — классическая система типа $RS \text{ CVn}$ и $VY \text{ Ari}$ — молодая звезда, прошедшая стадию $T \text{ Tau}$. Сопоставление с кривыми блеска показало, что у всех этих звезд максимумы эквивалентной ширины и интенсивности эмиссии соответствуют фазам минимального блеска. При этом одновременно происходит рост электронной плотности от $n_e = 1 \times 10^{10}$ до $n_e = 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ у $V775 \text{ Her}$, от 1.1×10^{11} до $2.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ у $LQ \text{ Hya}$, от 3.7×10^{11} до $3.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ у $MS \text{ Ser}$ и от 1×10^{10} до $4.6 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ у $VY \text{ Ari}$. Этот эффект указывает на присутствие в хромосферах исследованных звезд активных областей (флоккулов) с повышенной электронной плотностью, которые концентрируются на тех же активных долготах, что и наиболее запятненные области. У $VY \text{ Ari}$ помимо вращательной модуляции наблюдается долговременная переменность активности в линии H_{α} , по-видимому, коррелированная с циклами пятнообразования.

Иная картина наблюдается у одиночных быстро вращающихся гигантов типа *FK Com*. Их спектры радикально отличаются от спектров типичных хромосферно-активных звезд. Так, у звезды *IN Com* наблюдается очень сильная и широкая двухкомпонентная эмиссия в линии H_α с очень широкой (до 100 км/с) центральной абсорбцией и эмиссионными крыльями, достигающими до ± 400 км/с. При этом другие линии серии никакой явной эмиссии не показывают и проявляются только при вычитании фотосферного спектра. Проведенный Алексеевым и Козловой анализ спектров за 12 лет показал, что звезда окружена протяженной (до двух радиусов звезды) оболочкой из горячего газа, надуваемой звездным ветром, вклад которого превалирует в эпохи наибольшей запятненности. В эпохи же максимального блеска ветер ослабевает, и мы видим по преимуществу вклад твердоотельно вращающегося неоднородного по долготе околозвездного диска. Отметим, что и в этом случае максимум эмиссии совпадает с наиболее запятненными активными долготами.

Долговременные эффекты запятненности

Активные долготы

Общеизвестна секторная структура солнечного магнитного поля и солнечного ветра. Очевидно, что подобные структуры существуют и для других, много более активных звезд. Первые сообщения о существовании у звезд двух выделенных активных долгот появились в конце 80-х гг. в виде двухпятенной модели. Позднее аналогичные результаты были получены для всех типов запятненных звезд — классических *RS CVn* переменных, запятненных карликов и звезд типа *FK Com*. Активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт и поляризационных наблюдений. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной хромосферной активности и наиболее мощные вспышки.

В 1991 г. Йэтсу и др. обнаружили происходящее время от времени переключение доминирующей активной долготы с одной на другую — так называемый *flip – flop* эффект. Подобные переключения часто показывают тенденцию к цикличности, хотя у некоторых звезд они могут происходить и нерегулярно. Эффект наличия и переключения активных долгот обнаружен в слабой степени и на Солнце.

Дифференциальное вращение

По длительным рядам фотометрических наблюдений и доплеровских карт для ряда звезд проводились сопоставления найденных широт пятен с периодами осевого вращения звезды в соответствующие эпохи. Таким образом, для этих звезд были получены оценки дифференциального вращения. Одна из первых таких оценок получена Фогтом для классической запятненной звезды *BY Dra*. Полученные с помощью двухпятенной модели оценки дифференциального вращения восьми десятков активных двойных систем показали, что у всех звезд экватор вращается быстрее полюсов (вращение солнечного типа), и существует зависимость коэффициента дифференциального вращения от периода осевого вращения звезды и заполнения полости Роша

$$\lg D_r = -2.02 + 0.79 \lg P_{rot} - 0.42F, \quad (4)$$

действующая для всех типов запятненных звезд. Согласно формуле дифференциальное вращение уменьшается к более быстро вращающимся звездам и асимптотически приближается к твердотельному, что плохо согласуется с выводами теории динамо. В то же время доплеровское картирование показало для некоторых активных гигантов (*V711 Tau*, *UX Ari*, *HU Vir*, *V1794 Cyg*) отрицательное значение коэффициента D_r , которое соответствует антисолнечному типу вращения (околополюсная зона вращается быстрее экваториальной). Признаки антисолнечного дифференциального вращения были обнаружены и у некоторых звезд солнечного типа по корреляции вращательного периода с ходом линии CaII НК4 в течение цикла. Вместе с тем эти результаты тоже не являются окончательными, так как разные авторы дают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

На основе разработанной нами зональной модели мы получили оценки дифференциального вращения у двух десятков звезд разных типов. Сравнение полученных нами из моделей средних широт пятен с фотометрическими периодами звезды (или фазами ее минимального блеска) показало для большинства объектов (*G–K* карлики) наличие дифференциального вращения солнечного типа. Коэффициенты дифференциального вращения в среднем составляют $D_r = 0.01–0.05$ для молодых *post T Tau* звезд спектрального класса *K*, $0.03–0.09$ для *K* карликов, $-0.01–-0.04$ для запятненных *M* карликов, $-0.02–0.04$ для звезд типа *RS CVn* и 0.05 для быстровращающегося одиночного гиганта *IN Com*, в то время как солнечное

значение $D_r^\odot = 0.19$. Вероятно, что характер дифференциального вращения зависит от спектрального класса звезды, и переход к антисолнечной картине вращения происходит при достижении некоторого критического значения показателя цвета $B-V$.

Циклы активности

Цикличность солнечной активности была открыта в середине XIX в. любителем астрономии Генрихом Швабе, и сейчас 11-летний солнечный цикл, регулирующий все стороны проявления активности от чисел Вольфа до солнечно-земных связей, является одним из наиболее известных явлений в жизни Солнца. Помимо этого цикла известны также вековой (80–90 лет) цикл Глайссберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в два-три столетия.

Первые данные о возможных аналогах солнечных циклов у активных звезд появились при рассмотрении их долговременной фотометрии. Так, в 1973 г. Чугайнов заподозрил существование 8-летней цикличности у известной запятненной системы *BY Dra*, а Филлипс и Гартманн (1978) по пластинкам Гарвардской коллекции обнаружили длительные (50–60 лет) изменения среднего блеска у звезд *BY Dra* и *CC Eri*, по-видимому, аналогичные вековому циклу Глайссберга. Широко известны циклы хромосферной активности карликов солнечного типа, определяемые по потокам в эмиссионных линиях CaII (НК проект Вильсона, 1978). В последнее время обнаружены циклические изменения во вспышечной активности звезд типа *UV Cet*, в переключении активных долгот и проявлении дифференциального вращения у звезд типа *RS CVn*, *FK Com* и некоторых запятненных карликов.

Проводимое нами моделирование запятненности нескольких десятков активных звезд различных типов позволило нам рассмотреть вопрос о цикличности изменений полной площади и средней широты покрывающих звезду пятен. Из всей выборки исследованных нами активных звезд мы рассмотрели 17 объектов, для которых известны фотометрические и другие циклы активности. Для всех объектов были обнаружены циклические колебания средней широты и полной площади звездных пятен, длительности которых хорошо согласуются с известными длительностями фотометрических циклов.

Независимо от эволюционного статуса все программные звезды демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, то есть роста полной площади. У большинства звезд (все они имеют спек-

тральные классы $G-K$) этот дрейф происходит в направлении экватора, — мы считаем это грубым аналогом солнечной диаграммы бабочек. Скорость широтного дрейфа пятен $\delta\phi$ довольно сильно варьируется от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем $0.8-2.6$ градуса в год, в то время как солнечное значение скорости широтного дрейфа составляет $3-4$ градуса в год. Одновременно эти звезды показывают дифференциальное вращение солнечного типа, при котором экватор вращается быстрее околополюсных областей. Наиболее холодные звезды выборки (*V833 Tau*, *BY Dra*, *IM Peg* и *EV Lac*) демонстрируют картину, противоположную солнечной, — дрейф пятен к полюсу по мере увеличения их площади и дифференциальное вращение антисолнечного типа. По-видимому, две звезды (*CG Cyg* и *HU Vir*) находятся вблизи критической границы, так как у них сочетаются дрейф пятен к полюсу и слабое дифференциальное вращение солнечного типа.

Различие в характере широтного дрейфа активных областей в течение цикла было косвенно получено и по хромосферным линиям CaII НК. Для 22 звезд НК проекта Донахью и Бальюнас из сопоставления вариаций периода вращения звезды с ходом интенсивности линий в течение цикла нашли у 12 звезд выборки дрейф солнечного типа, у шести — антисолнечного и у четырех звезд заподозрили изменения направления дрейфа в течение цикла.

Обнаруживаемые циклы пятенной активности имеют характерную длину $4-16$ лет, то есть сравнимы с 11-летним циклом. Длительности цикла не показывают явной зависимости от спектрального класса звезды, ее скорости вращения и числа Россби.

У ряда программных звезд *BY Dra*, *V833 Tau*, *PZ Mon* сравнительно короткие циклы типа цикла Швабе сочетаются с более длительными и глубокими циклами, аналогичными вековому циклу Глайссберга. При этом полная площадь пятен может достигать в глубине вызванного циклом минимума блеска до половины поверхности звезды.

Открытым остается вопрос о совпадении между собой циклов, определяемых разными методами. Если у Солнца цикл Швабе синхронизирует все процессы активности, то для других звезд такой однозначной картины нет. Так, широко известные циклы хромосферной линии CaII могут как совпадать с пятенными ($\kappa C\text{et} = HD\ 20630$), так и не показывать никакой корреляции (например, *BE C\text{et}* или *EK Dra*, где нерегулярная переменность линий кальция сочетается с 9-летним фотометрическим циклом). У активной

вспыхивающей звезды EV Lac 7-летний цикл вспышечной активности плохо согласуется с пятнообразованием и, кроме того, наблюдается длительная (около 40 лет) переменность показателя цвета $U-B$, зависящего от хромосферной активности звезды. Пятенный цикл может быть достаточно плохо коррелирован и с излучением хромосферы в линии H_α ($LQ\ Hya$, $EV\ Lac$), хотя для переменной $IN\ Com$ мы видим обратную картину.

Помимо циклических изменений средней широты и полной площади пятен у ряда запятненных гигантов наблюдаются циклические переключения активных долгот — $flip-flop$ эффект. В слабой степени такой эффект известен и на Солнце с периодом около 3.7 года. Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но соотносятся как целые числа $P_{cyc}/P_{flip-flop} = 3:1, 2:1, 3:2, 5:4$ и пр. У переменных $V711\ Tau$ ($3:1$) и $CG\ Cyg$ ($5:4$) циклы $flip-flop$ эффекта проявляются и в запятненности, как более слабые вторичные изменения. При этом смена долгот происходит вблизи эпохи локального минимума площади пятен. Вероятно, такие отношения выражают взаимодействие различных мод звездного динамо.

Для ряда звезд солнечного типа ($BE\ Cet$, $DX\ Leo$, $LQ\ Hya$) мы видим в эти эпохи резкие скачки фотометрических периодов. Таким образом, для всех указанных звезд мы видим картину, качественно аналогичную солнечному пятнообразованию, — зарождение запятненных областей на некоторой активной долготе, их развитие (рост) и дрейф по широте в течение цикла.

Длительность циклов активности не показывает явных зависимостей от показателя цвета, глубины конвективной зоны, периода вращения или числа Россби. Более удобным параметром оказалось отношение P_{cyc}/P_{rot} , которое для выборки звезд НК проекта показывает зависимость от потока в линиях $\langle R'_{HK} \rangle$ и числа Россби. Существует и более общая зависимость $\lg(P_{cyc}/P_{rot})$ от $\lg(1/P_{rot})$, в которую хорошо укладываются циклы, определенные всеми методами (пятнообразование, $flip-flop$, CaII НК, вспышечная активность, дифференциальное вращение и циклические вариации орбитальных периодов у алголей и $RS\ CVn$ звезд). Из всего множества циклов зависимость выделяет три последовательности — цикл Глайссберга, цикл Швабе и наблюдаемый у ряда звезд короткий цикл.

Работа А. В. Кожевниковой выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.A03.21.0006).

А. И. Васюнин

Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Deutschland

ХИМИЯ ФОСФОРА В КОСМОСЕ

В лекции обсуждаются особенности химических процессов с участием фосфора в межзвездной среде.

Chemical processes with phosphorus in the interstellar medium will be discussed.

Фосфор — один из ключевых химических элементов, необходимых для формирования пребиотических молекул. В лекции будет обсуждаться химия фосфора и его соединений в космосе, включая области образования звезд и планет. Будет проведен обзор имеющихся наблюдательных данных о распространенности фосфора и его соединений, а также перспективы наблюдения фосфора на ведущих мировых инструментах. Будет обсуждаться возможность моделирования химии фосфора в космосе, в том числе с использованием свежих результатов лабораторных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ для молодых ученых — кандидатов наук, проект МК-8005.2016.2.

Д. З. Вибе¹, Э. И. Воробьев^{2,3},
В. В. Акимкин¹, Я. Н. Павлюченков¹

¹Институт астрономии РАН

²НИИ физики, Южный федеральный университет

³Department of Astrophysics, University of Vienna

ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ И МОЛЕКУЛЯРНЫЙ СОСТАВ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

Считается, что планетные системы формируются в газопылевых дисках, окружающих молодые звезды. Эти протопланетные диски являются аккреционными, то есть их вещество постепенно приближается к звезде и падает на нее. Аккреция на звезду приводит к разогреву вещества в ее непосредственных окрестностях и генерации ультрафиолетового и рентгеновского излучения, что, в свою очередь, влияет на структуру диска. Есть немало свидетельств того, что темп аккреции со временем может испытывать значительные колебания, что приводит к появлению так называемых аккреционных вспышек светимости. Долговременные последствия этих вспышек могут сохраняться в диске в виде особенностей его молекулярного состава.

Planetary systems are believed to form in gas-dust disks, surrounding young stars. These protoplanetary disks are accretion disks, which means that matter in them gradually moves toward the star and eventually falls onto it. Accretion on the star heats gas in its immediate vicinity and generates ultraviolet and X-ray emission, which, in turn, influences the disk structure. There are numerous evidences in favor of significant variations in the accretion rate, causing the so-called accretion luminosity outburst. Long-term consequences of the outbursts can be retained in the disk as peculiarities in its molecular content.

Фуоры и эксоры

В 1936—1937 гг. неприметная звездочка 16-й величины в созвездии Ориона внезапно выросла в яркости, достигнув величины 10.1^m к концу 1936 г. и величины 9.7^m к концу 1937 г. [1, 2]. Звезду, которая получила обозначение FU Ori, сочли новой, хотя и по длительности подъема блеска (около 120 дней), и по длительности спада блеска

© Вибе Д. З., Воробьев Э. И., Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н., 2017

(характерное время составляет порядка 100 лет) она заметно отличалась от других новых [1]. Только в 1966 г. Дж. Хербиг [2] высказал предположение, что вспышка FU Ori каким-то образом связана с ранней звездной эволюцией. Более детально связь FU Ori с процессом звездообразования была рассмотрена Хербигом в 1977 г. [3], когда было известно уже несколько подобных объектов, в честь звезды-прототипа получивших название фуоров. Согласно [4] идею о том, что вспышки на фуорах связаны с неустойчивостями в аккреционном диске, первым в 1976 г. высказал Богдан Пачинский.

Первый представитель другой подобной группы объектов привлек к себе внимание в 1944 г. Это была звезда HV 11976 в созвездии Волка [5], которая в спокойном состоянии имеет блеск около 13^m , но время от времени, с интервалами более нескольких лет, испытывает увеличение яркости как минимум на две звездные величины. Изначально она, как и FU Ori, считалась новоподобной, но уже в 1950 г. Хербиг показал [6], что это звезда типа T Tau, ассоциированная с темным облаком. Поскольку данная звезда в издании ОКПЗ 1948 г. получила обозначение EX Lup, родственные объекты стали называться эксорами.

Сравнительные характеристики фуоров и эксоров приводятся в таблице по данным из доклада Джоеля Грина на конференции «Protostars and Planets VI» (http://www.mpa.de/homes/ppvi/talks/audard_green.pdf). В целом объекты обоих типов считаются сейчас представителями молодых звездных объектов (МЗО) классов I и II, эруптивная переменность которых связана с эпизодическими усилениями темпа аккреции. Аккреционные вспышки светимости на эксорах повторяются сравнительно часто, раз в несколько лет. Светимость нарастает быстро и так же быстро спадает. Светимость фуоров нарастает медленнее, а потом очень долго остается примерно на постоянном уровне. Фактически все известные фуоры находятся сейчас в состоянии вспышки, за исключением звезды V346 Nor [7]. Эта звезда, вспыхнув в 1980-е гг., к 2010 г. потеряла в блеске несколько звездных величин, что указывает на переход в спокойное состояние. Таким образом, длительность вспышки оказалась около 25 лет, то есть больше, чем у эксоров, но меньше, чем у фуоров. Довольно значительный спад яркости наблюдается также у звезды V1057 Cyg [8]. Это может быть указанием на то, что принципиальных различий между двумя этими классами нет.

Сравнение параметров звезд типа FU Ori и EX Lup во время вспышки

Свойство	FU Ori	EX Lup
Сила вспышки	4–6 ^m , 20–500 L_{\odot}	3–5 ^m , 0.5–20 L_{\odot}
Повторяемость	Неизвестно	Раз в несколько лет
Темп аккреции	$> 10^{-6}$ – 10^{-4} M_{\odot} в год	10^{-7} – 10^{-5} M_{\odot} в год
Туманность	Всегда	Иногда
Спектр	F–M	K–M
Класс МЗО	I/II	II?
Нарастание блеска	0.3–10 лет	0.1–0.3 года
Спад блеска	>20 –100 лет	0.5–2 года

Эпизодическая аккреция

Сейчас считается, что МЗО классов I и II окружены газопылевыми дисками, масса которых велика на эволюционной стадии, соответствующей классу I, и постепенно снижается к окончанию эволюционной стадии, соответствующей классу II (в объектах класса III диск, по крайней мере газовый, уже практически отсутствует; см. табл. 1 в работе [9]). Через этот диск вещество продолжает аккрецировать на формирующуюся звезду, падая на ее фотосферу почти в режиме свободного падения со скоростью около 300 км/с [10]. Формирующиеся ударные волны, а также, вероятно, взаимодействие с магнитным полем нагревают вещество до температуры порядка 10^4 К, в результате чего в спектре звезды появляются значительный ультрафиолетовый избыток, а также эмиссионные линии. Горячая область диска вблизи звезды является источником излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

Калибровки аккреционной светимости показывают, что у звезд типа Т Тау (объекты класса II) при массе диска порядка $0.01 M_{\odot}$ типичный темп аккреции равен $\sim 10^{-8}$ – $10^{-9} M_{\odot}$ в год. У несколько более молодых объектов, принадлежащих классу I, темп спокойной аккреции составляет около 10^{-6} – $10^{-7} M_{\odot}$ в год. Последняя величина оказывается существенно ниже теоретических оценок темпа выпадения вещества на протозвезду, что привело к формулированию так называемой «проблемы светимости» [11]: ожидаемому для протозвезд темпу аккреции 2 – $5 \times 10^{-6} M_{\odot}$ в год должна соответствовать гораздо бóльшая светимость, чем та, что реально наблюдается.

Авторы работы [11] предположили, что эту проблему можно решить, если вещество не сразу падает на звезду, а сначала накапливается в околозвездном диске. При этом ожидаемый высокий темп аккреции соответствует выпадению вещества из протозвездной оболочки на диск, а наблюдаемый низкий темп аккреции — выпадению вещества из диска на звезду. Для обеспечения баланса необходимо, чтобы время от времени темп выпадения вещества на звезду сильно возрастал. Таким образом, большую часть своей жизни протозвезда проводит в состоянии с низким темпом аккреции (и, следовательно, с низкой светимостью), которое перемежается краткими, но интенсивными эпизодами повышенной аккреции и светимости, проявляющимися в виде явлений типа FU Ori.

В работе [12] сравнивались результаты фотометрических наблюдений примерно 4000 протозвезд при помощи космических телескопов “Spitzer” и WISE, проведенные с интервалом в пять лет. У нескольких протозвезд за это время яркость в ИК-диапазоне выросла на одну звездную величину, указывая на возможную вспышку светимости. Если эта интерпретация верна, средний интервал между вспышками звезд типа FU Ori составляет от 5 000 до 50 000 лет.

В рамках этого предположения эксоры могут представлять собой объекты на несколько более поздней эволюционной стадии, в которых из-за общего снижения массы диска и темпа аккреции вспышки получаются менее мощными и менее длительными. Современные наблюдения указывают, что темп аккреции испытывает вариации и на меньших масштабах. Мониторинг протозвезд в облаках OMC-2 и OMC-3 («волокно в форме интеграла») показал, что примерно у половины из них светимость испытывает колебания с амплитудой более 20 % на временах порядка нескольких недель [13]. Есть наблюдения хаотических вариаций светимости и с меньшей временной шкалой («фликеринг», менее одного дня), а также квазипериодических колебаний.

Следует отметить, что вариации темпа аккреции с разными амплитудами и характерными временами могут вызываться разными причинами [14]. В последнее время появилась информация об объектах, которые испытывают короткие вспышки аккреции на ранних эволюционных стадиях. Отмечены также длительные вспышки аккреции на классических звездах типа T Tau [15].

Несмотря на привлекательность предположения о связи вспышек светимости с эпизодической аккрецией, механизм или механизмы, приводящие к нарушению однородности диска и связанным с

этим вариациям темпа аккреции, до сих пор не вполне понятны. Предложены различные объяснения, например, тепловая неустойчивость, связанная с ионизацией водорода, взаимодействия в двойных системах (сама звезда FU Ori является двойной), сближения с другими звездами в скоплениях, формирование плотных сгустков в гравитационно-неустойчивом диске, взаимодействия диска с формирующимися планетами, магнито-вращательная неустойчивость во внутреннем диске, подпитываемая гравитационно-неустойчивым внешним диском [16], и т. д. Ни одно из этих объяснений не является общепринятым.

В значительной степени это связано с трудностями моделирования. Для исследования причин эпизодической аккреции необходима модель, которая, во-первых, включала бы в себя не только диск, но и окружающую оболочку, — для обеспечения высокого темпа аккреции в флуорах требуется постоянная подпитка диска веществом. Во-вторых, в модели должна описываться азимутальная структура диска, а это означает ограниченную возможность использования традиционных так называемых 1+1D моделей (см., напр., [17]), в которых рассматривается структура диска в широком диапазоне радиусов, но на одном азимуте, или моделей типа «shear box», в которых рассматривается фрагмент диска, ограниченный по радиусу и азимуту.

Детальная модель азимутальной и радиальной структуры диска на протяжении многих лет разрабатывается одним из авторов этого обзора [18–21]. В данной модели эволюция диска рассматривается с учетом наличия околосредней оболочки, из которой в диск поступает вещество. Диск рассматривается в рамках 2D приближения: проинтегрированные в вертикальном направлении параметры диска варьируются по радиусу и по азимуту. При помощи этой модели было показано, что гравитационная неустойчивость действительно способна приводить к фрагментации диска и выделению в нем спиральных ветвей и плотных сгустков. Падение этих сгустков на звезду обуславливает вспышки светимости. Для реализации вспышечного режима аккреции необходимо, чтобы темп аккреции вещества из оболочки превышал $10^{-6} M_{\odot}$ в год, что характерно для протозвездных оболочек с температурами 10–30 К. При постепенном убывании темпа аккреции система сначала испытывает короткие, но сильные вспышки светимости ($\sim 100 L_{\odot}$), а затем переходит в режим фликеринга.

В настоящее время модель усовершенствована в рамках 2+1D приближения, в котором информация о температуре и плотности вещества диска используется для восстановления его вертикальной структуры. Это приближение позволяет более детально исследовать перенос излучения вспышки в диске и оценивать его вклад в тепловую структуру диска. Наличие переноса излучения и детальный расчет тепловой структуры диска позволяют перейти к решению более сложной задачи — к оценке того, как вспышка аккреции в центре диска влияет на его химический состав.

Химические последствия вспышек

Одной из ключевых проблем в исследовании звезд типа FU Ori является недостаток информации о том, как они выглядят в спокойном состоянии. Из-за очень медленного спада яркости почти все звезды, классифицированные как фуоры, все еще находятся в состоянии вспышки. Упомянутая выше звезда V346 Nor [7] не решила эту проблему, так как на ней уже началась новая вспышка (это, кстати, может быть проявлением предсказанных в работе [21] серийных вспышек).

Неоднократно высказывалось предположение, что признаки прошлых вспышек могут длительное время сохраняться в молекулярном составе диска. Выявление таких признаков, возможно, пролило бы свет на механизм вспышек, поскольку позволило бы исследовать особенности структуры диска не только во время, но и после вспышки светимости с целью выявления индикаторов, характерных для конкретного механизма. Например, вспышки, вызванные падением газопылевых сгустков, могут происходить только в массивных гравитационно-неустойчивых дисках с сильными, но нерегулярными спиральными рукавами, тогда как вспышки, происходящие вследствие прохождений других объектов (молодых звезд) в окрестностях протопланетного диска, должны сопровождаться генерацией более регулярной двухрукавной структуры. Вспышки, вызванные процессами во внутреннем диске (магниторотационная или тепловая неустойчивость) не требуют обязательной сильной неустойчивости во внешнем диске и могут работать, когда внешний диск обладает слабой флоккулентной структурой. Эти наблюдательные проявления могут стать ключом к пониманию механизмов вспышек. Но для

работы с этими наблюдениями необходимо понимать, как именно вспышка светимости влияет на содержание различных наблюдаемых индикаторов (молекул и пыли).

В качестве одного из таких индикаторов предложен лед CO_2 . В работе [22] представлены результаты наблюдений 19 МЗО довольно низкой светимости (меньше $1 L_{\odot}$) при помощи спектрографа IRS космического телескопа «Spitzer». Оказалось, что в спектрах как минимум шести исследованных МЗО присутствуют признаки чистого кристаллического льда CO_2 , в том числе в спектре источника со светимостью $0.08 L_{\odot}$. По мнению авторов, формирование чистого льда CO_2 (без значительного количества льда CO) возможно при условии прогрева пылинок, который исследованные МЗО низкой светимости в их текущем состоянии обеспечить не могут. Поэтому химический состав ледяных мантий в этих объектах является признаком прошлых вспышек светимости (см. также [23]).

Вымораживание и испарение CO , CO_2 и некоторых других молекул рассматривались в качестве индикатора вспышек светимости в ряде других работ. В работе [24] высказывается предположение, что отслеживать прошлую тепловую историю протозвездных объектов, влияющую на формирование и испарение CO из ледяных мантий пылинок, можно по относительному содержанию CO и N_2H^+ . Виссер и Бергин [25] при помощи однозонной химической модели исследовали эволюцию содержания различных молекул при вспышке светимости и обнаружили, что ее главным результатом является испарение CO с поверхности пылевых частиц (в результате которого на пылинках остается только чистый лед CO_2). Избыток CO в газовой фазе может сохраняться в течение 10^3 – 10^4 лет после вспышки. Этот вывод был подтвержден с использованием глобальной модели диска в работе [26] (см. также [27]).

В работе [28] влияние вспышки на химический состав диска исследовалось при помощи набора сферических оболочек. Было показано, что помимо CO признаки прошлой вспышки можно увидеть в линиях молекул HCO^+ и N_2H^+ . Прогрев диска также приводит к десятикратному расширению снеговой линии водяного льда, которая возвращается в исходное положение через 10^2 – 10^3 лет после вспышки. Однако использование сферически-симметричной модели не позволило использовать ее результаты для детального предсказания результатов наблюдений.

Наблюдательная проверка роли газофазного содержания CO представлена в работе [29]. Ее авторы использовали интерферометр

SMA для картирования излучения $C^{18}O$ в 16 протозвездах на внедренной стадии эволюции. Выяснилось, что в восьми случаях протяженность эмиссии газофазных CO не согласуется с текущим значением светимости объекта (при которой значительно большая доля CO должна быть выморожена на пыли). Статистические оценки (впрочем, сделанные по очень маленькой выборке) указывают, что в исследованных протозвездах вспышки светимости происходят примерно каждые 20 000 лет.

Увеличение содержания молекул CO, воды и гидроксидов в непосредственных окрестностях звезды EX Lup (на расстоянии порядка 0.2–0.3 а. е.) было обнаружено во время вспышки 2008 г. [30]. В этот период темп аккреции на звезду увеличился до значения 10^{-8} – $10^{-7} M_{\odot}$ в год, а к 2014 г. вернулся к «нормальному» значению порядка $10^{-10} M_{\odot}$ в год. Оценки показывают, что в спокойном состоянии масса молекулярного газа в ближнем диске уменьшилась на порядок величины. Отметим, что возвращение к «нормальному» молекулярному составу произошло всего за несколько лет, то есть гораздо быстрее, чем это предсказывается для звезд типа FU Ori, что, скорее всего, вызвано отсутствием протяженного диска/оболочки с низкой плотностью вещества.

Существуют также другие исследования, в которых, в частности, исследуется зависимость отношения D/H в молекулах воды от истории светимости в диске [31]. Возможная роль вспышек в обогащении диска сложными органическими соединениями рассмотрена в работе [32].

Нами разработана модель химической эволюции диска, в которой используются физические условия до, во время и после вспышки, рассчитанные при помощи 2+1D модели, что позволяет нам моделировать трехмерное распределение молекул при максимально реалистичном представлении структуры диска. Используемая химическая модель описана в работе [33]. Расчет проводится следующим образом. Сначала на протяжении 5 000 лет диск эволюционирует только химически на стационарной физической структуре. Затем на протяжении 100 лет происходит вспышка аккреции, в ходе которой структура диска соответствует существенно более высокой светимости, после чего физические условия в диске возвращаются к прежнему состоянию.

На рисунке показаны радиальные профили лучевых концентраций молекул CO и N_2H^+ для избранного азимута и трех моментов времени. Сплошной линией показано содержание молекулы непо-

средственно перед началом вспышки. Штриховая линия соответствует окончанию вспышки. Пунктирные линии — распределения лучевых концентраций через 200 лет после окончания вспышки.

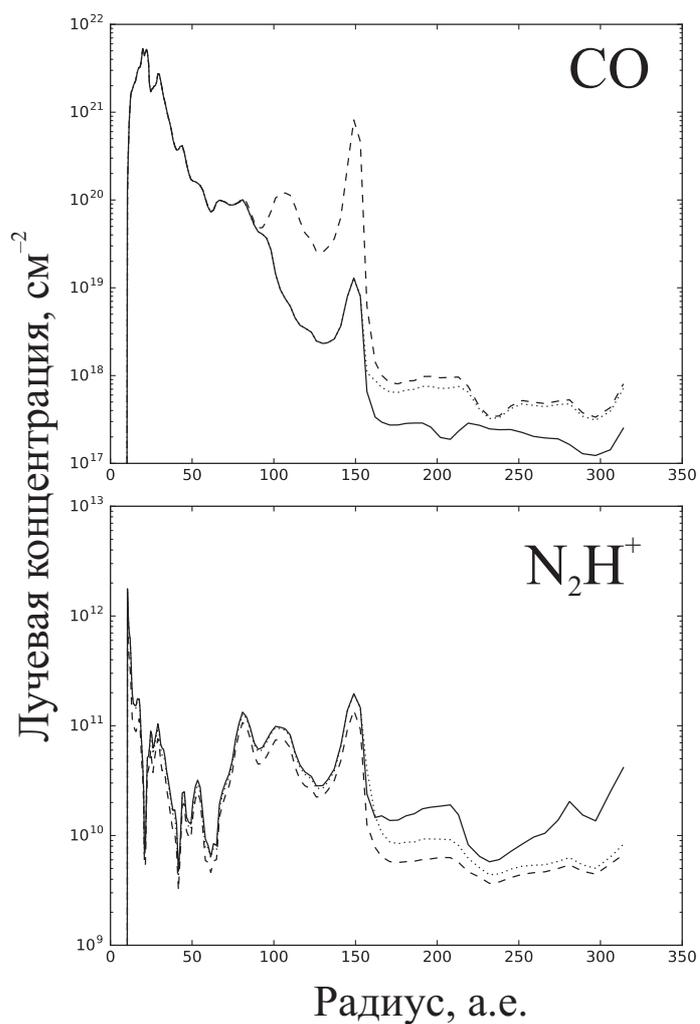
Эффект вспышки виден в распределении CO только на расстояниях свыше 70 а. е. от звезды, там, где до вспышки молекулы CO были в основном выморожены на пыли. На расстоянии более 150 а. е. вспышка приводит к повышению лучевой концентрации CO в несколько раз, и это повышенное содержание сохраняется как минимум несколько сотен лет после вспышки. Переход CO из твердой в газовую фазу приводит к разрушению молекул N_2H^+ , и потому в результате вспышки их содержание на длительное время уменьшается. Кроме того, вспышка ведет к резкому повышению газофазного содержания CO_2 , однако эти молекулы вымораживаются на пылинках практически сразу же после вспышки.

В дальнейшем, чтобы сопоставить результаты численного моделирования с результатами наблюдений, мы предполагаем использовать инструменты, позволяющие строить синтетические наблюдения как теплового излучения пыли, так и молекулярных эмиссионных линий. Это позволит нам непосредственно сравнивать результаты расчетов с данными наблюдений.

Дополнительные вопросы

В заключение кратко затронем еще несколько вопросов. Первый из них касается возможного вклада вспышек аккреции в решение проблемы образования массивных звезд [34]. Суть этой проблемы состоит в том, что в массивных протозвездах температура, необходимая для зажигания термоядерных реакций, достигается до окончания главной фазы аккреции, и в сферически-симметричном случае излучение родившейся звезды должно остановить рост ее массы на некоем предельном значении (около $10\text{--}20 M_\odot$), существенно меньшем, чем массы реально наблюдающихся массивных звезд. Преодолеть давление излучения звезды можно, если аккреция вещества на нее происходит не сферически-симметрично, а, например, через диск. В этом случае образование в диске массивных сгустков могло бы стать еще более эффективным способом «пробить» преграду излучения звезды [35]. Признаки эпизодической аккреции на массивные протозвезды также видны в наблюдениях [36].

В областях звездообразования вспышки аккреции на ранних эволюционных фазах могут быть важным механизмом обратной связи,



Результаты моделирования химической эволюции в диске до, во время и после вспышки. Сплошная линия — 5 000 лет после начала расчета (непосредственно перед вспышкой), штриховая линия — 5 100 лет после начала расчета (окончание вспышки), пунктирная линия — 5 300 лет после начала расчета (200 лет после окончания вспышки)

нагревающим газ не только в околозвездном диске, но и на существенно бóльших масштабах, регулируя тем самым темп звездообразования [37].

Наконец, некоторые признаки прошлой эпизодической аккреции мы можем увидеть и в Солнечной системе, например, в формировании и пространственном распределении так называемых кальций-алюминиевых включений (CAI). Их состав и структура указывают, что они сформировались в непосредственных окрестностях молодого Солнца при температуре порядка 1300 К [38]. Между тем сейчас их находят в составе хондритов, значительная часть вещества которых не претерпевала значительного нагрева. События типа аккреционных вспышек в звездах типа FU Ori были предложены в качестве механизма транспортировки CAI на расстояния порядка нескольких астрономических единиц от Солнца, где они перемешивались с более холодным твердым веществом [39]. Подобный механизм предлагался и в качестве объяснения наличия кристаллических силикатных частиц в кометных ядрах [40].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14–02–00719. Авторы благодарят Н. Н. Самуся за помощь в подготовке статьи.

Библиографические ссылки

1. *Hoffleit D.* Wachmann's Nova-Like Star: A Comparison with Other Peculiar Objects // Harvard College Observatory Bulletin. — 1939. — Vol. 911. — P. 41–48.
2. *Herbig G. H.* On the interpretation of FU Orionis // Vistas in Astronomy. — 1966. — Vol. 8. — P. 109–125.
3. *Herbig G. H.* Eruptive phenomena in early stellar evolution // Astrophys. J. — 1977. — Vol. 217. — P. 693–715.
4. *Trimble V.* The First European Conference on Astronomy // Q. J. R. Astron. Soc. — 1976. — Vol. 17. — P. 25–42.
5. *McLaughlin D. B.* The nova-like variable star HV 11976 // Astron. J. — 1946. — Vol. 52. — P. 109.
6. *Herbig G. H.* The Spectra of Five Irregular Variable Stars // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1950. — Vol. 62. — P. 211.
7. *Kraus S., Caratti o Garatti A., Garcia-Lopez R. et al.* V346 Norma: first post-outburst observations of an FU Orionis star //

- Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 462. — P. L61–L65. 1607.03114.
8. *Kóspál Á., Ábrahám P., Acosta-Pulido J. A. et al.* The outburst and nature of two young eruptive stars in the North America/Pelican Nebula Complex // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 527. — P. A133. 1011.4009.
 9. *Williams J. P., Cieza L. A.* Protoplanetary Disks and Their Evolution // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 49. — P. 67–117. 1103.0556.
 10. *Hartmann L., Herczeg G., Calvet N.* Accretion onto Pre-Main-Sequence Stars // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 54. — P. 135–180.
 11. *Kenyon S. J., Hartmann L. W., Strom K. M., Strom S. E.* An IRAS survey of the Taurus-Auriga molecular cloud // *Astron. J.* — 1990. — Vol. 99. — P. 869–887.
 12. *Scholz A., Froebrich D., Wood K.* A systematic survey for eruptive young stellar objects using mid-infrared photometry // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 430. — P. 2910–2922. 1301.3152.
 13. *Billot N., Morales-Calderón M., Stauffer J. R. et al.* Herschel Far-infrared Photometric Monitoring of Protostars in the Orion Nebula Cluster // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 753. — P. L35. 1208.0135.
 14. *Elbakyan V. G., Vorobyov E. I., Glebova G. M.* Variations in the accretion rate and luminosity in gravitationally unstable protostellar disks // *Astronomy Reports.* — 2016. — Vol. 60. — P. 879–893.
 15. *Audard M., Ábrahám P., Dunham M. M. et al.* Episodic Accretion in Young Stars // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 387–410. 1401.3368.
 16. *Armitage P. J., Livio M., Pringle J. E.* Episodic accretion in magnetically layered protoplanetary discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2001. — Vol. 324. — P. 705–711. astro-ph/0101253.
 17. *D’Alessio P., Cantö J., Calvet N., Lizano S.* Accretion Disks around Young Objects. I. The Detailed Vertical Structure // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 500. — P. 411–427. astro-ph/9806060.
 18. *Vorobyov E. I., Basu S.* The Origin of Episodic Accretion Bursts in the Early Stages of Star Formation // *Astrophys. J. Lett.* — 2005. — Vol. 633. — P. L137–L140. astro-ph/0510014.

19. Vorobyov E. I., Basu S. The Burst Mode of Protostellar Accretion // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 650. — P. 956–969. astro-ph/0607118.
20. Vorobyov E. I. Variable Accretion in the Embedded Phase of Star Formation // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 704. — P. 715–723. 0908.3645.
21. Vorobyov E. I., Basu S. Variable Protostellar Accretion with Episodic Bursts // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 805. — P. 115. 1503.07888.
22. Kim H. J., Evans N. J., II, Dunham M. M. et al. CO₂ Ice Toward Low-luminosity Embedded Protostars: Evidence for Episodic Mass Accretion via Chemical History // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 758. — P. 38. 1208.5797.
23. Poteet C. A., Pontoppidan K. M., Megeath S. T. et al. Anomalous CO₂ Ice toward HOPS-68: A Tracer of Protostellar Feedback // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 766. — P. 117. 1302.3883.
24. Lee J.-E. Chemical Evolution in VeLLOs // *Journal of Korean Astronomical Society.* — 2007. — Vol. 40. — P. 83–89. 0712.1866.
25. Visser R., Bergin E. A. Fundamental Aspects of Episodic Accretion Chemistry Explored with Single-point Models // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 754. — P. L18. 1206.5749.
26. Vorobyov E. I., Baraffe I., Harries T., Chabrier G. The effect of episodic accretion on the phase transition of CO and CO₂ in low-mass star formation // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 557. — P. A35. 1307.2271.
27. Frimann S., Jørgensen J. K., Padoan P., Haugbølle T. Protostellar accretion traced with chemistry. Comparing synthetic C¹⁸O maps of embedded protostars to real observations // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 587. — P. A60. 1512.00416.
28. Visser R., Bergin E. A., Jørgensen J. K. Chemical tracers of episodic accretion in low-mass protostars // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 577. — P. A102. 1503.04951.
29. Jørgensen J. K., Visser R., Williams J. P., Bergin E. A. Molecule sublimation as a tracer of protostellar accretion. Evidence for accretion bursts from high angular resolution C¹⁸O images // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 579. — P. A23. 1504.02974.
30. Banzatti A., Pontoppidan K. M., Bruderer S. et al. Depletion of Molecular Gas by an Accretion Outburst in a Protoplanetary Disk // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 798. — P. L16. 1412.1824.

31. *Owen J. E., Jacquet E.* Astro- and cosmochemical consequences of accretion bursts - I. The D/H ratio of water // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 446. — P. 3285–3296. 1410.6844.
32. *Taquet V., Wirström E. S., Charnley S. B.* Formation and Recondensation of Complex Organic Molecules during Protostellar Luminosity Outbursts // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 821. — P. 46. 1602.05364.
33. *Kochina O. V., Wiebe D. S., Kalenskii S. V., Vasyunin A. I.* Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects // *Astronomy Reports.* — 2013. — Vol. 57. — P. 818–832.
34. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
35. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.
36. *Kumar M. S. N., Contreras-Pena C., Lucas P. W., Thompson M. A.* Highly variable young massive stars in ATLASGAL clumps // *ArXiv e-prints.* — 2016. 1609.08711.
37. *Stamatellos D., Whitworth A. P., Hubber D. A.* Episodic accretion, protostellar radiative feedback, and their role in low-mass star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 427. — P. 1182–1193. 1209.0765.
38. *Connelly J. N., Bizzarro M., Krot A. N. et al.* The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk // *Science.* — 2012. — Vol. 338. — P. 651.
39. *Wurm G., Haack H.* Outward transport of CAIs during FU-Orionis events // *Meteoritics and Planetary Science.* — 2009. — Vol. 44. — P. 689–699.
40. *Ábrahám P., Juhász A., Dullemond C. P. et al.* Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star // *Nature.* — 2009. — Vol. 459. — P. 224–226. 0906.3161.

Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

ДИНАМИКА АСТЕРОИДОВ — КОМПАНЬОНОВ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Данная работа посвящена обзору динамики астероидов, сближающихся с Землей и движущихся в окрестности орбитального резонанса 1/1 с планетами. Рассмотрены основные резонансные характеристики — критический аргумент и резонансная щель, представлена классификация орбит (классический «головастик», подкова и квазиспутник). В качестве примера приведено исследование динамики некоторых астероидов в резонансе 1/1 с Венерой и Землей.

The paper deals with survey of dynamics of Near-Earth asteroids moving in vicinity of mean-motion resonance 1/1 with planets. The basic resonance characteristics are critical argument and resonance band. The orbital classification (tadpole, horseshoe, quasi-satellite) are presented. For example dynamics of some asteroids in mean-motion resonance 1/1 with Venus and the Earth are investigated.

Введение

Орбитальные резонансы оказывают существенное влияние на структуру как главного пояса астероидов, так и на динамику астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Особого внимания заслуживают объекты, движущиеся в резонансе 1/1 с большими планетами, так называемые компаньоны. Долгое время считали, что ни одна другая планета, кроме Юпитера, не может иметь своих троянцев. Открытие астероида 5261 Eureka показало, что это не так: 5261 Eureka, марсианский троянец, движется в окрестности треугольной точки либрации L_5 , отставая от Марса на $\sim 60^\circ$. Первым объектом, обнаруженным вблизи резонанса 1/1 с Землей, является 3753 Cruithne [1]. В настоящее время известно несколько астероидов, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с Венерой, Землей и Марсом, их движение изучается многими исследователями (см., например, [2–13]).

Исследование орбитальных резонансов в движении АСЗ представляет особый интерес, поскольку устойчивый резонанс позволяет сохранять определенные геометрические конфигурации в относительном движении астероида и больших планет [14]. А это при

благоприятных начальных условиях может служить защитным механизмом от тесных сближений [15, 16].

Резонансные характеристики

В данной работе исследуются резонансы, определяемые соизмеримостью средних движений исследуемого астероида и большой планеты. В качестве основных резонансных характеристик традиционно рассматриваются резонансная щель и критический аргумент.

Если существует соизмеримость средних движений астероида и планеты, то конфигурация данной системы характеризуется периодичностью. В этом случае взаимные возмущения, обусловленные конфигурацией системы, будут иметь один и тот же период, что усиливает возмущения [17]. Усиление возмущений происходит в момент соединения астероида и планеты, поэтому основным является выражение для долготы соединения, следовательно, критический (резонансный) аргумент для резонанса $1/1$ будет иметь вид $\beta = \lambda_0 - \lambda_j$, где λ_0, λ_j — средние долготы астероида и j -й планеты.

В качестве еще одной резонансной характеристики используется первая производная по времени от критического аргумента, так называемая резонансная щель. Согласно работе [18] будем считать, что астероид движется в α -резонансе $1/1$ с j -й планетой, если $\alpha = n_0 - n_j$ есть малая величина. Здесь n_0, n_j — средние движения соответственно астероида и j -й планеты. Величину α называют резонансной полосой или «щелью».

Будем считать, что астероид движется в окрестности резонанса, если α и β колеблются около значения точной соизмеримости, так что $|\beta - \beta_{mean}| \leq 180^\circ$ и $|\alpha| \leq \alpha_{max}$; β_{mean} — центр либраций критического аргумента, величина α_{max} характеризует границы резонансного движения и определяется по максимальной амплитуде колебаний критического аргумента β .

В ряде работ критический аргумент рассматривается в качестве основной характеристики резонанса. В работе [19] приводится следующее определение резонансного астероида: астероид является резонансным, если его критический аргумент либрирует или медленно циркулирует (период циркуляции больше чем 1 000 лет). Аналогичного определения придерживаются авторы работы [20]: к резонансным относятся астероиды, критический аргумент которых колеблется около неподвижного или смещающегося центра либрации. Однако резонансными могут быть астероиды, для которых в тече-

ние длительного времени сохраняется малая резонансная щель, но они не проходят через значение точной соизмеримости. В таком случае критический аргумент будет циркулировать [21]. Поэтому для исследования резонанса лучше использовать обе характеристики — резонансную щель и критический аргумент.

Резонанс 1/1 с большими планетами представляет особый интерес с точки зрения небесной механики, орбитальный период таких объектов незначительно отличается от орбитального периода планеты. Среди астероидов, движущихся в резонансе 1/1 (так называемых «компаньонов»), можно выделить три различных типа движения в системе координат, вращающейся с угловой скоростью планеты: классический «головастик» (tadpole), подкова (horseshoe) и квазиспутник (quasi-satellite) [22], что соответствует колебаниям критического аргумента около значений ± 60 , 180 и 0° соответственно.

Перечень АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы

Для того чтобы выявить астероиды, движущиеся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы, нами были проинтегрированы уравнения движения всех АСЗ на интервале времени (1016—3016 лет). Начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла на ноябрь 2016 г. [23]. Интегрирование уравнений движения выполнялось численно методом Эверхарта. Модель сил включала влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады и Весты. Все исследования выполнялись с помощью специально разработанного программного обеспечения [24], которое позволяет осуществлять высокоточное прогнозирование движения астероидов.

Результаты представлены в табл. 1, где показаны границы изменения резонансной щели и тип движения в соответствии с поведением критического аргумента: квазиспутник (QS) или подкова (H). В ходе исследования не было обнаружено ни одного астероида в окрестности резонанса 1/1 с Меркурием. Сложно сказать, связано это с тем, что Меркурий не способен удержать малое тело в соизмеримости средних движений, или мы имеем дело с эффектом наблюдательной селекции. Возможно, играют роль оба фактора.

Венере повезло чуть больше, — она имеет квазиспутник 2002 VE68. Следует отметить, что еще несколько астероидов движутся в окрестности резонанса с Венерой на некоторых интервалах времени, меньших рассматриваемых 2 000 лет.

Таблица 1. Перечень АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы

Объект	$\alpha, ''$	Тип движения
Венера		
2002 VE68	(-14.5, 14.9)	QS
Земля		
3753 Cruithne	(-20.7, 20.6)	QS
164207 2004 GU9	(-27.7, 28.2)	QS, H
255071 2005 UN6	(-29.6, 31.5)	QS, H
277810 2006 FV35	(-21.4, 16.6)	QS
419624 2010 SO16	(-27.8, 27.9)	H
469219 2016 HO3	(-35.7, 35.9)	QS, H
2001 GO2	(-40.7, 41.3)	H
2002 AA29	(-45.1, 45.5)	H
2010 TK7	(-19.2, 19.4)	QS
2013 LX28	(-14.2, 14.3)	QS
2014 OL339	(-17.8, 19.4)	QS
2015 SO2	(-37.7, 37.9)	H
2016 CA138	(-28.9, 29.0)	H, QS
2016 CO246	(-36.2, 36.5)	H

В пользу эффекта наблюдательной селекции относительно Меркурия и Венеры говорит большое число объектов в окрестности резонанса 1/1 с Землей. Таковых в настоящее время насчитывается 14, что дает нам возможность предположить, что аналогичные астероиды в окрестности резонанса с Венерой в настоящее время пока просто не открыты вследствие сложности наблюдений внутренней относительно Земли части Солнечной системы. Ответ на этот вопрос могут дать космические наблюдения.

Земля обладает пятью квазиспутниками (3753 Cruithne, 277810 2006 FV35, 2010 TK7, 2013 LX28, 2014 OL339), пять объектов движутся по подковообразным орбитам (419624 2010 SO16, 2001 GO2, 2002 AA29, 2015 SO2, 2016 CO246), остальные астероиды (164207 2004 GU9, 255071 2005 UN6, 469219 2016 HO3, 2016 CA138) меняют характер движения в течение рассматриваемых 2000 лет. Ни одного АСЗ, движущегося в окрестности треугольных точек либрации, об-

наружено не было. Чуть меньше половины из представленных астероидов нумерованные, то есть их орбита хорошо определена, два объекта открыты в 2016 г.

Динамика некоторых резонансных АСЗ

Рассмотрим динамику некоторых АСЗ в окрестности резонанса 1/1 с Венерой и Землей более подробно. В качестве примера представим астероид 2002 VE68 и разные типы движения в окрестности резонанса с Землей — 3753 Cruithne, 164207 2004 GU9 и 419624 2010 SO16. На рис. 1 показаны проекции их орбит на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Венеры и Земли, а в табл. 2 — эклиптические элементы орбиты на эпоху 08.11.2016. На рис. 2–5 представлена орбитальная эволюция перечисленных астероидов.

Таблица 2. Элементы орбит некоторых АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1/1 с планетами земной группы

Объект	a , а. е.	e	i , °
2002 VE68	0.72359313	0.41034857	9.007015
3753 Cruithne	0.99768950	0.51489660	19.806407
164207 2004 GU9	1.00133679	0.13614934	13.650181
419624 2010 SO16	1.00264554	0.07534635	14.521012

На рис. 2 показаны тесные сближения с Меркурием и Землей и эволюция резонансных характеристик для астероида 2002 VE68. Астероид 2002 VE68 сближается с Меркурием и Землей, однако сближения не очень тесные — за пределами соответствующих сфер Хилла. Тем не менее большое число сближений приводит к нерегулярным колебаниям резонансной щели в окрестности точной соизмеримости в пределах от -15 до $15''$ /сут. С начала интервала исследования (1016 г.) и до середины текущего тысячелетия критический аргумент либрирует около значения 0° с амплитудой порядка 40° , то есть астероид является квазиспутником Венеры. После 2500 г. центр либрации смещается (возможно, под влиянием многочисленных сближений), однако 2002 VE68 продолжает двигаться в устойчивом резонансе. Резонанс в данном случае служит защитным механизмом от сближений.

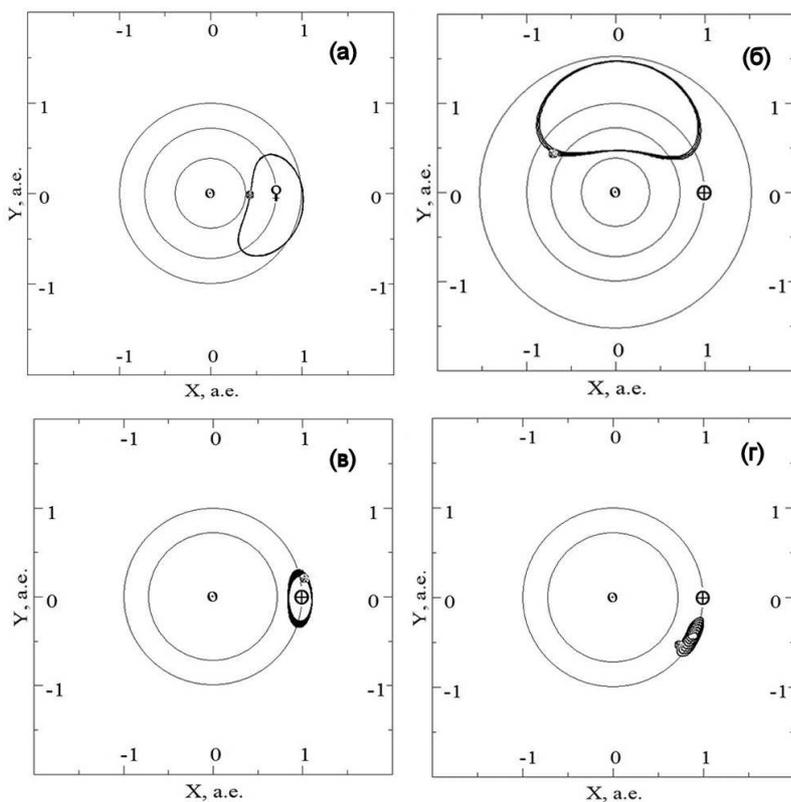


Рис. 1. Проекция орбит астероидов 2002 VE68 (а), 3753 Cruithne (б), 164207 2004 GU9 (в) и 419624 2010 SO16 (г) на плоскость эклиптики в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Венеры (а) и Земли (б, в, г) соответственно

Рисунок 3 содержит данные об орбитальной эволюции астероида 3753 Cruithne: сближения с Землей и Марсом и эволюцию резонансных характеристик. На всем рассмотренном интервале резонансная цель колеблется около нуля с небольшой амплитудой. Центр либрации критического аргумента немного смещен относительно 0° , амплитуда колебаний максимальна. Несмотря на наличие устойчивого резонанса, объект сближается с Землей, однако сближения не очень тесные.

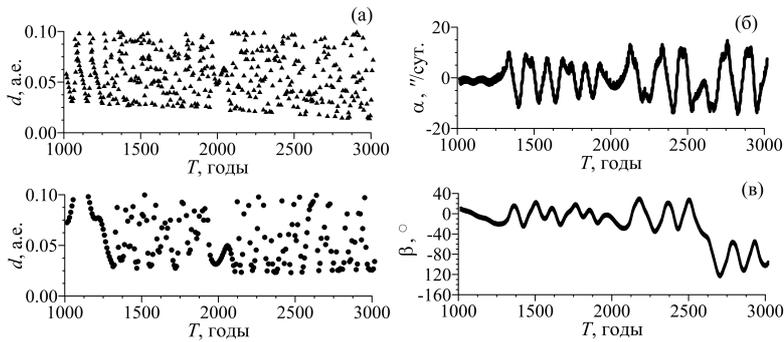


Рис. 2. Астероид 2002 VE68: сближения с Меркурием (Δ) и Землей (\bullet) (а), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

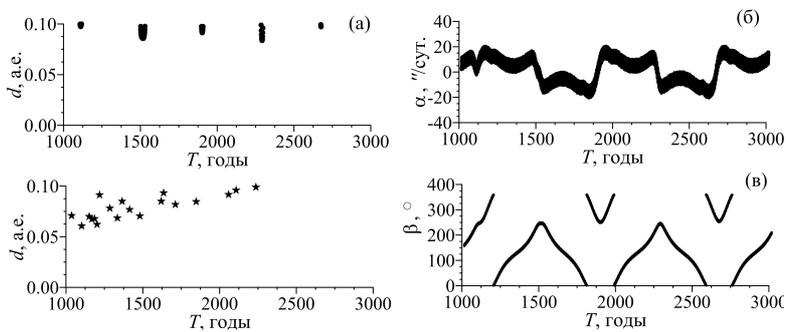


Рис. 3. Астероид 3753 Cruithne: сближения с Землей (\bullet) и Марсом ($*$) (а), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

Астероид 164207 2004 GU9 (рис. 4) чередует поведение, характерное для квазиспутника, и движение по подковообразной орбите. Причем в первом случае (± 500 лет от текущей эпохи) амплитуда колебаний резонансной щели существенно меньше и сближения отсутствуют, в остальное время сближения с Землей не тесные (такого же порядка, как и у 3753 Cruithne).

Последний изучаемый объект 419624 2010 SO16 (рис. 5) на рассматриваемом интервале не испытывает сближений с планетами, резонансная щель регулярно колеблется около нуля, а критический аргумент — около 180° .

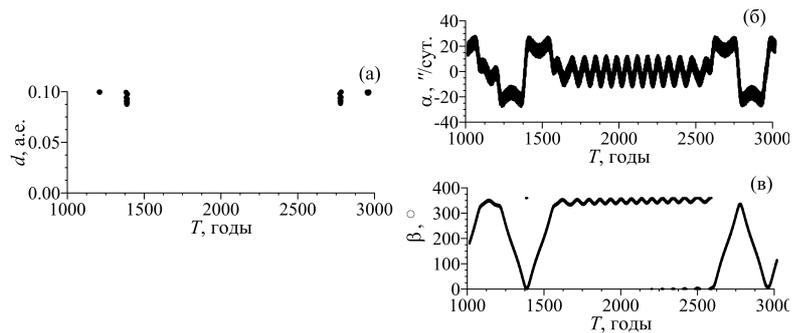


Рис. 4. Астероид 164207 2004 GU9: сближения с Землей (●)(а), эволюция резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

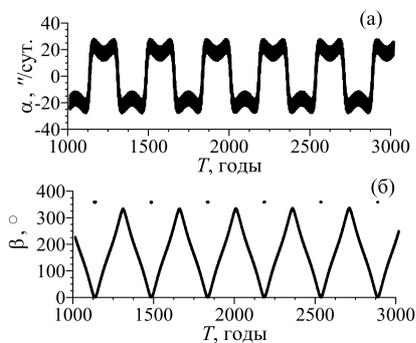


Рис. 5. Астероид 419624 2010 SO16: эволюция резонансной щели (а) и критического аргумента (б)

Заклучение

Наблюдения планет и астероидов показывают наличие в Солнечной системе большого числа соизмеримостей между средними движениями планет и астероидов. Говорят, что астероид и планета движутся вблизи некоторой соизмеримости, если периоды обращений астероида и планеты относятся между собой приблизительно как взаимно простые малые числа. Такую соизмеримость обычно называют орбитальным резонансом. Явление резонанса можно охарактеризовать величиной резонансной щели и критическим аргументом.

С точки зрения небесной механики особый интерес представляет резонанс 1/1. В настоящее время известны один астероид (2002 VE68), движущийся в окрестности резонанса 1/1 с Венерой на интервале времени ± 1000 лет от текущей эпохи, и 14 объектов в резонансе 1/1 с Землей на том же интервале времени. В работе кратко рассмотрена динамика некоторых из них.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 15–02–02868а.

Библиографические ссылки

1. *Wiegert P., Innanen K. A., Mikkola S.* The orbital evolution of Near-Earth asteroid 3753 // *Astron. J.* — 1998. — P. 2604–2613.
2. *Tancredi G.* An asteroid in a Earth-like orbit // *Celes. Mech. Dyn. Astron.* — 1998. — P. 119–132.
3. *Tabachnik S. A., Evans N. W.* Asteroids in the inner Solar system — I. Existence // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 319. — P. 63–79.
4. *Mikkola S., Brassier R., Wiegert P., Innanen K. A.* Asteroid 2002 VE68, a quasi-satellite of Venus // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 351. — P. L63–L65.
5. *Taylor P. A., Margot J.-L., Nicholson P. D. et al.* Properties of Horseshoe Object 2000 PH5 From Radar Observations // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #36* : Bulletin of the American Astronomical Society. — 2004. — Vol. 36. — P. 1181.
6. *Morais M. H. M., Morbidelli A.* Population of NEAs in Coorbital Motion with Venus // *American Astronomical Society, DPS meeting.* — 2005. — Vol. 37.
7. *Connors M., Stacey G., Brassier R., Wiegert P.* A survey of orbits of co-orbitals of Mars // *Planetary and Space Science.* — 2005. — Vol. 53, iss. 6. — P. 617–624.
8. *Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю.* Исследование либрационных движений АСЗ в окрестности резонанса 1/1 с большими планетами // *Материалы всероссийской конференции «Астероидно-кометная опасность — 2005»*, 3–7 окт. 2005 г. — СПб., 2005. — С. 79–82.

9. *Wajer P.* Dynamical evolution of Earth's quasi-satellites: 2004 GU9 and 2006 FV35 // *Icarus*. — 2010. — Vol. 209. — P. 488–493.
10. *Christou A. A., Asher D. J.* A long-lived horseshoe companion to the Earth // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 414. — P. 2965–2969.
11. *Галушина Т. Ю.* Исследование вероятностной орбитальной эволюции астероидов в окрестности резонанса 1 : 1 с Землей // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. — 2013. — Vol. 4, iss. 2. — P. 31–36.
12. *de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* Asteroid 2013 ND15: Trojan companion to Venus, PNA to the Earth // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 439. — P. 2970–2977.
13. *Галушина Т. Ю., Скрипниченко П. В., Титаренко Е. Ю.* Исследование динамики астероидов — компаньонов Венеры // *Изв. вузов. Физика*. — 2016. — Т. 59, вып. 9. — С. 65–72.
14. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 588.
15. *Быкова Л. Е.* Резонансные астероиды, сближающиеся с Землей // *Физика космоса : тр. 32-й Международ. студ. науч. конф., 3–7 февр. 2003 г.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2003. — С. 22–40.
16. *Галушина Т. Ю.* Динамика резонансных астероидов // *Физика космоса : тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., 1–5 февр. 2016 г.* — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — С. 43–58.
17. *Гринберг Р.* Орбитальный резонанс в движении естественных спутников // *Спутники планет / ред. Дж. Бернс*. — М., 1980. — С. 189–202.
18. *Гребеников Е. А., Рябов Ю. А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. — М. : Наука, 1978. — С. 128.
19. *Yoshikawa M.* Motions of asteroids at the Kirkwood Gaps II. On the 5/2, 7/2, and 2/1 resonances with Jupiter // *Icarus*. — 1991. — Vol. 92. — P. 94–117.
20. *Hahn G., Lagerkvist C.-I., Lindgren M., Dahlgren M.* Orbital evolution studies of asteroids near the 5/2 mean motion resonance with Jupiter // *Astron. Astrophys.* — 1991. — Vol. 246. — P. 603–618.

21. *Чеботарев Г. А.* Структура кольца малых планет // Малые планеты / ред. Н. С. Самойлова-Яхонтова. — М., 1973. — С. 151—203.
22. *Jackson J.* Retrograde satellite orbits // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1913. — Vol. 74. — P. 62—82.
23. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // In Asteroids, Comets, Meteors, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. — 1994. — P. 477—481.
24. *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.

ОТ «НЕПОДВИЖНОСТИ» ДО СВЕРХСКОРОСТЕЙ

В лекции затрагивается история кинематических моделей Галактики, постепенно усложняющийся теоретический анализ которых, а также все увеличивающиеся объемы наблюдательных данных привели к выявлению звезд с аномально быстрым пространственным движением. Исторически первое их определение, сложившееся с начала XIX в. как «летающие» звезды, сегодня трансформировано в обстоятельную классификационную схему, позволяющую установить причину кинематической аномальности. Еще в конце XX в. пределом аномальности считалось 10-кратное увеличение peculiar velocity звезд. Сегодня есть основания поднять этот предел еще выше — до релятивистских скоростей порядка $\sim c/2$. В лекции рассматриваются сценарии поддержания нового уровня аномальности и его физическая природа.

The lecture addresses the history of kinematic Galaxy models, the progress of which, as well as increasing observational data, led to the discovery of stars with abnormally rapid spatial movement. Historically their first definition originated in the beginning of XIX century as “flying” stars, today transformed into a detailed classification scheme that allows to identify the nature of the kinematic anomaly. At the end of the XX century the limit of the anomaly was considered as a 10-fold increase of the peculiar velocity of the stars. Today there are reasons to raise this limit even higher — up to relativistic velocities, of the order of $\sim c/2$. The lecture overviews scenarios maintaining the new level of anomaly and its physical nature

Из истории астрономии

... Это почти неподвижности мука
мчаться куда-то со скоростью звука,
зная прекрасно, что есть уже где-то
некто, летящий со скоростью света...

Л. Мартынов

В замечательном труде В. Г. Горбацкого «Лекции по истории астрономии» [1] отмечается, что еще в эпоху позднего неолита (6—5 тыс. лет до н. э.) практически одновременно в нескольких государствах на территориях Юго-Западной Азии, Северной Африки, Индии и Китая возникла потребность в долговременных наблюдениях за небесными светилами. Сегодня мы знаем, что эта «первая задача» наблюдательной астрономии была успешно решена, о чем свидетельствуют многочисленные находки в Вавилоне и Шумере каменных календарей с таблицами положений Солнца, Луны и планет, необходимых для сезонного земледелия. Кроме того, наблюдатели бронзового века заметили, что звезды неподвижны.

Этот вывод был разделен античными астрономами (323 г. до н. э.—300 г. н. э.) и постулирован в труде Архимеда (216 г. до н. э.) «Исчисление песчинок». Ссылаясь на Аристарха Самосского (310—230 гг. до н. э.), Архимед развивает идею о неподвижности звезд, находящихся на сфере очень большого радиуса по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца. Со временем наблюдения за звездами систематизировались, что привело к созданию каталогов. Наибольшую известность с античной эпохи снискал каталог Гиппарха (185—126 гг. до н. э.). К середине II в. н. э. каталог Гиппарха, содержащий сведения о 850 звездах с их эклиптическими координатами и звездными величинами, был дополнен данными Птолемея о еще 170 звездах с поправками долгот за прецессию, и на протяжении почти полутора тысячи лет он оставался незыблемым стандартом позиционной астрометрии.

В то время как кинематические схемы движения Солнца и Луны, а также теории видимого движения пяти тогда известных планет продолжали развиваться, мир звезд по-прежнему считался неподвижным, что было удобно в навигации для мореплавателей и путешественников. С изобретением арабскими астрономами астролябии и созданием раздела сферической геометрии точность наблюдений заметно улучшилась: птолемеевские данные не раз исправлялись с

учетом прецессии (Аль-Баттани, 858—929 гг.; Ас-Суфи, 908—986 гг.), но это не заронило сомнений в тезисе о неподвижности звезд.

Лишь с началом телескопической эры, связанной с именем Галилео Галилея (1564—1642), за которой последовал бурный технический прогресс в математике, механике, оптике, инженерии, парадигма о неподвижности была «разбита». В 1718 г. Эдмонд Галлей, производя сравнение данных своих наблюдений, выполненных для самых ярких звезд ночного неба Арктура, Сириуса и Проциона, с данными каталога Птолемея, впервые сделал вывод о собственном движении звезд. Спустя полвека Вильям Гершель, вычисляя собственное движение Солнца, нашел положение апекса (точки, куда направлена скорость движения Солнца) вблизи звезды λ Нег.

Наблюдения ярких звезд с заметным собственным движением (61 Суг, α Сеп и Вега) помогли разрешить проблему определения годичного параллакса звезд, отражающего обращение Земли вокруг Солнца, которая стояла перед астрономами со времен Коперника. Пока применялись визуальные методы астрометрии, только для самых ярких и самых близких звезд можно было определить координаты и измерить собственные движения. Но с изобретением фотографии (Жак Даггер, Жозеф Ньепс, 1839), которая дала мощный толчок развитию фотографических методов в астрометрии, позволивших сначала получать снимки Луны, затем Солнца, а в 1872 г. впервые сфотографировать спектр звезды Веги (Дрепер, США), определение собственных движений и относительных параллаксов стало массовым. Эти измерения позволили впервые оценить тангенциальную компоненту скорости звезды $v_T = 4.74 \cdot \mu r$ км/с, а с 60-х гг. XIX в. стало возможным определение лучевой компоненты скорости звезды v_r благодаря открытому Доплером эффекту смещения частоты излучаемых движущимся источником волн в зависимости от скорости его движения. С 1888 г. начались систематические измерения скоростей звезд в обсерваториях обоих полушарий, анализ которых позволил развить качественно новые методы изучения строения Галактики.

Вероятно, с этого момента крылатые слова Галилео Галилея «*E pur si muove!*» можно понимать в глобальном контексте, как относящиеся ко всей Галактике в целом.

Классификация звезд с аномальной кинематикой

Анализ данных о собственных движениях звезд и их пространственных скоростях оказался весьма плодотворным для исследования структуры Галактики. Каптейном была выявлена асимметрия движения звезд по направлению их скоростей, получившая название «двух потоков». Уже к середине 20-х гг. XX в. асимметрия хорошо укладывалась в модель дифференциального вращения Галактики, разработанную в 1927 г. Оортом и Линдбладом. Изучение различий звезд по их кинематическим свойствам и особенностям распределения в пространстве привело к открытию Бааде разных населений Галактики, звезды которых отличаются возрастом и химическим составом. К середине XX в. благодаря ряду теоретических работ Чандрасекара, Амбарцумяна и других был создан «кинематический портрет» Галактики с учетом всех ее подсистем, но некоторые звезды «упорно» не встраивались в общую картину движения. Это послужило введению термина *звезды с аномальной кинематикой*, природа которых оказалась много богаче, чем предполагалось сначала, что потребовало отдельной классификации.

Высокоскоростные звезды

В англоязычной версии эта группа *high-velocity stars* включает маломассивные объекты поздних спектральных типов, движущиеся с пространственными скоростями от 60 до 300 км/с. Это в несколько раз превосходит пекулярные скорости звезд диска (~ 20 – 30 км/с). Первые кандидаты в эту группу были обнаружены на рубеже XVIII–XIX вв.: звезда Лакайля 9352, 61 Суг, Грумбридж 1830, звезда Каптейна, звезда Бернарда и т. д. Идея Линдблада о дифференциальном вращении Галактики, состоящей из различных взаимопроникающих звездных подсистем, обращающихся вокруг общего центра, хорошо подошла для объяснения природы этих «летающих» высокоэксцентричных звезд. Населяющие медленно вращающуюся подсистему гало, эти звезды испытывают ускорение гравитационным полем Галактики во время пересечения ими плоскости галактического диска. На полярных орбитах звезды не испытывают дополнительного ускорения при падении в плоскость диска и дают наблюдательный эффект мнимого быстрого движения в направлении, обратном общему движению звезд быстровращающегося диска.

Убегающие звезды

В 60-е гг. XX в. была выделена вторая группа звезд с аномально высоким пространственным движением (100–300 км/с), названная по предложению Блау [2] в англоязычной версии *runaway stars*. В отличие от звезд первой группы представители второй участвуют в обратном движении — «убегают» из диска в гало. Как правило, это молодые ранних спектральных типов массивные звезды, природа которых, по-видимому, связана с двумя разными сценариями. В сценарии Поведы [3] рассматривается динамический выброс одной или нескольких звезд, обусловленный столкновительной активностью звезд в молодых рассеянных скоплениях, а также в звездных **O—B** ассоциациях диска. Сценарий Цвики [4] изучает распад тесной двойной системы (ТДС) вследствие взрыва сверхновой типа **SN I b, c**, в результате которого могла родиться *убегающая звезда*. Это жизнеспособный сценарий, дающий в доказательство одну характерную особенность, которая хорошо регистрируется в наблюдениях: головные ударные волны сжатого вещества межзвездной среды, производимые убегающими звездами, получившими импульс при взрыве звезды-компаньона. В настоящее время Пери с коллегами [5] создает фотокаталог убегающих звезд с фронтальными ударными дугами, изучение которых прольет свет на причины и условия образования убегающих звезд.

Быстро убегающие звезды

Если звезды первых двух групп были сначала открыты, а потом теоретически осмыслены, то объекты этой группы были предсказаны Напивацким и Силвой в 2008 г. [6] в рамках статистического анализа реконструированных траекторий выбросов для 96 убегающих звезд (рис. 1). Анализ диаграммы скорости в точке выброса от массы выброшенной звезды позволил выделить из общего распределения группу, состоящую из десяти звезд, получивших рабочее название *hyper-runaway stars*. Скорости этих звезд (300–500 км/с) превосходят галактическую скорость освобождения в точке их наблюдения, в гало, а реконструкция направления выброса указывает на верхние слои диска. Первое наблюдательное подтверждение существованию быстро убегающих звезд — объект HD271791 — сверхгигант спектрального типа В, открытый Хебером в 2008 г. [7].

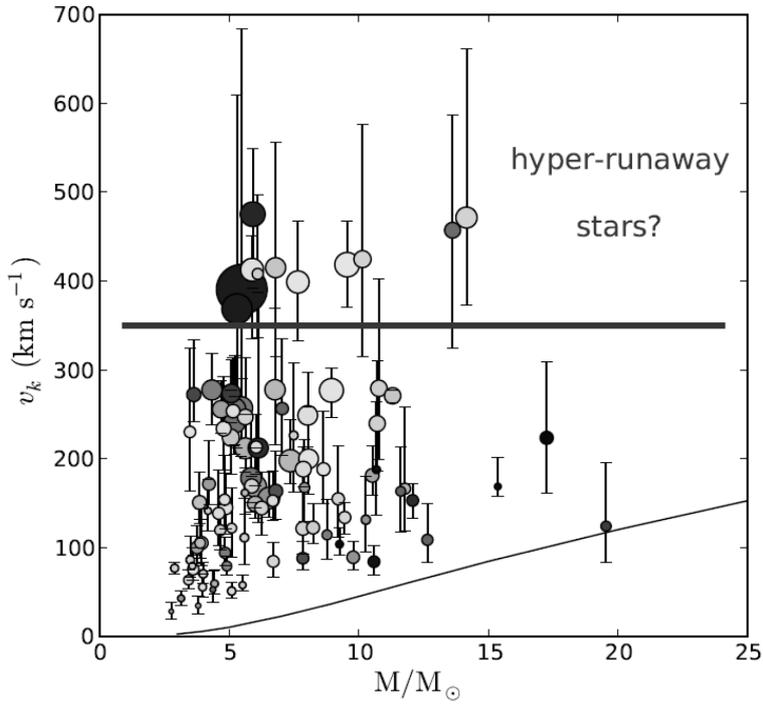


Рис. 1. Диаграмма скорости выброса убегающей из диска звезды как функция ее массы, взята из [6]. Нижняя линия показывает границу минимально возможной скорости звезды при заданной массе, с которой она успеет подняться на 1 кпк над галактической плоскостью за время жизни на Главной последовательности

Сверхскоростные звезды

В 2005 г. Уоррен Браун и его коллеги открыли объект **SDSS J090745.0+024507** спектрального типа **B9** на расстоянии 71 кпк от галактического центра с галактоцентрической скоростью 709 км/с [8], положивший начало новому классу звезд, названных в англоязычной версии *hypervelocity stars*. По определению звезда, чья скорость пространственного движения в несколько раз превосходит скорость убегания из Галактики на данном галактоцентрическом радиусе, называется сверхскоростной звездой (СЗ). Эти объекты были

предсказаны еще в 1988 г. Хиллзом [9], который рассмотрел задачу пролета ТДС в гравитационном поле Сверхмассивной Черной Дыры (СМЧД). Результаты 250 расчетов, учитывающих произвольную ориентацию ТДС ($1 M_{\odot} + 1 M_{\odot}$) по отношению к СМЧД (10^4 – $10^7 M_{\odot}$), показали, что при прохождении вблизи СМЧД на расстоянии 1–10 а. е. существует ненулевая вероятность выброса одного из компонентов ТДС со скоростью до 4 000 км/с.

К настоящему моменту открыто более двух десятков СЗ (рис. 2), что позволяет проводить статистические изучения и обобщать их свойства [10], указывающие на то, что СЗ — быстрые ротаторы спектрального типа **В0**–**В8** с массами выше $2.5 M_{\odot}$, эволюционный статус которых соответствует звездам Главной последовательности. Современные компьютерные лаборатории откликнулись потоком численных расчетов, моделирующих всевозможные сценарии рождения СЗ [11–13]. Все они реализованы в подходе классической задачи трех тел, которая позволяет оценить максимальные скорости выбросов в зависимости от перигрического сближения ТДС с СМЧД и от ее массы [14]. Но этот подход оставляет в стороне вопросы выживаемости звезды при ее выбросе. Поэтому нами была подключена вторая стадия моделирования, в которой звезда описывалась как структурированный объект в рамках задачи N тел [15]. Это позволило нам оценить полную вероятность образования СЗ в Галактике $9.3 \cdot 10^{-7}$ – $2.5 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$ [16, 17], согласующуюся с оценкой темпа выбросов, оцененного по наблюдательным данным заселенности галактического центра Жиллисеном [18] — $1.5 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$. Совпадение числа открываемых СЗ и наблюдаемых **В**-звезд в окрестности галактического центра, полагая, что это бывшие компаньоны СЗ в родительских двойных системах, разрушенных полем СМЧД, указывает на то, что сценарий Хиллза оказывается наиболее реалистичным.

Звезды с релятивистскими скоростями

Впервые предположения о возможности выброса *звезд с релятивистскими скоростями*, ЗРС, в классическом сценарии Хиллза были высказаны Тутуковым в обзоре, посвященном природе самых быстрых звезд [19]. Анализ приливного радиуса СМЧД $r_t \sim R \times (M_{SMBH}/M)^{1/3}$ и ее радиуса Шварцшильда $r_{sch} = 2GM_{SMBH}/c^2$ показывает, что привлечение более массивных СМЧД в сценарии Хиллза не гарантирует производства больших ускорений при выбросе звезды. Это потребовало модификации сценария Хиллза, в

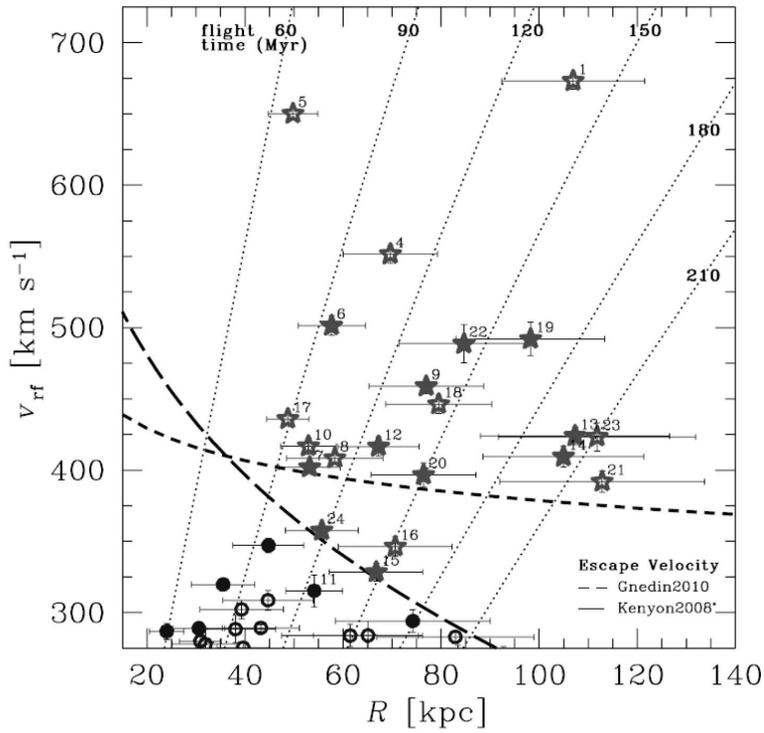


Рис. 2. Диаграмма галактоцентрической скорости выброса звезды в зависимости от галактоцентрического расстояния, взята из [10]. Звездочками отмечены не связанные с Галактикой объекты, кружками — связанные. Скорости выброса оценены в трехкомпонентной модели Галактики: балдж—диск—гало

котором один из компонентов ДС заменяется на СМЧД с меньшей массой, например, $10^5 M_{\odot}$. Впервые такое моделирование в рамках задачи трех тел было проведено Гилошоном и Лоебом (2015) [20].

Анализ 114 688 независимых экспериментов показал, что менее чем в 1 % случаев реализуется выброс звезды со скоростью порядка $1/3 \cdot c$ с учетом того, что подлет ДС происходил на расстоянии от главной СМЧД $\sim 10 r_{sch}$. Такие орбиты обладают кинетическим ресурсом для выброса ЗРС и были проверены в методике N-тел [21], представляющей своего рода «лупу», позволяющую разглядеть раз-

рушительные последствия выброса ЗРС при близких прохождениях ее родительской ДС к СМЧД (рис. 3). Критерий выброса звезды — положительный прирост полной удельной энергии $\Delta e > 0$ звезды за орбитальный виток: $v_{eject} = \sqrt{2 \cdot \Delta e}$.

Условие выброса СЗ из галактического центра, населенного СМЧД с массой $4.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$, согласно оценкам Ву и др. [22], $v_{eject} > 750$ км/с. Условие выброса ЗРС не является строгим: $v_{eject} > 0.27 \cdot c$. В [21] описаны конфигурации ДС, являющиеся кандидатами на выброс ЗРС, исследована динамика структурных изменений звезды после прохождения перицентра, оценено влияние орбитальной фазы ДС в перицентре по аналогии с солнечно-лунными приливами, а также обсуждается предел $c/2$ как максимально возможной скорости выброса.

Максимально возможная скорость выброса звезды в модифицированном сценарии Хиллза

Интересно оценить максимально возможную скорость выброса звезды в модифицированном сценарии Хиллза, то есть при участии двух СМЧД. По аналогии с классическим сценарием Хиллза максимально возможная скорость выброса реализуется за счет максимально возможного импульса, переданного звезде ее родительской СМЧД на расстоянии приливного радиуса $r_{t,3} = R_3 \cdot (M_2/M_3)^{1/3}$ во время прохождения перицентра центральной СМЧД. После чего каждый компонент ДС в системе их центра масс меняет свое направление на противоположное: $\vec{v}_2 \rightarrow \vec{v}_2 - 2\vec{v}_2 = -\vec{v}_2$ и $\vec{v}_3 \rightarrow \vec{v}_3 - 2\vec{v}_3 = -\vec{v}_3$. Здесь R_3, M_3, v_3 — радиус, масса и орбитальная скорость звезды; M_2, v_2 — масса и скорость родительской СМЧД.

Законы сохранения энергии и импульса для звезды и родительской СМЧД

$$\frac{M_2 v_2^2}{2} + \frac{M_3 v_3^2}{2} - \frac{GM_2 M_3}{r_{t,3}} = 0, \quad M_2 \vec{v}_2 + M_3 \vec{v}_3 = 0 \quad (1)$$

позволяют найти $|v_3| = M_2 \sqrt{2G(r_{t,3})^{-1}(M_2 + M_3)^{-1}}$.

Таким образом, максимальный переданный импульс звезде от родительской СМЧД составит $M_3 \cdot (2v_3)$.

Это значит, что максимальная скорость выброса звезды в области перицентра центральной СМЧД не может превышать величины $v_p + 2v_3$. Оценим скорость выброса из прироста энергии $E_{eject} = M_3/2 \times (v_p + 2v_3)^2 - M_3/2 \times v_p^2$ с учетом того, что $v_p \gg v_3$:

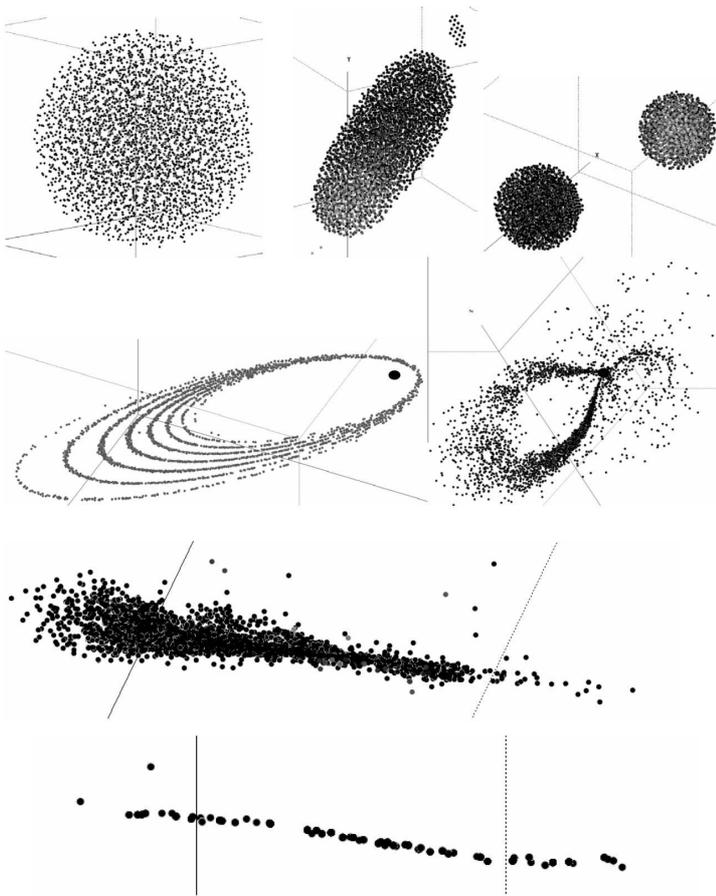


Рис. 3. Динамика структурных изменений звезды в избранных конфигурациях ДС ($1 M_{\odot} + 4.5 \cdot 10^5 M_{\odot}$), испытывающих захват гравитационным полем более массивной центральной СМЧД $4.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Демонстрируются различные виды разрушений звезды («кольцо» вокруг центральной СМЧД, «цепочка», «кометный хвост», «веер» и т. д.) в зависимости от начальных орбитальных параметров ДС и орбитальной фазы компонентов. Графики демонстрируют необходимость проведения модельных расчетов в постановке задачи N-тел как диагностирующей результаты выживания звезды

$$v_{eject} = \sqrt{\frac{2}{M_3} E_{eject}} \sim 2 \sqrt{v_p v_3}. \quad (2)$$

Полагая значение скорости в перицентре v_p , равное второй космической скорости $\sqrt{\frac{2GM_1}{r_p}}$, можно оценить, что, например, при динамическом захвате ДС ($4.5 \cdot 10^5 M_\odot + 4.5 M_\odot$) гравитационным полем центральной СМЧД с массой $M_1 = 4.5 \cdot 10^6 M_\odot$ на расстоянии приливного радиуса $r_p = 512 R_\odot$ максимально возможная скорость выброса, оцениваемая по формуле (2), оказывается $\sim 80\,000$ км/с.

Если увеличить массу родительской СМЧД до значения массы центральной СМЧД ($4.5 \cdot 10^6 M_\odot$), то максимально возможная скорость выброса звезды с массой $4.5 M_\odot$ увеличится до $115\,800$ км/с. С учетом эффекта туннелирования для $\beta = 1.15$ и $\beta = 1.89$ максимально возможная скорость выброса будет оцениваться как $124\,200$ и $160\,000$ км/с соответственно. К таким же пределам стремится максимальная скорость выброса звезды для варианта ДС ($4.5 \cdot 10^5 M_\odot + 4.5 M_\odot$) и центральной СМЧД с массой $4.5 \cdot 10^7 M_\odot$.

Для максимально ускоренного выброса звезды с массой $4.5 M_\odot$ необходима предельно возможная масса центральной СМЧД, которая оценивается $\sim 2.2 \cdot 10^8 M_\odot$ из условия равенства приливного радиуса для звезды, r_t^1 , и удвоенного шварцшильдовского радиуса центральной СМЧД, r_{sch}^1 . Это значит, что $r_t^1 = 1\,875 R_\odot$, а $r_{sch}^1 = 933 r_{sch}^1$. Оценка второй космической скорости на r_t^1 составляет $211\,550$ км/с. Полагая, что максимально возможный обмен импульсом между компонентами в ДС ($4.5 \cdot 10^5 M_\odot + 4.5 M_\odot$) возможен на приливном радиусе звезды в ДС — $r_t^3 = 238 R_\odot$, что соответствует оценке скорости по формуле (1) $v = 26\,850$ км/с, можно по формуле (2) оценить скорость выброса звезды как $v_{eject} = 2 \times \sqrt{211\,550 \times 26\,850} \sim 155\,000$ км/с.

Таким образом, в модифицированном сценарии Хиллза предельная скорость выброса звезды с массой $4.5 M_\odot$, входящей в состав ДС с родительской СМЧД массы $4.5 \cdot 10^5 M_\odot$, стремится к $c/2$.

Заклучение

Выбросы ЗРС не противоречат ОТО, созданной Эйнштейном 100 лет назад. Возможно, они будут детектированы уже в ближайших миссиях, готовящихся к запуску WFIRST, Euclid, JWST. Однажды, осознав движение звезд в пространстве, человек постепенно пришел к пониманию их движения во времени, то есть эволюции, многообразия форм которой неисчерпаемо и простирается далеко за горизонты современных исследований.

Приложение

Задача движения N-тел

Задача движения N-тел решается с использованием численного алгоритма скоростной формулировки, разработанного в начале 70-х гг. XX в. для проблем молекулярной динамики [23]. В данном случае алгоритм используется для интегрирования уравнений движения $N = 4000$ гравитирующих элементов, из которых «состоит» звезда. Обе СМЧД рассматриваются точечными объектами.

Каждый элемент звезды представлен сферой фиксированного радиуса a . Элементам запрещено подходить на расстояние, меньшее $2a$. В начальный момент задается однородное распределение массы элементов по объему звезды. Это простая модель звезды, газовое давление в которой имитируется запретом на сближение элементов, то есть звезда может менять форму и разрушаться (рис. 3) при воздействии приливных сил, сохраняя суммарный объем фрагментов.

Уравнения движения гравитирующих N элементов, на которые разбивается звезда, записываются в ньютоновской форме. В декартовых координатах система уравнений движения N элементов имеет следующий вид:

$$M_k \cdot \frac{d^2 x_k}{dt^2} = -\frac{\partial U_{ij}}{\partial x_k}, \quad (3)$$

$$M_k \cdot \frac{d^2 y_k}{dt^2} = -\frac{\partial U_{ij}}{\partial y_k}, \quad (4)$$

$$M_k \cdot \frac{d^2 z_k}{dt^2} = -\frac{\partial U_{ij}}{\partial z_k}. \quad (5)$$

Значения k пробегает от 1 до N . Численная реализация, построенная на скоростной формулировке алгоритма Верлета и Вейса [23], представляет собой консервативную схему: полная масса и полная энергия сохраняются на каждом счетном шаге, который условно разбивается на четыре этапа:

а) расчет пространственных координат для k -го компонента на $n + 1$ шаге:

$$x_k^{n+1} = x_k^n + v_{xk}^n \cdot h + a_{xk}^n \cdot \frac{h^2}{2}, \quad (6)$$

$$y_k^{n+1} = y_k^n + v_{yk}^n \cdot h + a_{yk}^n \cdot \frac{h^2}{2}, \quad (7)$$

$$z_k^{n+1} = z_k^n + v_{zk}^n \cdot h + a_{zk}^n \cdot \frac{h^2}{2}; \quad (8)$$

б) расчет пространственных скоростей для k -го компонента на $n + \frac{1}{2}$ шаге:

$$v_{xk}^{n+\frac{1}{2}} = v_{xk}^n + a_{xk}^n \cdot \frac{h}{2}, \quad (9)$$

$$v_{yk}^{n+\frac{1}{2}} = v_{yk}^n + a_{yk}^n \cdot \frac{h}{2}, \quad (10)$$

$$v_{zk}^{n+\frac{1}{2}} = v_{zk}^n + a_{zk}^n \cdot \frac{h}{2}; \quad (11)$$

в) расчет ускорений для k -го компонента на $n + 1$ шаге:

$$a_{xk}^{n+1} = \sum_{i=1, i \neq k}^N G \cdot M_i \cdot \frac{x_i^{n+1} - x_k^{n+1}}{|r_{ik}^{n+1}|^3}, \quad (12)$$

$$a_{yk}^{n+1} = \sum_{i=1, i \neq k}^N G \cdot M_i \cdot \frac{y_i^{n+1} - y_k^{n+1}}{|r_{ik}^{n+1}|^3}, \quad (13)$$

$$a_{zk}^{n+1} = \sum_{i=1, i \neq k}^N G \cdot M_i \cdot \frac{z_i^{n+1} - z_k^{n+1}}{|r_{ik}^{n+1}|^3}; \quad (14)$$

г) расчет пространственных скоростей для k -го компонента на

$n + 1$ шаге:

$$v_{xk}^{n+1} = v_{xk}^{n+\frac{1}{2}} + a_{xk}^{n+1} \cdot \frac{h}{2}, \quad (15)$$

$$v_{yk}^{n+1} = v_{yk}^{n+\frac{1}{2}} + a_{yk}^{n+1} \cdot \frac{h}{2}, \quad (16)$$

$$v_{zk}^{n+1} = v_{zk}^{n+\frac{1}{2}} + a_{zk}^{n+1} \cdot \frac{h}{2}. \quad (17)$$

Для выбранного варианта орбиты ДС с заданным r_p моделируется один орбитальный «виток» вокруг центральной СМЧД. Шаг интегрирования уравнений движения равен $h = 30$ с, что отвечает оптимальному выбору временного интервала при прохождении области перицентра с точки зрения сохранения полной энергии с точностью $< 10^{-6}$.

Библиографические ссылки

1. Горбачук В. Г. Лекции по истории астрономии. — СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. — С. 198.
2. Blaauw A. On the origin of the O- and B-type stars with high velocities (the "run-away" stars), and some related problems // Bull. Astron. Inst. Neth. — 1961. — Vol. 15. — P. 265.
3. Poveda A., Ruiz J., Allen C. Run-away Stars as the Result of the Gravitational Collapse of Proto-stellar Clusters // Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya. — 1967. — Vol. 4. — P. 86—90.
4. Zwicky F. Morphological astronomy. — 1957. — P. 299.
5. Peri C. S., Araudo A. T., Benaglia P. et al. Analysis of the spectral energy distribution from a runaway star bow shock // Rev. Mex. Astron. Astrofis. — 2011. — Vol. 40. — P. 156.
6. Napiwotzki R., Silva D. V. Runaway and hypervelocity stars. The supernova connection // Mem. S. A. It. — 2012. — Vol. 83. — P. 272—276.
7. Heber U., Edelmann H., Napiwotzki R. et al. The B-type giant HD 271791 in the Galactic halo. Linking run-away stars to hyper-velocity stars // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 483. — P. 21—24.
8. Brown W. R., Geller M. J., Kenyon S. J., Kurtz M. J. Discovery of an unbound Hypervelocity Star in the Milky Way halo // Astrophys. J. — 2005. — Vol. 622. — P. 33—36.

9. *Hills J. G.* Hyper-velocity and tidal stars from binaries disrupted by a massive Galactic black hole // *Nature*. — 1988. — Vol. 331. — P. 687–689.
10. *Brown W. R., Geller M. J., Kenyon S. J.* MMT Hypervelocity Star survey. III. The complete survey // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 787. — P. 89–101.
11. *O’Leary R. M., Loeb R. A.* Production of hypervelocity stars through encounters with stellar-mass black holes in the Galactic Centre // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — Vol. 383. — P. 86–92.
12. *Yu Q., Tremaine S.* Ejection of Hypervelocity Stars by the (Binary) Black Hole in the Galactic Center // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 599. — P. 1129–1138.
13. *Miralda-Escude J., Gould A.* A Cluster of Black Holes at the Galactic Center // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 545. — P. 847–853.
14. *Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В.* Разрушение Тесных Двойных Систем в гравитационном поле Сверхмассивной Черной Дыры и образование Сверхскоростных Звезд // *Астрон. журн.* — 2014. — Т. 91. — С. 1–11.
15. *Dryomova G. N., Dryomov V. V., Tutukov A. V.* Survival probability for a hypervelocity star in close neighborhood of a supermassive black hole // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 1–8.
16. *Дремова Г. Н., Дремов В. В., Орлов В. В. и др.* Вероятность образования Сверхскоростной Звезды в Галактике // *Астрон. журн.* — 2015. — Т. 92. — С. 1–18.
17. *Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В.* Оценка вероятности захвата Двойной Системы окрестностью Сверхмассивной Черной Дыры // *Астрон. журн.* — 2016. — Т. 93. — С. 1–7.
18. *Gillisen S.* Stellar dynamics in the Galactic Center // *International workshop Modest-13, Star clusters across cosmic time, Almaty*. — 2013. — Vol. 692. — P. 23.
19. *Тутуков А. В., Федорова А. В.* Природа самых быстрых звезд // *Астрон. журн.* — 2009. — Т. 86. — С. 902–913.
20. *Guillochon J., Loeb A.* The Fastest Unbound Stars in the Universe // *Astrophys. J.* — 2015. — Т. 806. — С. 124–144.
21. *Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В.* Звезды с релятивистскими скоростями в сценарии Хиллза // *Астрон. журн.* — 2016. — В печати.

22. *Wu X., Famaey B., Gentile G. u dp.* Milky Way potentials in cold dark matter and Modified Newtonian Dynamics. Is the Large Magellanic Cloud on a bound orbit? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — T. 386. — C. 2199–2208.
23. *Verlet L., Weis J. J.* Equilibrium Theory of Simple Liquids // *Phys. Rev.* — 1972. — P. 939–952.

В. В. Емельяненко
Институт астрономии РАН

ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Малые тела представляют собой наиболее многочисленную и динамичную часть Солнечной системы. Они играют важную роль в эволюции Солнечной системы благодаря процессам миграции и соударениям с планетами и Солнцем. По современным представлениям, малые тела сохранили в своем составе первичное вещество, поэтому они представляют первостепенный интерес и для решения вопросов образования Солнечной системы. Исследование долговременной динамики и взаимосвязи различных популяций малых тел затруднено вследствие их сложной динамической эволюции, являющейся комбинацией как регулярных, так и хаотических процессов. В обзоре рассматриваются как основные проблемы миграции и происхождения малых тел, так и современные методы изучения долговременной эволюции их орбит. Особое внимание уделено новым воззрениям на образование и структуру кометной популяции, возникшим после обнаружения далеких транснептуновых объектов и осуществления недавних космических миссий Rosetta и New Horizons.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16–02–00805, а также Программы 7 фундаментальных научных исследований Президиума РАН.

И. И. Зинченко
Институт прикладной физики РАН
Нижегородский государственный университет

ДИСКИ И БИПОЛЯРНЫЕ ИСТЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Ключевым вопросом для понимания механизмов образования массивных звезд является наличие околозвездных дисков. В последнее время, благодаря появлению новых инструментов, были получены убедительные свидетельства присутствия таких дисков у звезд с массами до $\sim 30\text{--}60 M_{\odot}$. Признаком дисковой аккреции являются также биполярные истечения. В данном обзоре мы приводим результаты исследований дисков и биполярных истечений в областях образования массивных звезд.

The key question for understanding mechanisms of high mass star formation is the presence of circumstellar disks. Recently, due to new instruments available, convincing evidences for existence of such disks around stars with the masses up to $\sim 30\text{--}60 M_{\odot}$ have been obtained. Bipolar outflows can also serve as indicators of the disk accretion. In this review we present results of the studies of disks and bipolar outflows in regions of high mass star formation.

Введение

Хорошо установлено, что процесс образования звезд с массой порядка солнечной включает в себя формирование диска, дисковую аккрецию и возникновение высокоскоростных биполярных истечений вдоль оси (например, [1, 2]).

Что касается массивных звезд ($M \gtrsim 8\text{--}10 M_{\odot}$), то вопрос о механизмах их формирования менее ясен. В таких звездах ядерные реакции начинаются еще в процессе накопления массы. Радиационное давление излучения массивной протозвезды может остановить дальнейшую аккрецию. Проблема в том, как избежать фрагментации массивного протозвездного ядра. Рассматриваются различные сценарии процесса образования массивных звезд [3], включая такие экзотические, как слияние звезд малой массы [4].

Естественно, для ответа на возникающие вопросы требуется как развитие теоретических моделей, так и наблюдения, которые могли бы их подтвердить. Ключевым является вопрос о наличии дисков вокруг молодых массивных (прото)звезд и их свойствах. Кроме того, важно понять, какие механизмы приводят к появлению наблюдаемых биполярных истечений от таких объектов, связаны ли они с дисковой аккрецией или нет.

Наблюдательные исследования областей образования массивных звезд затрудняются тем обстоятельством, что они находятся далеко от нас (~ 1 кпк и дальше). Требуемое угловое разрешение может быть достигнуто только с помощью интерферометров. Введенная недавно в строй Большая Миллиметровая/субмиллиметровая решетка в Атакаме (ALMA) является сейчас основным инструментом для исследования таких объектов, с ее помощью уже получены первые интересные результаты. Исследования дисков вокруг массивных звезд ведутся и на других интерферометрах (SMA, NOEMA, ATCA, VLA). Ниже мы приведем некоторые результаты таких исследований, в частности, полученные нами данные.

Наблюдения дисков и биполярных потоков в областях образования массивных звезд

Попытки наблюдений дисков вокруг массивных звезд предпринимались уже достаточно давно. Первые наблюдения довольно большой выборки (12 объектов) были выполнены в работе [5] при помощи ATCA (Australia Telescope Compact Array) в высокочастотных линиях аммиака. Признаки вращения были обнаружены в половине источников, но нигде не было явных свидетельств кеплеровского характера вращения.

В последние годы появились данные высокого качества с ALMA, SMA и VLA. В частности, в работе [6] приводятся результаты наблюдений на ALMA массивной протозвезды AFGL 4176. Получены убедительные свидетельства наличия массивного ($M \sim 10 M_{\odot}$) диска, вращающегося по кеплеровскому закону вокруг центрального объекта с массой $\sim 25 M_{\odot}$ (звезда класса O7).

В недавней работе [7] получены данные о наличии диска с массой 2–3 M_{\odot} вокруг звезды с массой ~ 30 –60 M_{\odot} G11.92–0.61 MM2. На сегодняшний день это, видимо, наиболее массивная звезда с обнаруженным диском. В линии CO наблюдается биполярное истечение в

направлении, перпендикулярном плоскости диска. Наблюдения проводились на SMA с разрешением $\sim 0.5''$.

При помощи интерферометрии в среднем ИК диапазоне на VLTI/MIDI проведен обзор 24 объектов промежуточной и большой массы с целью поиска околозвездных дисков [8]. Почти во всех объектах обнаружены вытянутые структуры. Однако неясно, относятся ли они к диску или к истечениям. Размеры этих структур составляют $\lesssim 100$ а. е.

Нами при помощи SMA проведены детальные исследования комплекса звездообразования S255 [9, 10]. Он состоит из двух основных массивных сгустков — S255IR и S255N, которые находятся на разных стадиях эволюции. Наблюдения с разрешением $\sim 0.4''$ выявили в S255IR вращающийся диск вокруг молодой массивной звезды с массой $\sim 20 M_{\odot}$ (рис. 1). Закон вращения может быть кеплеровским, хотя угловое разрешение недостаточно для надежных выводов. Масса горячего (~ 150 K) газа в диске невелика, $\sim 0.3 M_{\odot}$.

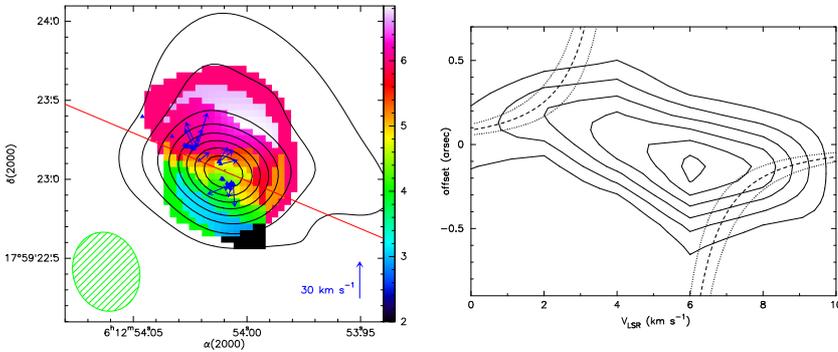


Рис. 1. Слева — карта распределения скоростей в S255IR-SMA1 по наблюдениям линии $4_2 - 3_1$ E CH_3OH . Контуры — изофоты излучения в континууме на волне 1.2 мм. Синие треугольники — мазеры H_2O . Стрелками показаны их собственные движения. Прямая линия — ось джета, наблюдаемого в ИК диапазоне. Справа — диаграмма позиция—скорость для той же линии вдоль сечения, перпендикулярного оси джета. Штриховые линии соответствуют кеплеровскому вращению вокруг объекта с массой $20 M_{\odot}$ и углом наклона диска 25° . Пунктирные линии соответствуют углам наклона $25 \pm 5^\circ$. Рисунки взяты из работы [10]

Интересно, что угол наклона диска, полученный из диаграммы позиция—скорость (рис. 1), не согласуется с найденным из недавних

наблюдений собственных движений мазеров в этой области методом РСДБ [11]. Из этой работы следует, что угол наклона гораздо больше и диск должен быть виден скорее с ребра. Изображение в среднем ИК диапазоне [8] также соответствует сильно наклоненному диску. Нужно, однако, учесть, что размер диска, видимого в ИК диапазоне, на порядок меньше наблюдаемого в молекулярных линиях. Не исключено, что ориентация «внутреннего» и «внешнего» дисков различны. Такое предположение делалось и в нашей работе [10]. Из наблюдений молекулярных линий следует, что фактор заполнения диаграммы направленности очень мал (~ 0.2). Для диска, видимого «плашмя», это может указывать на его сильно неоднородную (фрагментарную) структуру. К этому вопросу мы вернемся позже.

От этого диска наблюдаются высокоскоростные биполярные истечения, которые наиболее вероятно ускоряются ударными волнами, возникающими при эпизодических выбросах вещества из центра (рис. 2). По данным SMA, прослеживаются по крайней мере два таких события с интервалом в несколько тысяч лет [10]. Более старое протяженное истечение наблюдается в линиях CO (рис. 2, слева). В линиях HCN, HCO⁺ и CS, которые возбуждаются при более высоких концентрациях газа, чем CO, видно более компактное истечение, ассоциирующееся с излучением в ИК линии ионизованного железа (рис. 2, справа). Последнее возникает на фронтах ударных волн. Упомянутые выше РСДБ наблюдения мазеров H₂O [11] указывают на еще одно, совсем недавнее подобное событие. Это согласуется с представлением о фрагментарной структуре диска, что ведет к эпизодической аккреции. Это представление подкрепляется недавними наблюдениями вспышки метанольного мазера в этом объекте [12], а также вспышкой в ИК диапазоне [13].

Вторая массивная конденсация в этом комплексе звездообразования, S255N, по всем признакам находится на более ранней стадии эволюции [14]. Высокая светимость в ИК диапазоне [15], наличие ультракомпактной зоны Н II [16] и метанольного мазера I класса на частоте 44 ГГц [17] указывают на формирование массивных звезд. В работах [9, 14] сообщалось о наблюдениях высокоскоростных истечений в этой области, однако увидеть вращение центрального сгустка не удалось. Недавно более тщательный анализ имеющихся данных показал, что в центре имеется вытянутая структура, имеющая признаки вращения вокруг оси, примерно перпендикулярной направлению биполярного истечения (рис. 3) (см.: Землянуха и др., готовится к печати). Распределение яркости и кривая вращения указывают на

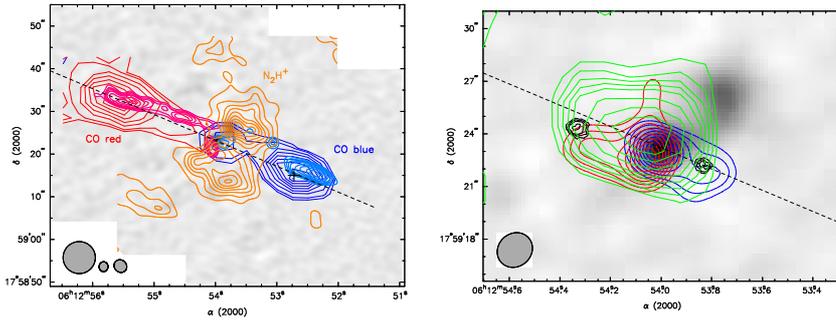


Рис. 2. Слева — карты излучения в крыльях линии CO(3–2) по наблюдениям на 30-м телескопе IRAM (толстые контуры) и на SMA (тонкие контуры). Фон — излучение в континууме на волне 0.8 мм. Показаны также контуры излучения в линии N₂H⁺(3–2). Справа — карты излучения в крыльях линии HCO⁺(4–3) на фоне излучения в континууме на волне 0.8 мм. Черные контуры показывают компактные области излучения Fe II. Приведены также контуры излучения в континууме на частоте 15 ГГц по архивным данным VLA. Штриховая линия показывает ось джета. Рисунки взяты из работы [10]

то, что молекулярное излучение, вероятно, формируется в видимом с ребра торе диаметром несколько тысяч а. е. вокруг (прото)звезды. Любопытно, что оценка массы по кривой вращения дает довольно низкую величину, что не согласуется с приведенными выше аргументами в пользу присутствия массивной протозвезды.

Вообще, высокоскоростные биполярные истечения наблюдаются повсеместно в областях образования массивных звезд [18]. Для них справедливы примерно те же закономерности, что и для истечений при формировании звезд с массой порядка солнечной. Есть и свои особенности, например, увеличение угла раскрытия с ростом светимости. В то же время механизмы образования истечений, видимо, могут быть разными.

Модели

Имеется несколько основных видов моделей формирования биполярных молекулярных потоков [18, 19]. В одних из них ускорение молекулярного газа производится быстрыми джетами, которые формируются в аккреционных дисках вокруг протозвезд. Другие моде-

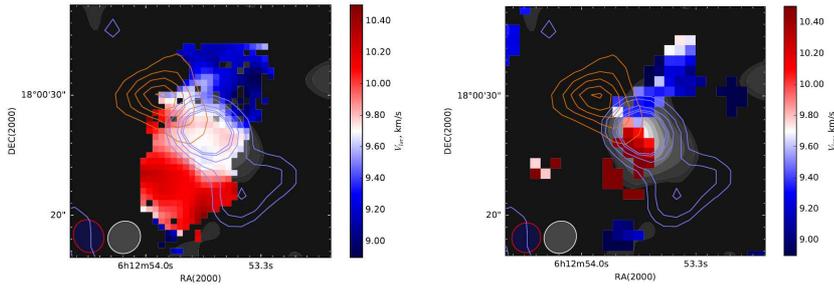


Рис. 3. Карты распределения лучевой скорости в S255N в линиях NH_3 (1,1) (слева) и $\text{C}^{34}\text{S}(6-5)$ (справа) на фоне излучения в континууме на волне 1.2 мм. Контурсы — изофоты излучения в крыльях линии $\text{CO}(2-1)$, которые показывают излучение высокоскоростного газа (Землянуха и др.).

ли объясняют ускорение молекулярного газа звездным ветром. Еще один класс моделей («циркуляционный») предполагает, что молекулярное истечение представляет собой вещество окружающего облака, падавшее на центральную протозвезду и отброшенное от нее магнитогидродинамическими силами. Разные модели предсказывают разную морфологию истечений и разные зависимости физических параметров от расстояния до центрального источника. Сравнение с наблюдениями показывает, что в разных случаях предпочтительными оказываются разные модели. Например, истечения от наиболее массивных протозвезд с большим углом раскрытия, по-видимому, лучше описываются моделью звездного ветра, а многие высококоллимированные истечения от протозвезд меньшей массы — моделями, где основную роль играет головная ударная волна джета. Они также хорошо согласуются с наблюдениями объектов Хербига—Аро и излучения молекулярного водорода в этих областях. Вообще, наиболее адекватными, видимо, являются комбинированные модели, которые включают в себя как компоненту, связанную с джетом, так и более медленный звездный ветер.

Имеется ряд работ, посвященных моделированию образования массивных звезд через дисковую аккрецию (см., например, [20, 21] и ссылки в них). Они показывают, что такой процесс возможен вплоть до самых больших наблюдаемых масс. Хотелось бы отметить недавнюю работу [22], где на основе численного гидродинамического моделирования показано, что такие диски могут иметь сильно неодно-

родную фрагментарную структуру, что приводит к эпизодической аккреции в согласии с упомянутыми выше наблюдениями S255IR.

Заключение

Появляется все больше свидетельств того, что формирование массивных звезд происходит путем дисковой аккреции. Диски, по видимому, сильно неоднородны, что ведет к эпизодической аккреции и проявляется в виде эпизодических вспышек и выбросов вещества.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-02-06098.

Библиографические ссылки

1. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565–687. 0707.3514.
2. *Inutsuka S.-I., Machida M., Matsumoto T. et al.* Low-Mass Star Formation: From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks // *EAS Publications Series : EAS Publications Series.* — 2016. — Vol. 75. — P. 219–226.
3. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
4. *Bonnell I. A., Bate M. R., Zinnecker H.* On the formation of massive stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 298. — P. 93–102. [arXiv:astro-ph/9802332](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9802332).
5. *Beuther H., Walsh A. J., Longmore S. N.* Hot High-Mass Accretion Disk Candidates // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2009. — Vol. 184. — P. 366–386. 0909.0691.
6. *Johnston K. G., Robitaille T. P., Beuther H. et al.* A Keplerian-like Disk around the Forming O-type Star AFGL 4176 // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 813. — P. L19. 1509.08469.
7. *Ilee J. D., Cyganowski C. J., Nazari P. et al.* G11.92-0.61 MM1: a Keplerian disc around a massive young proto-O star // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 4386–4401. 1608.05561.
8. *Boley P. A., Linz H., van Boekel R. et al.* The VLTI/MIDI survey of massive young stellar objects. Sounding the inner regions

- around intermediate- and high-mass young stars using mid-infrared interferometry // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A24. 1308.4282.
9. *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. 1206. 5906.
 10. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
 11. *Burns R. A., Handa T., Nagayama T. et al.* H₂O masers in a jet-driven bow shock: episodic ejection from a massive young stellar object // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 460. — P. 283–290. 1604.05682.
 12. *Fujisawa K., Yonekura Y., Sugiyama K. et al.* A flare of methanol maser in S255 // *The Astronomer’s Telegram.* — 2015. — Vol. 8286.
 13. *Stecklum B., Caratti o Garatti A., Cardenas M. C. et al.* The methanol maser flare of S255IR and an outburst from the high-mass YSO S255IR-NIRS3 - more than a coincidence? // *The Astronomer’s Telegram.* — 2016. — Vol. 8732.
 14. *Wang Y., Beuther H., Bik A. et al.* Different evolutionary stages in the massive star-forming region S255 complex // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 527. — P. A32. 1011.3575.
 15. *Cyganowski C. J., Brogan C. L., Hunter T. R.* Evidence for a Massive Protocluster in S255N // *Astron. J.* — 2007. — Vol. 134. — P. 346–358. 0704.0988.
 16. *Kurtz S., Churchwell E., Wood D. O. S.* Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 91. — P. 659–712.
 17. *Kurtz S., Hofner P., Álvarez C. V.* A Catalog of CH₃OH 7₀-6₁ A⁺ Maser Sources in Massive Star-forming Regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2004. — Vol. 155. — P. 149–165.
 18. *Arce H. G., Shepherd D., Gueth F. et al.* Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions // *Protostars and Planets V.* — 2007. — P. 245–260. astro-ph/0603071.
 19. *Cabrit S., Raga A., Gueth F.* Models of Bipolar Molecular Outflows // *Herbig-Haro Flows and the Birth of Stars* / ed. by

- B. Reipurth, C. Bertout : IAU Symposium. — 1997. — Vol. 182. — P. 163–180.
20. *Kuiper R., Klahr H., Beuther H., Henning T.* Three-dimensional Simulation of Massive Star Formation in the Disk Accretion Scenario // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 732. — P. 20. 1102.4090.
21. *Klassen M., Pudritz R. E., Kuiper R. et al.* Simulating the Formation of Massive Protostars. I. Radiative Feedback and Accretion Disks // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 823. — P. 28. 1603.07345.
22. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.

СТРУКТУРА ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Результаты работы космического телескопа им. Гершеля подтвердили давнюю идею о том, что межзвездные молекулярные облака имеют волокнистую структуру. Было обнаружено, что волокна в молекулярных облаках имеют одинаковую толщину в наиболее плотной их части. Образование волокон — это необходимая стадия, которую проходит межзвездный газ в процессе звездообразования.

Results of Hershel space telescope have confirmed an idea about filamentary structure of interstellar clouds. Shapes of the filaments are quasi-universal and have same radius of flat region in their densest part. Apparently that formation of the filaments is an essential phase of star formation process.

Введение

Межзвездные молекулярные облака неоднородны. Исследования их крупно- и мелкомасштабной структуры ведутся уже несколько десятилетий. Прорывным результатом последних лет стало фактически открытие и определение физических параметров волокнистой структуры молекулярных облаков (filaments). Этот прорыв был совершен в ходе обзора пояса Гулда космическим инфракрасным (ИК) телескопом им. Гершеля (*Herschel* Gould Belt Survey, [1]). Результаты наблюдений говорят о том, что образованию дозвездных ядер (prestellar cores) предшествуют гравитационное сжатие и фрагментация волокон [2]. Само образование волокон может быть необходимой стадией эволюции молекулярных облаков на пути к образованию в них звезд [2, 3].

Физические свойства волокон

Отличительное свойство волокон в молекулярных облаках — это универсальность их свойств. Для того чтобы восстановить распределение вещества в волокне по его ИК-изображениям в диапазоне от 70 до 500 мкм, применяют следующую процедуру. Для каждого

пикселя на изображении полагают, что распределение интенсивности излучения по частоте I_ν зависит только от температуры пыли T_d и ее оптических свойств τ_ν следующим образом: $I_\nu = B_\nu(T_d)(1 - e^{-\tau_\nu})$. Затем подбирают параметры T_d и τ_ν так, чтобы теоретическое распределение I_ν совпадало с наблюдаемым в каждом пикселе [4].

В результате данной процедуры в волокне выделяют наиболее плотную центральную часть — хребет. Эту одномерную структуру окружает газ, плотность которого спадает по мере удаления от хребта. Радиальный профиль волокна может быть с хорошей точностью приближен формулой для цилиндра

$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{[1 + (r/R_{\text{flat}})^2]^{\frac{p}{2}}},$$

где полуширина хребта волокна R_{flat} практически универсальна для областей образования звезд разных масс и составляет около 0.1 пк, а наклон $p \sim 2$ [3]. Длина волокон варьируется от 2 до примерно 10 пк.

Волокна в областях образования звезд малых масс отличаются значительно меньшей массой газа в единице длины, чем в областях образования массивных звезд. Например, в области образования звезд малых масс в направлении созвездия Муха масса в единице длины $M_{\text{line}} = 20\text{--}30 M_\odot/\text{пк}$ [5], а в массивном NGC 6334 $M_{\text{line}} = 500\text{--}2000 M_\odot/\text{пк}$ [3].

Гравитационное сжатие и фрагментация

Наблюдения показывают, что «Гершель» обнаружил дозвездные ядра и признаки звездообразования в тех волокнах, где масса молекулярного газа на единицу длины превышает критическое значение $M_{\text{line}} > M_{\text{crit}} = 2c_s^2/G$, где c_s — скорость звука, а G — гравитационная постоянная [2]. В этом случае волокно становится гравитационно неустойчивым для радиального сжатия и фрагментации вдоль волокна [6]. Для молекулярного облака с типичной температурой газа $T_{\text{gas}} = 10$ К, $c_s = 0.2$ км/с и $M_{\text{crit}} = 16 M_\odot/\text{пк}$. Далее, следуя выкладкам из работы [7], можно подсчитать пороговое значение лучевой концентрации молекулярного водорода, при которой волокно становится гравитационно неустойчивым: $N_{\text{H}_2}^0 = 8 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. В волокнах из созвездия Муха среднее значение $N_{\text{H}_2} < N_{\text{H}_2}^0$, но присутствуют фрагменты с более высокой N_{H_2} . Параметры этих волокон

и их структура не противоречат модели цилиндра, сжатого внешним давлением [5]. В области NGC 6334 $N_{\text{H}_2} \gg N_{\text{H}_2}^0$ и наблюдается несколько очагов звездообразования, в том числе с массивными звездами.

Характерный размер и турбулентное происхождение волокон

Анализ изображений «Гершеля» показал, что помимо гравитационно-связанных волокон существуют также и несвязанные в полупрозрачных (translucent) облаках, например, в направлении Полярной звезды [8]. Поэтому было высказано предположение, что не сила гравитации играет основную роль в формировании волокон, а крупномасштабные турбулентные движения, см., напр., [7]. Наблюдения радиотелескопа CO показал, что в масштабе 0.1 пк структура скоростей в молекулярных облаках становится связной, а в пределах фактора 2 этот масштаб соответствует шкале, на которой турбулентность переходит из сверхзвукового в дозвуковой режим, напр., [9]. Волокна могут быть образованы в результате сжатия молекулярных облаков ударными волнами в тех местах, где фронты распространения волн пересекаются. Сжатие при этом максимальное, а дисперсия скоростей минимальна. Наблюдатель видит эти места как волокна со связной структурой скоростей, причем ширина спектральных линий будет практически постоянной по всей длине волокон [9].

Гравитационно-несвязанные волокна со средней $N_{\text{H}_2} < N_{\text{H}_2}^0$ (или $M_{\text{line}} < 16 M_{\odot}/\text{пк}$) могут в дальнейшем разрушаться из-за воздействия новых ударных волн. Для типичного значения дисперсии скоростей в областях образования массивных звезд $\sigma = 0.3$ км/с и толщины волокна 0.1 пк это время составляет примерно 300 000 лет [7], что существенно меньше времени существования молекулярных облаков. Было высказано предположение, что внешнее давление способно предотвратить разрушения таких волокон. Возможно, это одна из причин того, что наблюдаются гравитационно-несвязанные волокна.

Наблюдения гравитационно-связанных волокон показали, что, по-видимому, происходит рост линейной массы M_{line} со временем из-за аккреции на центральные части волокон окружающего газа. Перпендикулярно хребту волокна наблюдаются «струйки» газа или субволокон, через которые и происходит рост его массы [10]. При

этом аккрецировавший газ сжимается и волокно сохраняет толщину ≈ 0.1 пк. При моделировании волокон в форме сжимающихся цилиндров с физическими условиями, типичными для молекулярных облаков нашей Галактики, численное значение длины волны Джинса оказывается близко к 0.1 пк [11].

Одновременно с крупномасштабной аккрецией газа на гравитационно-связанное волокно и его сжатием происходит также фрагментация волокна с образованием квазисферических дозвездных ядер [6]. Последующий локальный коллапс ядер происходит быстрее, чем сжатие волокна как целого, напр., [12], поэтому вполне естественно, что вдоль волокон наблюдаются области образования звезд.

Функция масс

Предполагая, что звезды образуются в волокнах, можно ожидать, что особенности фрагментации волокон должны объяснять вид начальной функции масс звезд и функции масс плотных дозвездных ядер. Последняя имеет пик на значении массы $0.6 M_{\odot}$. Оно хорошо согласуется с джинсовской массой для фрагментации и локального коллапса в волокне, которое находится на грани гравитационной связности и имеет ширину 0.1 пк и $M_{\text{line}} = 16 M_{\odot}/\text{пк}$. Кроме того, наблюдения «Гершеля» показали, что медиана проекции расстояния между плотными ядрами 0.09 пк в волокнах в направлении созвездия Орла грубо согласуется с оценкой джинсовской длины для волокна в «критических» условиях (см. предыдущий раздел). Степенной закон начальной функции масс звезд $dN/dM \sim M^{-2.35}$ близок к распределению масс ядер в волокнах, найденных «Гершелем» в поясе Гулда [1]. Степенной закон $M^{-2.5}$ имеет функция масс плотных ядер в результате фрагментации неоднородных молекулярных облаков с начальным спектром флуктуаций плотности $P(k) \sim k^{-1.5}$ в расчетах [13]. Результаты наблюдений «Гершеля» же показали, что флуктуации лучевой концентрации молекул водорода N_{H_2} имеют близкий спектр $P(k) \sim k^{-1.6}$ [14]. Таким образом, часть вопросов о происхождении начальной функции масс нашла ответы.

Образование волокнистых молекулярных облаков

Идея об образовании волокон — резервуаров сжатого газа — в результате действия турбулентности в молекулярных облаках проливает свет на начальные условия звездообразования: место и функцию масс. Однако при этом остается открытым вопрос о происхождении самих неоднородных молекулярных облаков волокнистой формы. В работе [10] было показано, что образование облаков происходит при многократном прохождении ударных волн по межзвездному изначально атомарному газу. Источниками ударных волн являются расширяющиеся оболочки сверхновых и областей НШ. В моделях образования намагниченных облаков ожидается, что они образуются только в тех местах, где направление магнитного поля параллельно направлению распространения ударных волн. Поэтому лишь в ограниченной части старого остатка сверхновой или оболочки области НШ могут образоваться молекулярные облака. Поскольку в Галактике много расширяющихся оболочек, то вполне естественно обнаруживать в наблюдениях молекулярные облака на их пересечении, как происходит, например, в комплексе звездообразования S231—S235 [15, 16].

Заключение

Идеи о том, что молекулярные облака обладают волокнистой структурой и что в них присутствуют когерентные по скорости участки, идентифицированные сегодня с хребтами волокон, были высказаны примерно 20 лет назад. Но только с проявлением высококачественных наблюдательных данных эти идеи нашли подтверждение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16—02—00834 А.

Библиографические ссылки

1. *André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. et al.* From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 27—51.

2. *André P., Men'shchikov A., Bontemps S. et al.* From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L102.
3. *André P., Revéret V., Könyves V. et al.* Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: High-resolution submillimeter imaging of the massive star-forming complex NGC 6334 with ArTéMiS // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 592. — P. A54.
4. *Könyves V., André P., Men'shchikov A. et al.* The Aquila prestellar core population revealed by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L106.
5. *Kainulainen J., Hacar A., Alves J. et al.* Gravitational fragmentation caught in the act: the filamentary Musca molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A27.
6. *Inutsuka S.-i., Miyama S. M.* A Production Mechanism for Clusters of Dense Cores // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 480. — P. 681–693.
7. *Arzoumanian D., André P., Peretto N., Könyves V.* Formation and evolution of interstellar filaments. Hints from velocity dispersion measurements // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 553. — P. A119.
8. *Men'shchikov A., André P., Didelon P. et al.* Filamentary structures and compact objects in the Aquila and Polaris clouds observed by Herschel // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L103.
9. *Goodman A. A., Barranco J. A., Wilner D. J., Heyer M. H.* Coherence in Dense Cores. II. The Transition to Coherence // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 504. — P. 223–246.
10. *Inutsuka S.-i., Inoue T., Iwasaki K., Hosokawa T.* The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A49.
11. *Inutsuka S.-I., Miyama S. M.* Self-similar solutions and the stability of collapsing isothermal filaments // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 388. — P. 392–399.
12. *Pon A., Johnstone D., Heitsch F.* Modes of Star Formation in Finite Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 740. — P. 88.
13. *Inutsuka S.-i.* The Mass Function of Molecular Cloud Cores // *Astrophys. J. Lett.* — 2001. — Vol. 559. — P. L149–L152.

14. *Roy A., André P., Arzoumanian D. et al.* Possible link between the power spectrum of interstellar filaments and the origin of the prestellar core mass function // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 584. — P. A111.
15. *Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. et al.* Physical conditions in star-forming regions around S235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437. — P. 1593–1608.
16. *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71. — P. 208–224.

КРАТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Кратные звезды — достаточно распространенные и интересные для исследователей объекты. Общее происхождение компонентов, иерархическая или неиерархическая структура, разнообразие возможных наблюдательных проявлений входящих в кратные системы звездных пар позволяют делать важные выводы как об отдельных объектах, так и о свойствах звездных ансамблей, в состав которых они входят. В частности, изучение звездной кратности приводит к лучшему пониманию процесса образования звезд. Активные исследования кратности звезд в ансамблях, находящихся на разных стадиях эволюции, а также детальное изучение кратных систем в локальной окрестности Солнца, позволили в последние годы существенно продвинуться в понимании фундаментальных закономерностей, связанных с феноменом звездной кратности. Однако есть ряд важных проблем, которые все еще остаются нерешенными.

Multiple stars are rather numerous and interesting for the investigators. Common origin of the components, hierarchical or non-hierarchical structure, variety of possible observational exhibitions of the pairs forming multiple systems lead to important results concerning selected objects as well as the joint characteristics of stellar populations they belong to. In particular, investigation of stellar multiplicity in populations on different stages of stellar evolution, along with detailed investigation of the multiple stars in solar vicinity, in recent years lead to significant advances in understanding of fundamental relations of stellar multiplicity. However, a number of important issues still require solution.

Введение

Существование кратных звезд было обнаружено вскоре после зарождения наблюдательной астрономии, в XVII столетии. Койпер [1] был первым, кто отметил, что частота встречаемости кратных звезд

и их распределение по физическим характеристикам может оказаться очень важным для развития теории образования звезд. Физические процессы, участвующие в жизни звездных популяций, в частности, динамические взаимодействия, также влияют на это распределение. Таким образом, характеристики кратных систем и их связь с массой главного компонента и с параметрами окружающей среды могут служить для исследования процессов образования и эволюции звездных систем. Кратные звезды позволяют получать уникальную информацию, — отношение периодов пар в одной системе, относительная ориентация плоскостей орбит, распределение компонентов по массам, — важную для определения параметров процесса звездообразования. Кроме того, такие звезды, благодаря комбинации различных способов наблюдения, достаточно часто позволяют надежно определять физические характеристики компонентов, в том числе их массы и светимости, что важно для проверки моделей звездной эволюции.

Что такое кратные звезды.

Кратность иерархическая и неиерархическая

Несмотря на интуитивную понятность термина, дать строгое определение — какие объекты являются кратными звездами, а какие нет — оказывается не вполне простой задачей. Формальный подход позволяет называть так любую группу звезд количеством больше двух, одновременно наблюдающуюся на небесной сфере и внесенную в каталог или публикацию под одним номером или идентификатором. Множество подобных «формально-кратных» звезд можно встретить в каталоге WDS (Washington Double Stars) [2]. Такой подход легко критиковать, очевидно, что он игнорирует физическую природу объектов и создает множество ложных кратных систем, потенциально объединяя удаленные друг от друга в пространстве звезды (оптические компоненты) и, возможно, теряя настоящие связанные друг с другом компоненты.

Другая возможность — называть кратными все звездные системы (объединенные общим положением в пространстве и, возможно, общим собственным движением группы звезд) с количеством компонентов больше двух. Иногда обозначают также верхнюю границу количества компонентов, например, 10, утверждая, что систему с большим количеством компонентов следует называть мини-скоплением. Однако выбор числа компонентов для верхней границы здесь вполне

произволен, и в любом случае 10 представляется сильно заниженной оценкой — см. обсуждение далее. Возможно также рассматривать как ограничитель размера кратной системы не количество компонентов, а расстояние между ними. В целом такой подход выглядит статистически обоснованным. Современные исследования, однако, показывают, что даже для двойных звезд предельное возможное расстояние между компонентами не определяется однозначно, но зависит от окружающих условий. Это означает, что в отдельных случаях формальное применение пространственного критерия для разделения кратная звезда/скопление может привести к ошибочным результатам. Кроме того, такой критерий чувствителен к точности определения расстояния до системы.

Еще один вариант — называть кратными только физически связанные звездные системы, в которых наблюдается движение компонентов вокруг центра (центров) масс, подобное кеплеровскому. Такой критерий тесно связан с точностью астрометрических наблюдений, а не только с физической природой систем.

Наконец, видимо наиболее строгий из возможных подходов, — рассматривать только устойчивые, иерархические кратные системы (такие, в которых расстояния между соседними парами компонентов отличаются как минимум приблизительно на порядок, и движения по орбитам происходят вокруг центров масс пар), исключая относительно короткоживущие трапециевидные системы, в которых расстояния между по крайней мере тремя соседними компонентами различаются меньше чем в три раза.

Тот или иной подход к определению кратных звезд наиболее разумно выбирать в зависимости от целей исследования.

Способы наблюдения кратных звезд

Как правило, кратные звезды обнаруживают и наблюдают в рамках тех же программ и задач, что и двойные звезды. В связи с этим, количество способов наблюдений звезд, входящих в кратные системы, достаточно велико и разнородно. Разнороден, в зависимости от способа наблюдения (наблюдательного типа), и набор получаемых данных. Как правило, кратную систему наблюдают как набор пар (составляющими пары в каждом случае могут быть как отдельные светила — компоненты, так и другие пары).

Визуальные пары — те, в которых оба компонента видны и разрешаются оптически при наблюдениях при помощи телескопа. Для

таких пар определяется взаимное расположение компонентов (позиционный угол) и угловое расстояние между ними. Для таких пар возможны только очень приблизительные оценки абсолютных и физических параметров, однако ситуация улучшается, если для них известно расстояние (тригонометрический параллакс), а также сделано несколько позиционных наблюдений. Те визуальные пары, у которых орбитальное движение наблюдается достаточно хорошо, чтобы можно было вычислить параметры орбиты, называют орбитальными. Если для системы, содержащей орбитальную пару, известен тригонометрический параллакс, можно определить сумму масс компонентов такой пары. Интерферометрические пары разрешаются на компоненты при помощи интерферометрических способов наблюдения и, как правило, позволяют определить лишь угловое расстояние между компонентами. Компоненты пар с общим собственным движением, как предполагается, объединены общим происхождением (и, таким образом, как и все физически связанные пары, имеют одинаковое содержание химических элементов и возраст). Пары с общим собственным движением могут стать орбитальными при повышении точности или удлинении периода наблюдений. Астрометрические пары, содержащие невидимый компонент, также позволяют вычисление некоторых параметров орбиты. Характеристики спектроскопических пар (в частности, функция масс и отношение масс компонентов), определяются по движениям линий в совокупном спектре тесной пары, а для затменных — по изменениям кривой блеска. Только для затменных и орбитальных пар возможно определение угла наклона орбиты, что, например, в комбинации с наблюдениями пары как спектрально-двойной, приводит к определению масс компонентов. В кратной системе, представляющей собой комбинацию пар нескольких наблюдательных типов, можно определить больше параметров компонентов и пар, чем в парах по отдельности. Так, сумма масс тесной пары может быть определена с помощью наблюдений широкой пары более высокого иерархического уровня, составляющей которой является тесная пара. Возможны и иные интересные комбинации методов определения параметров.

Проблема максимально возможной иерархической кратности

Теоретически предельную возможную степень иерархической кратности звездных систем можно оценить из следующих соображе-

ний. Система динамически стабильна, если (для круговых орбит) период орбиты внешнего уровня превышает период орбиты внутреннего уровня по крайней мере в пять раз (отношение больших полуосей больше трех). Для эксцентричных орбит этот фактор существенно повышается до 70, отношение больших полуосей — до 20. Количество уровней иерархии, с другой стороны, ограничено приливным взаимодействием с гравитационным полем Галактики, возмущениями от случайных сближений со звездами и гигантскими молекулярными облаками. Было показано [3], что число уровней иерархии не может превышать восемь или девять, в зависимости от параметров орбит компонентов. В предположении максимальной заселенности каждого иерархического уровня, это привело бы к иерархической кратной системе, содержащей 256 или даже 512 компонентов.

На практике, однако, не удается наблюдать ни подобного количества уровней иерархии (достоверно известны системы с тремя, возможно — четырьмя иерархическими уровнями, но не более), ни полной заселенности наблюдательных уровней. Максимальная достоверно известная иерархическая кратность системы — семь.

Для изменения ситуации можно обратиться не к рассмотрению уже известных иерархических систем, а исследовать неиерархические кратные системы, которые, однако, могут содержать иерархические подсистемы. Наиболее полный каталог визуальных двойных и кратных звезд, WDS, содержит системы с формальной кратностью, превышающей 30, и свыше 500 систем с формальной степенью кратности от шести и выше. Если изучить этот набор формально-кратных звезд, удалив из рассмотрения оптические компоненты (для этого существует ряд приемов, включающих учет параллаксов и собственных движений компонентов, а также статистические соображения), и выделить заведомо иерархические тесные пары и подсистемы путем сопоставления сведений с данными каталогов затменных, орбитальных, спектроскопических двойных звезд, возможно, удастся обнаружить новые иерархические системы высокой кратности [4].

Статистическое изучение характеристик ансамбля кратных звезд

Ансамбль кратных звезд сложен для изучения общих статистических характеристик из-за многочисленных и трудноучитываемых эффектов селекции, влияющих на возможность обнаружения кратной звезды, еще более сложных, чем эффекты селекции для двой-

ных. Как правило, исследователи выбирают один из двух путей. Можно изучить выборку кратных звезд поля в некотором ограниченном объеме, если есть основания считать такую выборку полной. Второй путь — использование различных наблюдательных техник для подробного изучения ограниченных в пространстве однородных звездных ансамблей, содержащих кратные звезды, таких как рассеянные скопления, молодые звездные ассоциации, и пр. Исследования по обоим этим направлениям существенно активизировались в последние годы в связи с существенным повышением качества наблюдений, в том числе, слабых и тесных компонентов.

Важные современные исследования кратных звезд в ограниченном объеме в окрестности Солнца описаны в [5–7]. Содержательный обзор исследований звездной кратности в различных ансамблях содержится в [8].

Некоторые результаты

Современные исследования общих характеристик кратности позволяют выявить следующие тенденции.

- Частота встречаемости и основные характеристики кратных звезд плавно зависят от массы главного компонента, что указывает на единый механизм образования.
- Свойства кратных звезд определяются в основном на pre-MS стадии. Последующая динамическая эволюция систем незначительна.
- Характеристики кратных звезд не поддерживают теорию независимого образования компонентов (random pairing).
- Существует отчетливый разрыв в характеристиках между звездными и планетными системами, вероятно, связанное с различием механизмов их образования.

Нерешенные вопросы

- Являются ли свойства кратности, связанные с звездообразованием, универсальными, или они зависят от условий? Ответ зависит от исследований кратности в различных ансамблях звезд до главной последовательности.
- Действительно ли существуют отклонения от гладкого распределения характеристик кратности от массивных к маломассивным звездам (такие как аномально высокая доля вторичных

компонентов с отношением масс меньше 0.1, или существование выделенной популяции пар с «близнецовыми компонентами», или они — следствие проявлений эффектов селекции?

- Каковы механизмы образования для тесных пар? Отличаются ли они от процессов и закономерностей образования широких пар?
- Зависит ли расположение «пустыни коричневых карликов» в пространстве параметров от массы главного компонента, или расстояния между компонентами? Какие физические процессы связаны с ее возникновением?
- Мешает или способствует кратность звезд образованию планет? Как это зависит от разделения между компонентами, отношения масс, характеристик орбиты?

Заключение

Исследования кратных звезд — интересный способ тестирования моделей звездообразования и получения информации об отдельных объектах. Можно ожидать, что данные астрометрической миссии Gaia существенно продвинут исследования кратных звезд, обеспечив высокоточную информацию о тригонометрических параллаксах и собственных движениях большой выборки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16–07–01162, 15–02–04053, а также Программы поддержки ведущих научных школ НШ–9576.2016.2.

Библиографические ссылки

1. *Kuiper G. P.* Problems of Double-Star Astronomy. I // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1935. — Vol. 47. — P. 15.
2. *Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I. et al.* VizieR Online Data Catalog: The Washington Visual Double Star Catalog (Mason+ 2001-2014) // VizieR Online Data Catalog. — 2016. — Vol. 1.
3. *Surdin V.* Hierarchical Star Clusters: Fractal Properties and Maximum Population // Dynamics of Star Clusters and the Milky Way / ed. by S. Deiters, B. Fuchs, A. Just et al. : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2001. — Vol. 228. — P. 568.

4. *Gebrehiwot Y.M., Kovaleva D., Kniazev A.Yu. et al.* On utmost multiplicity of hierarchical stellar systems // *Baltic Astronomy*. — 2016. — Vol. 25. — P. accepted.
5. *Raghavan D., McAlister H. A., Henry T. J. et al.* A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-type Stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2010. — Vol. 190. — P. 1–42.
6. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. I. Data on F and G Dwarfs within 67 pc of the Sun // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147. — P. 86.
7. *Tokovinin A.* From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147. — P. 87.
8. *Duchêne G., Kraus A.* Stellar Multiplicity // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51. — P. 269–310.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

В лекции обсуждаются особенности динамической эволюции планетных систем.

Features of the dynamical evolution of planetary systems are discussed.

Строение известных нам внесолнечных планетных систем отличается большим разнообразием, и лишь немногие из них отдаленно напоминают Солнечную систему. В чем причины?

В лекции рассматривается динамическая эволюция планетных систем на всех этапах их развития — от миграции планет в процессе их формирования до изменений структуры планетных систем на заключительных этапах эволюции родительских звезд. Описываются особенности динамической эволюции планетных систем в зависимости от их типа: резонансные, нерезонансные с существенной вековой динамикой, слабо взаимодействующие, планетные системы двойных и кратных звезд.

Особое внимание уделяется вопросам устойчивости и описанию хаотических процессов, происходящих в планетных системах. Подробно рассматриваются сценарии динамической эволюции Солнечной системы и ее динамических подсистем: планеты-гиганты, планеты земной группы, система Земля—Луна.

Обсуждается понятие зоны обитаемости и рассматривается динамическая эволюция землеподобных планет с точки зрения возможности формирования условий на поверхности планеты для поддержания жизни.

Рассмотрены сценарии динамической эволюции планетных систем, учитывающие потерю массы звездой во время нахождения на главной последовательности и при переходе через стадию красного гиганта к белому карлику.

Для большинства рассматриваемых проблем сформулированы нерешенные задачи, которые относятся к областям как теоретических, так и практических исследований.

С. Г. Моисеенко
Институт космических исследований РАН

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ**

Численное гидродинамическое моделирование в настоящее время является одним из эффективных инструментов решения многомерных нестационарных астрофизических задач. В настоящее время существует большое количество различных численных методов. В лекции будет сделан обзор некоторых современных численных методов, применяемых при моделировании гидрогазодинамических и МГД астрофизических задач. Будут освещены следующие вопросы: конечно-разностные методы, явные, неявные схемы, консервативные и полностью консервативные методы, методы частиц: N-body, PIC (Particles in Cell), SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), спектральные методы, метод конечных элементов, методы, основанные на задаче о распаде произвольного разрыва (метод Годунова), операторно-разностные методы, перестройка сетки и методы интерполяции сеточных функций. Будут приведены примеры численного решения некоторых астрофизических задач.

А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

ЗВЕЗДЫ — ГОЛУБЫЕ БРОДЯГИ

В лекции приводится обзор основных результатов в исследовании голубых бродяг, полученных за последние 5—7 лет. Библиография этих результатов дана в настоящей публикации.

The lecture gives an overview of general results in investigations of Blue Straggler stars obtained during the period of last 5—7 years. The bibliography of these results is listed in this publication.

Введение

Исследованию феномена голубых бродяг (BSS) в последние 5—7 лет было посвящено большое количество работ. В итоге были достигнуты серьезные успехи в изучении этих объектов. Обзор полученных результатов приводится в лекции, а библиография исследований — в настоящей публикации. Основное количество исследований выполнено в рамках двух рабочих групп. Исследованиями BSS в шаровых скоплениях (ШС) занимается группа под руководством профессора Ф. Ферраро (Университет Болоньи, Италия), исследования BSS в рассеянных звездных скоплениях (РЗС) координируются в рамках проекта WOCES (США). WOCES — это аббревиатура WIYN Open Cluster Study, группа по изучению РЗС из университетов Висконсина, Индианы и Йельского университета, а также Национальных оптических астрономических обсерваторий (NOAO).

В 2015 г. в серии “Astrophysics and Space Science Library” вышла книга “Ecology of Blue Straggler Stars” под редакцией Г. М. Дж. Боффина, Дж. Карраро и Дж. Беккари [1]. В книге систематизированы как наблюдательные, так и теоретические аспекты исследования голубых бродяг, приводится обширная библиография. Замечательно, что все главы книги опубликованы в arXiv.org.

Необходимо отметить, что термин «голубые бродяги» — это не точный перевод оригинального термина “blue stragglers”, а, скорее, романтический. Гораздо точнее смысл термина передается сочетанием «голубые отставшие звезды».

Голубые бродяги в шаровых скоплениях

Значительная часть работ посвящена исследованию населения BSS в отдельных ШС: ω Cen [2, 3], NGC 5824 [4], NGC 362 [5], NGC 6752 [6], NGC 5466 [7], M 10 [8], AM1, Eridanus, Pal 3 и Pal 4 [9], NGC 6397 [10], NGC 6229 [11], NGC 6864 [12], Pal 14 [13], M 4 [14], 47 Tuc [15, 16], NGC 1261 [17], NGC 3201 и NGC 6218 [3].

Один из наиболее интересных результатов был получен для скопления M 30, где на диаграмме звездная величина — показатель цвета голубые бродяги образуют две последовательности [18, 19]. Этот факт связывается с двумя различными механизмами образования BSS (см. ниже). Подобное распределение BSS обнаружено также в скоплении NGC 362 [5].

BSS, точнее их распределение по расстоянию от центра скопления, рассматривается как динамические часы, определяющие динамический возраст скопления [20]. Динамический возраст скопления — это отношение возраста скопления ко времени столкновительной релаксации. Динамически молодые скопления показывают плоское распределение голубых бродяг. Скопления, промежуточного возраста показывают бимодальное распределение. Динамически старые скопления показывают одномодальное распределение.

Одна из серьезных проблем в исследовании BSS — это поиск проэволюционировавших BSS (E-BSS), то есть звезд, ушедших с главной последовательности [21]. Сложность их обнаружения заключается в том, что такие звезды попадают в область на диаграмме звездная величина — показатель цвета, занятую звездами асимптотической ветви гигантов (AGB). Для отождествления E-BSS необходимо измерить массу звезды, чтобы убедиться, что она массивнее «обычных» звезд AGB [22–24].

На сегодня рассматриваются два наиболее вероятных сценария образования BSS: это перенос вещества в тесной двойной системе и прямое столкновение (слияние) звезд. Различные сценарии образования BSS рассматриваются в работах [16, 25–29]. Оба механизма приводят к аномалиям химического состава.

Химический состав BSS исследуется в работах [19, 30], измерению масс BSS посвящены работы [23, 24, 31].

Необходимо отметить, что исследовать свойства BSS и их распределение в ШС (или РЗС) очень удобно с помощью наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне (УФ), так как в УФ BSS являются одними из наиболее ярких звезд скопления [4, 8, 15, 16].

Голубые бродяги в рассеянных звездных скоплениях

Большое количество работ посвящено исследованию населения BSS в рассеянном скоплении NGC 188 [32–37]. В основном это работы Р. Д. Мэттью (Университет Висконсин, Мэдисон) и его бывшего аспиранта А. Геллера (Северо-западный Университет, Иллинойс, и Университет Чикаго).

Очень интересная работа посвящена обнаружению E-BSS в скоплении M 67 [22]. Звезда, которую авторы работы назвали Yellow Straggler Star (YSS), была обнаружена по ее избыточной массе с помощью астросейсмологических наблюдений.

Происхождение BSS в рассеянных скоплениях обсуждается в работах [33–35, 38–40].

С процессами переноса вещества в тесных двойных системах связано также образование еще одного очень интересного феномена — «красных бродяг», или суб-субгигантов (SSG) [41].

Голубые бродяги в карликовых галактиках, голубые бродяги поля

Звезды — голубые бродяги — образуются также в звездных скоплениях в карликовых спутниках нашей Галактики. Их исследованию посвящены работы [42–44].

BSS присутствуют и среди звезд поля [45–47]. Они могут попадать туда, уходя из звездных скоплений либо образуясь в ходе эволюции тесных двойных систем, не являющихся членами скоплений.

Библиографические ссылки

1. *Boffin H. M. J., Carraro G., Beccari G.* Ecology of Blue Straggler Stars. — 2015.
2. *Mucciarelli A., Lovisi L., Ferraro F. R. et al.* Spinning Like a Blue Straggler: The Population of Fast Rotating Blue Straggler Stars in ω Centauri // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 797. — P. 43.
3. *Simunovic M., Puzia T. H.* Blue Straggler Star Populations in Globular Clusters. I. Dynamical Properties of Blue Straggler Stars in NGC 3201, NGC 6218, and ω Centauri // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 782. — P. 49.

4. *Sanna N., Dalessandro E., Ferraro F. R. et al.* The WFPC2 Ultraviolet Survey: The Blue Straggler Population in NGC 5824 // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. 90.
5. *Dalessandro E., Ferraro F. R., Massari D. et al.* Double Blue Straggler Sequences in Globular Clusters: The Case of NGC 362 // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 778. — P. 135.
6. *Lovisi L., Mucciarelli A., Dalessandro E. et al.* Another Brick in Understanding Chemical and Kinematical Properties of BSSs: NGC 6752 // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 778. — P. 64.
7. *Beccari G., Dalessandro E., Lanzoni B. et al.* Deep Multi-telescope Photometry of NGC 5466. I. Blue Stragglers and Binary Systems // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 776. — P. 60.
8. *Dalessandro E., Ferraro F. R., Lanzoni B. et al.* Ultraviolet Observations of the Globular Cluster M10 from HST and GALEX: The BSS Population // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 770. — P. 45.
9. *Beccari G., Lützgendorf N., Olczak C. et al.* The Central Blue Straggler Population in Four Outer-halo Globular Clusters // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 754. — P. 108.
10. *Lovisi L., Mucciarelli A., Lanzoni B. et al.* Chemical and Kinematical Properties of Blue Straggler Stars and Horizontal Branch Stars in NGC 6397 // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 754. — P. 91.
11. *Sanna N., Dalessandro E., Lanzoni B. et al.* The blue straggler star population in NGC 6229 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 422. — P. 1171–1177.
12. *Contreras Ramos R., Ferraro F. R., Dalessandro E. et al.* The Unimodal Distribution of Blue Straggler Stars in M75 (NGC 6864) // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 748. — P. 91.
13. *Beccari G., Sollima A., Ferraro F. R. et al.* The Non-segregated Population of Blue Straggler Stars in the Remote Globular Cluster Palomar 14 // *Astrophys. J. Lett.* — 2011. — Vol. 737. — P. L3.
14. *Lovisi L., Mucciarelli A., Ferraro F. R. et al.* Fast Rotating Blue Stragglers in the Globular Cluster M4 // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 719. — P. L121–L125.
15. *Parada J., Richer H., Heyl J. et al.* Dynamical Estimate of Post-main-sequence Stellar Masses in 47 Tucanae // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 826. — P. 88.

16. *Parada J., Richer H., Heyl J. et al.* Formation and Evolution of Blue Stragglers in 47 Tucanae // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 830. — P. 139.
17. *Simunovic M., Puzia T. H., Sills A.* The Blue Straggler Star Population in NGC 1261: Evidence for a Post-core-collapse Bounce State // *Astrophys. J. Lett.* — 2014. — Vol. 795. — P. L10.
18. *Ferraro F. R., Beccari G., Dalessandro E. et al.* Two distinct sequences of blue straggler stars in the globular cluster M 30 // *Nature.* — 2009. — Vol. 462. — P. 1028–1031.
19. *Lovisi L., Mucciarelli A., Lanzoni B. et al.* Flames and XSHOOTER Spectroscopy along the Two Blue Straggler Star Sequences of M30 // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 772. — P. 148.
20. *Ferraro F. R., Lanzoni B., Dalessandro E. et al.* Dynamical age differences among coeval star clusters as revealed by blue stragglers // *Nature.* — 2012. — Vol. 492. — P. 393–395.
21. *Ferraro F. R., Lapenna E., Mucciarelli A. et al.* Weighing Stars: The Identification of an Evolved Blue Straggler Star in the Globular Cluster 47 Tucanae // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 816. — P. 70.
22. *Leiner E., Mathieu R., Stello D., Vanderburg A.* The K2 M67 Study: An Evolved Blue Straggler in M67 from K2 Mission Asteroseismology // *ArXiv e-prints.* — 2016. 1611.01158.
23. *Fiorentino G., Lanzoni B., Dalessandro E. et al.* Blue Straggler Masses from Pulsation Properties. I. The Case of NGC 6541 // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 783. — P. 34.
24. *Fiorentino G., Marconi M., Bono G. et al.* Blue Straggler Masses from Pulsation Properties. II. Topology of the Instability Strip // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810. — P. 15.
25. *Xin Y., Ferraro F. R., Lu P. et al.* The Binary Mass Transfer Origin of the Red Blue Straggler Sequence in M30 // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 801. — P. 67.
26. *Stepien K., Pamyatnykh A. A., Rozyczka M.* Evolutionary history of four binary blue stragglers from the globular clusters ω Cen, M55, 47 Tuc and NGC 6752 // *ArXiv e-prints.* — 2016. 1610.02199.
27. *Antonini F., Chatterjee S., Rodriguez C. L. et al.* Black Hole Mergers and Blue Stragglers from Hierarchical Triples Formed in Globular Clusters // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 816. — P. 65.

28. *Chatterjee S., Rasio F. A., Sills A., Glebbeek E.* Stellar Collisions and Blue Straggler Stars in Dense Globular Clusters // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 777. — P. 106.
29. *Perets H. B., Fabrycky D. C.* On the Triple Origin of Blue Stragglers // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 697. — P. 1048–1056.
30. *Lovisi L.* Chemical abundances of blue straggler stars in Galactic globular clusters // *Mem. Soc. Astron. It.* — 2014. — Vol. 85. — P. 283.
31. *Baldwin A. T., Watkins L. L., van der Marel R. P. et al.* Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) Catalogs of Galactic Globular Clusters. IV. Kinematic Profiles and Average Masses of Blue Straggler Stars // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 827. — P. 12.
32. *Mathieu R. D., Geller A. M.* A binary star fraction of 76 per cent and unusual orbit parameters for the blue stragglers of NGC 188 // *Nature.* — 2009. — Vol. 462. — P. 1032–1035.
33. *Geller A. M., Mathieu R. D.* A mass transfer origin for blue stragglers in NGC 188 as revealed by half-solar-mass companions // *Nature.* — 2011. — Vol. 478. — P. 356–359.
34. *Geller A. M., Hurley J. R., Mathieu R. D.* Direct N-body Modeling of the Old Open Cluster NGC 188: A Detailed Comparison of Theoretical and Observed Binary Star and Blue Straggler Populations // *Astron. J.* — 2013. — Vol. 145. — P. 8.
35. *Gosnell N. M., Mathieu R. D., Geller A. M. et al.* Detection of White Dwarf Companions to Blue Stragglers in the Open Cluster NGC 188: Direct Evidence for Recent Mass Transfer // *Astrophys. J. Lett.* — 2014. — Vol. 783. — P. L8.
36. *Mathieu R. D., Geller A. M.* The Blue Stragglers of the Old Open Cluster NGC 188 // *Ecology of Blue Straggler Stars* / ed. by H. M. J. Boffin, G. Carraro, G. Beccari. — 2015. — P. 29.
37. *Gosnell N. M., Mathieu R. D., Geller A. M. et al.* Implications for the Formation of Blue Straggler Stars from HST Ultraviolet Observations of NGC 188 // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 814. — P. 163.
38. *Lu P., Deng L.-C., Zhang X.-B.* Modeling blue stragglers in young clusters // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2011. — Vol. 11. — P. 1336–1350.
39. *Schneider F. R. N., Izzard R. G., de Mink S. E. et al.* Ages of Young Star Clusters, Massive Blue Stragglers, and the Upper Mass

- Limit of Stars: Analyzing Age-dependent Stellar Mass Functions // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. 117.
40. *Geller A. M., Leigh N. W. C.* Interrupted Stellar Encounters in Star Clusters // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 808. — P. L25.
 41. *Leiner E., Geller A., Mathieu R.* On the Origins of Sub-Subgiants: Mass Transfer, Dynamical Encounters, and Magnetic Fields // *Proceedings of the Frank N. Bash Symposium 2015 (BASH2015)*. 18–20 Oct. The University of Texas at Austin, USA. — 2015. — P. 32.
 42. *Carraro G., Seleznev A. F.* An analysis of the blue straggler population in the Sgr dSph globular cluster Arp 2 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 412. — P. 1361–1366.
 43. *Li C., de Grijs R., Deng L., Liu X.* Blue Straggler Evolution Caught in the Act in the Large Magellanic Cloud Globular Cluster Hodge 11 // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 770. — P. L7.
 44. *Momány Y.* The Blue Straggler Population in Dwarf Galaxies // *Ecology of Blue Straggler Stars* / ed. by H. M. J. Boffin, G. Carraro, G. Beccari. — 2015. — P. 129.
 45. *Preston G. W.* Field Blue Stragglers and Related Mass Transfer Issues // *Ecology of Blue Straggler Stars* / ed. by H. M. J. Boffin, G. Carraro, G. Beccari. — 2015. — P. 65.
 46. *Schirbel L., Meléndez J., Karakas A. I. et al.* HIP 10725: The first solar twin/analogue field blue straggler // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 584. — P. A116.
 47. *Jofré P., Jorissen A., Van Eck S. et al.* Cannibals in the thick disk: the young α -rich stars as evolved blue stragglers // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A60.

О. К. Сильченко
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Рассматривается проблема происхождения и эволюции галактик.

We consider a problem of formation and evolution of galaxies.

Введение. Теория и практика эволюции галактик

Согласно известной классификации Эдвина Хаббла [1] галактики бывают эллиптические (в форме сфероида, то есть «толстенские») и дисковые. Дисковые галактики состоят, в первом приближении, из двух компонент — компактного сфероида (балджа) и протяженного диска. Отдельный вопрос, который до сих пор дискуссионен, — можно ли считать балджи эллиптическими галактиками, помещенными в центр дисков, или у них есть принципиальные различия. Так или иначе, но балджи тоже сфероиды (то есть «толстенские» звездные структуры), а вот диски сплюснуты настолько, что во многих моделях их представляют двумерными структурами, совсем без толщины. Это, конечно, сильная идеализация: толщина у дисков есть, иногда и весьма заметная, но существенно, что радиус (или характерный масштаб вдоль радиуса) дисков существенно превышает их толщину (или характерный масштаб распределения звезд перпендикулярно плоскости диска). Когда Хаббл создавал свою схему, он назвал ее левую часть — ручку «вилки» — «галактиками ранних типов», а правую часть, оба зубца вилки, — «галактиками поздних типов». Значит ли это, что он придавал эволюционный смысл своей схеме? Тогда он думал, что спиральные галактики — многокомпонентные системы со множеством деталей в структуре — образуются со временем из простых сфероидов, галактик эллиптических, путем наращивания дисков. Минуты десятки лет, в астрономию пришли космологи-теоретики и перевернули эволюционное направление схемы Хаббла: теперь они говорят, что первыми сформировались спиральные галактики, в которых доминируют диски и упорядоченное

круговое вращение звезд и газа как раз в плоскости этого диска, а эллиптические галактики, где вращение слабо и момент куда-то делся (?) в процессе эволюции, это продукты поздних слияний спиральных галактик. Поэтому в среднем эллиптические галактики и массивнее, чем спиральные; а если бы спиральные образовывались из эллиптических путем наращивания дисков, то было бы наоборот. Такова нынче теория.

Существующая статистика по морфологическим типам галактик в разных местах Вселенной говорит о том, что в ближней Вселенной самый распространенный морфологический тип — спиральные галактики, их 75 %. Если разглядывать «поле», то есть области с достаточно неплотным расположением галактик, то там совсем мало эллиптических галактик, около 6 %, а линзовидных галактик — всего около 15 % [2]. Но чем в более плотные области мы углубляемся, тем больше там линзовидных галактик: в группах галактик их уже примерно столько же, сколько и спиральных, — по 45 % и тех и других, а в скоплениях галактик (куда, впрочем, входит всего 7 % галактик ближней Вселенной) линзовидные галактики уже составляют большинство — до 60 % галактик скоплений, это линзовидные галактики [3]. Эллиптических галактик в скоплениях около 25–30 % всего населения, и любопытно, что этот процент не менялся последние 5–8 млрд лет. Значит, плотное окружение каким-то образом подавляет звездообразование в дисках. Один из главных вопросов современного этапа развития исследований эволюции галактик: каким именно способом?

И наконец, за последнее десятилетие-полтора появилось огромное количество *наблюдательных данных* об эволюции галактик. С помощью крупных 8–10-метровых телескопов можно успешно и подробно изучать большие выборки галактик на далеких красных смещениях — вплоть до $z = 5–7$. На таких красных смещениях мы непосредственно наблюдаем галактики в молодости, ведь от галактик на $z = 1$ свет до нас идет 8 млрд лет, от галактик на $z = 2$ — 10 млрд лет, а от галактик на $z = 5$ — все 12 млрд лет. То есть сейчас подробно наблюдается все, что сформировалось и жило в нашей Вселенной всего через один миллиард лет после Большого взрыва. Мы практически видим всю историю Вселенной на просвет. И то, что мы видим, с одной стороны, выстраивается в какую-то осмысленную последовательность, которая может быть реально наблюдаемой эволюцией галактик, а с другой стороны — часто кардинально противоречит стройным предсказаниям «общепринятой» космологии. Что же мы

узнали и какие выводы уже можем сделать из наблюдательных фактов относительно путей эволюции во Вселенной?

Эволюция размеров: возможные механизмы

С помощью Хаббловского телескопа и его уникального пространственного разрешения, а также благодаря адаптивной оптике в ближнем инфракрасном диапазоне на крупных наземных телескопах удалось составить хорошую статистику и проследить эволюцию типичных размеров галактик разных морфологических типов за последние 10–11 млрд лет. Оказалось, что неожиданно быстро эволюционируют размеры именно эллиптических, пассивных в смысле звездообразования галактик. На красном смещении 1.5–2 наблюдается целое население объектов — гигантских, сфероидальных, без звездообразования, радиусы которых в 4–6 раз меньше, чем размеры таких же по массе эллиптических галактик рядом с нами. А если сообразить, что при разнице линейных размеров 4–6 раз вся эта гигантская масса звезд, 100 млрд солнечных масс, была втиснута в объем, в 100 раз меньший нынешнего, и соответственно плотность упаковки звезд в центрах далеких эллиптических галактик 10 млрд лет назад была на два порядка больше нынешней...

Раз у галактик нет звездообразования, то хотелось бы придумать какой-нибудь чисто динамический механизм, который привел бы далекие компактные массивные эллиптические галактики на современную фундаментальную плоскость за 8–11 млрд лет эволюции. В принципе, большой «сухой» (бездиссипативный) мерджинг способен привести к расширению центрального сгущения звездной плотности (“core”) и уменьшению центральной звездной плотности. Но при больших слияниях размер продукта слияний будет расти примерно пропорционально его массе. Это значит, что на диаграмме «масса — эффективный радиус» галактика будет эволюционировать под очень небольшим углом, почти параллельно последовательности современных эллиптических галактик. А при «посадке» далекой галактики массой $2 \times 10^{11} M_{\odot}$ путем серии больших слияний на диаграммах «масса — средняя плотность» или «масса — дисперсия скоростей звезд» на современные последовательности она будет «улетать» по массе далеко за пределы $> 10^{12} M_{\odot}$. Рядом с нами отсутствуют в до-

статочном количестве такие массивные галактики. Это значит, что эволюционный канал больших слияний для далеких массивных компактных эллиптических галактик наблюдательно закрыт.

В связи с этим, а также осмысливая крутые градиенты металличности звездного населения во внутренних областях и пологие — во внешних, целый ряд исследователей одновременно, и мы в том числе [4], предложили для формирования и эволюции эллиптических галактик другой сценарий, кардинально отличающийся от классического иерархического сценария больших слияний. Этот сценарий сейчас фигурирует в литературе как «двухэтапный» или «двухстадийный». Основываясь на наборе чисто эмпирических аргументов, можно предположить, что в ходе первой стадии, на $z \geq 3$, формировались компактные «затравки» будущих эллиптических галактик, и формировались они в процессе, очень похожем на монолитный коллапс. Впоследствии, на $z \leq 1.5$, и масса, и размер этих звездных систем увеличивались благодаря множественному *малому* мерджингу: на галактику падали ее спутники.

В природе в эллиптических галактиках наблюдается полное разнообразие радиальных профилей среднего возраста звездного населения. Можно предположить, что это из-за того, что на хозяйскую галактику могли падать как спутники с газом, с небольшим его количеством, так и спутники совсем без газа, как спутники со старым звездным населением, так и спутники с относительно молодыми звездами. В этом вопросе должно наблюдаться, и наблюдается, «космическое разнообразие» (cosmic variance). Однако с динамической точки зрения моделирование множественного малого мерджинга предсказывает, что звездная система, испытывающая его, будет греться, расширяться, и ее радиус будет расти пропорционально *квадрату* массы. А это значит, что возможно существенно увеличить размер звездной системы, несильно изменяя ее массу. Это, очевидно, как раз то, что наблюдается, если считать далекие компактные эллиптические галактики непосредственными эволюционными предшественниками современных эллиптических галактик.

Downsizing: от большого к малому

Самое неожиданное: абсолютно не оправдался в результате наблюдений иерархический характер «собрания» галактик, предсказанный космологами. Вместо первоначального рождения карликов и их постепенного слияния в гигантские галактики наблюдается строго обратный процесс. Гигантские галактики образовались первыми;

причем в последние 8 млрд лет, на $z < 1$, отсутствовала эволюция как их числа (в единице сопутствующего объема), так и их содержимого — звездного населения. При наблюдениях близких эллиптических галактик были обнаружены корреляции: чем массивнее галактика, тем старше ее звездное население, а также чем массивнее галактика, тем выше отношение содержания магния к содержанию железа в ее звездах. Последняя зависимость означает, что чем массивнее галактика, тем короче была эпоха основного звездообразования в ней: для самых массивных Es эта эпоха значительно короче 1 млрд лет. Между тем численное моделирование эволюции Вселенной, в котором первую роль играет гравитация, а вторую — газодинамика, предсказывает все как раз наоборот. Если галактика маломассивная, она не может удержать газ, нагреваемый молодыми звездами, он должен практически сразу после начала звездообразования покидать галактику, и звездообразование должно останавливаться рано. В массивных же галактиках гравитация способна удержать газ в процессе звездообразования до полного его исчерпания. Что же мы видим в реальной Вселенной? В массивных эллиптических галактиках отношение магния к железу в звездах свидетельствует об эпохе звездообразования длиной максимум несколько сотен миллионов лет, тогда как в сфероидальных карликах Местной Группы прямые оценки возрастов звезд, а также и отношения магния к железу в их атмосферах дают длительность самой первой эпохи звездообразования не менее 3 млрд лет. Как это может быть?

Приходится вводить в модели формирования галактик дополнительные факторы, подправляющие изначально слишком простую физику. Для быстрой остановки звездообразования в массивных сфероидальных галактиках придумали feedback («обратную связь») от центральных черных дыр. Когда в галактике при начале основного звездообразования еще много газа, его потоки к центру должны «поджигать» активность ядра, что, вероятно, и наблюдается на красном смещении около двойки, где особенно много квазаров. А дальше проснувшийся квазар своим мощным излучением разогревает окружающий газ и не дает ему больше собираться в звезды. Как известно, чем больше масса сфероидальной галактики, тем массивнее ее центральная черная дыра (по крайней мере, в настоящую эпоху эта оговорка важна), а чем массивнее черная дыра, тем выше ее эддингтоновский предел, тем мощнее, в принципе, она может светить.

Вот отсюда может возникнуть «правильная» корреляция между массой галактики и краткостью эпохи звездообразования в ней.

И действительно, когда этот feedback включили в полуаналитические модели формирования галактик в рамках эволюции Вселенной (LCDM-модель), сразу стало значительно легче: в модели появились старые массивные эллиптические галактики на $z = 0$. Немного смущает, что в наблюдениях пока не удалось увидеть остановку звездообразования квазаром в конкретных галактиках на $z = 2-3$, хотя космический телескоп Herschel, наблюдавший в далеком инфракрасном диапазоне и специализированный как раз для измерений темпов звездообразования в далеких галактиках, был нацелен на эту задачу и особо искал хоть какие-то случаи такого рода. Не нашел.

Что касается галактических ветров в карликах, то очень постепенно, и тоже в результате наблюдений, исследователи приходят к мысли, что энергетики вспышек звездообразования в малых галактиках не хватает для того, чтобы заставить газ улететь насовсем. Наблюдаемые истечения из областей звездообразования показывают весьма умеренные скорости, меньшие, чем «скорость убегания». То есть события в карликах, вероятно, развиваются так: начинается звездообразование, газ греется и уходит из областей звездообразования, останавливая процесс на какое-то, вероятно недолгое, время. Но уходит он недалеко, застревая в темном гало. Там он высвечивает, остывает и падает обратно на галактику, провоцируя начало следующего этапа звездообразования. Поэтому звездообразование в карликах продолжается миллиарды лет, и часто вплоть до настоящей эпохи, но происходит вспышками.

Аккреция — основной двигатель эволюции дисковых галактик?

Независимо от общего космологического сценария эволюции Вселенной, уже давно исследователи осознали необходимость допущения постоянной аккреции внешнего холодного газа на диск нашей Галактики, а по аналогии — на диски спиральных галактик вообще. Каковы наблюдательные факты, делающие необходимым допущение такой аккреции? Прежде всего, невозможность построения моделей химической эволюции дисковых галактик без внешней аккреции. В окрестностях Солнца давно наблюдается так называемый «парадокс G-карликов». G-карлики — это звезды с массами порядка одной массы Солнца, и время их жизни на главной последовательности — порядка 10 млрд лет. Это означает, что в диске нашей Галактики, где звездообразование теплится с примерно постоянным темпом все по-

следние 8 млрд лет, среди G-карликов должны встречаться звезды всех возрастов, от 8 млрд лет до нуля. А поскольку звезды в процессе своего горения все время синтезируют новые химические элементы — кислород, магний, железо, то содержание тяжелых химических элементов в звездах должно со временем увеличиваться и молодые звезды должны содержать больше тяжелых элементов, чем старые. Так вот, *все* G-карлики в окрестностях Солнца имеют одну и ту же, солнечную металличность! То же самое и с субгигантами: для них возможно измерить возраст, и у звезд диска нашей Галактики отсутствует корреляция возраст — металличность! Решить этот парадокс можно только одним эффективным способом: постоянно разбавлять газ диска Галактики, обогащенный свежесинтезированными продуктами звездной эволюции, внешним газом, бедным металлами. Тогда можно поддерживать среднюю металличность газа (и звезд) на постоянном уровне все время жизни и эволюции диска Галактики.

Для других спиральных галактик — для спиральных галактик ближней Вселенной как класса — есть еще один серьезный аргумент, требующий постоянной добавки внешнего газа в диск галактики. Это короткое время «исчерпания газа». Звезды образуются конкретно из молекулярного газа, а облака молекулярного газа, при определенных благоприятных условиях, собираются из водорода атомарного. Оказалось, что если разделить наблюдаемую в галактике массу молекулярного газа на темп звездообразования, то получается время исчерпания молекулярного газа от 0.5 млрд лет у карликов до 3 млрд лет у гигантских спиральных галактик, а время исчерпания атомарного газа и вовсе постоянно у всех близких галактик — около 2—3 млрд лет [5]. Но время жизни галактических дисков, в течение которого звездообразование все время идет с более-менее постоянной скоростью, 8—10 млрд лет! Неужели мы присутствуем при массовой смерти спиральных галактик? Эта идея никому не нравится; спасение от выделенности данного момента состоит в предположении, что постоянная аккреция газа извне подпитывает звездообразование в диске и что, в принципе, это равновесный процесс: сколько газа сверху упадет в единицу времени, столько и уйдет на формирование новых звезд.

Итак, ход эволюции спиральных галактик в последние 8 млрд лет полностью зависел от аккреции извне холодного газа — и звездообразование, и химическая эволюция. И, возможно, структурная эволюция тоже. После обзора ближних галактик космическим ультрафиолетовым телескопом GALEX выяснилось, что 30 % всех дисковых га-

лактик имеют ультрафиолетовое продолжение дисков, — излучение в ультрафиолете продолжается иногда на два—пять радиусов оптического (старого) звездного диска. Понятно, что это на наших глазах продолжается «достройка» внешних областей диска, формирование диска inside-out. Но что питает это звездообразование в областях, где старых звезд нет? Сейчас уже уверенно говорят, что протяженные ультрафиолетовые диски галактик — это следствие недавнего события падения крупной массы внешнего газа именно на периферию галактик. То есть падало не просто газовое облако — падало газовое облако с большим моментом вращения, необходимым для того, чтобы оно осело именно во внешней части вращающегося галактического диска. И вот тут пора перейти к вопросу об источниках внешней аккреции газа.

Космологи обещали, что LCDM-теория эволюции Вселенной как целого способна обеспечить источник постоянной плавной аккреции газа на диски галактик. А именно, первичный газ, вириализованный до рентгеновских температур по всему объему темного гало, должен очень постепенно остывать, высвечивая свою энергию, и оседать в диск (поскольку момент он при этом не теряет). Однако незадача опять вышла с наблюдениями: у гигантских спиральных галактик не оказалось рентгеновских гало! У эллиптических галактик той же массы — наблюдается, а у спиральных, которым аккреция гораздо нужнее, чем эллиптическим, — нет. Или, если, как у трех самых массивных спиральных галактик, удастся что-то вытянуть, то оказывается, что этого рентгеновского газа примерно в 100 раз меньше, чем нужно. И вот тут нашелся теоретик, израильский космолог Авишай Декель, который предложил радикальное *теоретическое* решение проблемы. Он предложил линейную аккрецию холодного газа из космологических филаментов.

Космологические филаменты!

Однородная изначально Вселенная очень быстро в процессе эволюции распределения темной материи под действием гравитации приобретает сетчатую, или ячеистую, или пенообразную структуру. И тогда между «узлами» крупномасштабной структуры, где рождаются массивные галактики, натягиваются нити — так называемые филаменты. Они состоят из темной материи, но есть там и газ, причем газ холодный, и он не стоит на месте: под действием гравитации он течет в узлы, туда, где идет формирование галактик. Первона-

чальные расчеты Декеля показывали, что аккреция холодного газа из филаментов на галактики эффективна только на больших красных смещениях, $z > 2$, и он даже связывал резкий спад в интенсивности космического звездообразования на $z < 1$ со сменой доминирующего режима аккреции, с линейного холодного на цилиндрический горячий. Однако сама идея была так хороша и так здорово решала и проблему источника аккреции холодного газа, и проблему недостатка момента в модельных галактиках, получаемых цилиндрической аккрецией, что народ стал ее обдумывать и обдумывать. И тут вот что приходит в голову. Да, в *массивных* галактиках аккреция из филаментов становится неэффективной на $z < 1$ из-за того, что у массивных галактик предполагается наличие горячей газовой короны, которая будет разогревать и поглощать любой подходящий снаружи филамент. Однако это именно в *массивных* галактиках! А у маломассивных галактик рентгеновских гало нет и быть не может — не хватает массы, чтобы разогреть газ. То есть маломассивным галактикам ничто не мешает аккрецировать из филаментов и на $z < 1$.

Позвольте, что же это получается? Массивные галактики аккрецируют из филаментов на $z > 2$, но и звезды свои они образуют тогда же. А маломассивные галактики аккрецируют из филаментов до сих пор, и звездообразование в них продолжается до сих пор! Это же *downsizing!* Без всякого «обратного эффекта» от активных ядер! А увеличение размеров «космологических ячеек» со временем, то есть фактически увеличение расстояний между соседними филаментами, все большее и большее «прореживание» системы филаментов, может приводить к тому, что они все чаще «промахиваются» мимо центра галактики при аккреции на нее и таким образом приносят газ со все большим орбитальным моментом. Это приводит к концентрации аккрецируемого газа на периферии дисков и к построению дисков спиральных галактик «изнутри–наружу» (*inside-out*).

Эмпирический сценарий: все начиналось с S0...

Итак, какие установленные наблюдательные факты могут служить основой для формулировки эмпирического сценария эволюции дисковой галактики? На высоких красных смещениях, 10 млрд лет назад, в дисках галактик еще было много собственного газа, до половины всей барионной массы или выше; эти газовые диски были толстыми, турбулентными, и звездообразование в них шло невероятно эффективно, с временами исчерпания газа меньше 1 млрд лет. Из

этой эпохи должны были «вылупляться» толстые звездные диски, без спиральных рукавов (из-за того, что они динамически горячие и потому устойчивые против волновых возмущений плотности); и отношение магния к железу в звездах этого диска должно было быть выше солнечного, из-за краткости эпохи звездообразования [6]. Первые ассоциации, которые вызывает это описание, — это диски линзовидных галактик в близких группах и скоплениях, там, где не было условий для внешней аккреции холодного газа последние 5–8 млрд лет, где «реликтовые» дисковые галактики могли сохраняться без новых добавок все эти последние миллиарды лет. Но и толстый диск нашей собственной Галактики тоже подходит под это описание!

Ближе к красному смещению $z = 1$ ситуация во Вселенной меняется. Звездный компонент в массивных галактиках уже в основном сформировался, и собственного газа в дисках не осталось. Звездообразование во Вселенной начинает затухать, — средняя космическая интенсивность звездообразования падает практически вертикально, с $z = 1$ до $z = 0$ она упала на порядок. Но в локальной Вселенной есть (должна быть!) постоянная аккреция внешнего газа с высоким угловым моментом на диски галактик — на массивные эллиптические галактики она не идет, потому что там на пути холодных потоков газа встает горячее рентгеновское гало. Именно внешняя аккреция газа может подпитывать современное звездообразование в дисковых галактиках — не такое эффективное, как на $z = 2$, но все-таки местами заметное.

Мы знаем, что в локальной Вселенной, в поле, 75 % галактик — спиральные, а 15 % — линзовидные. То есть в одних дисках, которых больше, звездообразование идет и видны спиральные ветви, а в других, которых меньше, звездообразования практически нет (а когда есть, это не спиральные ветви, а кольца). Почему? Неужели на линзовидные галактики поля не идет аккреция, хотя они находятся точно в таком же окружении, что и спиральные? Нет. Статистика результатов наших наблюдений [7] показывает, что на линзовидные галактики поля аккреция газа идет: в большинстве из них протяженные газовые диски наблюдаются. Однако газ в этих дисках ионизован не молодыми звездами, а ударными волнами. Спектральные наблюдения показывают, что именно в линзовидных галактиках поля кинематика газа часто не похожа на кинематику звезд: газ или вращается в обратную сторону, или вообще сосредоточен в диске, плоскость которого наклонена к плоскости звездного диска.

Очевидно, гравитационные приливные воздействия звезд на такой газовый диск греют его и мешают звездообразованию (которое требует холодного газа). То есть условием стационарного звездообразования в диске галактики в настоящую эпоху является не только постоянная аккреция внешнего газа, но и подходящая геометрия этой аккреции — в плоскости основного звездного диска, что опять же возвращает нас к холодным филаментам Декеля! Впрочем, ориентация современных дисковых галактик в пространстве относительно филаментов крупномасштабной структуры — это модная сейчас, но совершенно отдельная тема...

Библиографические ссылки

1. *Hubble E. P.* Realm of the Nebulae. — 1936.
2. *Naim A., Lahav O., Buta R. J. et al.* A comparative study of morphological classifications of APM galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1995. — Vol. 274. — P. 1107–1125. [arXiv:astro-ph/9502078](#).
3. *Dressler A.* Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies // *Astrophys. J.* — 1980. — Vol. 236. — P. 351–365.
4. *Baes M., Sil'chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A.* Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 991–1001. [astro-ph/0702605](#).
5. *Saintonge A., Kauffmann G., Wang J. et al.* COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies - II. The non-universality of the molecular gas depletion time-scale // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 415. — P. 61–76. [1104.0019](#).
6. *Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M.* The Thick Disks of Spiral Galaxies as Relics from Gas-rich, Turbulent, Clumpy Disks at High Redshift // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — Vol. 707. — P. L1–L5. [0910.3677](#).
7. *Katkov I. Y., Kniazev A. Y., Sil'chenko O. K.* Kinematics and Stellar Populations in Isolated Lenticular Galaxies // *Astron. J.* — 2015. — Vol. 150. — P. 24. [1505.01386](#).

СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАДИГМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ

Представления научного сообщества о том, как происходит образование звезд в 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, полученных в рамках проекта *Herschel*, на радиоинтерферометре ALMA и других современных инструментах, существенно продвинули наше понимание строения областей образования звезд, окрестностей молодых звездных объектов 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. Следующий прорыв в этой области может быть осуществлен по результатам планирующегося проекта «Спектр-ММ» (Миллиметр), предполагающего существенное улучшение углового разрешения и чувствительности.

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 «Спектр-Р» (РадиоАстрон). Существенный вклад в исследование процессов аккреции ожидается в результате реализации проекта «Спектр-УФ» («Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет», сокр. ВКО-УФ, англ. WSO-UV).

В совокупности с теоретическими достижениями полученные наблюдательные данные позволили существенно развить наши представления о процессах звездообразования.

Understanding by the scientific community of the star formation processes in the Galaxy undergone significant changes in recent years. This is largely due to the development of the observational basis of astronomy in the infrared and submillimeter ranges. Analysis of new observational data obtained in the course of the Herschel project, by radio interferometer ALMA and other modern facilities significantly advanced our understanding of the structure of the regions of star formation, young stellar object vicinities and provided comprehensive data on the mass function of proto-stellar objects in a number of star-forming complexes of the Galaxy. Mapping of the complexes in molecular radio lines allowed to study their spatial and kinematic structure on the spatial scales of tens and hundreds of parsecs. The next breakthrough in this field can be achieved as a result of the planned project “Spektr-MM” (Millimetron) which implies a significant improvement in angular resolution and sensitivity.

The use of sensitive interferometers allowed to investigate the details of star formation processes at small spatial scales – down to the size of the solar system (with the help of the ALMA), and even the Sun (in the course of the space project “Spektr-R” = RadioAstron). Significant contribution to the study of the processes of accretion is expected as a result of the project “Spektr-UV” (“World Space Observatory — Ultraviolet” = WSO-UV).

Complemented with significant theoretical achievements obtained observational data have greatly promoted our understanding of the star formation processes.

Введение

Явление звездообразования исследуется во всех диапазонах электромагнитного спектра. Различные объекты проявляются в излучении на различных длинах волн и, следовательно, требуют различных средств и методов для их исследования. Например, развитые области III являются довольно яркими источниками излучения длинных радиоволн; протозвездные ядра, молодые звездные объекты и их окружение проявляются в инфракрасном и субмиллиметровых диапазонах; аккрецирующие молодые звездные объекты проявляются в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах и т. д. Невозможно описать детали современной парадигмы звездообразования в Галактике в этой краткой работе. Поэтому я концентрируюсь на описании основных составляющих парадигмы и списке важных достижений последнего года, изменяющих парадигму звездообразования.

В последние годы наблюдается прорыв в исследованиях звездообразования. Это связано с такими успешными космическими миссиями, как *Herschel* [1], *Spitzer* [2], *HST* [3], включая такие полные обзоры неба, как *WISE* [4], и др. Прорыв также связан с успехом недавно введенных в действие наземных интерферометров *ALMA* [5] и *VLTI* [6], которые обеспечивают высокое угловое разрешение. Ранее построенные ведущие интерферометры, такие как *SMA* [7], *NOEMA* [8], *VLA* [9], *EVN* [10], *ATC* [11] и проч., также очень активно использовались для изучения звездообразования. Необходимо отметить масштабные обзоры с помощью наземных средств, такие как *UKIDSS* [12], *Gould Belt* [13], *ATLASGAL* [14], *MALT-45* [15], *THOR* [16], *MMB* [17] и др.

Также необходимо отметить значительные теоретические достижения, которые в большой степени продвинули наши знания об объектах звездообразования и понимание процессов формирования звезд. Теоретическая работа особенно важна для построения сценариев звездообразования. Эти сценарии описывают происхождение и эволюцию областей звездообразования, погруженных и молодых звездных скоплений, протозвезд и молодых звездных объектов.

Достижения в области исследований образования звезд и планет периодически резюмируются на специальных конференциях “Protostars and Planets”, в результате которых издается книга. Последняя, “Protostars and Planets VI”, была проведена в 2013 г. и информация о ней доступна публично [18]. Во всяком случае, область быстро развивается, и в этой статье я концентрируюсь на важнейших результатах, которые были получены в последние годы.

Текущая парадигма определенно утверждает, что звезды малых масс в нашей Галактике образуются в результате сжатия газопылевых сгустков. Классический обзор с соответствующим сценарием был опубликован Shu и др. в 1987 г. [19]. Хотя основы формирования звезд малых масс кажутся хорошо известными, есть много деталей, которые должны быть выяснены. Современная парадигма включает в себя множество деталей, которые были неизвестны не только в прошлом веке, но и совсем недавно.

Сценарии формирования звезд больших масс гораздо менее ясны, потому что этот процесс происходит в гораздо более хаотичном и энергичном окружении. Поэтому классический обзор по образованию массивных звезд Циннекера и Йорка [20] появился на два десятилетия позже обзора по звездам малой массы. Основы сценариев формирования звезд больших масс находятся в стадии раз-

работки до сих пор. В настоящее время твердо установлено, что сценарий «маломассивного типа» может привести к формированию массивных звезд. Тем не менее есть по крайней мере две альтернативы этому сценарию, которые включают в себя конкурирующую аккрецию (competitive accretion) и слияние протозвезд (protostellar mergers). Детальное рассмотрение данного вопроса представлено в обзоре Tan [21], который содержит много важных ссылок.

Окружение образующихся звезд

Изучение окружения образующихся звезд очень важно для исследования различных сценариев формирования звезд. Есть в Галактике и особые случаи. Наиболее ярким из них является окружение образующихся звезд в звездном диске вокруг массивной черной дыры в центре Галактики. Об этом можно прочитать в работе [22]. Изучение и отождествление особых случаев находится в активной стадии. На данный момент общепринятым и соответственно входящим в парадигму является только сам факт существования в нашей Галактике нестандартных окружений образующихся звезд. Наиболее распространенные и осознанные типы окружения включают в себя протозвездные/протопланетные диски и взаимодействующие звездные/планетные компаньоны.

Околзвездные диски

Околзвездные диски на стадии звездообразования формируются под действием электромагнитных и центробежных сил. Для прототы диски можно разделить на три категории (см, например, [23]). Протозвездные диски — геометрически толстые самогравитирующие диски. После формирования молодой звезды протозвездный диск превращается в аккреционный диск, вещество которого аккрецирует на звезду с темпом аккреции 10^{-8} – $10^{-6} M_{\odot}$ в год в случае звезд типа Т Тельца. Аккреционные диски звезд типа Т Тельца — геометрически тонкие структуры с массами около $(0.001$ – $0.1) M_{\odot}$ и размерами около $(100$ – $1000)$ астрономических единиц. В процессе эволюции аккреционные диски превращаются в протопланетные диски, подобные протосолнечному.

Диски как объекты и связанные с ними явления очень популярны, специальный словарь был составлен Эвансом и соавторами [24]. Этот словарь содержит много терминов и определений. Недавнее

исследование, проведенное Сицилией-Агиляр и др. [25], представляет другое ключевое описание протопланетных дисков, описывающее синергетику многоволновых наблюдений.

Следует отметить, что в настоящее время знания о строении и эволюции дисков вокруг звезд малой массы быстро развиваются вследствие новых открытий, совершаемых с использованием интерферометра *ALMA*. Пресс-релизы на сайте [26] позволяют находиться в курсе последних достижений. Для того чтобы показать масштаб открытий, я приведу несколько названий пресс-релизов, опубликованных в 2016 г. и связанных с общей структурой диска: “ALMA’s Best Image of a Protoplanetary Disk”, “ALMA Discovers Hidden Spiral Arms Embracing a Young Star”, “ALMA Discovers a Rotating Ring of Complex Organic Molecules”. Исследование молекулярной химии в дисках является очень быстро развивающейся областью. Подробный обзор исследований в этой области был опубликован в 2013 г. [27]. Последние открытия включают обнаружение органических молекул, таких сложных, как метанол [28, 29].

В последние годы мы узнали много нового о самых ранних стадиях формирования планет вокруг образующихся звезд солнечного типа и о наличии сложных/пребиотических молекул в местах планетообразования. Пресс-релизы 2016 г. с сайта *ALMA* сообщают нам: “ALMA confirms predictions on the interaction between protoplanetary disks and planets”, “ALMA Reveals Footprints of Baby Planets in a Gas Disk”, “ALMA Observes First Protoplanetary Water Snow Line Thanks to Stellar Outburst”, “ALMA Spots Possible Formation Site of Icy Giant Planet”.

Образование звезд сопровождается истечениями, которые связаны с потерей углового момента и определяются магнитными полями в диске. Последний наблюдательный результат представлен в пресс-релизе “ALMA Spots Baby Star’s Growing Blanket”, наши теоретические исследования по этой теме опубликованы в [23].

Исследования дисков вокруг молодых звезд приблизительно одинакового возраста в подобном окружении проводятся по данным о молодых звездных скоплениях, которые являются базовыми объектами для изучения эволюции дисков. Было показано, что окружающая среда/взаимодействие с окрестностями в каждом скоплении играют важную роль в эволюции дисков. Получены свидетельства о существовании неоднородностей в виде малых концентраций звезд внутри скоплений большего размера [30].

Наблюдения молекулярных линий на *ALMA* и *SMA* обнаружили вращающиеся диски и связанные с ними истечения вокруг нескольких образующих массивных звезд [31–33]. Это подтверждает возможность сценария «маломассивного типа», приводящего к образованию массивных звезд. Наблюдения в среднем инфракрасном диапазоне на *VLTI/MIDI* подтверждают это утверждение обнаружением дисков и истечений в молодых звездных объектах большой массы [34–36].

Кратность образующихся звезд

Хорошо известно, что звезды, как правило, формируются в группах. Последние крупные исследования нескольких сотен областей формирования массивных звезд на инфракрасных телескопах класса с 8–10 м обнаружили, что вопрос о кратности образующихся звезд, взаимодействующих между собой, является чрезвычайно важным [37]. Это подтверждается результатами спектроскопического мониторинга молодых звезд, даже на телескопах небольшого диаметра [38, 39]. Таким образом, образование массивных звезд по сценариям, отличающимся от «маломассивного типа», представляется возможным.

Интерферометры подтвердили свою эффективность в наблюдениях кратности отдельных объектов в субмиллиметровом и радиодиапазонах также и для звезд малой массы. Это доказывают результаты специальных обзоров, таких, например, как *CALYPSO* [40] и *VANDAM* [41]. Пресс-релизы 2016 г. “ALMA Unveils Details of Planet Formation around Binary Star” и “Young Stellar System Caught in Act of Forming Close Multiples” представляют прекрасные примеры формирующихся кратных звездных систем.

Наблюдения скоплений протозвезд ясно показывают, что образующиеся звезды промежуточных и больших масс оказывают сильное влияние на близлежащие молодые звездные объекты и беззвездные сгустки [42]. Таким образом, ближайшее окружение формирующихся звезд подвергается мощному воздействию окружающих их ярких звезд.

Окрестности образующихся звезд

Как было отмечено в предыдущем разделе, современная парадигма образования звезд включает в себя взаимодействие непосред-

ственного окружения образующихся звезд с более широкими окрестностями. Это является темой данного раздела.

Молекулярные ядра

Молекулярные ядра являются наиболее ранним типом изолированных объектов, связанных с образованием звезд в Галактике. Некоторые из этих ядер не содержат звезд, но могут подвергнуться внешнему воздействию, которое приведет к процессам вынужденного звездообразования.

Ядра, дающие жизнь звездам малой массы, имеют сравнительно небольшие размеры, и детальное исследование этих объектов возможно только в близких комплексах звездообразования, таких как Пояс Гулда (Gould Belt). Важные результаты соответствующих обзоров опубликованы в следующих работах, анализирующих данные, полученные на *Herschel* [43], JCMT [44] и VLA [45]. Общие свойства ядер до сих пор являются объектом рассмотрения.

Обширная информация о ядрах, в которых образуются массивные звезды, приведена в результатах обзора *ATLASGAL* [14], специальных исследованиях объектов, обнаруженных в ходе обзора метанольных мазеров *MMB* [17], и результатах других проектов. Эти ядра достаточно яркие, чувствительные обзоры позволяют исследовать общие свойства этих объектов во всей Галактике [46]. Необходимо отметить также «слепые» (то есть ненаправленные, полные обзоры) избранных областей, например *MALT-45* [15], которые дают информацию о частях Галактики, представляющих особый интерес.

Исследования молекулярных ядер очень важны для понимания деталей процессов образования звезд. Однако сам факт существования молекулярных ядер и их общие свойства соответствуют существующей парадигме, новые исследования вряд ли приведут к ее изменению.

Волокна

Обзоры окрестностей молекулярных ядер привели к важному открытию: ядра находятся в волокнах, которые являются основными составляющими звездообразующих комплексов. Последние работы показывают, что в волокнах, вероятно, заключается основная доля плотного газа в звездообразующих молекулярных облаках [43, 47]. Анализ результатов *ATLASGAL* позволил выделить всегалактический набор плотных волокнистых структур [48]. Есть признаки того,

что волокна обладают некоторыми универсальными свойствами [49]. В волокнах наблюдается значительная фрагментация [50] и выделяются подструктуры с коррелированными скоростями [51]. Иногда хорошо выделяется сеть перпендикулярных «бороздок» или субволокон [52]. Происхождение волокон и их общие свойства не совсем ясны, но они являются одной из важнейших составляющих современной парадигмы образования звезд.

Области НП

Обзоры ясно показывают, что наша Галактика наполнена пузырями — областями НП, образованными молодыми и яркими звездами. Влияние ярких звезд может приводить к формированию массивных звезд [53], звезд меньших масс [54] и звездных скоплений [55]. Исследования физических параметров и кинематики газа на краях областей НП [56, 57] показали, что процессы звездообразования, инициированные в одном и том же комплексе, могут иметь различную природу. Различные сценарии представляют собой разновидности сценариев «сгребания-и-сжатия» (“collect-and-collapse”) и «сжатия ранее существовавших сгустков».

Комплексы звездообразования

Как показано в работе Инуцка с соавторами [58], для образования молекулярных комплексов звездообразования требуется несколько эпизодов сверхзвукового сжатия. Это может произойти из-за распространения крупномасштабных ударных волн от сверхновой, спиральных волн плотности, расширения областей НП и межоблачных столкновений. Последний сценарий часто рассматривается как основной для образования богатых звездных скоплений и их комплексов [59]. До сих пор неясно, как формируются комплексы звездообразования, но есть указание на пути решения проблемы. Они заключаются в изучении «СО-темного» (“CO-dark”) газа, который недавно был обнаружен как весьма заметная составляющая межзвездной среды. В последнее время этот газ является объектом интенсивных исследований, как наблюдательных [60], так и теоретических [61]. Необходимо отметить большие теоретические достижения в изуче-

нии молекулярных облаков и формирования комплексов звездообразования на галактических масштабах [62–64]. Они ясно показали, что свойства молекулярных облаков зависят от их галактического окружения.

Заключение

Таким образом, существующая парадигма образования звезд в Галактике изменяется, была существенно дополнена в последние годы. Она быстро развивается за счет использования сверхсовременных наблюдательных средств, развития теории и средств интерпретации. Существенный прорыв ожидается от предстоящих космических миссий «Спектр-ММ» [65] и «Спектр-УФ» [66] с ведущим российским участием.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 15–12–10017.

Библиографические ссылки

1. HERSCHEL. — <http://www.cosmos.esa.int/web/herschel/home>.
2. Spitzer. — http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/main/index.html.
3. HST. — https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html.
4. WISE. — http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/main/index.html.
5. ALMA. — <http://www.almaobservatory.org/>.
6. VLTI. — <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti.html>.
7. SMA. — <https://www.cfa.harvard.edu/sma/>.
8. NOEMA. — <http://iram-institute.org/EN/noema-project.php>.
9. VLA. — <http://www.vla.nrao.edu/>.
10. EVN. — <http://www.evlbi.org/>.
11. ATCA. — <https://www.narrabri.atnf.csiro.au/>.
12. UKIDSS. — <http://www.ukidss.org/>.
13. GouldBelt. — <http://www.herschel.fr/cea/gouldbelt/en/>.
14. GouldBelt. — <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/div/atlasgal/>.
15. *Jordan C. H., Walsh A. J., Lowe V. et al.* MALT-45: a 7 mm survey of the southern Galaxy - I. Techniques and spectral line data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 448. — P. 2344–2361. 1501.06650.

16. GouldBelt. — <http://www2.mpia-hd.mpg.de/thor/Overview.html>.
17. *Green J. A., Cohen R. J., Caswell J. L. et al.* The Methanol Multi-beam Survey // *Astrophysical Masers and their Environments* / ed. by J. M. Chapman, W. A. Baan : IAU Symposium. — 2007. — Vol. 242. — P. 218–222.
18. ppvi. — <http://www.mpia.de/homes/ppvi/index.php>.
19. *Shu F. H., Adams F. C., Lizano S.* Star formation in molecular clouds - Observation and theory // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1987. — Vol. 25. — P. 23–81.
20. *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward Understanding Massive Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 481–563. 0707.1279.
21. *Tan J. C.* Comparison of Low-Mass and High-Mass Star Formation // *ArXiv e-prints*. — 2015. 1510.08021.
22. *Yusef-Zadeh F., Wardle M.* Star Formation Close to Sgr A* and Beyond the Nuclear Cluster // *ArXiv e-prints*. — 2016. 1611.09401.
23. *Khairbrakhmanov S. A., Dudorov A. E., Parfenov S. Y., Sobolev A. M.* Large-scale magnetic field in the accretion discs of young stars: the influence of magnetic diffusion, buoyancy and Hall effect // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. 586–598. 1609.03969.
24. *Evans N., Calvet N., Cieza L. et al.* The Diskionary: A Glossary of Terms Commonly Used for Disks and Related Objects, First Edition // *ArXiv e-prints*. — 2009. 0901.1691.
25. *Sicilia-Aguilar A., Banzatti A., Carmona A. et al.* A "Rosetta Stone" for protoplanetary disks: The synergy of multi-wavelength observations // *ArXiv e-prints*. — 2016. 1611.01798.
26. ALMApress. — <http://www.almaobservatory.org/en/press-room/press-releases>.
27. *Henning T., Semenov D.* Chemistry in Protoplanetary Disks // *Chemical Reviews*. — 2013. — Vol. 113. — P. 9016–9042. 1310.3151.
28. *Walsh C., Loomis R. A., Öberg K. I. et al.* First Detection of Gas-phase Methanol in a Protoplanetary Disk // *Astrophys. J. Lett.* — 2016. — Vol. 823. — P. L10. 1606.06492.
29. *Parfenov S. Y., Semenov D. A., Sobolev A. M., Gray M. D.* Towards detecting methanol emission in low-mass protoplanetary discs

- with ALMA: the role of non-LTE excitation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 460. — P. 2648–2663. 1605.03729.
30. *Sicilia-Aguilar A., Kim J. S., Sobolev A. et al.* The low-mass stellar population in the young cluster Tr 37. Disk evolution, accretion, and environment // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 559. — P. A3. 1308.0114.
 31. *Johnston K. G., Robitaille T. P., Beuther H. et al.* A Keplerian-like Disk around the Forming O-type Star AFGL 4176 // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 813. — P. L19. 1509.08469.
 32. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
 33. *Chen H.-R. V., Keto E., Zhang Q. et al.* A Hot and Massive Accretion Disk around the High-mass Protostar IRAS 20126+4104 // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 823. — P. 125. 1604.00523.
 34. *Boley P. A., Kraus S., de Wit W.-J. et al.* A multi-wavelength interferometric study of the massive young stellar object IRAS 13481-6124 // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A78. 1511.03195.
 35. *Caratti o Garatti A., Stecklum B., Weigelt G. et al.* Tracing jet emission at the base of a high-mass YSO. First AMBER/VLTI observations of the Br γ emission in IRAS 13481-6124 // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 589. — P. L4. 1603.06860.
 36. *Caratti o Garatti A., Tambovtseva L. V., Garcia Lopez R. et al.* AMBER/VLTI high spectral resolution observations of the Br γ emitting region in HD 98922. A compact disc wind launched from the inner disc region // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 582. — P. A44. 1508.00798.
 37. *de Koter A.* Formation and Evolution of Massive Stars: Current Surveys // *Multi-Object Spectroscopy in the Next Decade: Big Questions, Large Surveys, and Wide Fields* / ed. by I. Skillen, M. Barcells, S. Trager : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2016. — Vol. 507. — P. 147.
 38. *Alexeeva S. A., Sobolev A. M., Gorda S. Y. et al.* Orbital and physical parameters of the spectroscopic binary HD37737 // *Astrophysical Bulletin.* — 2013. — Vol. 68. — P. 169–176.
 39. *Bisyarina A. P., Sobolev A. M., Gorda S. Y., Parfenov S. Y.* Optical spectroscopic monitoring of the Herbig Be binary star HD 200775:

- New maximum of activity and refinement of the orbital period // Astrophysical Bulletin. — 2015. — Vol. 70. — P. 299–309.
40. *Santangelo G., Codella C., Cabrit S. et al.* Jet multiplicity in the proto-binary system NGC 1333-IRAS4A. The detailed CALYPSO IRAM-PdBI view // Astron. Astrophys. — 2015. — Vol. 584. — P. A126. 1511.01428.
 41. *Tobin J. J., Looney L. W., Li Z.-Y. et al.* The VLA Nascent Disk and Multiplicity Survey of Perseus Protostars (VANDAM). II. Multiplicity of Protostars in the Perseus Molecular Cloud // Astrophys. J. — 2016. — Vol. 818. — P. 73. 1601.00692.
 42. *Wang Y., Audard M., Fontani F. et al.* Ongoing star formation in the protocluster IRAS 22134+5834 // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 587. — P. A69. 1510.02251.
 43. *Könyves V., André P., Men'shchikov A. et al.* A census of dense cores in the Aquila cloud complex: SPIRE/PACS observations from the Herschel Gould Belt survey // Astron. Astrophys. — 2015. — Vol. 584. — P. A91. 1507.05926.
 44. *Ward-Thompson D., Pattle K., Kirk J. M. et al.* The JCMT and Herschel Gould Belt Surveys: a comparison of SCUBA-2 and Herschel data of dense cores in the Taurus dark cloud L1495 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 463. — P. 1008–1025. 1608.04353.
 45. *Pech G., Loinard L., Dzib S. A. et al.* The Gould's Belt Very Large Array Survey. V. The Perseus Region // Astrophys. J. — 2016. — Vol. 818. — P. 116. 1511.07522.
 46. *Urquhart J. S., Csengeri T., Wyrowski F. et al.* ATLASGAL: Massive Star Formation Across the Galaxy // EAS Publications Series : EAS Publications Series. — 2016. — Vol. 75. — P. 215–216.
 47. *Schisano E., Rygl K. L. J., Molinari S. et al.* The Identification of Filaments on Far-infrared and Submillimeter Images: Morphology, Physical Conditions and Relation with Star Formation of Filamentary Structure // Astrophys. J. — 2014. — Vol. 791. — P. 27. 1406.4443.
 48. *Li G.-X., Urquhart J. S., Leurini S. et al.* ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 591. — P. A5. 1604.00544.

49. *André P., Revéret V., Könyves V. et al.* Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: High-resolution submillimeter imaging of the massive star-forming complex NGC 6334 with ArTéMiS // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 592. — P. A54. 1605.07434.
50. *Kainulainen J., Hacar A., Alves J. et al.* Gravitational fragmentation caught in the act: the filamentary Musca molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A27. 1507.03742.
51. *Hacar A., Tafalla M., Kauffmann J., Kovács A.* Cores, filaments, and bundles: hierarchical core formation in the L1495/B213 Taurus region // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 554. — P. A55. 1303.2118.
52. *Palmeirim P., André P., Kirk J. et al.* Herschel view of the Taurus B211/3 filament and striations: evidence of filamentary growth? // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 550. — P. A38. 1211.6360.
53. *Deharveng L., Schuller F., Anderson L. D. et al.* A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 523. — P. A6. 1008.0926.
54. *Ladeyschikov D. A., Sobolev A. M., Parfenov S. Y. et al.* Star formation in the S233 region // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 452. — P. 2306–2317. 1506.05888.
55. *Kirsanova M. S., Sobolev A. M., Thomasson M. et al.* Star formation around the HII region Sh2-235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — Vol. 388. — P. 729–736. 0805.1586.
56. *Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. et al.* Physical conditions in star-forming regions around S235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 437. — P. 1593–1608. 1310.6123.
57. *Rodón J. A., Zavagno A., Baluteau J.-P. et al.* Herschel SPIRE-FTS observations of RCW 120 // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 579. — P. A10. 1504.06485.
58. *Inutsuka S.-i., Inoue T., Iwasaki K., Hosokawa T.* The formation and destruction of molecular clouds and galactic star formation. An origin for the cloud mass function and star formation efficiency // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 580. — P. A49. 1505.04696.
59. *Fukui Y., Torii K., Ohama A. et al.* The Two Molecular Clouds in RCW 38: Evidence for the Formation of the Youngest Super Star

- Cluster in the Milky Way Triggered by Cloud-Cloud Collision // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 820. — P. 26. 1504.05391.
60. *Beuther H., Ragan S. E., Ossenkopf V. et al.* Carbon in different phases ([CII], [CI], and CO) in infrared dark clouds: Cloud formation signatures and carbon gas fractions // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 571. — P. A53. 1410.0156.
61. *Glover S. C. O., Clark P. C.* Hunting for the signatures of molecular cloud formation // *EAS Publications Series : EAS Publications Series.* — 2016. — Vol. 75. — P. 367–370. 1511.04689.
62. *Khoperskov S. A., Vasiliev E. O., Sobolev A. M., Khoperskov A. V.* The simulation of molecular clouds formation in the Milky Way // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2013. — Vol. 428. — P. 2311–2320. 1207.5162.
63. *Khoperskov S. A., Vasiliev E. O., Ladeyschikov D. A. et al.* Giant molecular cloud scaling relations: the role of the cloud definition // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 455. — P. 1782–1795. 1508.04966.
64. *Dobbs C. L., Adamo A., Few C. G. et al.* The properties, origin and evolution of stellar clusters in galaxy simulations and observations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. 1609.00209.
65. *Kardashev N. S., Novikov I. D., Lukash V. N. et al.* Review of scientific topics for the Millimetron space observatory // *Physics Uspekhi.* — 2014. — Vol. 57. — P. 1199–1228. 1502.06071.
66. *Boyarchuk A. A., Shustov B. M., Savanov I. S. et al.* Scientific problems addressed by the Spektr-UV space project (world space Observatory—Ultraviolet) // *Astronomy Reports.* — 2016. — Vol. 60. — P. 1–42.

Л. Л. Соколов, Н. А. Петров,
А. А. Васильев, Г. А. Кутеева
Санкт-Петербургский государственный университет

ОБ ОПАСНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ АСТЕРОИДОВ

Обсуждаются траектории возможных соударений с Землей опасных астероидов. Найдено множество возможных соударений с Землей астероида 2015 RN35. Многие астероиды были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Обсуждаются также возможные соударения с Землей астероида Апофис. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и необходимости более подробного исследования множеств возможных соударений опасных астероидов с Землей. Такое исследование необходимо для планирования и реализации мероприятий по обеспечению астероидной безопасности.

We discuss trajectories with possible collisions of hazardous asteroids with the Earth. Possible collisions of asteroid 2015 RN35 with the Earth are presented, including previously unknown collisions. Main characteristics and properties of corresponding trajectories are derived. Possible collisions of asteroid Apophis with the Earth are discussed too. The results testify that possible collisions of hazardous asteroids need more carefully investigation and this investigation is practicable. Such investigation is necessary for planning and realisation measures to avoid collisions.

Введение

Актуальность проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности сегодня не вызывает сомнений [1, 2]. Важнейшая ее составляющая — выделение опасных объектов, прогнозирование их движения, определение возможных соударений с Землей и тесных сближений с ней.

Трудность нахождения возможных соударений связана, в частности, с так называемыми резонансными возвратами астероидов — повторными тесными сближениями с планетой в случае, когда после первого тесного сближения астероид переходит на резонансную

орбиту. При сближениях теряется точность прогнозирования, движение становится практически недетерминированным. Для выделения опасных сценариев приходится применять специальные методы. Мы рассмотрим задачу нахождения возможных сближений и соударений на примере недавно открытого астероида 2015 RN35, а также хорошо известного астероида Апофис. Для последнего резонансные возвраты играют решающую роль, а число работ, посвященных ему, огромно. Укажем некоторые [3–11].

Опасный астероид 2015 RN35

Астероид 2015 RN35 открыт 9 сентября 2015 г. на обсерватории Pan-STARRS 1. В этот момент он находился на расстоянии 0.1907 а. е. от Земли, а наименьшее расстояние от Земли 0.1561 а. е. достигнуто 27 сентября 2015 г. На первом этапе наблюдений от 9 сентября 2015 г. до 3 ноября 2015 г. было получено 33 наблюдения. После улучшения орбиты на сайте НАСА было опубликовано решение, полученное 30 ноября 2015 г., которое соответствует первому этапу наблюдений.

На втором этапе, от 19 января 2016 г. до 7 марта 2016 г., было получено 23 наблюдения. После обработки наблюдений и улучшения орбиты на сайте NASA было опубликовано новое решение, полученное 7 марта 2016 г., которое соответствует второму этапу наблюдений. Большая полуось получилась $a = (1.459378 \pm 11 \times 10^{-6})$ а. е. Точность большой полуоси на втором этапе наблюдений увеличилась примерно в 8 раз. Эксцентриситет орбиты 2015 RN35 равен $e = 0.34$, наклон — $i = 0.26^\circ$.

О методе нахождения соударений астероидов с Землей

Для поиска соударений астероидов с планетами мы используем численное интегрирование уравнений движения, интегратор Эверхарта [12] и современные динамические модели Солнечной системы (DE405, DE430 и др.) [13]. В основе метода — варьирование начальных данных в области возможных движений. Мы ограничиваемся варьированием на одномерном многообразии начальных данных вместо шестимерного, что значительно облегчает поиски. Численные эксперименты свидетельствуют, что обычно этого достаточно.

Поиск соударений происходит в два или три этапа. На первом этапе находятся локальные минимумы геоцентрического расстояния как функции времени и варьируемой координаты. На втором этапе эти минимумы уточняются с использованием более мелкого шага варьирования. Соударение соответствует уточненному минимуму меньше радиуса Земли, иначе это сближение. Основная трудность, с которой мы встречаемся в случае резонансных возвратов (примером является астероид Апофис) — потеря точности, связанная с рассеянием возможных траекторий при тесных сближениях (в 2029, 2036 и 2051 гг. для Апофиса). Для преодоления этой трудности мы переносим начальные данные вдоль траектории вперед, за 2029 г., для Апофиса [4] и варьируем начальные данные в новой области. Эти вычисления составляют третий этап поиска соударений. Обычно для Апофиса мы использовали варьирование «начальных данных» 01.05.2035. Это позволяет зафиксировать именно соударение, а не просто тесное сближение, видимое на втором этапе. «Разглядеть» соударение в интервале 2006—2016 гг. удастся только для самых больших ведущих к соударениям щелей.

Для идентификации и описания траекторий с соударениями мы использовали следующие характеристики: 1. Дата и момент соударения. 2. Относительное положение щели, ведущей к соударению. Это разность большой полуоси, ведущей к данному соударению, и большой полуоси некоторой фиксированной траектории (номинальной орбиты, или фиксированного соударения) в некоторый момент времени. Альтернативный метод определения положения щели — использование минимального геоцентрического расстояния в момент некоторого предыдущего тесного сближения астероида с Землей. 3. Размер щели, ведущей к соударению. Это максимальная разность больших полуосей траекторий, ведущих к данному соударению, в некоторый момент времени. Альтернативный метод определения размера щели — использование диапазона (максимальной разности) минимальных геоцентрических расстояний траекторий, ведущих к данному соударению в момент некоторого фиксированного предыдущего тесного сближения астероида с Землей. 4. Минимальное геоцентрическое расстояние в момент рассматриваемого соударения (из всех траекторий, ведущих к этому соударению).

Необходимо подчеркнуть, что указанные характеристики траекторий с соударениями оказываются устойчивыми относительно малых изменений модели движения, в то время как сами исследуемые траектории демонстрируют сильнейшую ляпуновскую неустой-

чивость, связанную с тесными сближениями. Эти характеристики практически сохраняются при переходе от модели Солнечной системы DE405 к модели DE430, а также при небольшом (для Апофиса) изменении номинальной орбиты. Даты и моменты найденных нами соударений соответствуют приведенным на сайте НАСА для основных (с самыми большими размерами щелей) соударений. Положение ведущей к соударению щели, определяемое по изменению исходной большой полуоси, и характеристика σ_{LOV} (см. сайт НАСА) оказываются линейно зависимыми с точностью порядка процента. Размеры щелей также коррелируют с соответствующими характеристиками на сайте НАСА, в том числе с вероятностями соударений, если положения щелей близки. Согласующиеся результаты получаются также, если брать начальные данные на номинальной траектории в разные моменты времени. Для основных (по размерам щелей) соударений сравнивались вышеуказанные альтернативные методы определения положений и размеров щелей, получаются согласующиеся результаты. Все это косвенно свидетельствует о правильности и надежности получаемых результатов, что исключительно важно.

Для поиска соударений астероидов с Землей нами использовался компьютерный кластер вычислительного центра Ресурсного центра научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, что было обусловлено необходимостью проведения большого объема вычислений. Алгоритм позволяет естественно использовать распараллеливание вычислений, и использование компьютерного кластера оказалось исключительно эффективным.

Соударения и сближения астероида 2015 RN35

Используя номинальную орбиту, полученную 30.11.2015 после первого этапа наблюдений 2015 RN35, мы нашли 154 возможных соударения в текущем столетии. На рис. 1 показаны относительные положения и размеры соответствующих щелей. Положения определяются разностью большой полуоси, соответствующей текущему соударению, и номинального значения большой полуоси в начальный момент 30.11.2015 в метрах, размеры — диапазоном ведущих к соударению значений большой полуоси в начальный момент в метрах. На рис. 2 показаны относительные положения и даты соударений для соответствующих щелей. Кругами выделены соударения, которые были приведены на сайте НАСА.

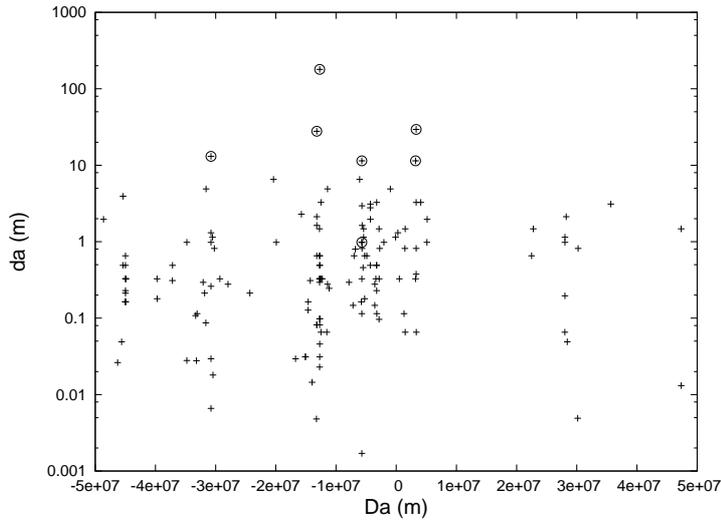


Рис. 1. Относительные положения и размеры щелей астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений

Для той же номинальной орбиты нами было найдено семь сближений с Землей на расстояние менее 0.5 а. е. на интервале времени от 1978 до 2022 г. В табл. 1 приведены даты сближений, юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния (а. е.). Для сравнения приведены юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния, которые были указаны на сайте НАСА. Как видно из табл. 1, отличие по юлианской дате составляет 0.001 суток в 1985 г., а по геоцентрическому расстоянию максимальное отличие составляет 0.000013 а. е. в 1978 г.

Используя номинальную орбиту, полученную 07.03.2016 после второго этапа наблюдений 2015 RN35, мы нашли 21 возможное соударение в текущем столетии. На рис. 3 показаны относительные положения и размеры соответствующих щелей. Положения определяются разностью большой полуоси, соответствующей текущему соударению, и номинального значения большой полуоси в начальный момент (07.03.2016) в метрах, размеры — диапазоном ведущих к соударению значений большой полуоси в начальный момент в метрах. На рис. 4 показаны относительные положения и даты соударений для соответствующих щелей. Кругами выделены соударения, кото-

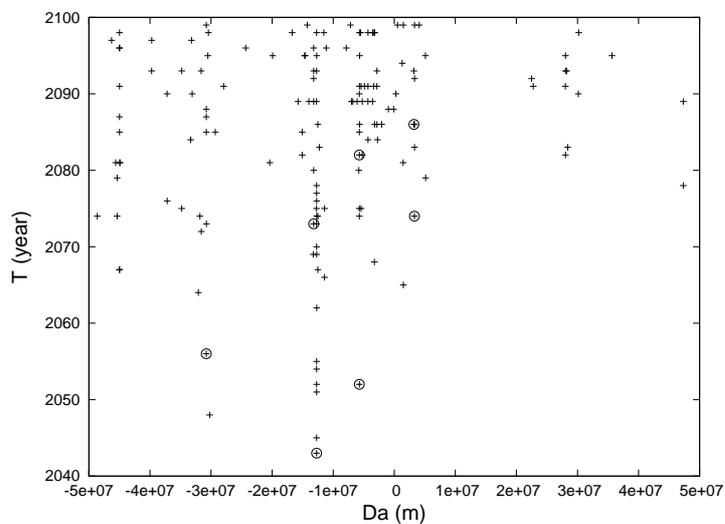


Рис. 2. Относительные положения и даты соударений астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений

Таблица 1. Сближения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, d (а. е.) — минимальное расстояние

Дата	JD	JD НАСА	d	d НАСА
06-09-1978	2443757.600	2443757.600	0.493140	0.493127
10-10-1985	2446348.723	2446348.722	0.033738	0.033741
30-12-1992	2448987.476	2448987.476	0.099601	0.099595
22-01-2000	2451566.386	2451566.386	0.452191	0.452187
27-09-2015	2457292.542	2457292.542	0.156206	0.156206
30-01-2016	2457417.510	2457417.510	0.371670	0.371670
14-12-2022	2459928.286	2459928.286	0.003781	0.003782

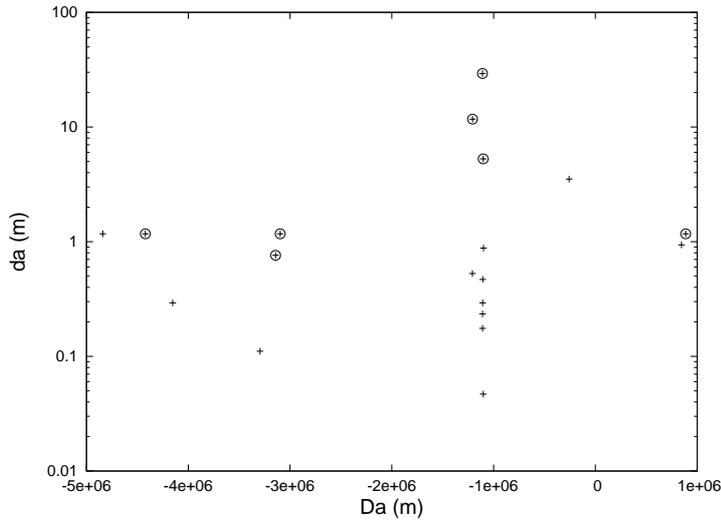


Рис. 3. Относительные положения и размеры щелей астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений

рые приведены на сайте НАСА. Выделяются семейства соударений с близкими положениями щелей.

Для той же номинальной орбиты после второго этапа наблюдений нами были найдено 12 сближений с Землей на расстояние менее 0.5 а. е. на интервале времени от 1955 до 2031 г. В табл. 2 приведены даты сближений, юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния (а. е.). Для сравнения приведены юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния, которые были указаны на сайте НАСА. Как видно из табл. 2, максимальное отличие по юлианской дате составляет 0.035 суток в 2031 г., а по геоцентрическому расстоянию максимальное отличие составляет 0.000440 а. е. также в 2031 г. Отметим два сближения (1956 и 1962 гг.), не указанные на сайте НАСА, особенно сравнительно тесное в 1962 г. Если бы удалось найти соответствующие старые наблюдения, точность орбиты увеличилась бы существенно.

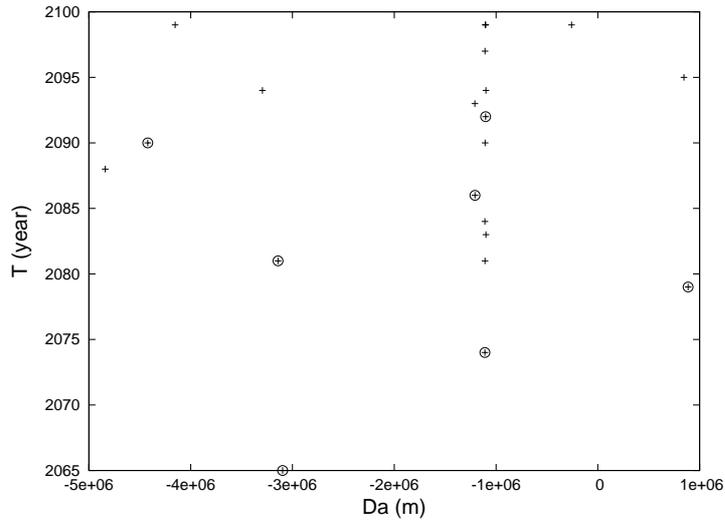


Рис. 4. Относительные положения и даты соударений астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений

Таблица 2. Сближения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, d (а. е) — минимальное расстояние

Дата	JD	JD НАСА	d	d НАСА
16-09-1955	2435367.043	2435367.021	0.310523	0.310885
18-02-1956	2435521.666		0.476823	
01-11-1962	2437970.379		0.021406	
15-01-1970	2440602.142	2440602.147	0.336371	0.336467
06-09-1978	2443758.118	2443758.120	0.483357	0.483321
09-10-1985	2446348.271	2446348.269	0.036089	0.036098
30-12-1992	2448987.040	2448987.038	0.095208	0.095190
22-01-2000	2451566.221	2451566.220	0.448965	0.448952
27-09-2015	2457292.543	2457292.543	0.156211	0.156211
30-01-2016	2457417.508	2457417.508	0.371682	0.371682
15-12-2022	2459928.676	2459928.677	0.004305	0.004307
28-09-2031	2463137.547	2463137.582	0.164867	0.164427

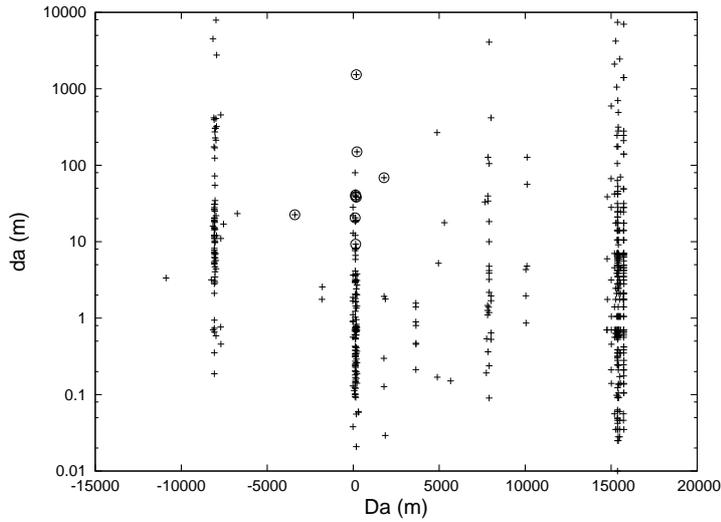


Рис. 5. Относительные положения и размеры щелей астероида Апофис

Соударения астероида Апофис

Любопытно сравнить результаты, полученные ранее для астероида Апофис (например, [9]), с аналогичными результатами для астероида 2015 RN35. На рис. 5 приведены относительные положения и размеры щелей, ведущих к соударениям с Землей астероида Апофис в текущем столетии. Использовался старый номинал (2006 г.), модель Солнечной системы DE405. Положения определялись разностью текущей большой полуоси (в метрах) и большой полуоси для «основного» (в 2068 г.) соударения в начальный момент в 2006 г., размеры щелей — диапазоном ведущих к соударению больших полуосей (в метрах) в 2035 г. На рис. 6 приведены относительные положения щелей и даты тех же соударений. Кругами выделены соударения, которые приведены на сайте НАСА. При внимательном рассмотрении отчетливо видна фрактальная структура.

На рис. 7 приведена центральная область рис. 5, ось абсцисс взята в крупном масштабе, ее начало сдвинуто от вышеуказанного и соответствует некоторой «промежуточной» (между 2006 и 2014 г.) номинальной орбите. В настоящее время актуальны только соударения в окрестности номинальной орбиты, где находятся эти круги.

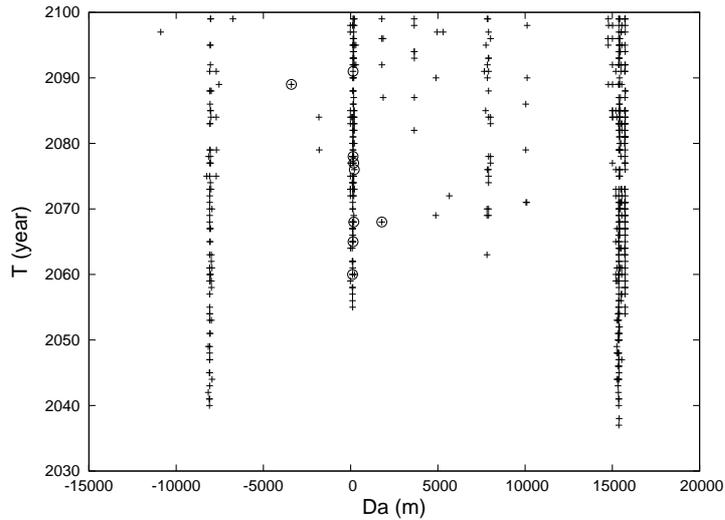


Рис. 6. Относительные положения щелей и даты соударений астероида Апофис

При внимательном рассмотрении отчетливо видна структура, похожая на фрактальную. Всего в самой широкой исследованной области на рис. 5, 6 приведено более 500 соударений, из них актуальны около 130. В этой широкой области отчетливо видны три самых богатых семейства. Центральное — около номинальной орбиты — связано с рассеянием возможных траекторий после сближения в 2051 г. Семейство слева связано с рассеянием возможных траекторий после сближения в 2036 г.; соответствующее соударение активно обсуждалось до уточнения орбиты Апофиса в 2012–2013 гг. Очень богатое семейство справа связано с рассеянием после сближений в 2037 и 2038 гг. Это семейство было актуальным только в самом начале исследования Апофиса, когда точность орбиты была мала.

Исследование «виртуальных» соударений астероида представляет не только академический интерес. При изменении орбиты астероида с целью предотвращения соударений необходимо знать, где находятся щели, а где — свободные от них области.

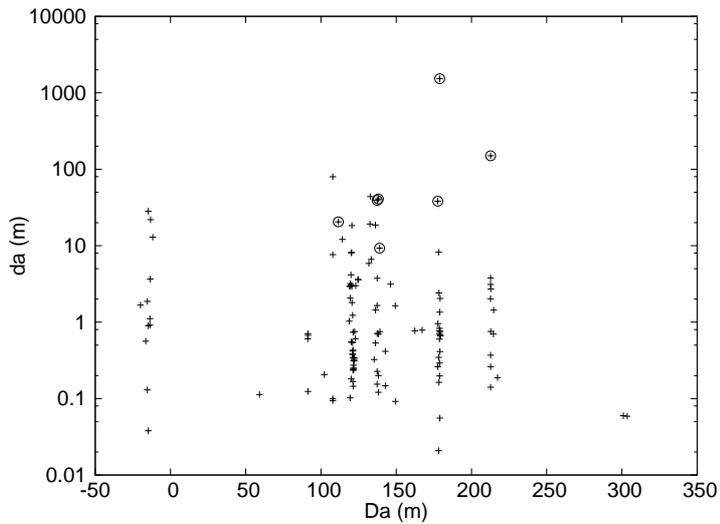


Рис. 7. Относительные положения и размеры щелей астероида Апофис в окрестности номинальной орбиты

Заключение

Нами разработан метод выделения возможных соударений астероидов с Землей. Этот метод применен для астероида Апофис и 2015 RN35; найдено множество возможных соударений этих астероидов с Землей, большинство из них были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Правильность полученных результатов подтверждается, в частности, сравнением с аналогичными результатами, полученными американскими коллегами и публикуемыми на сайте НАСА <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>. Характеристики траекторий с соударениями устойчивы по отношению к малым изменениям начальных данных и модели движения, что также свидетельствует об их надежности.

Можно сделать вывод о том, что в настоящее время опасность соударений астероидов с Землей недооценивается, ведь мы знаем далеко не все возможные соударения с Землей даже известных астероидов. Необходимо более подробно исследовать множества возможных соударений опасных астероидов с Землей. Получаемые данные яв-

ляются исходными для планирования и реализации мероприятий по обеспечению астероидной безопасности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14–02–00804-а, 15–02–04340, Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (проект 6.37.341.2015). При выполнении настоящей работы использовался компьютерный кластер Вычислительного центра Ресурсного центра научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Библиографические ссылки

1. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В.* Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. — М., 2010.
2. *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.
3. *Chesley Steven R.* Potential impact detection of near-Earth asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors : Proc. IAU Symposium 229th, 2005.* — Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2006. — P. 215.
4. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П.* Особенности движения астероида 99942 Апофис // *Астрон. вестн.* — 2008. — Т. 42, вып. 1. — С. 20.
5. *Yeomans D. K. et al.* Deflecting a Hazardous Near-Earth Object // *Protecting Earth from Asteroids : IAA Planetary Defense Conference, 27–30 April 2009, Granada, Spain.* — 2009.
6. *Chesley Steven R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // *From Threat to Action : IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.* — 2011.
7. *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.
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.

9. *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. 411.
10. *Farnocchia D. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus*. — 2013. — Submitted.
11. *Соколов Л. Л., Кутеева Г. А.* Возможные соударения астероида Апофис после уточнения его орбиты // Вестн. С.-Петербург. ун-та. — 2015. — Т. 2, Сер. 1, вып. 1. — С. 148.
12. *Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* — 1974. — Vol. 10. — P. 35.
13. *M. Standish E.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405. — JPL Interoffice Memorandum, 312.F-98-048. — 1998.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

В лекции планируется осветить следующие вопросы:

- а) Общие свойства корональных петель.
- б) Уравнения магнитогазостатики.
- в) Потенциальная магнитная аркада как основа всей конфигурации.
- г) 2D корональная петля с трансляционной симметрией. Профили давления, плотности и температуры.
- д) 3D уединенная корональная петля. Приближение тонкой петли. Высотный профиль температуры для петли с сильным магнитным полем.

Корональные петли, как показывают изображения солнечной короны, получаемые современными космическими обсерваториями (TRACE, SOHO, SDO и др.) в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, представляют собой основной долгоживущий структурный элемент солнечной короны, обладающий рядом специфических свойств, до сих пор не имеющих своего объяснения.

Одним из таких свойств является то, что зачастую (но не всегда) радиус корональных петель остается практически неизменным вдоль петли, то есть отсутствует характерное для локальных биполярных магнитных структур увеличение масштаба с высотой. Характерным свойством корональных петель является и то, что основания такой корональной петли обычно значительно более яркие, чем другие ее части, включая вершину.

Как правило, при теоретическом анализе корональных петель основное внимание уделяется проблеме их нагрева, анализируется уравнение теплопереноса, а проблема магнитогазостатического равновесия петли часто вообще не рассматривается, оно произвольно постулируется как очевидное для любой геометрической формы петли. Между тем проблема равновесия магнитных структур в плазме из-за нелинейного характера магнитной силы, наличия гравитации и кривизны магнитных силовых линий, а также из-за отсутствия в системе уединенных магнитных петель выраженной трансляционной или вращательной (осевой) симметрии весьма нетривиальна и

до сих пор не имеет решения. Вопрос о механическом равновесии магнитной корональной петли той или иной геометрической формы должен рассматриваться в первую очередь: при отсутствии равновесия система петель развалится и перестанет существовать в течение нескольких секунд, поскольку альвеновская скорость, с которой система релаксирует к равновесному состоянию, в корональных магнитных структурах очень высока, она составляет более 1 000 км/с.

В докладе-лекции изложена процедура построения модели 2D-петли и 3D уединенной корональной петли, вписанных в потенциальную магнитную аркаду, магнитная ось которой находится под фотосферой. Радиус сечения корональной петли остается практически неизменным вдоль ее длины. Показано, что для 2D петель, обладающих трансляционной симметрией вдоль оси магнитной аркады, существует точное магнитогадростатическое равновесие. В случае 3D уединенной петли магнитогадростатическое равновесие возможно лишь в приближении очень тонкой петли, в толстых петлях остается малая нескомпенсированная сила магнитного натяжения, которая приводит к их вытягиванию вверх и/или расщеплению на ряд тонких магнитных петель. Возможно, в этом и состоит механизм образования тонкой волокнистой структуры, наблюдаемой в корональных петлях.

Работа поддержана грантом РФФИ 15–12–20001 и Программой Президиума РАН П-7.

С. А. Хайбрахманов^{1,2}, А. Е. Дудоров²

¹Уральский федеральный университет

²Челябинский государственный университет

ФИЗИКА АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ

В лекции обсуждаются основные физические процессы, сопровождающие образование и эволюцию аккреционных дисков молодых звезд. Особое внимание уделяется электромагнитным, ионизационно-рекомбинационным и диффузионным процессам, а также некоторым неустойчивостям.

Приводятся наблюдательные характеристики аккреционных и протопланетных дисков. Оцениваются и анализируются физические условия в аккреционных дисках звезд типа Т Тельца и Ae/Be Хербига. Рассматриваются основные модели аккреционных дисков. Обсуждается остаточная природа крупномасштабного магнитного поля аккреционных дисков молодых звезд. Описываются физические механизмы, лежащие в основе процесса образования планет. В заключение обсуждаются нерешенные проблемы и направления в современной теории аккреционных дисков молодых звезд.

We discuss the main physical processes accompanying the formation and evolution of the young stars' accretion discs. Special attention is paid to the electromagnetic, ionization-recombination and diffusion processes, as well as some instabilities.

Observational properties of the accretion and protoplanetary discs are given. The physical conditions in the accretion discs of T Tauri and Herbig Ae/Be stars are estimated and analysed. Main models of the accretion discs are considered. The fossil nature of the large-scale magnetic field of the accretion discs of young stars is discussed. The physical mechanisms underlying the planet formation process are described. In the conclusion we discuss some unsolved problems and directions in the modern theory of the young stars' accretion discs.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15–12–10017.

Ю. В. Хачай¹, В. Н. Анфилов², А. Н. Антипин¹

¹Институт геофизики УрО РАН

²Институт минералогии УрО РАН

РАННЕЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ

В работе приводятся результаты численного моделирования термической эволюции Земли на стадии ее аккумуляции в трехмерной модели. Показано развитие тепловых неоднородностей, обусловленных выделением энергии при случайном распределении по массе и координатам аккумулялируемых тел и частиц.

Введение

К настоящему времени при помощи внеатмосферных телескопов открыты сразу три необычные новорожденные звезды в созвездии Скорпиона, Хамелеона и Волка, процессы формирования планет у которых находятся в самом разгаре, чего раньше никогда не удавалось наблюдать, сообщает Европейская южная обсерватория [1].

Как видно на рис. 1, вокруг звезды RXJ1615 наблюдается фрагментация газопылевого диска протопланетного облака. Тем самым нашло наблюдаемое подтверждение много раньше полученное теоретическое описание модели формирования планет Шмидта—Сафронова [2]. В этой модели рост протопланет происходит за счет объединения случайным образом распределенных тел и частиц на растущую поверхность протопланеты. В ранних моделях предполагалось, что аккумулялируемые тела имеют небольшие размеры. Из этого предположения вытекают два следствия: во-первых, формируется сферически-симметричная протопланета; во-вторых, температура внутренних областей, как показали полученные решения [2, 3], оказалась низкими, ниже температуры плавления железа.

В настоящее время Земля имеет расплавленное состояние внешнего ядра. Нужно было объяснить это последующее нагревание ядра. Оно могло быть обеспечено либо падением очень крупных тел, либо выделением тепла при распаде естественно-радиоактивных элементов. До недавнего времени основное выделение тепла во внутренних

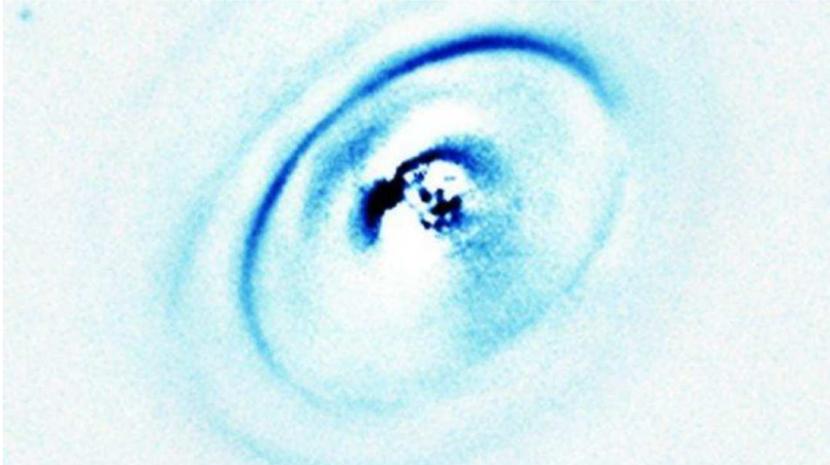


Рис. 1. Протопланетный диск вокруг звезды RXJ1615 [1]

областях Земли объяснялось радиоактивным распадом долгоживущих изотопов U, Th, K. Однако необходимые значения температуры в этом случае достигаются только спустя 1.5–2 млрд лет после завершения аккумуляции планеты [4]. Казалось, что противоречия удалось преодолеть в модели «мегаимпакта» [5], в которой предполагается, что в почти достигшую современной массы Земли протопланету происходит удар тела массы Меркурия, что обеспечивает дифференциацию вещества с выделением железного ядра и силикатной мантии. Но полученные к 2005 г. результаты изотопных исследований позволили установить следующее: во-первых, время отделения геохимического резервуара ядра от геохимического резервуара силикатной мантии оценивается величиной 5–30 млн лет, тогда как возраст силикатной мантии — 100 млн лет. Это означало бы, что разделение резервуаров произошло до их образования [6]; во-вторых, энергии, производимой короткоживущими изотопами, как показали результаты [6], достаточно, чтобы расплавить тела радиуса 50–200 км, и запускается принципиально новый процесс дифференциации протоземли [6, 7].

Постановка задачи и решение

Базовой для проведения математического моделирования термической эволюции растущей планеты является система уравнений, описывающих баланс импульса, энергии, сохранения массы вещества и задачи Стефана на границах областей с зонами расплава [6]. Для скорости роста зародыша планеты используется модель Сафронова [2],

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 2(1 + 2\theta)r^2\omega \left(1 - \frac{m}{M}\right) \sigma, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость орбитального движения; σ — поверхностная плотность вещества в зоне «питания» планеты; M — современная масса планеты; r — радиус растущего зародыша; θ — статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания».

Краевые задачи для каждого из уравнений системы решались методом конечных разностей с использованием неявных, монотонных, консервативных схем. Шаг по временной сетке переменный и при выбранном распределении плотности, как функции глубины, вычисляется из уравнения (1). Эти же пространственная и временная сетки используются при решении остальных краевых задач системы. С использованием уравнения (1) на каждом временном шаге вычисляются масса растущей планеты и распределение литостатического давления во внутренних областях. Для каждого значения достигнутого размера растущей планеты вычисляется распределение температуры плавления. В ядре зависимость температуры плавления в основном железного состава вычисляется по [7]. В области формирующейся преимущественно силикатной мантии используется зависимость температуры плавления от давления по [8]. Зона полного и частичного плавления определялась для каждого временного слоя по сопоставлению вычисленного распределения температуры в каждом узле 3D-модели с распределением температуры плавления в этом узле для данного момента времени.

На поверхности протопланеты заданы условия, обеспечивающие баланс поступающей части потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, затрат тепла на нагревание поступившего вещества и переизлучаемого в пространство теплового потока с учетом прозрачности внешней среды:

$$k\rho\frac{\gamma M}{r}\frac{dr}{dt} = \varepsilon\sigma[T^4 - T_1^4] + \rho c_p[T - T_1]\frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

где ρ — плотность вещества; γ гравитационная постоянная; M — масса растущей планеты; r — ее радиус; T и T_1 — соответственно температура тела на границе и температура внешней среды; ε — коэффициент прозрачности среды; c_p — удельная теплоемкость; k — доля преобразованной в тепло потенциальной энергии. Качественное отличие полученных вариантов результатов численного моделирования в 3D-модели состоит в том, что удалось проследить возникновение тепловых и плотностных неоднородностей. Возникновение этих неоднородностей обусловлено случайным характером распределения тел и частиц по массам и скоростям, которое описывается параметром θ (в уравнении (1), а в уравнении (2) учитывается использованием случайной функции при вычислении левой части этого уравнения внутри слоя, на которое происходит увеличение радиуса тела за шаг по времени (см., например, рис. 2–4)).

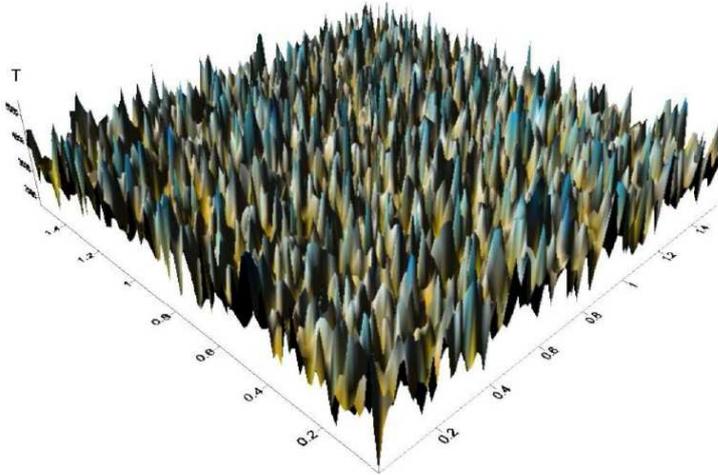


Рис. 2. Пример вычисленного распределения температуры на растущей поверхности Земли при радиусе $R = 100$ км

Силикатная оболочка Земли начала формироваться, когда основная часть ядра уже была сформирована. Выполненное нами численное моделирование теплового режима при формировании ядра

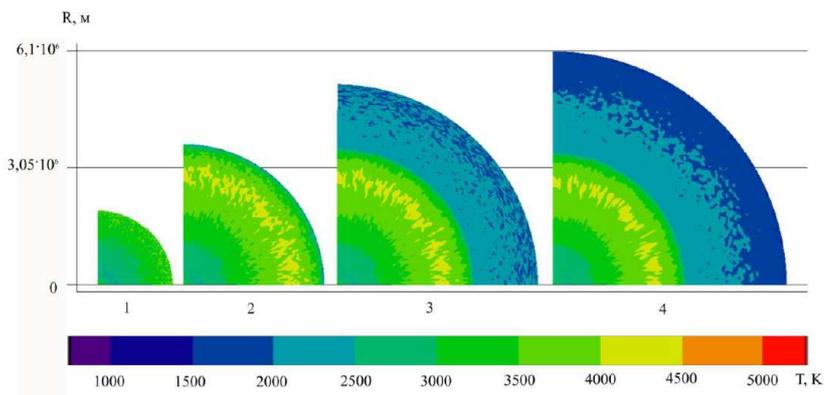


Рис. 3. Варианты распределения температуры для увеличивающихся значений радиуса [6]

Земли показало, что температура на поверхности растущего ядра на завершающей стадии может достигать 2500–3000 К [6]. Поэтому силикатный материал, из которого формировалась мантия Земли, отлагался на поверхность ядра, температура которой была выше температуры ликвидуса этого материала. В результате на границе ядро–мантия образуется слой силикатного расплава [6]. Для решения нашей проблемы важно знать, как протекает этот процесс на завершающем этапе аккумуляции Земли. По мере роста Земли мощность слоя расплава уменьшается. Когда она достигнет 420 км, из ликвидусных фаз исчезнет гранат, извлекающий из расплава Al_2O_3 , и глинозем будет накапливаться в расплаве. Кристаллизация оливины на линии ликвидуса будет сопровождаться обеднением расплава MgO и обогащением FeO . В результате состав расплава приблизится к составу обогащенного FeO и Al_2O_3 базальта. Когда температура расплава в верхней части слоя опустится ниже $1250^\circ C$, начнется кристаллизация плагиоклаза, кристаллы которого будут подниматься вверх, образуя на контакте расплава с верхней твердой оболочкой слой магматической «каши», состоящей из расплава и кристаллов плагиоклаза. Это создает условия для формирования у поверхности Земли слоя анортозитов.

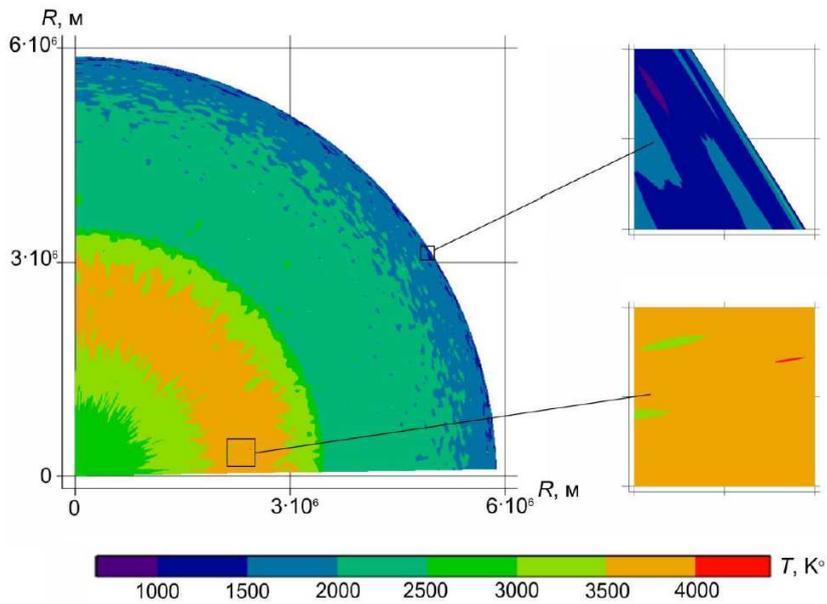


Рис. 4. Вариант распределения температуры к завершению аккумуляции. На вставках показана полученная структура тепловых неоднородностей [6]

Выводы

Случайное распределение по массе и координатам аккумулируемых тел и частиц, выпадающих на поверхность протопланетного зародыша создает необходимость рассмотрения процесса аккумуляции в трехмерной модели. Существенная часть образовавшихся тепловых неоднородностей сохраняется в формирующейся мантии Земли до завершения ее аккумуляции. Это начальное распределение неоднородностей существенно отразится на дальнейшей геологической эволюции внутренних областей Земли.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16–09–00540.

Библиографические ссылки

1. Sculpting Solar Systems. — <https://www.eso.org/public/news/eso1640/>.
2. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М. : Наука, 1969.
3. Любимова Е. А. Термика Земли и Луны. — М. : Наука, 1968.
4. Анфилогов В. Н., Хачай Ю. В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. — 2005. — Т. 403, вып. 6. — С. 803—806.
5. Hartmann W. K., Davis D. R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // Icarus. — 1975. — Vol. 24, № 4. — P. 504—515.
6. Anfilogov V. N., Khachay Y. V. Some Aspects of the Formation of the Solar System. — Heidelberg ; N. Y.; Dordrecht ; L. : Springer International Publishing, 2015.
7. Стейси Ф. Физика Земли. — М. : Мир, 1972.
8. Kaula W. M. Thermal evolution of Earth and Moon growing by simal impacts // Journ. of Geophys. Research: Solid Earth. — 1979. — Vol. 84. — P. 999—1008.

К. В. Холшевников^{1,2}, С. А. Орлов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Институт прикладной астрономии РАН

О ФОРМЕ ОБЛАКА ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С ПОВЕРХНОСТИ НЕБЕСНОГО ТЕЛА

Выбросы значительной массы вещества в космос с поверхности тела, обращающегося вокруг притягивающего центра по эллиптической орбите, регулярно наблюдаются в Солнечной системе. Типичные примеры: истечение пыли и газа с поверхности кометы, выброс реголита с малого спутника после метеоритного удара, взрыв ИСЗ. Ограничимся рассмотрением относительно крупных частиц с массами более 10^{-4} г. Поведение более мелких в значительной степени определяется электромагнитным взаимодействием с фотонным и корпускулярным солнечным излучением и магнитным полем планеты. Через время Δt после выброса частицы заполнят некоторую область \mathcal{D} . Время Δt выберем достаточно малым, чтобы можно было пренебречь возмущениями элементов орбит частиц, и достаточно большим, чтобы частицы, в силу неравенства орбитальных периодов, заполнили область \mathcal{D} , *окружающую орбиту родительского тела*. Мы получили аналитическое описание \mathcal{D} . Точнее, найдены параметрические уравнения поверхности \mathcal{S} , граничной для \mathcal{D} . В важнейшем частном случае изотропного выброса проведено полное исследование вида поверхности \mathcal{S} и ее дифференциально-геометрических свойств.

© Холшевников К. В., Орлов С. А., 2017

Ejections into space of considerable masses from the surface of a body revolving around an attracting centre on an elliptic orbit are observed in the Solar System regularly. Typical examples: outflow of gas and dust from a comet, ejection of a regolith mass after a meteoroid impact on a small satellite, artificial satellite explosion. We restrict ourselves with studying relatively large particles having masses more than 10^{-4} g. Behaviour of more tiny ones are controlled by electromagnetic interaction with photon and corpuscular solar radiation. Particles fill a certain domain \mathcal{D} within a time interval Δt after the ejection. We choose Δt sufficiently short to neglect perturbations of orbital elements of particles, and sufficiently long for particles fill the domain \mathcal{D} *enveloping the orbit of the parent body* due to inequality of their orbital periods. We find an analytic description of \mathcal{D} . More exactly, parametric equations of the surface \mathcal{S} bounding \mathcal{D} are deduced. Complete analysis of the shape of the surface \mathcal{S} and its differential-geometric properties is carried on in a most important case of an isotropic ejection.

Введение

Пылевые комплексы образуют одну из составляющих Солнечной системы. Существует множество способов их образования: выброс вещества с поверхности спутников при метеоритной бомбардировке; столкновения нерегулярных спутников и астероидов; извержения с таких спутников, как Ио и Энцелад; истечение вещества из кометных ядер в околосолнечной окрестности; взрывы и столкновения ИСЗ и др. Какова форма образующегося облака частиц? Несмотря на разную физику процессов, определение области, заполняемой частицами, требует исследования и решения если не одинаковых, то однотипных уравнений. Различным аспектам феномена в последние четверть века посвящено множество работ. Перечислим лишь некоторые.

Первая четкая постановка вопроса применительно к гипотетическим кольцам Марса (до сих пор не обнаруженным) содержится в [1], но развитие темы наступило много позже. Большинство работ использовало численный анализ, см., например, работы [2–4] об околосолнечных комплексах и [5–7] о продуктах взрывов ИСЗ.

Работы [8, 9] и др., посвященные метеорным потокам, порожденным кометными выбросами, используют полуаналитические методы.

Чисто аналитический подход использован в наших работах [10–17] об усложнении задачи от плоской круговой до пространствен-

ной с изотропным выбросом из произвольной точки эллиптической орбиты. Здесь мы откажемся и от изотропности. Перечислим основные допущения, при которых решение применимо к реальным телам Солнечной системы:

- а) орбита материнского тела — произвольный кеплеров эллипс;
- б) в произвольный момент времени t_0 происходит выброс вещества по всевозможным направлениям. Относительные скорости выброшенных частиц в общем случае зависят от их направления (анизотропный выброс). В частном случае изотропного выброса задача упрощается. Важно, что замена реального выброса изотропным с наибольшей по всем направлениям относительной скоростью расширяет реальную область, заполненную частицами. Следовательно, можно гарантировать, что рой заполнит часть модельной области и ни одна частица не выйдет за ее пределы;
- в) орбиты частиц — эллипсы, движение всех частиц по ним — прямое (обратные орбиты отсутствуют). Соответствующие условия, связывающие скорость выброса, элементы орбиты материнского тела и положение точки выброса, будут сформулированы ниже;
- г) возмущения в движении частиц не учитываются. Это значит, во-первых, что мы рассматриваем лишь относительно крупные частицы с массами более 10^{-4} г. Поведение более мелких в значительной степени определяется взаимодействием с магнитным полем и с фотонным и корпускулярным излучением Солнца [18, 19], а в некоторых случаях с потоками межзвездного газа [20]. Во-вторых, мы рассматриваем не слишком большой промежуток времени $t - t_0$, за который возмущения не успевают накопиться [21, 22]. Так, возмущения узлов и перигелиев достигают $10-20^\circ$ для ИСЗ типа «Молния» за месяц, для астероида 3200 Фаэтон — за 600 лет. Однако играют роль лишь дифференциальные возмущения: поворот всей системы на любой угол вокруг любой оси не меняет вида заполненной частицами области. Поэтому наши рассмотрения годятся на больший срок: для указанных ИСЗ — примерно на год, а для Фаэтона — на 5 000 лет;
- д) промежуток времени $t - t_0$ не должен быть и слишком малым, чтобы частицы успели заполнить область за счет неравенства орбитальных периодов. На это обычно требуется десяток оборотов материнского тела. Например, нужна неделя для обломков

геостационарного спутника при относительной скорости частиц 10–100 м/с, и от года до 2–3 десятков лет при выбросе с Фазтона с относительной скоростью частиц 100–1000 м/с в зависимости от точки выброса.

Семейство траекторий

Перейдем к точным формулировкам. Пусть точка O_1 массы m_1 описывает кеплеров эллипс вокруг точки O массы m . Масса m_1 конечна, но $m_1 \ll m$. В момент t_0 происходит выброс из O_1 частиц Q бесконечно малой массы. Введем систему декартовых невращающихся координат \mathcal{O} с началом в O ; ось x направим в O_1 в момент выброса, ось y — ортогонально x в плоскости орбиты в сторону движения O_1 , ось z — по вектору площадей орбиты O_1 . Пусть b, θ, λ — сферические координаты вектора скорости Q относительно O_1 , то есть разности векторов скоростей Q и O_1 в системе \mathcal{O} . Считаем точку (θ, λ) принадлежащей единичной сфере \mathbb{S} , $b = b(\theta, \lambda) > 0$, причем функция $b(\theta, \lambda)$ непрерывно дифференцируема на сфере \mathbb{S} . При $b = \text{const}$ выброс изотропен. Требуется найти область \mathcal{D} , заполненную траекториями T выброшенных частиц Q . Как известно из [23, 24], область \mathcal{D} ограничена поверхностью \mathcal{S} , огибающей двухпараметрическое семейство эллипсов $\{T\}$.

Обозначим через $a, p, e, i, \Omega, g, u, \varphi$ большую полуось, фокальный параметр, эксцентриситет, наклон, долготу восходящего узла, аргумент перицентра, аргумент широты и истинную аномалию орбиты Q в эпоху t_0 ; те же величины орбиты O_1 снабдим индексом ноль. Положение и скорость O_1 в момент выброса равны

$$\mathbf{r}_0 = r_0(1, 0, 0), \quad \mathbf{v}_0 = w(\sin f, \cos f, 0). \quad (1)$$

Здесь

$$r_0 = \frac{p_0}{1 + e_0 \cos \varphi_0}, \quad w = \frac{\varkappa}{\sqrt{p_0}} K, \\ K = \sqrt{1 + 2e_0 \cos \varphi_0 + e_0^2}, \quad 1 - e_0 \leq K \leq 1 + e_0, \quad (2)$$

где \varkappa^2 — произведение постоянной тяготения на массу m ; f — угол, на который надо повернуть вектор скорости \mathbf{v}_0 до совмещения с лучом Oy' , параллельным лучу Oy (рис. 1). По известным формулам

кеплеровского движения [25, 26]

$$\cos f = \frac{1 + e_0 \cos \varphi_0}{K}, \quad \sin f = \frac{e_0 \sin \varphi_0}{K}. \quad (3)$$

При $e_0 = 0$ (круговая орбита) или $\sin \varphi_0 = 0$ (выброс в апсидальной точке) $f = 0$, то есть вектор скорости ортогонален радиус-вектору, что и следовало ожидать. В общем случае, как легко показать,

$$\sqrt{1 - e_0^2} \leq \cos f \leq 1, \quad -e_0 \leq \sin f \leq e_0. \quad (4)$$

Ограничиваясь эллиптическими орбитами O_1 , потребуем

$$e_0 < 1. \quad (5)$$

Безразмерную скорость

$$c(\theta, \lambda) = \frac{b(\theta, \lambda)}{w}$$

назовем *параметром выброса*. Здесь и далее будем считать ее функцией от θ и λ , но часто писать сокращенно c . Наложим условие эллиптичности орбит частиц, то есть считаем $w + b$ меньшей параболической скорости:

$$c < \frac{\sqrt{2(1 + e_0 \cos \varphi_0)}}{K} - 1. \quad (6)$$

Например, при выбросе в апсидальных точках это условие переходит в

$$c < \sqrt{\frac{2}{1 + e_0}} - 1 \quad (\text{перицентр}), \quad c < \sqrt{\frac{2}{1 - e_0}} - 1 \quad (\text{апоцентр}),$$

а для круговой орбиты

$$c < \sqrt{2} - 1. \quad (7)$$

Найдем орбиту T точки Q по положению и скорости. В начальную эпоху положение и скорость выброшенной частицы Q , выделенной двумя параметрами θ и λ , будут

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}_0 = r_0(1, 0, 0), \\ \mathbf{v} &= w(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda, \cos f + c \sin \theta \sin \lambda, c \cos \theta), \end{aligned} \quad (8)$$

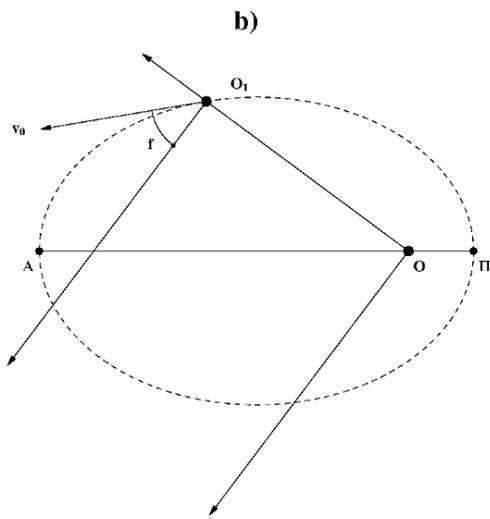
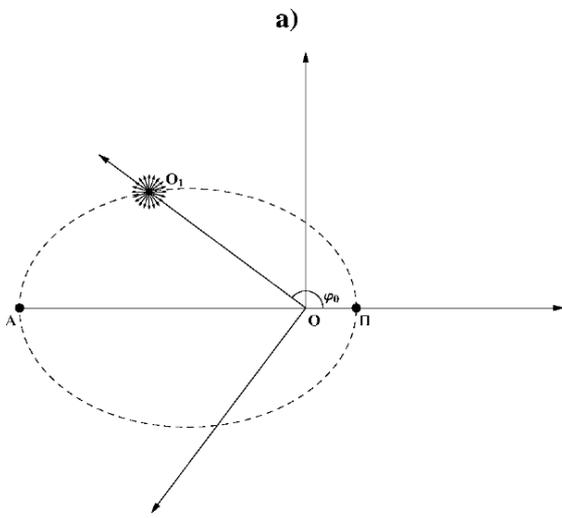


Рис. 1. Модель изотропного выброса с эллиптической орбиты родительского тела

причем

$$|\mathbf{v}| = wL, \quad L = \sqrt{1 + 2c \sin \theta \sin(f + \lambda) + c^2} \quad 1 - c \leq L \leq 1 + c.$$

Отсюда сразу находим вектор площадей

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \times \mathbf{v} &= \varkappa \sqrt{p} (\sin i \sin \Omega, -\sin i \cos \Omega, \cos i) = \\ &= r_0 w (0, -c \cos \theta, \cos f + c \sin \theta \sin \lambda). \end{aligned} \quad (9)$$

Если $\cos \theta = \cos f + c \sin \theta \sin \lambda = 0$, то последний вектор исчезает, что отвечает прямолинейной орбите. Если $\cos f + c \sin \theta \sin \lambda = 0$, $\cos \theta \neq 0$, то плоскость орбиты ортогональна плоскости xy , содержащей орбиту O_1 . Если $\cos f + c \sin \theta \sin \lambda < 0$, движение частицы обратно движению O_1 . Наложим условие: все частицы Q обладают прямым движением. Для этого необходимо и достаточно

$$\cos f + c(\theta, \lambda) \sin \theta \sin \lambda > 0 \iff \frac{1 + e_0 \cos \varphi_0}{K} + c(\theta, \lambda) \sin \theta \sin \lambda > 0 \quad (10)$$

при всевозможных θ, λ . Заметим, что условие (10) заведомо выполняется при

$$c(\theta, \lambda) < \cos f \iff c(\theta, \lambda) < \frac{1 + e_0 \cos \varphi_0}{K}. \quad (11)$$

При $c(\theta, \lambda) = \text{const}$ условия (10) и (11) совпадают.

Из двух неравенств (6) и (10) ни одно не является следствием другого. В [17] для постоянного c определено, в каких случаях сильнее неравенство (6), а в каких — неравенство (10). При $e_0 \leq 1/2$ неравенство (11) вытекает из (6). В противном случае задача сводится к тригонометрическому уравнению третьей степени относительно φ_0 , содержащему e_0 в качестве параметра. Подробности см. в [17].

Введем величину A :

$$A = \sqrt{(\cos f + c \sin \theta \sin \lambda)^2 + c^2 \cos^2 \theta}. \quad (12)$$

Поскольку $A > 0$ при условии (11), можно представить (9) в виде

$$\begin{aligned} \varkappa \sqrt{p} (\sin i \sin \Omega, -\sin i \cos \Omega, \cos i) &= \\ &= r_0 w A \left(0, \frac{-c \cos \theta}{A}, \frac{\cos f + c \sin \theta \sin \lambda}{A} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

делая последний вектор единичным.

Равенство (13) влечет

$$p = r_0 A^2 M, \quad (14)$$

где

$$M = \frac{1 + 2e_0 \cos \varphi_0 + e_0^2}{1 + e_0 \cos \varphi_0}, \quad 1 - e_0 \leq M \leq 1 + e_0. \quad (15)$$

Направление вектора площадей согласно (13) определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \sin i \sin \Omega &= 0, \\ A \sin i \cos \Omega &= c \cos \theta, \\ A \cos i &= \cos f + c \sin \theta \sin \lambda. \end{aligned} \quad (16)$$

Примем для удобства, что $-\pi/2 \leq i \leq \pi/2$, а восходящий и нисходящий узлы меняются местами при переходе i через 0. Тогда $\Omega = 0$ для орбит любого наклона. Окончательно,

$$\Omega = 0, \quad \cos i = \frac{\cos f + c \sin \theta \sin \lambda}{A}, \quad \sin i = \frac{c \cos \theta}{A}. \quad (17)$$

Теперь найдем истинную аномалию φ при $t = t_0$:

$$\begin{aligned} e \cos \varphi &= p/r_0 - 1 = A^2 M - 1, \\ e \sin \varphi &= \frac{\sqrt{p}}{\varkappa} v_x = AM(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda). \end{aligned}$$

Мы условились, что при $t = t_0$ будет $\Omega = 0$ и, следовательно, $u = 0$. Отсюда получаем аргумент перицентра $g = -\varphi$. В результате

$$e \cos g = \alpha, \quad e \sin g = \beta, \quad (18)$$

где

$$\alpha = A^2 M - 1, \quad \beta = -AM(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda). \quad (19)$$

В заключение найдем большую полуось и эксцентриситет орбиты частицы. Согласно интегралу энергии полная энергия частицы на единицу массы есть

$$\mathcal{H} = \frac{v^2}{2} - \frac{\varkappa^2}{r_0} = -\frac{\varkappa^2}{2r_0}(2 - L^2 M).$$

Отсюда

$$a = -\frac{\varkappa^2}{2\mathcal{H}} = \frac{r_0}{2 - L^2 M}. \quad (20)$$

Эксцентриситет можно получить, отправляясь от p, a по формуле $e^2 = 1 - p/a$ или отправляясь от $e \cos g, e \sin g$. Получим

$$e^2 = 1 - A^2 M(2 - L^2 M). \quad (21)$$

Заметим, что $2 - L^2 M > 0$, поскольку, согласно (6), $(1 - c)^2 < 2/M$.

Орбита частицы определена полностью. Вектор положения Q в произвольную эпоху t задается формулами

$$\mathbf{r} = r(\cos u, \cos i \sin u, \sin i \sin u), \quad r = \frac{r_0 M A^2}{1 + \alpha \cos u + \beta \sin u}, \quad (22)$$

причем A, i, α, β выражаются через θ, λ согласно (12, 17, 19). В дальнейшем в качестве независимой переменной, определяющей положение частицы на орбите T , выберем аргумент широты u .

Огибающая поверхность

Параметрические уравнения поверхности \mathcal{S} , огибающей пространственное двупараметрическое семейство $\{T\}$, даются согласно [23, 24] соотношениями (22) и

$$\Phi(u, \theta, \lambda) = 0, \quad (23)$$

где

$$\Phi = (\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_3). \quad (24)$$

Здесь и далее индексы 1, 2, 3 у $\mathbf{r}, r, i, \alpha, \beta$ указывают на дифференцирование по u, θ, λ соответственно. Производные от A^2 обозначены как A_{22}, A_{23} . Необходимо разрешить (23) относительно u и подставить решение в (22).

Вычисляя смешанное произведение (24), найдем после преобразований

$$\Phi = r^2 \sin u \Phi_1,$$

где

$$\Phi_1 = (i_2 r_3 - i_3 r_2).$$

Выпишем производные независящих от u величин:

$$\begin{aligned}
A_{22} &= 2cc_2 \cos^2 \theta - 2c^2 \sin \theta \cos \theta + \\
&\quad + 2 \sin \lambda (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda) (c \cos \theta + c_2 \sin \theta); \\
A_{23} &= 2cc_3 \cos^2 \theta + 2 \sin \theta (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda) (c \cos \lambda + c_3 \sin \lambda); \\
A^2 i_2 &= -c^2 \sin \lambda - c \cos f \sin \theta + c_2 \cos f \cos \theta; \\
A^2 i_3 &= \cos \theta (-c^2 \sin \theta \cos \lambda + c_3 \cos f); \\
\alpha_2 &= MA_{22}; \\
\alpha_3 &= MA_{23}; \\
2A\beta_2 &= -2MA^2 \cos \lambda (c \cos \theta + c_2 \sin \theta) - MA_{22} (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda); \\
2A\beta_3 &= 2MA^2 \sin \theta (c \sin \lambda - c_3 \cos \lambda) - MA_{23} (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda).
\end{aligned}$$

Теперь можно вычислить производные от радиуса:

$$\begin{aligned}
r_2 &= \frac{r_0 M}{(1 + \alpha \cos u + \beta \sin u)^2} \left[A_{22} (1 - \cos u) + \frac{1}{2} \Psi_1 \sin u \right], \\
r_3 &= \frac{r_0 M}{(1 + \alpha \cos u + \beta \sin u)^2} \left[A_{23} (1 - \cos u) + \frac{1}{2} \Psi_2 \sin u \right].
\end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= AM \left[-A_{22} (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) + 2A^2 \cos \lambda (c \cos \theta + c_2 \sin \theta) \right], \\
\Psi_2 &= AM \left[-A_{23} (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) - 2A^2 \sin \theta (c \sin \lambda - c_3 \cos \lambda) \right].
\end{aligned}$$

После перехода к половинному углу

$$\begin{aligned}
r_2 &= \frac{r_0 M}{(1 + \alpha \cos u + \beta \sin u)^2} \sin \frac{u}{2} \left(2A_{22} \sin \frac{u}{2} + \Psi_1 \cos \frac{u}{2} \right), \\
r_3 &= \frac{r_0 M}{(1 + \alpha \cos u + \beta \sin u)^2} \sin \frac{u}{2} \left(2A_{23} \sin \frac{u}{2} + \Psi_2 \cos \frac{u}{2} \right).
\end{aligned}$$

В результате

$$\Phi = \frac{r^2 r_0 M}{A(1 + \alpha \cos u + \beta \sin u)^2} \sin u \sin \frac{u}{2} \left(B_1 \cos \frac{u}{2} + B_2 \sin \frac{u}{2} \right). \quad (25)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
B_1 &= \cos \theta (c^2 \sin \theta \cos \lambda - c_3 \cos f) \Psi_1 + \\
&\quad + (-c^2 \sin \lambda - c \cos f \sin \theta + c_2 \cos f \cos \theta) \Psi_2, \\
B_2 &= 2 \cos \theta (c^2 \sin \theta \cos \lambda - c_3 \cos f) A_{22} + \\
&\quad + 2(-c^2 \sin \lambda - c \cos f \sin \theta + c_2 \cos f \cos \theta) A_{23}.
\end{aligned}$$

Получим все решения уравнения (23).

- а) Двойной корень $u = 0$. Отвечает конической точке $(1, 0, 0)$ поверхности \mathcal{S} : все траектории T проходят через точку выброса.
б) Простой корень $u = \pi$. Отвечает перетяжке

$$x_1 \leq x \leq x_2, \quad y = z = 0 \quad (26)$$

поверхности \mathcal{S} : все траектории проходят через линию узлов. Здесь x_s — крайние точки абсциссы

$$x = -r_0 M \frac{A^2}{2 - A^2 M},$$

причем r_0, M постоянны, а A^2 , согласно (12), изменяется в ограниченном промежутке, когда (θ, λ) описывает сферу \mathbb{S} . Окрестности конической точки и перетяжки приведены на рис. 2.

- в) Корни (θ^*, λ^*) системы уравнений

$$B_1(\theta, \lambda) = 0, \quad B_2(\theta, \lambda) = 0. \quad (27)$$

Обе орбиты $T(\theta^*, \lambda^*)$ целиком лежат на огибающей поверхности \mathcal{S} .

- г) В остальных случаях уравнение (23) равносильно

$$\operatorname{tg} \frac{u}{2} = -\frac{B_1}{B_2},$$

откуда однозначно определяются нужные нам косинус и синус аргумента широты

$$\cos u = \frac{B_2^2 - B_1^2}{B_1^2 + B_2^2}, \quad \sin u = -\frac{2B_1 B_2}{B_1^2 + B_2^2}. \quad (28)$$

Приведем окончательное параметрическое задание огибающей поверхности \mathcal{S} :

$$\begin{aligned}
x &= r_0 M A^2 \frac{h_1}{h}, & y &= r_0 M A^2 \frac{h_2}{h}, \\
z &= r_0 M A^2 \frac{h_3}{h}, & r &= r_0 M A^2 \frac{h_4}{h},
\end{aligned} \quad (29)$$

где

$$\begin{aligned}
h_1 &= B_2^2 - B_1^2, \\
h_2 &= -2B_1B_2 \cos i, \\
h_3 &= -2B_1B_2 \sin i, \\
h_4 &= B_1^2 + B_2^2, \\
h &= (1 - \alpha)B_1^2 + (1 + \alpha)B_2^2 - 2\beta B_1B_2. \quad (30)
\end{aligned}$$

Замечание. Первые три случая содержатся в четвертом. Первый получается при $B_1(\theta, \lambda) = 0$, $B_2(\theta, \lambda) = 1$; второй — при $B_2(\theta, \lambda) = 0$; третий — предельным переходом $\theta \rightarrow \theta^*$, $\lambda \rightarrow \lambda^*$.

Вид семейства траекторий и огибающей его поверхности приведен на рис. 3

Свойства огибающей поверхности при изотропном выбросе

В общем случае функции $h_s(\theta, \lambda)$ сложны и установить свойства \mathcal{S} затруднительно. Рассмотрим сначала простейший случай изотропного выброса $c = \text{const}$, $c_2 = c_3 = 0$, когда $h_s(\theta, \lambda)$ — тригонометрические многочлены. Даже в этом случае, как мы увидим, задача нетривиальна.

Выпишем нужные нам величины при $c = \text{const}$, $c_2 = c_3 = 0$:

$$\begin{aligned}
A_{22} &= -2c^2 \sin \theta \cos \theta + 2c \cos \theta \sin \lambda (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda); \\
A_{23} &= 2c \sin \theta \cos \lambda (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda); \\
A^2 i_2 &= -c^2 \sin \lambda - c \cos f \sin \theta; \\
A^2 i_3 &= -c^2 \cos \theta \sin \theta \cos \lambda; \\
\alpha_2 &= MA_{22}; \\
\alpha_3 &= MA_{23}; \\
2A\beta_2 &= -2MA^2 c \cos \theta \cos \lambda - MA_{22}(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda); \\
2A\beta_3 &= 2MA^2 c \sin \theta \sin \lambda - MA_{23}(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda). \\
\Psi_1 &= AM [-A_{22}(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) + 2A^2 c \cos \theta \cos \lambda], \\
\Psi_2 &= AM [-A_{23}(\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) - 2A^2 c \sin \theta \sin \lambda]. \\
B_1 &= c^2 \cos \theta \sin \theta \cos \lambda \Psi_1 - c(c \sin \lambda + \cos f \sin \theta) \Psi_2, \\
B_2 &= 2c^2 \cos \theta \sin \theta \cos \lambda A_{22} - 2c(c \sin \lambda + \cos f \sin \theta) A_{23}. \quad (31)
\end{aligned}$$

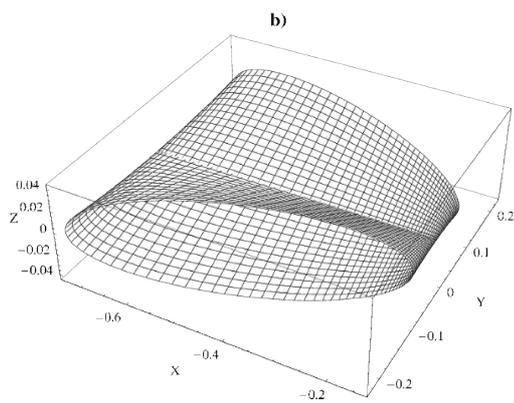
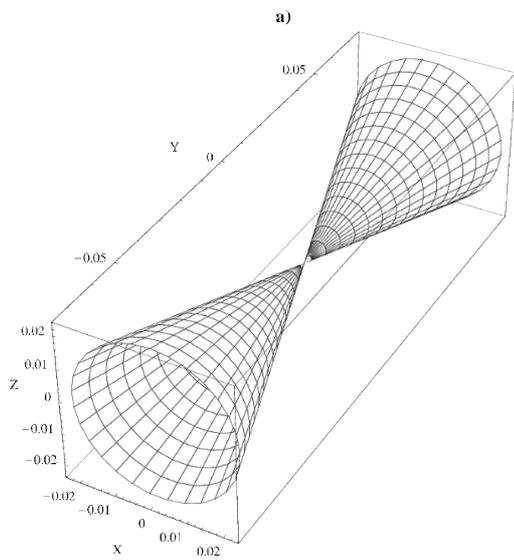


Рис. 2. Окрестности конической точки (*a*) и перетяжки (*b*)

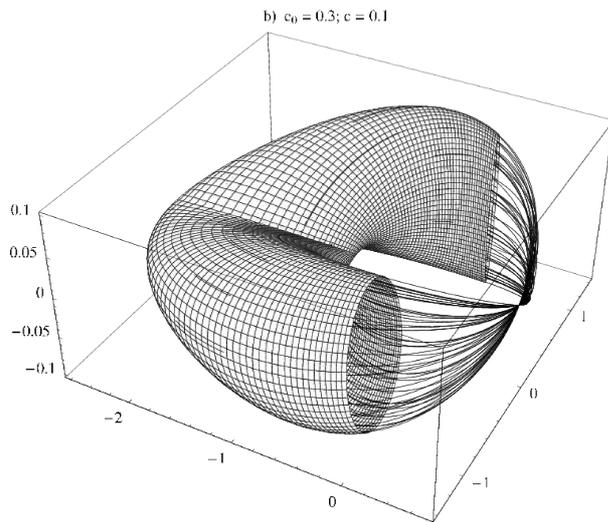
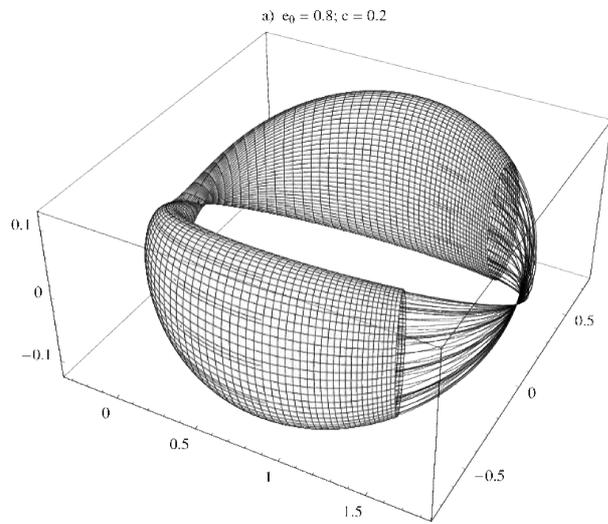


Рис. 3. Поверхность, огибающая семейство траекторий. Выброс изотропный апсидальный в апоцентре (*a*) и перигентре (*b*)

Ограниченность

1. Перепишем последнюю формулу (17) в виде

$$\sin^2 i = \frac{c^2 \cos^2 \theta}{(\cos f + c \sin \theta \sin \lambda)^2 + c^2 \cos^2 \theta}. \quad (32)$$

Поскольку $\cos f > c > 0$, $\sin \theta \geq 0$, последнее выражение принимает наибольшее значение при $\sin \lambda = -1$. Таким образом,

$$\sin^2 i \leq F(\theta) := \frac{c^2 \cos^2 \theta}{\cos^2 f - 2c \cos f \sin \theta + c^2}.$$

Вычислим производную

$$\frac{dF(\theta)}{d\theta} = \frac{2c^2 \cos \theta}{(\cos^2 f - 2c \cos f \sin \theta + c^2)^2} (\cos f - c \sin \theta)(c - \cos f \sin \theta).$$

Ясно, что наибольшее значение F принимает при $\sin \theta = c/\cos f$, причем в этой точке $F = c^2/\cos^2 f$. В результате

$$|\sin i| \leq \frac{c}{\cos f}. \quad (33)$$

Равенство в (33) достигается при

$$\sin \theta = c/\cos f, \quad \sin \lambda = -1. \quad (34)$$

Теперь легко установить ограниченность отношения z/r на поверхности \mathcal{S} . Согласно (29, 30)

$$\left| \frac{z}{r} \right| = \left| \frac{h_3}{h_4} \right| = \left| \frac{2B_1 B_2 \sin i}{B_1^2 + B_2^2} \right| \leq |\sin i|,$$

так что

$$\left| \frac{z}{r} \right| \leq \frac{c}{\cos f}. \quad (35)$$

Установим точность оценки (35). Достижимости равенства в (33) нам недостаточно: соответствующая орбита может касаться огибающей не обязательно в верхней точке. Подставим в (12, 31) значения (34):

$$A = \sqrt{\cos^2 f - c^2}, \quad A_{22} = -2c\sqrt{\cos^2 f - c^2}, \quad A_{23} = 0;$$

$$\Psi_1 = 2cM(\cos^2 f - c^2) \sin f;$$

$$\Psi_2 = 2c^2 M (\cos^2 f - c^2)^{3/2} / \cos f;$$

$$B_1 = B_2 = 0.$$

Мы встретились с орбитой экстремального наклона. Их две, согласно (34). Обе они целиком лежат на \mathcal{S} . Таким образом, оценка (35) точна.

2. Перейдем к оценке радиуса r снизу. Согласно (14, 21)

$$r_\pi = \frac{p}{1+e} = \frac{A^2 M r_0}{1 + \sqrt{1 - A^2 M (2 - L^2 M)}}. \quad (36)$$

Правая часть (36) возрастает с ростом A и убывает с ростом L . Поэтому

$$\min_{A, L} r_\pi(A, L) \geq r_\pi(\min A, \max L) = r_\pi(\cos f - c, 1 + c).$$

Неравенство вызвано тем, что минимум A и максимум L достигаются на экваторе $\theta = \pi/2$, но при разных значениях λ . В результате получаем простое, но не точное неравенство

$$r \geq \frac{(\cos f - c)^2 M r_0}{1 + \sqrt{1 - (\cos f - c)^2 M [2 - (1 + c)^2 M]}} \geq \frac{(\cos f - c)^2 M r_0}{2}. \quad (37)$$

Простого точного неравенства не существует. В [17] показано, что для получения точного неравенства достаточно вычислить наименьшее значение правой части (36) по λ при $\theta = \pi/2$, что можно свести к вычислению корней тригонометрического многочлена 5-й степени.

3. Перейдем к оценке радиуса r сверху:

$$r \leq r_\alpha = \frac{p}{1-e} = \frac{A^2 M r_0}{1 - \sqrt{1 - A^2 M (2 - L^2 M)}} =$$

$$= \frac{1 + \sqrt{1 - A^2 M (2 - L^2 M)}}{2 - L^2 M} r_0.$$

Правая часть убывает с ростом A и возрастает с ростом L . Поэтому

$$\max_{A, L} r_\alpha(A, L) \leq r_\alpha(\min A, \max L) = r_\alpha(\cos f - c, 1 + c).$$

Окончательно,

$$r \leq \frac{1 + \sqrt{1 - (\cos f - c)^2 M [2 - (1 + c)^2 M]}}{2 - (1 + c)^2 M} r_0 \leq \frac{2}{2 - (1 + c)^2 M} r_0. \quad (38)$$

Итак, поверхность \mathcal{S} ограничена. Она замкнута как непрерывное отображение сферы. Таким образом, \mathcal{S} компактна.

Симметрия

Подстановка $(\theta, \lambda) \mapsto (\pi - \theta, \lambda)$ сохраняет $\sin \theta$, A , A_{23} , $\cos i$, α , β , Ψ_2 , B_1 , B_2 , h_1 , h_2 , h_4 , h и меняет знак у $\cos \theta$, A_{22} , $\sin i$, Ψ_1 , h_3 , что влечет $(x, y, z) \mapsto (x, y, -z)$.

Таким образом, поверхность \mathcal{S} симметрична относительно плоскости xy . Нетрудно показать, что других плоскостей симметрии в общем случае не существует. Однако они появляются в важных частных случаях.

Пусть $f = 0$, что выполнено при круговой орбите материнского тела или при выбросе в перицентре или апоцентре. Подстановка $(\theta, \lambda) \mapsto (\pi - \theta, \pi - \lambda)$ сохраняет $\sin \theta$, $\sin \lambda$, A , $\cos i$, α , Ψ_1 , Ψ_2 , B_1 , h_1 , h_3 , h_4 , h и меняет знак у $\cos \theta$, $\cos \lambda$, A_{22} , A_{23} , $\sin i$, β , B_2 , h_2 , что влечет $(x, y, z) \mapsto (x, -y, z)$. Мы получили дополнительную плоскость симметрии xz .

Свойства поверхности \mathcal{S} в общем случае

Если параметр выброса $c(\theta, \lambda)$ является переменным и не обладает какой-либо симметрией, то и поверхность \mathcal{S} асимметрична.

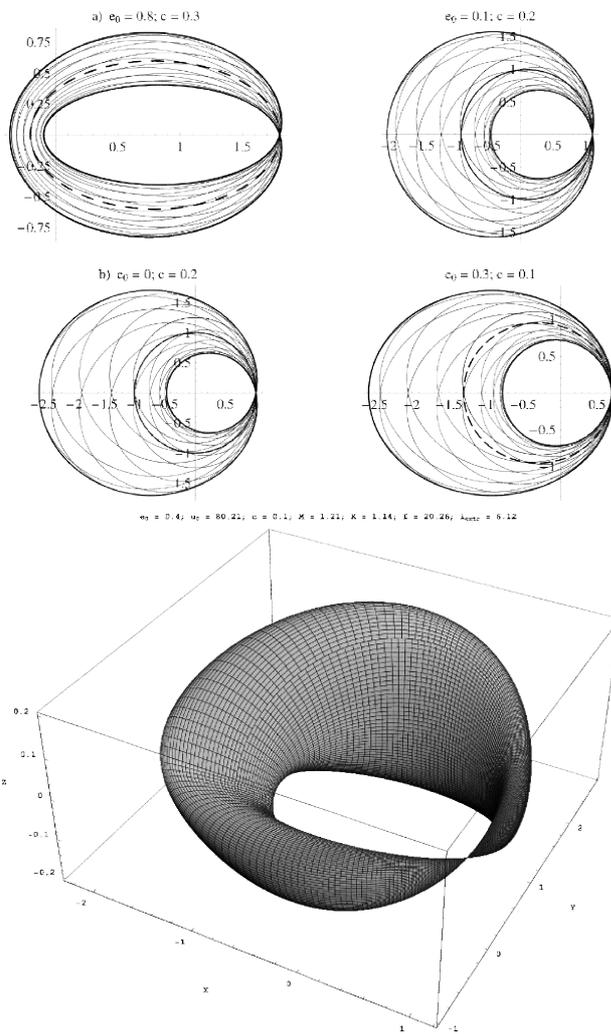


Рис. 4. Сечение огибающей поверхности плоскостью орбиты родительского тела (вверху). Поверхность, огибающая семейство траекторий (внизу). Выброс изотропный неапсидальный

Однако плоскость xy по-прежнему будет плоскостью симметрии при дополнительном условии: функция c зависит лишь от квадрата косинуса θ , то есть $c = c(\cos^2 \theta, \lambda)$. Это ясно из геометрического смысла условия и легко проверяется формально. Достаточно заметить, что подстановка $(\theta, \lambda) \mapsto (\pi - \theta, \lambda)$ влечет $c_2 \mapsto -c_2$, $c_3 \mapsto c_3$.

Вывод о компактности \mathcal{S} сохраняет силу. Как было сказано во введении, увеличение скорости выброса расширяет заполненную частицами область \mathcal{D} . В частности, оценки (35, 37, 38) остаются справедливыми при замене c на $c^* = \max_{\theta, \lambda} c(\theta, \lambda)$.

Некоторое представление о форме поверхности \mathcal{S} при изотропном выбросе дает рисунок 4. Для наглядности мы выбрали сравнительно большие значения параметра выброса. Как правило, он значительно меньше, см. полученные численным интегрированием аналогичные рисунки в работах [5, 6, 8, 9].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17–02–00478) и СПбГУ (грант 6.37.341.2015).

Библиографические ссылки

1. *Soter S.* The Dust Belts of Mars // Cornell Univ. Center for Radio-physics and Space Res. Report. — 1971. — Iss. 462. — P. 62.
2. *Кривов А. В., Соколов Л. Л., Холшевников К. В., Шор В. А.* О существовании роя частиц в окрестности орбиты Фобоса // Астрон. вестн. — 1991. — Т. 25, вып. 3. — С. 317–326.
3. *Kholshchevnikov K. V., Krivov A. V., Sokolov L. L., Titov V. B.* The Dust Torus around Phobos Orbit // Icarus. — 1993. — Vol. 105. — P. 351–362.
4. *Krivov A. V., Sokolov L. L., Dikarev V. V.* Dynamics of Mars-orbiting Dust: Effects of Light Pressure and Planetary Oblateness // Celest. Mech. Dyn. Astr. — 1996. — Vol. 63. — P. 313–339.
5. *Бордовицына Т. В., Васильченко О. И.* Численное моделирование распада и эволюции фрагментов КА на геостационарной орбите // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : докл. всерос. науч. конф. — Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2000. — С. 125–126.
6. *Мишкин А. В., Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А.* Моделирование эволюции фрагментов распада геостационарного спутника

- на больших интервалах времени // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики. — 2002. — Вып. 5. — С. 132–133.
7. *Бордовицкина Т. В., Авдюшев В. А.* Теория движения искусственных спутников Земли. — Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2007.
 8. *Рябова Г. О.* Плотность потока частиц при распаде тела на орбите // *Астрономия и геодезия.* — 1998. — Вып. 16. — С. 75–78.
 9. *Ryabova G. O.* Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 375. — P. 1371–1380.
 10. *Коблик В. В., Холшевников К. В.* Огибающая орбит изотропно выброшенных частиц // *Вестн. СПбГУ.* — Сер. 1. — 1994. — Вып. 1. — С. 98–102.
 11. *Холшевников К. В., Орлов С. А.* Пылевой тор. I. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц // *Вестн. СПбГУ.* — Сер. 1. — 2000. — Вып. 3. — С. 118–123.
 12. *Холшевников К. В., Орлов С. А., Джазматли М. С.* Пылевой тор. II. Исследование огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц // *Вестн. СПбГУ.* — Сер. 1. — 2003. — Вып. 4. — С. 119–130.
 13. *Орлов С. А., Холшевников К. В.* Пылевой тор. III. Уравнения огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц с учетом движения узлов и перигелиев // *Вестн. СПбГУ.* — Сер. 1. — 2004. — Вып. 1. — С. 112–119.
 14. *Орлов С. А.* Пылевой тор. IV. Исследование огибающей поверхности семейства траекторий изотропно выброшенных частиц с учетом движения узлов и перигелиев // *Вестн. СПбГУ.* — Сер. 1. — 2006. — Вып. 3. — С. 131–144.
 15. *Орлов С. А., Холшевников К. В.* Орбитальный пылевой тор как огибающая поверхность семейства траекторий изотропно выброшенных частиц // *Астрон. вестн.* — 2008. — Т. 42, вып. 2. — С. 99–118.
 16. *Орлов С. А., Холшевников К. В.* Пылевой тор, образованный выбросом частиц в апсидальных точках // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 3. — С. 223–234.
 17. *Orlov S. A., Kholshchevnikov K. V.* Dust torus formed by particles ejected from a celestial body at an arbitrary point of its elliptic

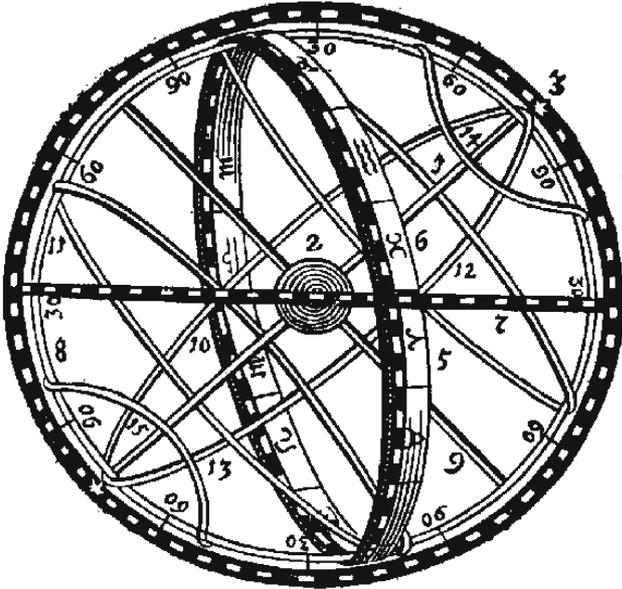
- orbit // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2013. — Vol. 116, iss. 1. — P. 35–52.
18. *Burns J. A., Lamy P. L., Soter S.* Radiation forces on small particles in the solar system // *Icarus*. — 1979. — Vol. 40. — P. 1–48.
 19. *Wyatt M. C., Clarke C. J., Booth M.* Debris disk size distributions: steady state collisional evolution with Poynting–Robertson drag and other loss processes // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2011. — Vol. 111. — P. 1–28.
 20. *Pástor P.* Influence of fast interstellar gas flow on the dynamics of dust grains // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2012. — Vol. 112. — P. 23–45.
 21. *Kozai Y.* The motion of a close earth satellite // *Astron. J.* — 1959. — Vol. 64. — P. 367–377.
 22. *Valsecchi G. B., Milani A., Gronchi G. F., Chesley S. R.* Resonant returns to close approaches: Analytical theory // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 408. — P. 1179–1196.
 23. *Залгаллер В. А.* Теория огибающих. — М. : Наука, 1975.
 24. *Фавар Ж.* Курс локальной дифференциальной геометрии. — М. : ИЛ, 1960.
 25. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М. : Наука, 1968.
 26. *Холшевников К. В., Титов В. Б.* Задача двух тел. — СПб : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2007.

Б. М. Шустов
Институт астрономии РАН

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ КОСМОС В ФКП-25

В апреле 2016 г. подписана Федеральная космическая программа России на период 2016–2025 гг. (ФКП-25). Это главный документ, определяющий направления развития космической деятельности в стране на ближайшее десятилетие. Значительное место в ФКП уделено фундаментальным космическим исследованиям (ФКИ). В лекции рассказывается о всех основных направлениях этих исследований (внеатмосферная астрономия, планетные исследования, изучение Солнца и солнечно-земных связей, космическая биология) и о конкретных проектах, осуществляемых в рамках ФКП. Рассматриваются проекты, планируемые к реализации как на автоматических, так на пилотируемых космических аппаратах. Обсуждаются проблемы отбора и реализации проектов для ФКИ.

Тезисы студенческих докладов



А. А. Апетян

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

ПОИСК ДВОЙНЫХ СРЕДИ БЛИЗКИХ КАРЛИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЗОРАХ НЕБА

Поиск близких кратных систем, образованных маломассивными звездами, является актуальным направлением современной астрономии. Вот уже несколько лет в Пулковской обсерватории действует программа изучения звезд с большими собственными движениями, в ходе которой у ряда звезд были обнаружены эффекты нелинейного движения по небу, спекл-интерферометрические наблюдения на БТА подтвердили наличие спутника у одной из звезд [1]. Мы изучаем объекты, расположенные не далее 50 пк от Солнца. Помимо изучения движений этих звезд интерес представляют оценки эллиптичности, асимметрии их изображений по сравнению со звездами фона. Такой анализ ведется с использованием различных цифровых обзоров неба и собственных наблюдений на телескопе «Сатурн» ГАО РАН. Особый интерес вызывают тесные пары, в состав которых входят карликовые звезды низкой светимости. Определение характеристик таких систем даст возможность дополнить статистику масс и орбит и, как следствие, уточнить зависимость масса—светимость, функцию масс для малых масс, долю двойных среди общего числа звезд, распределение по орбитальным параметрам. Оценки этих величин можно получить из космогонических моделей, но для их тестирования необходимо сравнение с наблюдательными данными. Наша работа направлена на поиск объектов, дальнейшее изучение которых позволит получить наблюдательный материал для последующего анализа.

Библиографические ссылки

1. *Khovrichiev M. Y., Kulikova A. M., Sokov E. N. et al.* Detection of the binarity of the star J1158+4239 // *Astronomy Letters*. — 2016. — Vol. 42. — P. 686—692.

Г. С. Бисноватый-Коган¹, С. А. Панафидина^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН

²Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

В данной работе мы рассмотрели задачу о распространении сильной ударной волны в равномерно расширяющейся среде, соответствующей решению Фридмана для плоской Вселенной, проанализировали автомодельные решения, в которых имеются сингулярности, связанные с сингулярностью в решении Фридмана [1]. Аналитические решения для различных значений показателя адиабаты γ принципиально отличаются друг от друга. Так, к примеру, при одних значениях γ первой становится сингулярной автомодельная переменная, соответствующая плотности газа позади ударной волны. А при других γ раньше становится сингулярной переменная, соответствующая скорости звука.

Для задачи был повторен вывод аналитического автомодельного решения [2], подготовлена программа для численного решения. Были исследованы различные свойства автомодельного решения, в частности, обнаружены принципиальные различия поведения его в зависимости от показателя адиабаты. Главным принципиальным отличием от стационарного решения является наличие сингулярности в автомодельном решении, которое является следствием сингулярности в невозмущенном решении Фридмана. Получены асимптотики аналитического решения.

Библиографические ссылки

1. *Бисноватый-Коган Г. С.* Релятивистская астрофизика и физическая космология. — М. : URSS, 2011.
2. *Бисноватый-Коган Г. С.* Strong shock in the uniformly expanding medium // *Gravitation and Cosmology*. — 2015. — Vol. 21. — P. 236—240.

Е. В. Блинкова

Томский государственный университет

**РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО АЛГОРИТМА
АВТОНОМНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ
НИЗКОЛЕТАЮЩЕГО ИСЗ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ
СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задачи определения и прогнозирования орбиты низколетящего ИСЗ по измеренным расстояниям от этого спутника до спутников системы ГЛОНАСС. В процессе моделирования пространственные положения всех объектов вычислялись с использованием программного комплекса «Численная модель движения ИСЗ», причем для всех спутников учитывались возмущения от несферичности геопотенциала. Кроме того, для низколетящего ИСЗ — возмущения от сопротивления атмосферы Земли, а для спутников ГЛОНАСС — лунно-солнечные возмущения. Улучшения производились на интервалах времени 10, 20, 30, 40, 50 и 90 мин. Анализируемые данные приведены в таблице.

Характеристики итерационного процесса

Интервал, мин	Длина дуги, кол-во оборотов	Число изменений	Скорость сходимости, кол-во итераций	Средне-квадратическая ошибка, км
Случайные ошибки [0,1]				
10	0.1059	96	16	$9.63 \cdot 10^{-4}$
40	0.4236	380	4	$2.34 \cdot 10^{-4}$
90	0.9531	844	3	$2.49 \cdot 10^{-4}$
Случайные ошибки [0,10]				
10	0.1059	96	125	$9.26 \cdot 10^{-3}$
40	0.4236	380	11	$5.90 \cdot 10^{-3}$
90	0.9531	844	4	$7.50 \cdot 10^{-4}$

Эффективность выбора параметров алгоритма улучшения орбиты оценивалась по точности прогнозирования движения вперед на 220 оборотов. В результате анализа полученных данных были предложены варианты структуры алгоритма, зависящие от требуемой точности прогнозирования.

© Блинкова Е. В., 2017

О. И. Бородина, А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ NGC 4052, NGC 5715 И NGC 6834

Работа выполнена в рамках проекта по созданию однородного каталога структурных и динамических характеристик рассеянных звездных скоплений (РЗС), а также по исследованию их звездного состава на основе каталога точечных источников 2MASS [1].

Ключевая особенность будущего каталога заключается в том, что параметры РЗС в нем будут приведены к одной абсолютной предельной величине звезд впервые в мировой практике. Это даст возможность получить более достоверные распределения параметров РЗС, намного надежнее оценивать динамическое состояние скоплений, особенности их взаимодействия с другими объектами диска Галактики, чем в предыдущих работах [2].

В работе для скоплений NGC 4052, NGC 5715 и NGC 6834 построены карты поверхностной плотности, радиальные профили поверхностной плотности; получены функция светимости и функция масс; даны оценки радиусов скоплений, их масс и приливных радиусов в поле сил Галактики.

Библиографические ссылки

1. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163—1183.
2. *Daniilov V. M., Seleznev A. F.* The catalogue of structural and dynamical characteristics of 103 open star clusters and the first results of its investigation. // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* — 1994. — Vol. 6. — P. 85—155.

А. А. Гроховская

Национальный исследовательский Томский государственный
университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

В работе рассматривается математическое моделирование профилей излучения ряда пульсаров для получения кинематических характеристик излучаемых частиц из наблюдаемых величин мгновенной мощности излучения в рамках нелинейной задачи наименьших квадратов. Сама задача представляет собой минимизацию функционала суммы квадратов невязок между измеренными и рассчитанными значениями профиля пульсара. Метод моделирования профилей основан на работах В. А. Бордовицына с соавт. [1, 2], в которых профиль излучения получается линией пересечения поверхности индикатрисы, вращающейся вместе с пульсаром, с неподвижным в пространстве лучом зрения наблюдателя.

Библиографические ссылки

1. *Бордовицын В. А., Немченко Е. А.* Построение и идентификация профилей излучения пульсаров // Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» ВАК-2013 : тез. докл. — 2013. — С. 35–36.
2. Теория излучения релятивистских частиц / ред. В. А. Бордовицын. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.

А. П. Ершова
Институт прикладной астрономии РАН

ОРБИТЫ КОМЕТ, ЦАРАПАЮЩИХ СОЛНЦЕ

Численно исследовано движение комет, царапающих Солнце (sun-grazers), характеризующихся малыми перигелийными расстояниями. Учтены гравитационные возмущения со стороны восьми планет, орбиты которых интегрировались совместно с орбитой кометы. Негравитационные эффекты вычислялись по модели Марсдена с поправкой за изменение массы кометы в результате сублимации [1]. При интегрировании был применен модифицированный метод Энке, позволяющий повысить точность и уменьшить время, затраченное на вычисления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16–02–00805–а «Изучение роли сближений с Солнцем в эволюции астероидов и комет».

Библиографические ссылки

1. *Sekanina Z., Kracht R.* Strong erosion-driven nongravitational effects in orbital motions of the Kreutz sungrazing system's dwarf comets // *Astron. J.* — 2015. — Vol. 801. — P. 135–154.

Е. А. Ильина¹, А. А. Черенков^{1,2}, Д. В. Бисикало²

¹Московский физико-технический институт

²Институт астрономии РАН

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ «ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА» ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СКВОЗЬ КВМ С МАЛЫМ УГЛОМ РАСТВОРА

«Горячие юпитеры» — планеты, расположенные на малом расстоянии от звезды (менее 0.1 а. е.) и обладающие массой порядка массы Юпитера. Значительная часть атмосферы некоторых «горячих юпитеров» находится вне полости Роша [1, 2]. Ранее авторами была разработана модель асимметричной газовой оболочки «горячих юпитеров» [3], которая может быть квазистационарной, благодаря динамическому давлению звездного ветра. Возмущение параметров звездного ветра (например, корональные выбросы массы — КВМ) может приводить к срыву внешних частей оболочки. Ранее авторами было выполнено трехмерное численное газовое моделирование влияния КВМ с большим углом раствора (60°) на оболочку планеты HD 209458 b [4] и показано, что потери массы атмосферой от КВМ солнечного типа на порядок выше, чем в стационарном режиме ветра. В то же время из наблюдений известно, что конус КВМ может быть достаточно узким, то есть возможна ситуация, при которой планета будет проходить через боковую границу КВМ. В настоящем докладе представлены результаты 3D моделирования газодинамики течения в атмосфере HD 209458 b при его прохождении через узкий КВМ для различных фаз и углов раствора КВМ.

Библиографические ссылки

1. *Ben-Jaffel L.* Exoplanet HD 209458b: Inflated Hydrogen Atmosphere but No Sign of Evaporation // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 671. — P. 61.
2. *Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Desert J.-M.* An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b // *Nature.* — 2003. — Vol. 422. — P. 143.
3. *Бисикало Д. В.* Типы газовых оболочек экзопланет, относящихся к классу «горячих Юпитеров» // *Астрон. журн.* — 2013. — Т. 10. — С. 779.
4. *Бисикало Д. В.* О влиянии корональных выбросов массы на газодинамику атмосферы экзопланеты типа «горячий Юпитер» // *Астрон. журн.* — 2016. — Т. 93. — С. 139.

Е. А. Крюкова

Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М. Ф. Решетнёва

НОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В СОЗВЕЗДИИ ЯЩЕРИЦА

В обсерватории Сибирского аэрокосмического университета с августа по октябрь 2014 г. было получено более 3 400 ПЗС-снимков участка размером $2.3 \times 2.3^\circ$ (центр поля $\alpha = 22^h 50^m$, $\delta = 54^\circ 00'$) в созвездии Ящерица на телескопе системы Гамильтон (фокусное расстояние 915 мм, диаметр 400 мм). Телескоп оснащен ПЗС-камерой FLI ML9000 CCD (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Все снимки получены в интегральном (белом) свете с экспозицией 30 с. При первичной обработке снимков были учтены темновые токи, токи считывания и неравномерная чувствительность матрицы.

Для поиска кандидатов в переменные звезды использовался пакет VAST. Для определения периодов применялся метод Лафлера—Кинмана, реализованный В. П. Горанским в программе WinEfk.

На выбранном участке была выявлена переменность у 147 звезд. Из них 85 звезд — затменно-переменные, 6 — запятненные, 9 звезд с переменностью типа DSCT и 8 звезд типа RR Лиры, а остальные выявленные переменные звезды являются неправильными пульсирующими звездами.

Для исследуемых звезд определены периоды, максимумы и минимумы изменения блеска, начальные эпохи и типы переменности.

А. А. Кудряшова

Казанский (Поволжский) федеральный университет

КАТАЛОГ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ОБЗОРЕ НЕБА НА РАТАН-600

В результате обработки обзора неба на РАТАН-600 получен новый RZF (RATAN Zenith Field) каталог 760 источников на волне наблюдений 6.2 см. Обзор проведен в 2011–2012 гг. на радиометрическом комплексе Эридан-2. Обработка проведена по оригинальному алгоритму с калибровкой и накоплением данных с участием автора. Чувствительность 2-месячных круглосуточных наблюдений, на склонении $41.5 \pm 0.1^\circ$ достигла 5 мЯн по плотности потока.

При сравнении с радиокаталогами базы данных CATS [1] были построены спектры источников и рассчитаны их спектральные индексы на волне наблюдений 6.2 см. Для 25 % источников спектры были получены впервые, еще для 48 % спектры уточнены, для остальных — дополнены. Максимум распределения приходится на $\alpha = -0.81$ ($S_\nu \sim \nu^\alpha$).

Библиографические ссылки

1. CATS. — <https://www.sao.ru/cats>.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ NGC 1912, NGC 7142 И IC 2714

Работа выполнена в рамках проекта по созданию однородного каталога структурных и динамических характеристик рассеянных звездных скоплений (РЗС), а также по исследованию их звездного состава на основе каталога точечных источников 2MASS [1].

В работе для скоплений NGC 1912, NGC 7142 И IC 2714 построены карты поверхностной плотности, радиальные профили поверхностной плотности, получены функция светимости и функция масс, даны оценки радиусов скоплений, их масс и приливных радиусов в поле сил Галактики.

Все функции распределения, используемые для исследования РЗС, получены с помощью метода функции-ядра (kernel estimator) [2–4]. Для визуализации полученных результатов написаны и отлажены наборы инструкций (скрипты) для графического пакета gnuplot [5]. Использование gnuplot позволит в дальнейшем встроить эти скрипты в программы расчета функций распределения.

Библиографические ссылки

1. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163–1183.
2. *Silverman B. W.* Density estimation for statistics and data analysis. — 1986.
3. *Merritt D., Tremblay B.* Nonparametric estimation of density profiles // *Astron. J.* — 1994. — Vol. 108. — P. 514–537.
4. *Seleznev A. F.* Kernel density estimation in the study of star clusters // *Baltic Astronomy.* — 2016. — Vol. 25. — P. 267–274.
5. gnuplot. — <http://gnuplot.sourceforge.net>.

Н. Д. Лебедев¹, П. М. Землянуха²

¹Институт прикладной физики РАН

²Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД SH2-187

Одной из важнейших задач в современной астрофизике является изучение процесса образования звезд. До сих пор процесс формирования звезд массой более чем 8–10 масс Солнца недостаточно изучен. Процессы, возникающие в протозвездных облаках, вызывают большой интерес для астрономического сообщества. Их изучение помогает понять механизм образования звезд. Целью работы является изучение мелкомасштабных неоднородностей ионизированной оболочки и ее взаимодействия с атомарным и молекулярным газом.

Объект исследования SH2-187 представляет собой область активного звездообразования. Измерения проводились на интерферометре GMRT на частотах 610 и 1 420 МГц. Детально рассматриваются наблюдения континуума, а также излучение в 21-см линии нейтрального атомарного водорода. Обработка данных проводилась с помощью программных пакетов AIPS, CASA и собственных скриптов в Python.

Был получен интегральный спектр излучения в линии 21 см, имеющий два пика, соответствующих разным объектам на луче зрения. Для них были определены значения оптических толщин, количества молекул на луче зрения (0.31×10^{21} и 0.6×10^{21} см⁻² соответственно). В поле зрения была обнаружена яркая радиогалактика ($T_b = 200$ К), в спектре которой наблюдается линия поглощения того же газа. Для линии поглощения были подсчитаны те же физические параметры (2.9×10^{21} и 3.39×10^{21} см⁻²).

В результате работы полученные карты вкпе с молекулярными наблюдениями позволяют сделать выводы о взаимодействии атомарного газа, расширяющейся ионизированной оболочки и молекулярных облаков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00873-мол-а.

Л. А. Максимова

Санкт-Петербургский государственный университет

ШКАЛА РАССТОЯНИЙ ДО ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОДСИСТЕМ ГАЛАКТИКИ

Проблема определения точных расстояний до планетарных туманностей до сих пор не решена. Обычно для построения шкалы расстояний используются статистические методы, основанные на методе Шкловского. Для калибровки шкал используются объекты, расстояния до которых известны с высокой точностью.

На основе кинематической калибровки, опирающейся на высокоточные определения расстояния до центра Галактики [1] и наблюдательные данные об угловых размерах туманностей и их радиопотоках, нами были уточнены расстояния до 555 планетарных туманностей. Полученная шкала расстояний сравнивалась со шкалой SSV. С использованием классификации планетарных туманностей Пеймберта [2, 3], определяющей принадлежность той или иной туманности к галактическим подсистемам (тонкий и толстый диск, балдж и гало), был проведен анализ пространственной структуры Галактики.

Полученная шкала расстояний может быть использована для анализа химической эволюции Галактики. Планируется использовать данные, полученные со спутника Gaia, для уточнения построенной нами шкалы расстояний.

Библиографические ссылки

1. *Akimkin V. V., Nikiforov I. I., Kholtygin A. F.* Distance scale calibration from kinematic analysis of an ensemble of the galactic planetary nebulae // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — 2012. — Vol. 27. — P. 365–368.
2. *Peimbert M.* Temperature Determinations of H II Regions // *Astrophys. J.* — 1967. — Vol. 150. — P. 825.
3. *Quireza C., Rocha-Pinto H. J., Maciel W. J.* Bayesian posterior classification of planetary nebulae according to the Peimbert types // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 475. — P. 217–231. 0709.0711.

Т. С. Молярова
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Институт астрономии Российской академии наук

МОЛЕКУЛА СО КАК ИНДИКАТОР МАССЫ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

Одним из ключевых параметров протопланетного диска является его масса, которая существенно влияет на формирование планетной системы. Большая часть массы сосредоточена в молекулярном водороде, ненаблюдаемом в холодных условиях молекулярных облаков и протопланетных дисков, поэтому обычно в качестве индикатора массы используется излучение молекулы СО. Однако вследствие специфичности физических условий в протопланетных дисках значительная часть СО может вымерзнуть на пыль и становится ненаблюдаемой, что делает СО соединением, плохо подходящим для определения массы. Несмотря на это, в некоторых современных работах масса протопланетных дисков определяется по излучению СО (например, [1]).

В работе с помощью астрохимического моделирования [2] вычислена доля СО в газовой и твердой фазе при различных физических параметрах протопланетного диска. Показано, как эффект вымерзания СО влияет на оценку массы. Также рассмотрена применимость других химических соединений в качестве индикаторов массы диска.

Работа частично поддержана грантом РФФИ (16-02-00834) и грантом Президента РФ (НШ-9576.2016.2).

Библиографические ссылки

1. *Ansdell M., Williams J. P., van der Marel N. et al.* ALMA Survey of Lupus Protoplanetary Disks. I. Dust and Gas Masses // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 828. — P. 46. 1604.05719.
2. *Akimkin V., Zhukovska S., Wiebe D. et al.* Protoplanetary Disk Structure with Grain Evolution: The ANDES Model // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 766. — P. 8. 1302.1403.

В. В. Никифорова, А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ NGC 2099, NGC 6268 И Czernik 38

Работа выполнена в рамках проекта по созданию однородного каталога структурных и динамических характеристик рассеянных звездных скоплений (РЗС), а также по исследованию их звездного состава на основе каталога точечных источников 2MASS [1].

Все функции распределения, используемые для исследования скоплений, получены с помощью метода функции-ядра (kernel estimator). Эффективность его применения была доказана на примере ряда РЗС (см., например, [2, 3]). Одной из ключевых особенностей метода является то, что получаемые оценки — непрерывные и дифференцируемые функции.

В работе для скоплений NGC 2099, NGC 6268 и Czernik 38 построены карты поверхностной плотности, радиальные профили поверхностной плотности, получены функция светимости и функция масс, даны оценки радиусов скоплений, их масс и приливных радиусов в поле сил Галактики.

Библиографические ссылки

1. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163–1183.
2. *Seleznnev A. F.* Open-cluster density profiles derived using a kernel estimator // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 456. — P. 3757–3773.
3. *Prisinzano L., Carraro G., Piotto G. et al.* Luminosity and mass function of galactic open clusters I. NGC 4815 // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 369. — P. 851–861.

О. С. Олейник

Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

МИГРАЦИЯ ПЛАНЕТ В АККРЕЦИОННОМ ДИСКЕ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается двойная система, состоящая из красного гиганта и звезды главной последовательности. Вокруг аккретора существует планетная система, красный гигант теряет массу в режиме звездного ветра, без переполнения полости Роша. Вокруг звезды главной последовательности образуется аккреционный диск. Используются две модели тонкого диска с разными режимами аккреции: в первом случае рассматривается стандартный диск из звездного ветра, во втором случае приток вещества происходит по всей площади диска. Задачей является расчет времени миграции первого типа, вплоть до падения планеты на звезду. Полученное время миграции для различных значений темпа аккреции, большой полуоси, массы планеты и расстояния до звезды сравнивается со временем жизни красного гиганта, из чего можно сделать вывод о выживаемости планет и частоте слияний.

А. П. Панькив¹, Н. А. Кругликов^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

²Институт физики металлов УрО РАН

РАЗРАБОТКА ОБЛАЧНОГО СЕРВИСА БОЛИДНОЙ СЕТИ

В настоящее время существует актуальная задача по сбору, хранению и обработке фото- и видеоматериалов, содержащих данные о метеорных и болидных явлениях в атмосфере Земли.

В связи с этим возникла задача создать сервис, который с минимальными затратами может выполнять функции автоматического накопления, фильтрации и анализа данных, поступающих с гетерогенных источников фото- и видеосигнала.

Такой сервис был реализован и прошел испытания с подключением двух автоматических фотокамер и нескольких камер, с которых данные передавались вручную. Веб-интерфейс сервиса разработан на платформе PHPframework Yii2 (<http://www.yiiframework.com/>).

Облачный сервис развернут на виртуальном сервере, который имеет следующую физическую конфигурацию:

- CPU: 1 vCore x2.4 Ghz,
- RAM: 2 GB RAM,
- DISK: 10 GB SSD,
- NETWORK: 102 Mbps Bandwidth.

Подключив сеть стационарных автоматических камер к нашей системе, мы сможем обеспечить возможности расчета траекторий болидов и определения мест падения метеоритов.

В настоящий момент пользовательский интерфейс позволяет добавлять обсерватории, подключать камеры с возможностью автоматического и ручного добавления фотографий. Кроме того, имеется вспомогательный функционал для добавления, удаления, просмотра фотографий. Реализована возможность каталогизации и сортировки изображений по различным признакам.

Ведется работа над системой машинного зрения, которая позволит получать метеорологические данные. Разрабатываются алгоритмы распознавания объектов на снимках.

Следующим этапом разработки является размещение системы на стационарном сервере и реализация возможности добавления видеоматериалов.

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА СЕДИМЕНТАЦИЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ
ЧАСТИЦ В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ
МОЛОДЫХ ЗВЕЗД**

В работе исследуется влияние магнитного поля на динамику пыли в аккреционных дисках молодых звезд. Структура аккреционного диска и магнитного поля рассчитывается в рамках МГД модели Дудорова и Хайбрахманова [1]. Аналитические оценки скорости седиментации заряженных пылинок рассчитываются в рамках приближения ведущего центра с учетом трения, гравитации и электромагнитной силы. Определяется распределение заряженных пылевых частиц в аккреционных дисках. Учитывается влияние испарения на распределение частиц.

Показано, что магнитное поле оказывает влияние на седиментацию пыли вне «мертвых» зон. В «мертвых» зонах влиянием магнитного поля можно пренебречь, что способствует быстрому накоплению пыли и образованию планетезималей. Приведены оценки критических размеров пылинок, которые могут седиментировать к экваториальной плоскости за время жизни диска. Радиальное магнитное поле на расстоянии 10 а. е. препятствует седиментации отрицательно заряженных частиц с размерами $a \leq 10^{-4}$ см. Азимутальное магнитное поле препятствует седиментации частиц с размерами $a \leq 3 \times 10^{-6}$ см.

Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных научных исследований Челябинского государственного университета (проект 5/16).

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.

Е. А. Попова¹, А. М. Соболев¹, А. П. Цивилев²
А. М. Толмачев², А. В. Алакоз³

¹Уральский федеральный университет

²Пушчинская радиоастрономическая обсерватория
АКЦ ФИАН

³Астрокосмический центр ФИАН

НАБЛЮДЕНИЯ МАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЛИНИИ ВОДЯНОГО ПАРА

На радиотелескопе РТ-22 Пушчинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН были успешно проведены наблюдения 25 мазерных источников в линии водяного пара на частоте 22 235.08 МГц. Исследуемые объекты были выбраны из программы наблюдений космического радиотелескопа Радиоастрон. Одной из целей этих наблюдений было обнаружение быстрых изменений интенсивности линий. Был проведен предварительный анализ полученных спектров, быстрых изменений интенсивности выявлено не было.

В то же время полученные на РТ-22 спектры позволяют помочь в калибровке данных Радиоастрона. Так, например, наблюдался внегалактический мазер NGC 4258 (исследуемый источник ассоциируется с аккреционным диском вокруг сверхмассивной черной дыры), за время порядка 4 ч была зарегистрирована водяная линия с плотностью потока 6 Ян. Этот же объект наблюдал Радиоастрон в составе наземно-космической РСДБ-сети с базой 19.5 диаметра Земли, что позволило достичь рекордного углового разрешения в 11 микросекунд дуги.

А. Э. Потоскуев¹, П. Боли²

¹Уральский федеральный университет

²Астрономическая обсерватория УрФУ

ФОТОМЕТРИЯ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК ABELL 262

Информация о спектральном распределении энергии излучения галактик может быть получена посредством многоцветной фотометрии. В роли наблюдательных данных в работе используются снимки с телескопа MASTER-II Ural в фильтрах BVRI и изображения с обзора 2MASS в полосах JHKs. Объектом исследования выступает скопление галактик Abell 262.

В данной работе спектральное и пространственное распределение интенсивности излучения изучается посредством поверхностной фотометрии. Построение радиальных профилей предоставляет информацию о зависимости энергии излучения от расстояния до центра галактики. Аппроксимация этой зависимости позволяет не только оценить величину блеска галактик, но и классифицировать их для дальнейшего анализа.

В. Н. Русских

Челябинский государственный университет

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГРАВИТАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ

Исследуется влияние остаточного крупномасштабного магнитного поля на гравитационную устойчивость аккреционных дисков молодых звезд. Предполагается, что диск является геометрически тонким, однородным и вращается с кеплеровской угловой скоростью; магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости диска. Из уравнений гравитационной магнитной газодинамики методом малых возмущений выводятся дисперсионные уравнения, описывающие распространение малых возмущений в плоскости диска. Исследуются области замороженного магнитного поля и области эффективной диффузии. В случае замороженного магнитного поля поведение возмущений описывается двумя динамическими модами. Для данного случая рассчитывается модифицированный параметр Тоомре Q , в зависимости от плазменного параметра β , характеризующего интенсивность магнитного поля. Находится зависимость минимального времени роста гравитационной неустойчивости от параметра Тоомре при различной величине магнитного поля. Рассчитываются времена роста неустойчивости. Время роста гравитационной неустойчивости для диска вокруг звезды солнечной массы составляет $5 \times 10^{-5} - 0.05$ года при $Q = 0.15$, $\beta = 1$ в зависимости от расстояния от звезды, что много меньше времени жизни диска порядка нескольких миллионов лет. В областях эффективной диффузии магнитного поля распространение возмущений описывается тремя динамическими модами, одна из которых является неустойчивой. Анализ дисперсионного уравнения для различных значений магнитного числа Рейнольдса, R_m , характеризующего эффективность магнитной диффузии, показывает, что магнитное поле стабилизирует диск, но вследствие ограничения генерации поля диффузией интервал неустойчивых длин волн увеличивается по сравнению со случаем замороженного магнитного поля. В случае сильной диффузии, $R_m < 1$, магнитное поле не оказывает заметного влияния на динамику неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных научных исследований Челябинского государственного университета (5/16).

О. Л. Рябухина, П. М. Землянуха
Институт прикладной физики РАН
Нижегородский университет им. Н. И. Лобачевского

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ И КИНЕМАТИКИ ФИЛАМЕНТА G192.76+00.10

Филаментные структуры в межзвездных облаках привлекают особое внимание, так как именно в них могут начинаться процессы звездообразования. Исследование строения и кинематики плотных межзвездных облаков ведется на основе наблюдений различных молекул в радиодиапазоне. Спектральный анализ излучения позволяет установить химический состав наблюдаемого объекта, его температуру и ряд других параметров.

В 2016 г. получены данные наблюдений объекта G192.76+00.10 на телескопе IRAM 30 м в диапазоне 218–245 ГГц. Объект представляет собой длинное волокнообразное инфракрасное темное облако [1].

Проведены спектральный анализ и картографирование в радиолиниях $C^{18}O$ (2–1), CS (5–4), CO (2–1) и CH_3CCH (13–12). Данные результаты сравниваются с наблюдениями, полученными в астрономической обсерватории ОНСАЛА в 2015 г. в диапазоне длин волн 3 мм.

Получены оценки физических характеристик и исследованы движения газа в филаменте G192.76+00.10.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00873-мол-а.

Библиографические ссылки

1. *Samal M. R., Ojha D. K., Jose J. et al.* Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 581. — P. A5. 1503.09037.

Т. А. Рябчикова¹, А. М. Романовская²

¹Институт астрономии РАН

²Отделение астрономии физического факультета МГУ

СТРАТИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ МАГНИТНОЙ ПЕКУЛЯРНОЙ (Ap) ЗВЕЗДЫ HD 188041

Представлено исследование стратификации (расслоения) элементов по глубине атмосферы магнитной, химически пекулярной звезды HD 188041. Используются спектры с разрешающей силой $R = 80\,000$, полученные на спектрографе UVES 8 м телескопа Европейской Южной обсерватории. Рассматривались модели атмосфер с эффективными температурами от 8 200 до 8 800 К и логарифмом ускорения силы тяжести от 3.7 до 4.2. Проведен анализ химического состава звезды через измерение эквивалентных ширин одиночных или малоблендированных линий и изучена стратификация элементов железа и хрома в ее атмосфере. Среднее содержание большинства элементов определялось по эквивалентным ширинам с учетом магнитного (зеemanовского) расщепления спектральных линий. Для исследования стратификации было отобрано 26 линий Fe I и Fe II и 17 линий Cr I и Cr II, потенциал возбуждения которых E_i лежит в широком диапазоне энергий и которые имеют различную интенсивность.

Оба обстоятельства предполагают формирование спектральных линий на разных оптических глубинах, что дает возможность исследовать различные слои атмосферы звезды. Кроме того, стратификационный анализ позволяет уточнить параметры атмосферы, примерную геометрию магнитного поля и скорость вращения. Проведенное исследование стратификации по линиям железа Fe и хрома Cr показывает, что элементы имеют скачок содержания на оптических глубинах $\lg \tau_{5\,000}$ от -1.5 до -0.5 . Показано, что стратификация наилучшим образом описывается для модели атмосферы звезды с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 8\,800$ К, ускорением силы тяжести $\lg g = 4.0$, проекции скорости вращения на луч зрения $v_e \sin i = 3$ км/с. Средний угол наклона магнитных силовых линий к видимой наблюдателем поверхности звезды лежит в пределах $45\text{--}90^\circ$. Величина модуля вектора магнитного поля, усредненного по этой части поверхности, $B_s = 3\,600$ Гс.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕКОТОРЫХ АСЗ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ АО УРФУ**

В связи с актуальностью проблемы астероидно-кометной опасности важными являются наблюдение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), а также как можно более точные предсказания их орбит. В ходе наблюдений АСЗ на телескопе СБГ АО УрФУ в период с 10 по 13 февраля 2016 г. было зафиксировано 16 астероидов, 3 объекта из которых имели неудовлетворительные значения невязок $(O-C) > 1''$, для них был применен метод отбраковки наблюдений, основанный на улучшении орбит. Для АСЗ 459872 2014 ЕК24, который имел 32 наблюдения с большими значениями $(O-C)$, 13 после улучшения орбиты оказались удовлетворительного качества с $(O-C) < 1''$. Результаты наблюдений были отправлены в центр малых планет, часть из которых уже опубликована в его циркулярах.

В работе также рассматривается вероятностная орбитальная эволюция АСЗ 459872 2014 ЕК24 ($e = 0.07$, $i = 4.79^\circ$). Изучаемый астероид обладает не только малыми эксцентриситетом и наклоном плоскости орбиты к эклиптике, но и сравнимой с Землей большой полуосью ($a = 1.005$ а. е.). Вероятностная орбитальная эволюция исследовалась путем изучения поведения элементов номинальной орбиты и тестовых частиц, избранных из начальной вероятностной области, на интервалах, ограниченных точностью интегрирования. Рассмотрено поведение элементов орбит — большой полуоси, наклона, эксцентриситета. В ходе исследования было обнаружено, что астероид 459872 2014 ЕК24 движется в далекой окрестности резонанса 1 : 1 с Землей, изучено поведение резонансных характеристик (критического аргумента и резонансной щели).

В. А. Соколова¹, А. Б. Островский¹,
А. И. Васюнин^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

²Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Deutschland

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГИИ ДЕСОРБЦИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА ХИМИЧЕСКУЮ ЭВОЛЮЦИЮ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Энергии десорбции атомов и молекул в значительной степени определяют протекание химических процессов на поверхности пылевых частиц, а также химический состав межзвездной среды. Кислород является одним из наиболее химически активных и обильных элементов в межзвездной среде, а также одним из ключевых химических элементов, необходимых для возникновения и развития жизни. Долгое время при моделировании химических процессов использовалось теоретически оцененное значение энергии десорбции $E_b^O = 800$ К, но в недавних исследованиях (He 2015, Minissale 2016) удалось экспериментально определить энергию десорбции атомарного кислорода, и оказалось, что она приблизительно в два раза превышает прежнее значение.

В работе анализируется, насколько сильно изменится протекание химических реакций на поверхности пыли и в газовой среде при использовании вновь определенного значения $E_b^O = 1\,850$ К. При моделировании процессов химической эволюции использовались модели холодного темного облака и коллапса из полупрозрачного облака в темное. Показано, что в целом значительных изменений химической эволюции в условиях выбранных моделей объектов не произошло, но формирование некоторых молекул оказалось чувствительным к замене традиционно принятого значения энергии десорбции кислорода на вновь определенное. Такими молекулами оказались: O_3 для модели холодного темного облака, O_2H , H_2O_2 , O_3 , H_2C_3O , HC_2O для первой «холодной» стадии модели коллапса и C , O , O_2 , CS , SO на стадии нагрева в этой же модели. Для данных частиц был проведен анализ цепочек их формирования.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых — кандидатов наук, проект МК-8005.2016.2.

Д. С. Тырышкин
Томский государственный университет

**ПРИЛОЖЕНИЕ SPACE & PLAYS
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

При моделировании и изучении орбитального движения еще на этапе постановки задачи у исследователя часто возникает необходимость предварительного знакомства с предметом исследования, когда на тот момент уже имеются полученные каким-либо образом эфемериды небесного тела. Информация, заложенная в эфемеридах, вполне достаточная для того, чтобы хотя бы приближенно установить закон движения космического объекта, а также представить его орбиту. Проблема, однако, состоит в том, что у исследователя обычно не оказывается под рукой подходящей и удобной в использовании программной среды для визуализации орбитальной динамики на основе имеющихся эфемерид. Автор работы как раз предлагает программное приложение Space & Plays, которое разрешает эту проблему.

Гибкое в применении и обладающее высокой степенью автоматизации приложение позволяет создавать фотореалистичные изображения композиций небесных тел и анимировать их движение, используя заранее полученные результаты численного моделирования. Разработанное автором приложение является не только полезным инструментом для предварительного исследования орбитальной динамики, но также отличным источником медиаматериала для подготовки разного рода презентаций и демонстраций.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ДЛЯ ВЫДЕЛЕННОГО
ИСТОЧНИКА СИГНАЛА, ДЕТЕКТИРУЕМОГО
АНТЕННАМИ СИСТЕМЫ LIGO—VIRGO**

В конце 2015 г. интерферометрическими антеннами aLIGO (Advanced LIGO) были детектированы сигналы GW150914, GW151226 и LVT151012, интерпретированные как сигналы гравитационных волн. Возможные положения источников рассматриваемых гравитационно-волновых событий представляют собой видимые круги на небе, которые лежат параллельно сверхгалактической плоскости крупномасштабной структуры, известной как местное скопление галактик (Local Super-Cluster) с радиусом 80 Мпк и толщиной 30 Мпк.

В случае когда положение источника определено однозначно, например с помощью трех и более антенн, могут быть исследованы состояния поляризации гравитационной волны. В то время как в ОТО принимаются в рассмотрение только поперечные тензорные волны, существует ряд модифицированных теорий гравитации и в общем случае имеет смысл рассматривать шесть состояний поляризации: тензорные «кросс» (\times) и «плюс» ($+$), скалярные продольные и поперечные. Исследуя состояния поляризации, можно делать проверку теорий гравитации.

В работе представлен анализ состояний поляризации в случае ввода в эксплуатацию третьей антенны Virgo (Италия) на основе отношения геометрических факторов как максимальной амплитуды сигнала на каждой из антенн сети. В качестве интерферометрических детекторов рассматриваются одноплечные (one-arm) и двухплечные (two-arm) антенны, на которых и были детектированы сигналы. Расчеты показали, что в то время как двухплечные антенны могут различать между тензорными и скалярными состояниями поляризации, одноплечные интерферометры позволяют выделить продольные и поперечные состояния поляризации скалярной волны. Таким образом, точное определение положения источника открывает возможности для исследования физики гравитационного взаимодействия.

В. А. Фёдорова

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИРАН

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ НОВОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА БСА ФИАН

В работе анализируются новые возможности радиотелескопа БСА ФИАН в исследовании вариаций плотностей потоков источников космического радиоизлучения на сравнительно небольших временных масштабах. Меридианный радиотелескоп БСА ФИАН представляет собой фазиремую антенную решетку с полосой приема 111 ± 1.25 МГц.

Нами была поставлена задача поиска вариаций космического радиоизлучения на временных масштабах от суток до нескольких месяцев и оценка точности таких измерений на БСА ФИАН. С этой целью были отобраны относительно яркие источники космического радиоизлучения, попадающие в поле зрения радиотелескопа и имеющие угловые размеры меньше ширины диаграммы направленности БСА. Далее проводилась оценка амплитуд откликов источников. Используемая методика анализа результатов наблюдений на новом радиотелескопе БСА продемонстрировала надежную работу радиотелескопа. Вариации откликов радиоисточников ото дня ко дню в течение месяца составляют в среднем около 6.5 %, а вариации параметров системы за полгода не выходят за пределы 4 %.

Устойчивая работа нового радиотелескопа БСА ФИАН и использованного цифрового приемника вселяет большие надежды на успех в решении широкого круга наблюдательных задач.

Ю. И. Филина, П. М. Царегородцева, А. Ф. Селезнев
Уральский федеральный университет

АТЛАС РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Появление обзоров всего неба в ближнем инфракрасном диапазоне привело к открытию большого количества новых рассеянных звездных скоплений (РЗС). В результате сегодня количество известных скоплений и кандидатов увеличилось более чем в три раза.

При исследовании РЗС часто возникает необходимость в атласе скоплений, показывающем их расположение на небе и приблизительные размеры. К сожалению, единственный атлас РЗС был издан в 1963 г. и содержит всего около 860 объектов [1].

Цель настоящей работы — составление современного атласа РЗС. Список скоплений для атласа основан на каталогах [2–5], использовался также каталог ГАИШ МГУ <http://ocl.sai.msu.ru/>.

Библиографические ссылки

1. *Alter G., Ruprecht J.* The system of open star clusters and our galaxy. Atlas of open star clusters. — N. Y. : Academic Press and Praha : Publ. House of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1963.
2. *Kharchenko N. V., Piskunov A. E., Schilbach E. et al.* Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A53.
3. *Schmeja S., Kharchenko N. V., Piskunov A. E. et al.* Global survey of star clusters in the Milky Way. III. 139 new open clusters at high Galactic latitudes // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 568. — P. A51.
4. *Scholz R.-D., Kharchenko N. V., Piskunov A. E. et al.* Global survey of star clusters in the Milky Way. IV. 63 new open clusters detected by proper motions // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 581. — P. A39.
5. *Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A., Lepine J. R. D.* VizieR Online Data Catalog: Optically visible open clusters and Candidates (Dias+2002–2013) // *VizieR Online Data Catalog.* — 2012. — Vol. 1.

РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОРБИТАМИ АСТЕРОИДОВ

В задаче отождествления родительских тел обломков комет и астероидов, и в первую очередь метеороидных роев, центральную роль играют метрики в пространстве кеплеровских орбит и в трех важнейших фактор-пространствах, полученных игнорированием долгот узлов, аргументов перицентров, или обоих этих углов.

В данной работе были найдены четыре указанных типа расстояний между орбитами всех $N = 464622$ нумерованных астероидов, всего $N(N - 1)/2 = 107\,936\,569\,131$ пара. Наши расстояния имеют размерность квадратного корня из длины. Мы приводим их в системе, в которой за единицу длины принята астрономическая единица. Единичное расстояние отвечает $12\,231 \text{ км}^{1/2}$, или 34.26 корня из диаметра Земли. Нас интересуют малые расстояния. Программа расчета выводит на печать пары астероидов, расстояния между их орбитами и фактор-орбитами, если они не превосходят 10^{-3} . Наименьшее расстояние, равное 3.634540×10^{-5} , принадлежит паре № 63440 и № 331933. Элементы орбит данных астероидов различаются лишь в шестом знаке (чуть хуже у аргумента перицентра). Напрашивается предварительный вывод: эти астероиды являются осколками одного либо это вообще один и тот же астероид. Такое отождествление в последовательных оппозициях случилось в истории астрономии.

Отдельно были рассмотрены метрики в трех фактор-пространствах. Наименьшие расстояния $r_2 = 1.1463381 \times 10^{-5}$ (минимум по аргументам перицентра) и $r_3 = 1.0753622 \times 10^{-5}$ (минимум по узлам и аргументам перицентра) принадлежат вышеуказанной паре. Однако наименьшее расстояние $r_1 = 6.7338774 \times 10^{-5}$ (минимум по узлам) принадлежит другой паре астероидов № 5841 и № 145784, их орбиты в пространстве орбит таковыми не являются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 17-02-00478, а также СПбГУ (грант 6.37.341.2015).

Тезисы кратких сообщений



И. Ю. Алексеев¹, О. В. Козлова¹,
С. Ю. Горда², Е. А. Аввакумова², А. В. Кожевникова²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН

²Уральский федеральный университет

МНОГОЛЕТНЯЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ЗАПЯТНЕННОГО ГИГАНТА IN COMAE

Приведены результаты наших наблюдений 2004–2016 гг. запятненного гиганта IN Com в линиях H_α , H_β и He I 5876 Å, а также UBVRI фотометрии. Данные убедительно показывают, что именно звездный ветер является тем физическим механизмом, который поставляет газ в ближайшую окрестность IN Com, формируя вокруг нее оптически тонкий горячий газовый диск. Образующиеся в нем эмиссионные линии определяются физическими условиями в диске, которые, как мы показали, меняются на многолетней (21 год) временной шкале. В максимуме цикла активности (в 2004–2005 гг.) интенсивный звездный ветер «надувает» околозвездную газовую оболочку вокруг звезды и ее размеры увеличиваются до двух звездных радиусов. На это указывает рост лучевой скорости V_{red} , — ветер, дующий в сторону от нас, уже не экранируется диском звезды и дает вклад в красный компонент эмиссии. В минимуме же пятенной активности (2010–2016), когда блеск звезды максимален, звездный ветер сильно уменьшается, и мы видим прежде всего остатки бывшей ветровой оболочки — оптически тонкий горячий твердотельно вращающийся неоднородный по долготе газовый диск, который начинается вблизи поверхности звезды и простирается до полутора звездных радиусов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16–02–00689, а также при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт 02.A03.21.0006.

А. С. Аракчеев
Институт астрономии РАН

**ОСЛАБЛЕНИЕ ПОТЕРИ МАССЫ
ГОРЯЧИМИ ЮПИТЕРАМИ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

В работе рассматривается влияние дипольного магнитного поля горячего юпитера, близкого к заполнению своей полости Роша, на темп потери массы атмосферой. По результатам расчетов показано, что наличие сравнительно небольшого магнитного момента (порядка 0.1 от магнитного момента Юпитера) у планеты с параметрами WASP-12b приводит к заметному изменению структуры течения и уменьшению темпа потери массы более чем в четыре раза по сравнению с решением без магнитного поля. При этом качественно меняется характер течения: если в решении без магнитного поля струя из окрестности внутренней точки Лагранжа L_1 не может быть остановлена динамическим давлением звездного ветра и оболочка является открытой, то в решении с магнитным полем возникает квазизамкнутая оболочка и струя из L_1 ограничена размером порядка 14 радиусов планеты. Также в решении с магнитным полем наблюдаются периодические срывы вещества с конца струи с периодом $\sim 0.25P_{orb}$. Уменьшение темпа потери массы в результате действия магнитного поля позволяет планетам формировать замкнутые и квазизамкнутые оболочки при больших степенях переполнения полости Роша, чем это возможно без магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14–12–01048. Расчеты выполнялись с использованием ресурсов NASA High-End Computing (HEC) отдела NASA Advanced Supercomputing (NAS) в научно-исследовательском центре Ames.

Г. С. Бисноватый-Коган^{1,2}, М. В. Глушихина¹

¹Институт космических исследований РАН

²Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ПЛОТНОМ ВЕЩЕСТВЕ

Получено решение уравнения Больцмана методом Чепмена—Энскога для полностью ионизованной плазмы с учетом магнитного поля для вырожденных электронов и невырожденных ядер. Для расчета приближенного решения были использованы функции, обобщающие полиномы Сонина. Рассчитан тензор теплопроводности с учетом магнитного поля. Получены аналитические формулы для случаев невырожденной и сильно вырожденной плазмы. Получено аналитическое выражение в трехполиномиальном приближении с учетом электрон-электронных столкновений для тензора теплопроводности для невырожденных электронов в магнитном поле. Учет третьего члена значительно улучшает точность результатов. Для двухполиномиального приближения наши результаты совпадают с результатами, полученными ранее другими авторами. Для сильно вырожденных электронов найдено точное аналитическое решение для тензора теплопроводности с учетом магнитного поля. Это решение существенно сложнее зависит от магнитного поля, чем результаты опубликованные ранее другими авторами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15–12–30016.

А. А. Загидуллин, Н. К. Петрова,
Ю. А. Нефедьев

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛИБРАЦИИ ЛУНЫ — ГЛАВНАЯ ПРОБЛЕМА

В данном исследовании строится численная модель либрации Луны в рамках главной проблемы. Суть главной проблемы заключается в том, что Луна — абсолютно твердое тело, система Земля — Луна консервативна, а в качестве возмущающих источников рассматриваются Земля и Солнце, причем размеры их не учитываются.

Новизна в исследовании заключается в том, что система Гамильтона строится в других канонических переменных, что, в свою очередь, ведет к новому решению поставленной задачи. Данная работа, после планируемых включений тонких эффектов в либрацию Луны, позволит объективно оценивать точность имеющихся теорий и выявлять систематические ошибки.

На данном этапе было проведено сравнение численного решения с аналитической теорией Н. К. Петровой, так как в основу была заложена модель гравитационного поля Луны, используемая в работе Н. К. Петровой. В 1986 г. Г. И. Ерошкин оценил свое численное решение с полуаналитическими теориями Экхарда и Мунс и получил, что остаточные разности решений соответствуют в долготе около $1''$, а в широте около $0.5''$. Мы также построили остаточные разности и получили, что в долготе остаточная разность составляет $1.7''$, а в широте $0.7''$. Столь большие разности объясняются неточностью учета резонансных гармоник в аналитических работах, которые приводят к малым делителям. Построив периодограмму Шустера, мы обнаружили искомые резонансные гармоники. Таким образом, независимое аналогичное решение Ерошкина подтверждает правильность нашего решения.

Результаты работы были представлены на конференции EPSC 11 в октябре 2016 г.

С. Н. Замоздра, Е. В. Павлова
Челябинский государственный университет

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ

К данному моменту у 289 малых тел Солнечной системы обнаружены спутники. Основная часть двойных систем найдена в главном поясе астероидов. Типичные размеры главного тела 4–9 км, а спутника — 1 км. Характерные значения большой полуоси 10 км. У большинства систем период вращения главного тела меньше орбитального периода в 3–20 раз.

Для объяснения наблюдательных характеристик двойных астероидов разрабатывается численная модель, в которой учтены несферичность астероидов и удары метеороидов. Исследование этой модели показывает, что астероиды могут сближаться благодаря переходу орбитального момента в собственный момент каждого из тел. Во многих случаях такое сближение завершается контактом тел и образованием одного гантелеобразного астероида. Это согласуется с появлением данных о контактных системах (гантелеобразных астероидах) [1].

В случае достаточно быстрого вращения главного тела система, наоборот, может разрушиться. В некоторых случаях система «находит» состояние, которое устойчиво десятки тысяч лет и может разрушиться из-за удара большого метеороида.

Авторы благодарят Н. Н. Горькавого за предложение исследовать двойные астероиды.

Работа поддержана грантом № 5/16 Фонда перспективных научных исследований ЧелГУ.

Библиографические ссылки

1. *Johnston Wm. Robert.* Contact Binary Asteroids and Comets. — <http://www.johnstonsarchive.net/astro/contactbinast.html>. — 2016.

П. М. Землянуха^{1,2}, И. И. Зинченко^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН

²Нижегородский университет им. Н. И. Лобачевского

ПРОТОЗВЕЗДНЫЙ ДИСК В КЛАСТЕРЕ S255N

Мы сообщаем об обнаружении протозвездного диска в объекте S255N SMA1 кластера S255N. Кластер содержит в себе ядра на разных стадиях развития, SMA1 на более позднем из них. Он является довольно горячим (~ 200 K) источником [1], с ним ассоциируется ультракомпактная H II область [2]. Обнаружены биполярные истечения, коллимированные с ядром [1]. Все сгустки кластера находятся внутри родительского гигантского молекулярного облака.

Судя по изображению, ось диска имеет небольшой угол к картинной плоскости, то есть диск виден в профиль. Несмотря на отсутствие наблюдений с хорошим пространственным разрешением, форма диска видна довольно неплохо в линии аммиака перехода 1,1. Градиент скорости также наблюдается в линиях молекул $C^{34}S$, H_2CS , DCO. Карта вращающегося объекта в молекулярных линиях имеет форму тора, края диска обладают существенной толщиной, обнаружен «хвост». Оценка кривой вращения дает массу центрального сгустка порядка трех масс Солнца, что существенно меньше сделанных ранее ($23 M_{\odot}$) [1] оценок, что можно объяснить некеплеровским вращением внешних слоев. Из оценки, сделанной по линиям аммиака, кинетическая температура лежит в пределах 35–80 K в зависимости от точки на диске: 80 K в окрестностях ядра, 40 K в среднем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00873-мол-а.

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.
2. *Ojha D. K., Samal M. R., Pandey A. K. et al.* Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 738. — P. 156.

Д. Э. Ионов, В. И. Шематович, Я. Н. Павлюченков
Институт астрономии РАН

ВРЕМЯ ЖИЗНИ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В «ПУСТЫНЕ ГОРЯЧИХ НЕПТУНОВ»

За последние 25 лет открыто уже более 2000 экзопланет. При проведении статистических исследований этого массива объектов было обнаружено, что на диаграмме орбитальный период—масса планеты наблюдается заметный недостаток планет в области, соответствующий массе Нептуна и периоду меньше трех дней. Это явление получило название «пустыня горячих нептонов» [1]. Между тем известно, что для многих планет с водородной атмосферой, близко расположенных к своей звезде, наблюдается интенсивный отток атмосферного газа. Это следствие нагрева верхней атмосферы планеты потоком XUV-излучения звезды. Можно предположить, что подобный отток приводит к исчезновению планет с параметрами, характерными для горячих нептонов.

Нами проведено моделирование оттока атмосферы планеты из области «пустыни горячих нептонов» с помощью самосогласованной астрономической модели водородно-гелиевой атмосферы. В ходе расчета ионизации и нагрева атмосферы учитывалось влияние надтепловых фотоэлектронов. Результаты моделирования показали, что планета у звезды типа Солнца с массой и радиусом Нептуна и большой полуосью орбиты 0.05 а. е. будет испытывать отток, который приведет к полной потере атмосферы за время порядка нескольких десятков миллионов лет.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14–02–00838.

Библиографические ссылки

1. *Mazeh T., Holczer T., Faigler S.* Dearth of short-period Neptunian exoplanets: A desert in period-mass and period-radius planes // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 589. — P. A75. 1602.07843.

В. В. Крушинский, Е. А. Аввакумова
Астрономическая обсерватория Уральского федерального
университета

PySex — АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОПТОВОЛОКОННОМ СПЕКТРОГРАФЕ

Разработан пакет программ PySex для автоматической обработки спектров, получаемых на оптоволоконных спектрографах.

Пакет осуществляет первичную обработку кадров, удаление следов космических частиц и рассеянного света, экстракцию спектров несколькими способами, идентификацию линий калибровочной лампы и построение дисперсионной функции. Выходные данные представляются в виде fits-файла в соответствии с форматом WCS и полностью совместимы с программным обеспечением для визуализации и анализа спектров (IRAF, MIDAS). Дополнительно создается fits-файл с оценками отношения сигнал/шум для каждого пикселя. Также в пакете имеются две программы для интерактивного построения дисперсионной функции и проведения континуума.

Экстракция спектров выполняется одним из трех способов: простым суммированием интенсивностей пикселей в апертуре, оптимальной экстракцией с учетом PSF поперек направления дисперсии эшелле-решетки [1], экстракцией относительно спектра лампы непрерывного спектра [2].

Пакет программ тестировался в операционных системах Win7/Win10 и Linux.

Программы, тестовые данные и описание размещены на сайте Коуровской астрономической обсерватории по адресу: <http://optlab.astro.usu.ru/PySex/>.

Библиографические ссылки

1. *Horne K.* An optimal extraction algorithm for CCD spectroscopy // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1986. — Vol. 98. — P. 609–617.
2. *Zechmeister M., Anglada-Escudé G., Reiners A.* Flat-relative optimal extraction. A quick and efficient algorithm for stabilised spectrographs // Astron. Astrophys. — 2014. — Vol. 561. — P. A59–A67.

О. Е. Кутков, С. В. Назаров
Крымская астрофизическая обсерватория

КАМЕРА ОБЗОРА НЕБА КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Строительство крупных обсерваторий всегда сопровождается масштабными исследованиями астроклимата с целью выбора наилучшей площадки под определенные научные задачи. Одной из важнейших целей такого исследования является прогноз устойчивости астроклимата. Однако зачастую после ввода в строй обсерватории такие исследования резко сокращаются и нельзя сделать вывод о достоверности прогноза. Кроме того, сам процесс работы крупных телескопов требует постоянного контроля состояния окружающей среды для оперативного принятия решения об открытии/закрытии купола. Таким образом, наблюдение за текущими и многолетними изменениями в погоде является важной задачей. Мы представляем описание конструкции, программного обеспечения и результатов работы автоматического погодного комплекса, включающего две камеры обзора неба и ряд датчиков.

П. А. Левкина
Институт астрономии РАН

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ВБЛИЗИ УСТОЙЧИВОЙ ТОЧКИ 75° В. Д.

Гравитационные воздействия Земли и Луны на плоскость геостационарной орбиты обуславливают возмущения в движении искусственных спутников и космического мусора в этой области. Помимо роста величины наклона орбиты, в силу отличия формы земного экватора от окружности, неуправляемые геостационарные объекты дрейфуют вдоль экватора к одной из двух точек равновесия. Либрация космических объектов осуществляется относительно устойчивых точек 75° и 255° в. д.

Экваториальная область на геосинхронной орбите с долготами около 75° в. д. является важной для размещения космических аппаратов, выполняющих функции связи на территории России и решающих научные и прикладные задачи. В то же время число объектов, либрирующих вблизи точки 75° в. д., увеличивается год от года. Возникает вероятность опасного сближения с активными спутниками и нарушения их функционирования. В ежегодном каталоге геосинхронных объектов ESA на начало 2016 г. в режиме либрации возле точки 75° в. д. указан 121 объект, возле точки 255° в. д. — 52 объекта и вблизи обеих устойчивых точек — 17 объектов.

В докладе приведены результаты исследования движения нескольких фрагментов космического мусора возле точки 75° в. д. В качестве исходных данных использованы ряды продолжительных позиционных и фотометрических наблюдений, выполненных на телескопах ИНАСАН (Сантел-500 и Цейсс-2000), а также на телескопе Цейсс-1000 в обсерватории Санглок Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан. С помощью позиционных наблюдений были улучшены параметры движения объектов и оценки отношения площади к массе. На основе фотометрических измерений получены оценки периодов вращения объектов. Определены особенности изменения значений отношения площади миделевого сечения к массе объекта, что позволяет в несколько раз улучшить точность прогноза орбит космического мусора.

Е. Д. Мазаева¹, А. С. Позаненко¹,
В. В. Румянцев²

¹Институт космических исследований РАН

²Крымская астрофизическая обсерватория

**КРИВАЯ БЛЕСКА GRB 030329
В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ:
НОВЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЯРКОГО ГАММА-ВСПЛЕСКА**

Несмотря на то что гамма-всплеск GRB 030329 был зарегистрирован более десяти лет назад, он до сих пор является самым ярким в оптическом диапазоне на момент времени 1.5 часа после его регистрации в гамма-диапазоне (до этого момента наблюдений в оптике не проводилось) [1]. GRB 030329 имеет наиболее плотный ряд фотометрических данных, полученных для какого-либо из наблюдавшихся послесвечений гамма-всплесков.

В работе представлены новые, ранее не опубликованные данные, полученные обсерваториями КрАО, Майданак, SPM, РТТ-150, VLT и дополняющие уже известные фотометрические ряды. Построены подробные многоцветные кривые блеска. Исследуются многочисленные неоднородности кривой блеска и их возможная природа.

Библиографические ссылки

1. *Kann D. A., Klose S., Zhang B. et al.* The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 720. — P. 1513–1558. 0712.2186.

С. В. Назаров

Крымская астрофизическая обсерватория

ЭХОКАРТИРОВАНИЕ ПЯТИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Мы представляем первые результаты международного мониторинга пяти активных ядер галактик с целью эхокартирования области широких линий. В течение первой половины 2014 г. на нескольких обсерваториях почти ежедневно наблюдались галактики MCG+08-11-011, NGC 2617, NGC 4051, 3C 382 и Mrk 374. В результате мониторинга удалось определить массы центральных черных дыр, основываясь на задержке излучения в линии H β относительно континуума. Для четырех объектов массы также определялись по линиям H γ и HeII. Время реакции всех линий находится в хорошем согласии с фотоионизационной моделью [1].

Библиографические ссылки

1. *Fausnaugh M. M., Grier C. J., Bentz M. C. et al.* Reverberation Mapping of Optical Emission Lines in Five Active Galaxies // eprint arXiv:1610.00008. — 2016.

А. С. Перминов, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ 10 МЛРД ЛЕТ

В рамках четырехпланетной задачи построена вековая теория движения второго порядка по массам планет. С помощью метода Хори—Депри получены уравнения движения в средних элементах и функции замены переменных. Теория построена для второй системы элементов Пуанкаре в координатах Якоби.

В работе рассматривается орбитальная эволюция четырехпланетной системы Солнце — Юпитер — Сатурн — Уран — Нептун на интервале времени 10 млрд лет. Использование осредненных уравнений движения позволяет существенно увеличить шаг интегрирования. Уравнения движения интегрировались методами Эверхарта 15-го порядка [1] и Рунге—Кутты 11-го порядка [2] с шагом 10 000 лет.

Изучены качественные характеристики орбитальной эволюции планет-гигантов Солнечной системы. Рассмотрены аналитические свойства осредненных уравнений движения. С помощью мажорант функций замены переменных определены границы возможных резонансных зон в системе планет-гигантов. На основе сохранения интеграла движения и z -компоненты интеграла площадей даны оценки точности численного интегрирования уравнений движения.

Библиографические ссылки

1. *Everhart E.* Implicit single methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* — 1974. — Vol. 10. — P. 35–55.
2. *Данилов В. М., Дороговцева Л. В.* Временные шкалы механизмов динамической эволюции в моделях РЗС // *Астрон. вестн.* — 2008. — Т. 85. — С. 524–536.

Е. Б. Рыспаева^{1,2}, А. Ф. Холтыгин¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЖЕСТКОСТЬЮ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ МАССИВНЫХ О-ЗВЕЗД

В настоящее время считается, что рентгеновское излучение ОВ-звезд формируется при столкновении звездных ветров в двойных системах или при прохождении ударных волн по веществу звездного ветра одиночных ОВ-звезд. У звезд, обладающих магнитным полем, образование рентгеновского излучения может быть описано в модели магнитно удерживаемой ударной волны (Magnetically confined wind-shock model, MCWS). В этой модели потоки вещества звездного ветра направляются вдоль магнитных силовых линий к магнитному экватору, где сталкиваются и образуют стоячую ударную волну. При этом формируются протяженная горячая разреженная область, излучающая в рентгене, и тонкий плотный околозвездный диск в области магнитного экватора. Однако прямой зависимости между рентгеновской светимостью и величиной магнитного поля пока не выявлено. Решение вопроса о наличии или отсутствии такой зависимости является актуальной астрофизической задачей.

Цель нашей работы — исследование связи рентгеновских спектров массивных звезд спектрального класса О и их магнитных полей. Для достижения цели этого мы проанализировали архивные рентгеновские наблюдения 10 магнитных О-звезд, полученных с помощью орбитальных обсерваторий «Chandra» и «ХММ-Newton» с 2000 по 2014 г. Были извлечены архивные спектры звезд и, при использовании метода полиномиальной аппроксимации уровня континуума, выделены спектральные линии. Для отождествленных нами рентгеновских линий были оценены их ширины на уровне половины максимума (FWHM), затем их сравнили с опубликованными данными. Были сопоставлены спектры и величины магнитных полей исследуемых звезд. В результате был сделан предварительный вывод о наличии связи между жесткостью спектра и средней напряженностью магнитного поля звезды.

Г. Е. Самбаров, О. М. Сюсина
Национальный исследовательский
Томский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Все малые тела Солнечной системы изменяют свои первоначальные орбиты под воздействием других тел.

В данной работе на примере ряда астероидов, сближающихся с Землей, были проведены исследования влияния малых возмущающих параметров, таких как сжатие Земли, сжатие Солнца и релятивистские эффекты, на точность построения вероятностной модели движения объекта. Неучет малого возмущающего параметра со временем может привести к изменению эволюционной картины объекта. Оценивание влияния каждого возмущения на начальный момент времени осуществлялось с помощью показателя эффективности [1, 2]. В этом способе ошибки модели сил тесно связываются с размерами доверительных областей и смещениями оценок, определяемых для разных моделей движения астероидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-32-00191 мол_а.

Библиографические ссылки

1. Самбаров Г. Е., Сюсина О. М. Оценивание влияния ошибок модели движения астероидов, сближающихся с землей, на точность построения доверительных областей // Вестн. СибГАУ. — 2014. — Т. 56, вып. 4. — С. 111—118.
2. Сюсина О. М., Черницын А. М., Тамаров В. А., Самбаров Г. Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2013. — Т. 56, вып. 6/3. — С. 235—237.

Е. Э. Сивкова, Д. Э. Вибе, М. С. Мурга
Институт астрономии РАН

ЭВОЛЮЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ЗОНАХ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА И УДАРНЫХ ВОЛНАХ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — один из основных компонентов пыли в межзвездной среде. Их интенсивные эмиссионные полосы в ближней инфракрасной (ИК) области спектра широко используются в качестве индикатора процессов звездообразования. При этом измеренные интенсивности полос ПАУ сильно зависят от металличности. В частности, в галактиках с низкой металличностью проявляется недостаток ПАУ.

Низкая интенсивность эмиссии ПАУ в галактиках малой металличности может быть результатом эффективного разрушения и/или изначального дефицита ПАУ. Важную роль в разрушении ПАУ при низкой металличности могут играть ультрафиолетовое излучение массивных звезд и ударные волны при вспышках сверхновых. Нами проведено исследование микрофизики эволюции пылевых частиц в зонах ионизованного водорода (НИ) и ударных волнах в остатках сверхновых. Рассчитана эволюция распределения пылинок по размерам и степеням ароматизации для различных значений скорости столкновений с частицами газа и интенсивности поля излучения. Рассмотрено две модели пыли: Матис и др. [1] и Джонс и др. [2]. Прослежена эволюция массы пыли, и оценены временные шкалы ее разрушения для различных значений поля излучения и скоростей столкновения частиц пыли с газом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-00604.

Библиографические ссылки

1. *Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H.* The size distribution of interstellar grains // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 217. — P. 425–433.
2. *Jones A. P., Fanciullo L., Köhler M. et al.* The evolution of amorphous hydrocarbons in the ISM: dust modelling from a new vantage point // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A62. 1411 . 6293.

К. И. Смирнова¹, С. Ю. Парфёнов¹,
Д. З. Вибе²

¹Уральский федеральный университет

²Институт астрономии РАН

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ И ГАЛАКТИКАХ С ПОЛЯРНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Звездообразование является одной из наиболее актуальных астрофизических проблем. В последнее время значительный прогресс в ее решении достигнут благодаря доступности масштабных наблюдений внегалактических комплексов звездообразования.

В данной работе мы выделили предполагаемые области звездообразования при помощи программ, позволяющих автоматически выбирать области по интенсивности излучения и кинематическим данным, например, GetSources или GaussClump. Автоматический метод выделения областей звездообразования по данным во всех диапазонах примерен к некоторым карликовым галактикам, в которых мы ранее применяли метод «на глаз», не позволяющий выделить значительное количество областей звездообразования. Полученные результаты сравниваются с результатами наших предыдущих исследований.

Те же методы опробованы на галактике с полярным кольцом NGC 660. Эта галактика располагается значительно дальше галактик, которые мы исследовали в предыдущей работе [1], поэтому метод «на глаз» для нее не будет эффективен. Тем не менее интересно, смогут ли автоматические программы выделить в ней области для анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00237.

Библиографические ссылки

1. Смирнова К. И., Мурга М. С., Вибе Д. З. Связь молекулярного и атомарного водорода с пылью во внегалактических комплексах НП // Изв. вузов. Физика. — 2015. — Т. 58, № 7/2. — С. 63–67.

К ВОПРОСУ О ПОИСКЕ РАДИО- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПУЛЬСАРОВ

В наших предыдущих работах было показано, что радиопульсары, обнаруженные как пульсирующие гамма-источники на телескопе LAT космической обсерватории Ферми, обладают высокими значениями магнитной индукции вблизи светового цилиндра, на два-три порядка превышающей величины индукции для спокойных радиопульсаров. Кроме того, их скорости потери вращательной энергии также в среднем на три порядка выше соответствующих значений для основной массы радиопульсаров. Обнаружена корреляция между светимостями гамма- и радиопульсаров. Это обстоятельство позволяет выделить из всей совокупности известных радиопульсаров объекты, у которых с большой вероятностью можно ожидать наличие гамма-сигнала. Мы приводим ниже список таких радиопульсаров и предлагаем провести поиск их жесткого излучения. С другой стороны, в каталоге гамма-пульсаров присутствуют источники, которых в настоящее время нет в каталогах радиопульсаров. Часть из них обладает большой гамма-светимостью и в соответствии с полученной корреляцией светимостей от них можно ожидать заметного радиоизлучения. Мы приводим список объектов для поиска импульсного радиосигнала и оценки плотностей потока на двух частотах (1 400 и 111 МГц).

	PSR	P, c	R lum1400	$L_{\gamma}, 10^{33}$ эрг/с	dist	S_{1400}	S_{111}
1	J0106+4855	0.08316	0.07	21	3.06	0.008	0.3584
2	J0205+6449	0.06574	0.46	24	3.2	0.045	2.016
3	J0633+1746	0.2371		4.3	0.25		

А. П. Топчиева
Институт астрономии РАН

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

В англоязычной литературе для обозначения кольцевых инфракрасных туманностей широко используется термин «инфракрасный пузырь», подразумевающий, что туманность является проекцией структуры, имеющей *примерно* сферически-симметричную форму. В ряде работ исследуется, являются ли данные объекты областями ионизованного водорода [1]. Выяснение истинной природы туманностей, а также определение параметров поля излучения в них важно при построении моделей этих объектов.

В работе представлены исследования потоков инфракрасных кольцевых туманностей на 8, 24, 100, 160 и 250 мкм по данным обзоров GLIMPSE и MIPS GAL, выполненных на космическом телескопе Spitzer, а также по результатам наблюдений на приборах PACS и SPIRE космического телескопа Herschel. Ранее нами было отобрано 92 объекта. Измерены потоки от всей области, от внешнего кольца, от внутренней части объекта. Проведен анализ наличия излучения в линиях CO, HI и H α . С целью уточнения природы объектов сопоставлены полные потоки на разных длинах волн, как это было сделано в работе [1]. Для оценки обилия полициклических ароматических углеводородов в исследуемых туманностях определено отношение потоков F_8/F_{24} . Из этого можно сделать вывод о физических свойствах объекта, в частности, о его металличности и поле излучения в нем.

Работа поддержана грантами РФФИ 16-02-00834 и НШ-9951.2016.2.

Библиографические ссылки

1. Watson C., Povich M. S., Churchwell E. B. et al. Infrared Dust Bubbles: Probing the Detailed Structure and Young Massive Stellar Populations of Galactic H II Regions // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 1341–1355. 0806.0609.

С. А. Тюльбашев¹, А. И. Чернышова²

¹Пушчинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН

²Пушчинский государственный естественно-научный институт

ПОИСК ПУЛЬСАРОВ В МОНИТОРИНГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

Поиск новых пульсаров — одна из очень сложных в техническом плане задач. В исходных записях, полученных на радиотелескопе БСА ФИАН, отношение сигнала к шуму может быть меньше 0.1. При этом количество обнаруживаемых периодических сигналов в оригинальных ежедневных записях в тысячи раз больше, чем пульсаров. Одна из рассматриваемых задач — разработка методики поиска пульсаров в приложении к наблюдениям БСА ФИАН.

Наблюдения на радиотелескопе БСА ФИАН в мониторинговом режиме продолжаются больше трех лет. Это позволяет искать редкие виды пульсаров.

Для поиска пульсаров использовался комплекс программ, позволяющий делать анализ предварительно обработанных данных: строить динамические спектры, проводить усреднение импульсов для получения среднего профиля, проводить дополнительную цифровую фильтрацию, сравнивать получаемые каталоги, определять координаты объектов, работать с исходными записями и решать другие задачи.

В результате работы были обнаружены десятки новых кандидатов в пульсары. Перечислим некоторые из них: $J0219 + 3615$ с периодом 1.029 с; $J0328 + 2754 - 0.715$ с; $J0419 + 3248 - 0.901$ с; $J1132 + 2340 - 1.187$ с.

Например, был обнаружен известный пульсар $B1133 + 16$ с периодом $p = 1.18791$ с, который у нас наблюдался почти на 8° выше его истинного положения ($J1132 + 2340$) в боковом лепестке антенны БСА ФИАН. То, что это один и тот же объект, доказано совпадением его периода до третьего знака после запятой и совпадающей мерой дисперсии. Кандидат в пульсары $J0328 + 2754$ является нижней кульминацией известного пульсара $B0329 + 54$.

Усреднение фурье-спектров мощности позволило открыть не менее 30 новых пульсаров. Продолжается работа над улучшением методики поиска.

А. А. Черенков, Д. В. Бисикало
Институт астрономии РАН

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГАЗОДИНАМИКУ АТМОСФЕР ЭКЗОПЛАНЕТ ТИПА «ГОРЯЧИЙ ЮПИТЕР»

Открытие «горячих Юпитеров» является одним из главных достижений в наблюдательной астрономии последних десятилетий. Из-за их близости к родительским звездам они подвержены сильному облучению и воздействию плазменных явлений, происходящих в короне звезд, что ставит вопрос их происхождения и эволюции.

Фотометрические наблюдения транзитов «горячих Юпитеров» показали, что на длине волны Ly- α затмение длится дольше и имеет большую глубину, чем в оптическом диапазоне, что свидетельствует о том, что планета окружена обширной водородной оболочкой. Гидродинамическое моделирование, выполненное нашей научной группой, показало, что такие оболочки могут сформироваться и быть стабильными из-за динамического давления звездного ветра. В данной работе на основе численного моделирования мы исследуем, какое влияние оказывает давление излучения в линии Ly- α на верхние слои атмосфер этих планет. При расчете давления излучения учитывается доплеровский сдвиг в линии и поглощение излучения при его распространении в атмосфере.

На основе трехмерного численного моделирования показано, что суммарный импульс давления излучения в линии Ly- α недостаточен, чтобы оказать существенное влияние на газодинамику атмосферы для горячего Юпитера HD 209458 b, — он изменяет динамику только тонкого слоя вещества, расположенного ближе всего к звезде; показано, что давление излучения может существенно изменить картину течения только при увеличении интенсивности линии Ly- α на два порядка. Также мы хотим подчеркнуть, что, вероятно, для близких планет, вращающихся вокруг звезд с более интенсивной линией Ly- α или с меньшим темпом потери массы, давление излучения может существенно влиять на газодинамику верхних слоев их атмосфер.

И. Н. Чувашов

Томский государственный университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

В работе рассмотрено несколько способов моделирования ускорений от светового давления с использованием позиционных наблюдений объектов космического мусора. В первом способе совместно с координатами и скоростями определяется коэффициент парусности. В последующих двух подходах задаются отличные друг от друга спутникоцентрические системы координат и определяются три компонента вектора ускорения вдоль осей этих систем координат. Показано, что последние два способа лучше минимизируют среднеквадратическую ошибку наблюдений и хорошо представляют наблюдения, а первый подход не всегда позволяет найти решение обратной задачи.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП–4301.2016.5–СП–2016).

Е. М. Чудакова
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга

ТОЛЩИНЫ ДИСКОВ ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИК СКОПЛЕНИЙ ЮЖНОГО НЕБА

В данной работе исследуются толщины звездных дисков галактик, расположенных в плотном окружении, на примере выборки фотометрических изображений в фильтрах g и r 29 линзовидных галактик скопления южного неба. Изображения были получены на сети метровых роботизированных телескопов ГТОЛК (LCOGT).

Для определения толщины диска используется авторский метод, позволяющий определять толщину экспоненциального диска, видимого под произвольным углом, используя распределение яркости диска галактики в картинной плоскости. Метод работает для дисков галактик, видимых под углом, меньшим или равным 70° . Для диска с распределением объемной яркости, имеющим экспоненциальную зависимость от радиуса и sech^2 по оси вращения галактики, $\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{r}{h_0}\right) \text{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)$, мы называем относительной толщиной соотношение масштабных коэффициентов $q = \frac{z_0}{h_0}$.

Для выявления зависимости толщины диска от плотности окружения мы сравнили полученную в работе статистику толщин дисков S0 галактик в скоплениях со статистикой по 82 дисковым галактикам ранних типов, видимым с ребра, в поле [1]. Сравнение показывает, что плотность окружения не влияет на относительные толщины экспоненциальных дисков галактик ранних типов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14–22–00041.

Библиографические ссылки

1. *Mosenkov A. V., Sotnikova N. Y., Reshetnikov V. P.* 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 401. — P. 559–576. 0909.1263.

Стендовые доклады



А. П. Бисярина, А. М. Соболев, С. Ю. Горда
Астрономическая обсерватория
Уральского федерального университета

**ПЕРЕМЕННОСТЬ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ
Si II 6347 И 6371 Å В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ VE ХЕРБИГА
HD 200775**

Зарегистрирована переменность излучения линий Si II 6347 и 6371 Å в спектре звезды Ве Хербига HD 200775. Ранее было обнаружено, что лучевые скорости двух компонент фотосферных линий звезды, образованных соответственно в двух компонентах системы, меняются с периодом около 3.7 г. В ходе предыдущих исследований спектра этой звезды нами была замечена переменность линий [OI] 6300 и 6363 Å и показано, что профили этих линий изменяются в соответствии с орбитальной фазой.

В настоящей работе проведен анализ переменности линий Si II 6347 и 6371 Å на основе данных новых и архивных оптических наблюдений, проведенных на спектрографах высокого разрешения в течение 20 лет. Основная часть данных новых наблюдений получена на 1.2-метровом телескопе Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Показано, что переменность линий Si II 6347 и 6371 Å, как и переменность запрещенных линий кислорода, происходит в соответствии с орбитальной фазой.

Работа выполнялась в Уральском федеральном университете при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15–12–10017).

К. В. Волков¹, А. А. Попов²

¹Уральский федеральный университет

²Астрономическая обсерватория УрФУ

НОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В СОЗВЕЗДИИ КАССИОПЕЯ

В рамках проекта по поиску внесолнечных экзопланет — Kourovka Planet Search (KPS) [1] — проведены наблюдения области неба в созвездии Кассиопея.

По результатам наблюдений и обработки данных обнаружено 150 объектов, показывающих изменения блеска. Для 71 звезды определен период и тип переменности, среди них 9 короткопериодических пульсирующих звезд, 13 звезд с иррегулярными изменениями блеска, а остальные звезды принадлежат к затменным двойным.

Для спектральной классификации найденных переменных звезд использовались Q-диаграммы [2], построенные с использованием инфракрасных показателей цвета 2MASS.

Работы проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № 01201465056).

Библиографические ссылки

1. *Burdanov A. Y., Benni P., Krushinsky V. V. et al.* First results of the Kourovka Planet Search: discovery of transiting exoplanet candidates in the first three target fields // MNRAS. — 2016. — Vol. 461. — P. 3854–3863.
2. *Bessell M. S., Brett J. M.* JHKLM photometry – Standard systems, passbands, and intrinsic colors // PASP. — 1988. — Vol. 100. — P. 1134–1151.

А. С. Горбан
Южный федеральный университет

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ В ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

В работе представлены результаты N -частичного моделирования динамической эволюции звездных скоплений. Расчет проводился с помощью общедоступного кода NBODY6. Основной акцент анализа результатов сделан на исследовании эволюции двойных систем, которые являются важным источником энергии для скопления. Исследована динамика образования двойных систем в зависимости от их первоначальной доли. Кроме того, в рамках настоящей работы были проведены численные расчеты по влиянию среднемассивной черной дыры (массой порядка 1 % от массы скопления), расположенной в центре шарового скопления, на динамическую эволюцию двойных систем. Расчеты были проведены как с учетом гравитационного поля Галактики, так и без него.

А. А. Калинин

Уральский федеральный университет

О СВЕЧЕНИИ ЛИНИИ 422.7 НМ НЕЙТРАЛЬНОГО КАЛЬЦИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ПРОТУБЕРАНЦАХ

Одной из нерешенных проблем в теории протуберанцев (и хромосферы, и короны в целом) является разница в поведении нейтральных и ионизованных компонент химических элементов, составляющих протуберанец. Теория и наблюдения пока часто противоречат друг другу. Представляется актуальным для протуберанцев анализировать (квази)одновременные спектры элементов, содержащие линии как нейтральной, так и ионизованной фракции. В связи с этим теоретический анализ эмиссии водорода и ионизованного кальция в спектрах протуберанцев, проведенный автором ранее, дополнен анализом свечения линии 422.7 нм нейтрального кальция. Приведены диагностические диаграммы зависимостей интегральной интенсивности линий водорода и кальция от температуры и давления в протуберанце. Получено, что логарифм интенсивности линии 422.7 нм практически линейно зависит как от температуры, так и от логарифма давления.

Работа выполнена при поддержке Госзадания Минобрнауки РФ (проект № 3.1781.2014/К).

Н. Д. Калинина
Уральский федеральный университет

О ДИАГНОСТИКЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МОЛЕКУЛЯРНОМ ЯДРЕ NGC 6334I

Композиционный состав молекул и отношения удельных лучевых концентраций сложных органических молекул могут использоваться в качестве диагностики физических параметров областей звездообразования [1].

Исследования гигантского молекулярного облака NGC 6334 на различных длинах волн обнаруживают множество областей звездообразования. Для молекулярного ядра NGC 6334I, являющегося областью массивного звездообразования, методом вращательных диаграмм получены лучевые концентрации и вращательные температуры ряда молекул. Отношения лучевых концентраций молекул CH_3OCH_3 , CH_3CCH , CH_3CN и CH_3CHO к лучевой концентрации молекулы CH_3OH и вращательные температуры для каждой из молекул дают возможность предположить, что ядро NGC 6334I содержит в себе как теплую, так и горячую составляющие. Наши результаты подтверждают выводы работы [1]: излучение молекул CH_3CN и CH_3OH трассирует в основном более горячие области, $T \geq 100$ К; излучение молекулы CH_3CCH трассирует относительно холодные области, ≈ 50 К.

Положение источника NGC 6334I на диаграмме зависимости отношения лучевых концентраций молекул CH_3CN и CH_3OH от вращательной температуры (рис. 8 [1]) дает основания полагать, что эффективность образования молекул CH_3CN резко падает при температурах выше 250 К.

Работа выполнена при поддержке Госзадания Минобрнауки РФ (проект номер 3.1781.2014/К).

Библиографические ссылки

1. *Oberg K. I., Fayolle E. C., Reiter J. B., Cyganowski C.* Complex molecule formation around massive young stellar objects // *Faraday Discussions*. — 2014. — Vol. 168. — P. 81–101.

А. В. Квашнина¹, А. И. Васюнин^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

² Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik

РАСШИРЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ КОДА MONACO ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕБИОТИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ

Решение вопросов о происхождении звезд, планетных систем и жизни во Вселенной — одна из фундаментальных задач современной науки. Изучение молекулярного состава межзвездной среды, в том числе посредством моделирования эволюции химического состава, способствует построению наиболее полной картины процесса образования звезд и планетных систем.

MONACO — код, предназначенный для численного моделирования химии межзвездной среды с учетом реакций в газе и на пылевых частицах. База данных химических реакций MONACO содержит более 650 молекул, включая органические молекулы и порядка 6 000 реакций. Однако она не является полной, поэтому было принято решение о расширении базы данных, в частности в области пребиотической химии.

Был проведен сравнительный анализ сеток химических реакций MONACO и Р. Гэррода [1], в ходе которого были выявлены органические молекулы и реакции с ними, которые ранее отсутствовали в MONACO. Новые реакции были включены в базу данных кода MONACO, проведены тестовые расчеты сложной органической химии для условий коллапсирующей протозвезды и разогревающегося горячего ядра.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых — кандидатов наук, проект МК-8005.2016.2.

Библиографические ссылки

1. Rob Garrod's Astrochemistry pages. Resources. Reaction file. — http://www.astro.cornell.edu/~rgarrod/wp-content/uploads/reactions_Science_paper.txt.

С. Е. Киричек, А. А. Соловьев
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория

СОЛНЕЧНЫЙ ФАКЕЛ КАК КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ПЕРЕМЕННОЙ ВО ВРЕМЕНИ ЖЕСТКОСТЬЮ

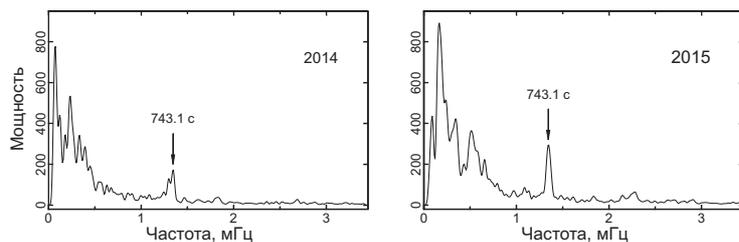
За последние годы установлено, что солнечные пятна колеблются как целостные магнитные структуры с периодами от 12 до 32 ч в зависимости от напряженности их магнитного поля. Долгопериодические собственные колебания ($T = 20\text{--}30$ ч) обнаружены у корональных петель, наблюдаемых солнечными космическими обсерваториями в УФ диапазоне, а также у хромосферных волокон, наблюдаемых в линии $H\alpha$ глобальной наземной сетью GONG. Солнечные факелы, имеющие иногда на магнитограммах вид достаточно крупных долгоживущих магнитных узлов, также обнаруживают собственные колебания, то есть колеблются как единое целое, квазипериодически меняя среднее по сечению магнитное поле, с периодом от 1 до 4 ч. Недавно по магнитограммам SDO было установлено, что в тех случаях, когда за время наблюдения (15–20 ч) средняя напряженность магнитного поля факела значительно изменяется (падает в несколько раз), колебания приобретают весьма специфический характер: основная мода собственных колебаний факела заметно (примерно в два раза) нарастает по амплитуде и вместе с тем примерно в три раза возрастает период колебаний. В конце процесса система распадается. Это явление связано, по-видимому, с тем, что эффективная жесткость системы, которая, очевидно, зависит от квадрата напряженности среднего магнитного поля факела, существенно изменяется за время наблюдения, то есть мы имеем дело с колебаниями системы, жесткость (или упругость) которой значительно меняется во времени. В работе представлено частное решение уравнения $\partial^2 X / \partial t^2 + w^2(t)X = 0$, описывающее именно такой колебательный режим, при котором собственная частота осцилляций экспоненциально падает со временем, а период и амплитуда колебаний нарастают. Авторам представляется, что полученное простое решение для систем с переменным во времени коэффициентом упругости $k/m = w^2(t)$ может быть использовано для описания не только солнечных колебаний, но и широкого класса астрофизических явлений.

Работа поддержана РФФ (проект 15–12–20001).

© Киричек С. Е., Соловьев А. А., 2017

ФОТОМЕТРИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОЛЯРА V2069 CyG

Недавно было установлено, что катаклизмическая переменная V2069 Cyg является промежуточным полярком. Звезда показывает колебания блеска с периодом вращения белого карлика 743.1 ± 0.6 с. Колебания были найдены как в рентгеновской области спектра, так и в оптике. Однако точность периода колебаний была не очень высокой. Чтобы определить период вращения белого карлика с высокой точностью, в 2014–2015 гг. на 70-см телескопе Коуровской обсерватории мы провели фотометрические наблюдения V2069 Cyg в течение 32 ночей общей продолжительностью 119 ч. На рисунке приведены средние спектры мощности наиболее продолжительных кривых блеска V2069 Cyg. Хотя колебания имеют малую амплитуду (приблизительно 0.02^m), в средних спектрах мощности они обнаруживаются уверенно. Объединив все наблюдения в общий временной ряд, мы получили период вращения $P = 743.40670 \pm 0.00048$ с, а также эфемериду колебаний со сроком годности 36 лет. Эта эфемерида может быть использована для исследования изменений периода вращения в будущем.



Средние спектры мощности, вычисленные для наиболее продолжительных кривых блеска V2069 Cyg

Исследование поддержано программой 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006.

Э. Д. Кузнецов, П. Е. Захарова, Д. В. Гламазда
Уральский федеральный университет

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ НА ВЫСОКИХ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ОРБИТАХ С МАЛЫМИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ

В работе исследуется динамическая эволюция искусственных спутников Земли, движущихся в окрестности высоких экваториальных орбит с малыми начальными эксцентриситетами.

Динамическая эволюция на коротких интервалах времени исследована на основе позиционных наблюдений высокоорбитальных объектов на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. В 2016 г. определено свыше 3700 положений для более чем 140 объектов. Построено 189 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. Отношение миделева сечения к массе (парусность) варьировалось от малых значений, соответствующих спутникам, до больших — соответствующих космическому мусору.

Рассмотрена динамическая эволюция объектов на орбитах с малыми начальными значениями эксцентриситета $e = 0.001$ и наклона $i = 0.001^\circ$, расположенных выше геостационарной орбиты. Начальные значения большой полуоси a выбирались в окрестности резонансов высоких порядков 50 : 49 ($a = 42\,740$ км), 20 : 19 ($a = 43\,635$ км), 15 : 14 ($a = 44\,153$ км), 10 : 9 ($a = 45\,237$ км), 9 : 8 ($a = 45\,613$ км). Максимальные значения парусности, при которых космический мусор остается на орбите не менее 240 лет, составляют $33 \text{ м}^2/\text{кг}$ для объектов, движущихся в окрестности резонансов 50 : 49, 20 : 19, 10 : 9, 9 : 8 и $34 \text{ м}^2/\text{кг}$ — в окрестности резонанса 15 : 14.

А. А. Кудряшова

Казанский (Поволжский) федеральный университет

ПОИСК ДАЛЕКИХ ОБЪЕКТОВ СРЕДИ ИСТОЧНИКОВ НОВОГО RZF КАТАЛОГА

Зависимость спектральный индекс — красное смещение является ключевым критерием при поиске далеких объектов во Вселенной. По спектральным индексам, полученным с использованием данных нового RZF каталога, были отобраны 211 источников с ультракрасными спектрами. С использованием оптических баз данных было отождествлено 100 источников, еще для шести были найдены возможные кандидаты. По морфологической классификации объекты распределены следующим образом: 58 объектов типа «галактика», 36 объектов типа «звезда» (квазары и далекие неразрешимые галактики). Для 54 источников имеются измеренные красные смещения. Среди них оказались источники с большим z : RZF 003048+411053 ($z = 2.428$), RZF003453+413131 ($z = 3.67$), RZF 065052+413027 ($z = 3.7928$), RZF 122855+413032 ($z = 3.563$).

Также было проведено отождествление остальных источников RZF каталога. Из 660 радиоисточников с оптическими обзорами удалось отождествить 409 источников. Для 225 имеются известные значения красных смещений. Для всех объектов была построена единая зависимость z от спектрального индекса на четырех частотах (151, 325, 1400 и 4850 МГц). Во многих работах отмечается, что зависимость z —Sp.Ind наиболее чувствительна к низким частотам. Наши результаты показывают обратное. Причина этого разногласия должна быть изучена дополнительно.

А. А. Кудряшова

Казанский (Поволжский) федеральный университет

ПОИСК ЗВЕЗД С РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ В КОНТИНУУМЕ НА РАТАН-600

В настоящей работе исследованы все звезды, которые могут быть видны в радиоконтинууме. Мы выбрали таких 134 звезды с возможностью радиоизлучения. Поиск ограничен центральной полосой обзора с максимальной чувствительностью ($41.5^\circ \pm 3'$). Отождествление проведено по известным ресурсам SDSS и Aladin. Из 130 MORX-объектов [1] было отождествлено 25 галактик, 35 «звезд» — полагаем, квазары, 2 квазара и 13 — пустые поля. По 61 звезде данные отсутствуют. С использованием двухцветных диаграмм для фильтров SDSS (u-g, g-r, r-i, i-z) и 2MASS (J-H, H-K) были определены спектральные типы звезд. 29 звезд поздних K и M типов и 2 более ранние. При отождествлении звезд с RZF каталогом три звезды совпали с источниками каталога. Однако при тщательном рассмотрении один источник отождествлен с галактикой. Для остальных двух звезд в базах данных нет сведений, что это внегалактические объекты, однако мы также не можем утверждать что это звезды с излучением в радиоконтинууме. Полученные сведения не противоречат общей статистике крайне малой доли звезд, видимых в радиодиапазоне на уровне до 10 мЯн и выше. Однако красные карлики M типа во время вспышек в состоянии давать такое излучение.

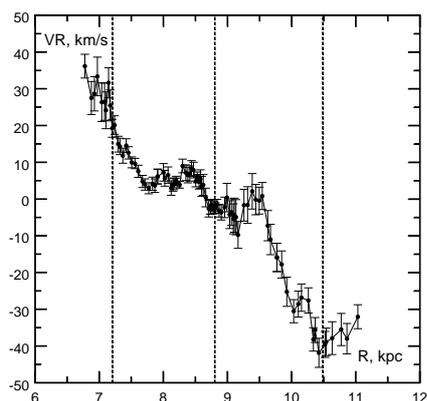
Библиографические ссылки

1. *Flesch E. W.* The Million Optical — Radio/X-ray Associations (MORX) Catalogue // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 2016. — Vol. 33. — P. e052. 1609.05973.

А. В. Локтин, М. Э. Попова
Уральский федеральный университет

ВЛИЯНИЕ СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

По данным текущей версии «Однородного каталога параметров рассеянных скоплений» (РЗС) проводится исследование влияния спиральных волн плотности на поле скоростей объектов, характерных для диска Галактики — РЗС. Для исследования использованы пространственные скорости 477 РЗС. На рисунке приведена зависимость радиальных скоростей РЗС. При этом данные сглаживались методом скользящего среднего для групп по 30 РЗС. Штриховыми линиями отмечены положения обычно выделяемых отрезков спиральной структуры. На рисунке не выделяются явно видимые периодические изменения скоростей как функции расстояния от центра Галактики при очевидной негладкости функции. Подобные графики были построены для всех трех компонент пространственной скорости РЗС с аналогичным результатом. Надеемся, что предполагаемый анализ методами исследования случайных процессов поможет прояснить ситуацию.



Зависимость радиальных скоростей РЗС от расстояния до центра Галактики

С. В. Назаров, О. Е. Кутков
Крымская астрофизическая обсерватория

ПОИСК ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В ПОЛЯХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

В 2001 г. в КраО на телескопе АЗТ-8 [1] стартовал проект постоянного мониторинга избранного ряда активных галактик. На сегодняшний день база данных проекта содержит 470 000 снимков в пяти фильтрах нескольких десятков площадок размером $15 \times 15'$. Мы представляем результаты и описание процесса поиска переменных звезд в этой базе данных с использованием пакета Vast [2] и собственного программного обеспечения.

Библиографические ссылки

1. *Sergeev S. G., Klimanov S. A., Okhmat S. S.* Upgrading and automating the AZT-8 70-cm telescope // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory. — 2010. — Vol. 106. — P. 92–98.
2. *Sokolovsky K. V., Gavras P., Karampelas A.* Comparative performance of selected variability detection techniques in photometric time series data // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Vol. 464. — P. 274–292.

Т. С. Полушина, С. Ю. Горда
Уральский федеральный университет

ПЗС-ФОТОМЕТРИЯ МАССИВНОЙ ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ UU CAS

Затменная переменная UU Cas ($10.4-10.8^m$) с массивными компонентами раннего спектрального класса B0.5 III и периодом 8.51929^d дней является самой массивной тесной двойной системой, включенной в «Каталог орбитальных элементов масс и светимостей тесных двойных звезд» Свечникова. К настоящему времени получены две фотоэлектрические кривые блеска UU Cas. Авторами отмечены значимые временные изменения кривых блеска практически на всех фазах.

На основе результатов фотометрических наблюдений Кумсиашивили и Полушиной, а также недавно проведенных Марковым и др. с использованием ПЗС-камеры спектральных наблюдений предложена модель этой двойной системы, состоящей из главного компонента, представляющего собой молодую массивную звезду с расширяющейся оболочкой, и второго компонента, окруженного толстым диском.

С целью дальнейшего исследования UU Cas и уточнения параметров системы в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ на телескопе АЗТ-3 ($D = 0.45$ м, $F = 2$ м), оснащенный ПЗС камерой Alta U6, с 2007 по 2015 г. выполнялись мониторинговые наблюдения данной звезды в трех BVR_c -фильтрах. В настоящее время проведена фотометрическая обработка, полученного материала. Получены новые свидетельства изменений кривых блеска. С 2017 г. предполагается проведение спектрального мониторинга UU Cas.

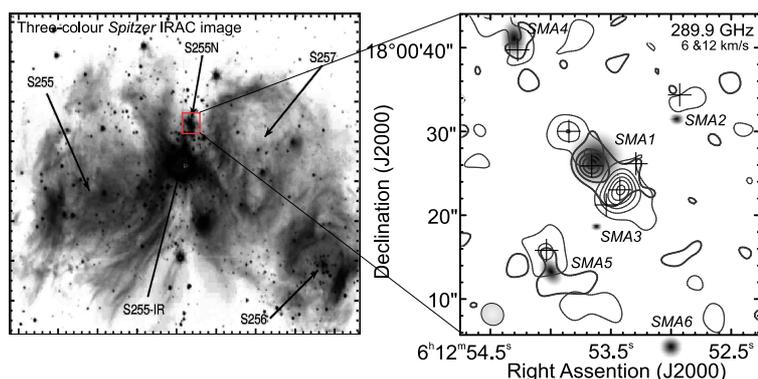
С. В. Салий¹, И. И. Зинченко², А. М. Соболев¹
¹Астрономическая обсерватория УрФУ
²Институт прикладной физики РАН

ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫДЕЛЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЯДРА S255 N ПО РАДИОЛИНИЯМ МЕТАНОЛА

Молекулярное ядро S255 N, удаленное на 1.59 кпк, входит в область звездообразования, расположенную между развитыми зонами III (S255 и S257). В S255 N наблюдается излучение как в континууме на 1.3 мм (SMA1—SMA6), так и в радиолиниях молекул [1]. В частности, в линиях метанола в интервале 216—290 ГГц.

По линиям метанола в выделенных районах S255 N оценены кинетическая температура и плотность газа, лучевая концентрация и относительное содержание метанола (положения, в которых проводились оценки параметров, отмечены крестиками на рисунке).

Значения кинетических температур, полученные для разных положений, заметно отличаются: от ~ 20 до ~ 200 К, что указывает на различие природы районов, генерирующих излучение метанола.



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.

© Салий С. В., Зинченко И. И., Соболев А. М., 2017

В. С. Сафронова, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИКИ ПРОСТРАНСТВА ОРБИТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЯСА АСТЕРОИДОВ

Метрики пространства кеплеровых орбит [1] использованы для решения двух задач: поиска близких орбит астероидов и выделения семейств астероидов.

Поиск близких орбит выполнялся по данным Международного центра малых планет. Использовались метрики [1]: ρ (в 5-мерном пространстве элементов) и ρ_3 (учтены все возможные повороты линий узлов и апсид). Приведем две пары астероидов с минимальными ρ : (315938) 2008 TV49 — 2012 BF155 ($\rho = 1700$ км, $\rho_3 = 1500$ км) и 2001 MD30 — (331933) 2004 TV14 ($\rho = 3900$ км, $\rho_3 = 1500$ км). В системе Horizons вычислены эфемериды на интервале 100 лет. Для пары (315938) 2008 TV49 — 2012 BF155 минимальное расстояние 3800 км достигается в 2090 г. Для 2001 MD30 — (331933) 2004 TV14 минимальное расстояние превышает 14 млн км.

Исследование возможности применения метрики ρ_3 для выделения астероидов, входящих в семейства, выполнялось на примере методики, предложенной в [2], с использованием собственных элементов орбит [3]. Максимальное значение ρ_3 для известных семейств достигает 0.24 а. е., однако в большинстве случаев $\rho_3 < 0.05$ а. е.

Библиографические ссылки

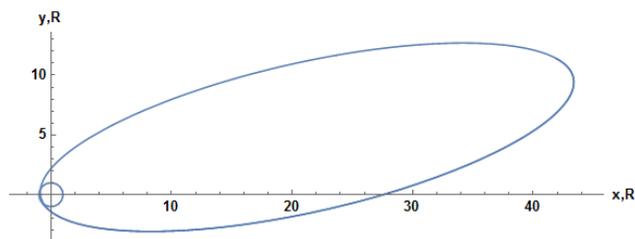
1. *Kholshchikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 25. — P. 2275–2283.
2. *Carruba V., Michtchenko T. A.* A frequency approach to identifying asteroid families // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 475. — P. 1145–1158.
3. *Milani A., Knežević Z.* Asteroid mean elements: higher order and iterative theories // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 1998. — Vol. 71. — P. 55–78.

Е. Д. Старовойт
Пушчинская радиоастрономическая
обсерватория АКЦ ФИАН
Пушчинский государственный
естественно-научный институт

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТНОЙ ОРБИТЫ ПОСЛЕ ВЗРЫВА СВЕРХНОВОЙ

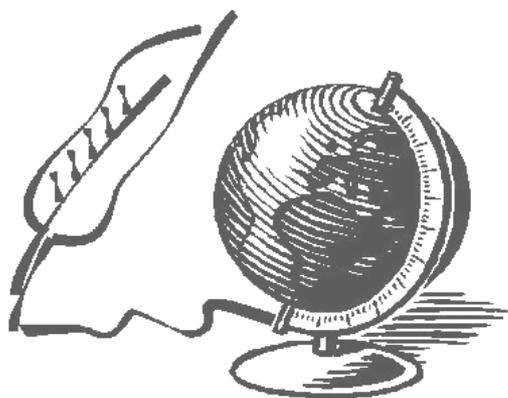
На данный момент существуют две основные версии происхождения пульсарных планет: либо они образовались из сброшенного звездного вещества после взрыва сверхновой, либо сумели «пережить» взрыв, оставшись на орбите бурно проэволюционировавшей звезды.

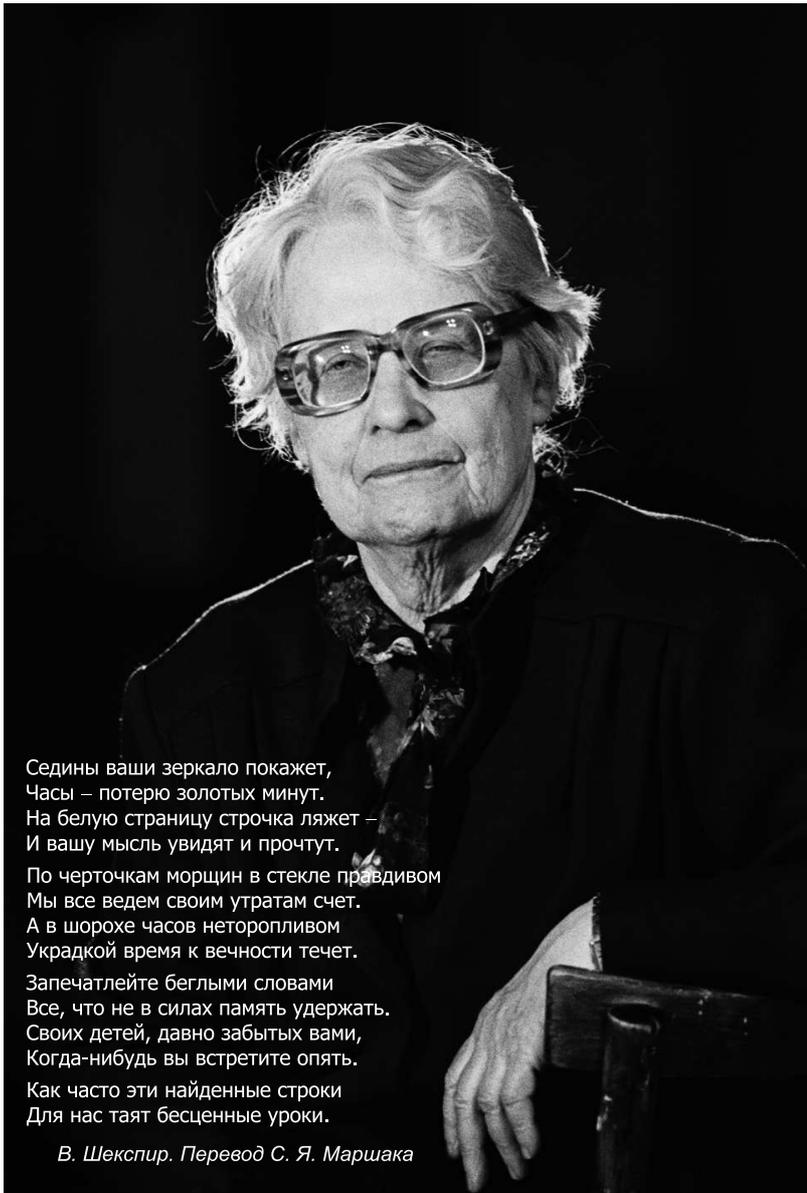
Для того чтобы ответить на вопрос, могут ли планеты «выжить» и остаться на орбите звезды, была построена модель эволюции планетной орбиты после взрыва сверхновой. Программа выполнена на языке Wolfram. В качестве переменных параметров были выбраны масса и скорость сброшенного звездного вещества, масса и плотность планеты, а также начальный радиус орбиты планеты. Мы решали задачу двух тел при изменяющейся массе центрального тела, конечная масса которого определялась нижней границей массы нейтронной звезды. В результате были получены графики эволюции орбиты для различных планет, один из которых представлен на рисунке.



Эволюция орбиты твердой планеты массой $M = 8M_E$ при взрыве сверхновой. Скорость разлета сброшенного вещества $V = 6 \times 10^6$ м/с. По осям за единицу принят начальный радиус орбиты планеты $R = 4$ а. е. На графике представлены начальная орбита (круговая) и ее вид после взрыва сверхновой (эллиптическая)

Из истории науки





Седины ваши зеркало покажет,
Часы – потерю золотых минут.
На белую страницу строчка ляжет –
И вашу мысль увидят и прочтут.

По черточкам морщин в стекле правдивом
Мы все ведем своим утратам счет.
А в шорохе часов неторопливом
Украдкой время к вечности течет.

Запечатлейте беглыми словами
Все, что не в силах память удержать.
Своих детей, давно забытых вами,
Когда-нибудь вы встретите опять.

Как часто эти найденные строки
Для нас таят бесценные уроки.

В. Шекспир. Перевод С. Я. Маршак

К. А. Бархатова. 1989 г.

**К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
КЛАВДИИ АЛЕКСАНДРОВНЫ БАРХАТОВОЙ,
«ЗВЕЗДНОГО ПРОФЕССОРА»**



7 ноября 2017 г. исполняется 100 лет со дня рождения известного ученого и организатора астрономической науки на Урале, профессора Уральского государственного университета Клавдии Александровны Бархатовой.

Изучение рассеянных звездных скоплений (РЗС) было основной задачей научной деятельности К. А. Бархатовой. Интерес к этой тематике вызван тем, что рассеянные звездные скопления являются одним из важнейших объектов астрофизических и звездно-статистических исследований. Дело в том, что звезды, члены скоплений, имеют практически одинаковый возраст и химический состав, что позволяет на основе анализа результатов исследования РЗС совершенствовать существующие и разрабатывать новые теории происхождения и эволюции звезд. Кроме того, РЗС — почти единственные объекты нашей Галактики, для которых возможны точные опре-

деления расстояний, возрастов, химического состава атмосфер звезд, членов скопления.

Одним из основных методов исследования РЗС является многоцветная фотометрия, позволяющая определять основные параметры (блеск, цвет, межзвездное поглощение, химический состав) для весьма слабых звезд, недоступных классическому спектральному анализу.

К. А. Бархатова начала исследовать РЗС еще в 1943 г., когда поступила в аспирантуру ГАИШ в Москве.

Остановимся на основных этапах жизненного пути К. А. Бархатовой — организатора строительства при УрГУ единственной на Урале Коуровской астрономической обсерватории.

К. А. Бархатова родилась 7 ноября 1917 г. в Нижнем Тагиле в рабочей семье. Отец, Бархатов Александр Васильевич, имел большой революционный опыт, устанавливал советскую власть в Нижнем Тагиле, в Нязепетровске и других уральских городах. Октябрьская революция отозвалась в Нижнем Тагиле серьезным обострением борьбы между заводчиками и рабочими. За советом и помощью тагильские рабочие послали делегацию к Ленину, в Петроград. Среди четырех рабочих был и Бархатов. Ленин дал один совет: забирайте всю власть в свои руки. Ради спасения революции на Урале А. В. Бархатов не мог не выполнить партийного поручения, и в это тревожное, голодное время оставил новорожденную Клаву и двухлетнюю Шуру на жену Мотю.

Учиться пошла Клава, когда ей не было и шести. Классовая борьба входила в ее сознание через потрясения, которые испытывала семья в это трудное время. Когда Клаве было одиннадцать лет, двое бандитов чуть не убили топорами мать и двух ее сестер. Тогда они жили в Салде, а отца дома не было, его вызвали в Нижний Тагил.

В 1930 г. семья Бархатовых переехала в Свердловск. Отец подал заявление, и его приняли в Урало-Казахстанскую промакадемию. В свои сорок лет он хотел учиться. Отец был всегда для Клавы большим авторитетом и помощником.

Клава окончила среднюю школу и решила свою жизнь посвятить астрономии, которой она была увлечена с детства. Своему выбору К. А. Бархатова осталась верной до конца жизни!

В 1935 г. Клава поступила на 1 курс физико-математического факультета Свердловского государственного университета. Посещала астрономический кружок. Заведующим кафедрой астрономогеодезии и гравиметрии в то время был Сергей Владимирович Муратов

(1881—1949). Он отмечал огромный интерес Клавдии Александровны к астрономии, необыкновенную любознательность. С. В. Муратов взял Клавдию Александровну на затмение. Речь идет о полном солнечном затмении 19 июня 1936 г. Экспедиция отправилась в Петропавловск (Казахстан), поскольку этот город был ближайшим к Свердловску, где проходила полоса полной фазы затмения. Участие в наблюдении полного солнечного затмения окончательно подтвердило желание Клавдии Александровны заниматься астрономией.

В 1937 г. (до 1941 г.) Клавдия Александровна была избрана секретарем комсомольской организации университета. Там она познакомилась с однокурсником Иосифом Тарлинским, красивым парнем из Бурятии. 6 июля 1940 г. они поженились. Иосиф после получения диплома был направлен на турбомоторный завод. Клавдии Александровне из-за болезни почек предстояло вновь идти на пятый курс.

Через три месяца после свадьбы И. В. Тарлинского призвали на действительную службу в Красную армию. В июне 1941 г. из Калуги, где он служил, И. В. Тарлинский был направлен на фронт.

21 июня 1941 г. Клавдия Александровна сдавала третий госэкзамен из пяти. 22 июня, в ясный солнечный день, прозвучало по радио сообщение о начале войны с фашистской Германией. 23 июня 1941 г. в университете прошел митинг, добровольцами на фронт записывались студенты, преподаватели, заведующие кафедрами, проректоры, ректор. Все ребята с курса Клавдии Александровны ушли на фронт.

В 1941 г. К. А. Бархатова окончила физико-математический факультет Уральского государственного университета им. А. М. Горького. Она была направлена на работу в геодезическую лабораторию в Косулино, но к осени 1941 г. лаборатория была закрыта.

Осенью 1941 г. в Свердловск прибыло много эвакуированных: детей с воспитателями, студентов, артистов, ученых, рабочих. Необходимо было в кратчайшие сроки запустить производство на эвакуированных предприятиях.

Среди ученых-астрономов в эвакуации на Урале были М. С. Зверев, С. К. Всехсвятский, С. Н. Блажко, Э. Р. Мустель, Е. Я. Богуславская, И. С. Шкловский, А. Б. Северный и др. Со временем сотрудники кафедры астрономии во главе с заведующим А. А. Яковкиным стали общаться с коллегами из других городов. Многие из них читали студентам лекции, проводили практические занятия.

Как вспоминала Клавдия Александровна, в это трудное для страны время было огромное желание что-то делать, чем-то помочь Родине, оказать помощь фронту работой в тылу. Клавдия Алексан-

дровна хотела поработать в школе, но не удалось, университет отозвал ее: она стала работать на 0.5 ставки лаборантом. С сентября 1941 г. Клавдию Александровну снова избрали секретарем комитета ВЛКСМ университета, затем она была переведена на ставку ассистента. Клавдии Александровне надо было разрабатывать новые лекционные курсы по звездной астрономии, сферической астрономии, общей астрономии, математической обработке результатов наблюдений. Времени не хватало. Студенты и сотрудники строили цеха для заводов, которые были эвакуированы в Свердловск и другие уральские города. На полях осенью убрали урожай, заготовливали дрова, торф, с началом зимы расчищали от снега железнодорожные пути. Клавдия Александровна в составе комсомольских бригад занималась приемом и транспортировкой раненых, ухаживала за ними в подшефном госпитале, читала книги, писала письма, участвовала в концертах.

Жизнь и работа в годы войны проходила в сложных, тяжелых условиях. Голодали, не хватало дров, мерзли, занимались в пальто. Клавдия Александровна запомнила разговор с А. А. Яковкиным: «Что вы будете, Клавдия Александровна, есть после войны?» Я ответила: «Хлеб и масло!».

Несмотря на тяжелейшие условия, войну, в 1942 г. была восстановлена аспирантура на естественных факультетах университета. Руководителем аспирантуры у Клавдии Александровны должен был быть А. А. Яковкин. Однако Клавдия Александровна ему призналась, что не хочет заниматься Луной. «А чем же?» — спросил А. А. Яковкин. Ответ последовал без промедлений: «Звездной астрономией». Сдав в 1942 г. экзамены, летом 1943 г. Бархатова отправилась в Москву, в МГУ, в ГАИШ. К этому времени сотрудники ГАИШ стали возвращаться из эвакуации. Кафедра звездной астрономии оживала. Вернулись из действующей армии Павел Петрович Паренаго — заведующий кафедрой, доцент Борис Васильевич Кукаркин. К этим известным астрономам и пришла Клавдия Александровна. Тему научной работы ей предложил ее будущий руководитель, известный астроном-звездник П. П. Паренаго: «Открывайте открытые (то есть рассеянные) скопления». Первые работы Клавдии Александровны еще не были фотометрическими (шла война, многие обсерватории были разрушены, не было телескопов), ей оставалось анализировать уже опубликованные данные. Клавдии Александровне удалось предсказать и статистически подтвердить зависимость видимых угловых диаметров скопления от величины меж-

звездного поглощения света. Бархатова переопределила расстояние до 334 РЗС, изучила пространственное распределение рассеянных скоплений в нашей Галактике и оценила их общую численность.

С 1944 г. К. А. Бархатова — член ВКП(б).

В 1948 г. Клавдия Александровна успешно защитила кандидатскую диссертацию. Еще до защиты Бархатова знала о возможности работы в МГУ. О намерении оставить Бархатову в МГУ узнал новый ректор Свердловского университета И. Д. Седлецкий, который занимался по заданию наркома просвещения и Комитета по делам высшей школы подготовкой записки о послевоенном развитии университета. Согласно этой записке планировалось открытие новых факультетов, а также строительство обсерватории, открытие НИИ астрономии. К этому времени возвращались с Урала домой все эвакуированные астрономы. Уехал работать в Киев А. А. Яковкин, остался в городе один астроном — С. В. Муратов. Ректору нужны были астрономические кадры для реализации его планов. В Наркомате Седлецкий предупредил, что если Бархатову оставят в МГУ, то он уйдет с ректорского поста.

Бархатова вернулась в Свердловск, в родной университет, чтобы со временем создать в университете астрономическое направление. С 1946 г. К. А. Бархатова занимается преподавательской работой в должности и. о. доцента кафедры астрономии, в 1948 г. ей присвоено звание доцента.

2 мая 1949 г. ушел из жизни С. В. Муратов. Похороны любимца университета были многолюдными. О многом передумала в тяжелые минуты прощания с Учителем Клавдия Александровна. Восстановить кафедру, которая к этому времени была закрыта, построить обсерваторию, готовить астрономов на Урале ради памяти Муратова — вот такие задачи поставила перед собой Бархатова после смерти Муратова.

Кафедра астрономии была объединена с кафедрой теоретической механики. С октября 1949-го по сентябрь 1954 г. Бархатова — доцент кафедры теоретической механики.

С 1951 по 1953 г. Клавдия Александровна была деканом физико-математического факультета.

С 1951 г. Бархатова — член Международного астрономического союза (МАС), входила в оргкомитет Комиссии № 3 («Звездные скопления и ассоциации») МАС (1967—1976). Бархатова активно вела большую общественную работу. Она входила в Научно-технический совет и Научно-методический совет Минвуза СССР, была членом

Совета по астрономическим кадрам АН СССР, председателем рабочей группы «Звездные скопления» Астросовета АН СССР. С 1969 по 1986 г. Бархатова была председателем Головного совета по астрономии при Минвузе РСФСР.

С сентября 1954-го по сентябрь 1956 г. Клавдия Александровна проходила докторантуру в ГАИШе при МГУ. В качестве докторанта МГУ в 1956 г. Клавдия Александровна получила свой первый фотографический материал в Казанской астрономической обсерватории им. Энгельгардта: 224 негатива стали основой «стеклянной библиотеки» РЗС УрГУ. С этих наблюдений, выполненных Бархатовой, начались фотометрические исследования РЗС в Уральском университете. Вскоре появились интересные результаты: были обнаружены два новых РЗС (в созвездии Лебедя); выявлены звездные цепочки в скоплении NGC 7086; сделано предположение, что скопления NGC 1528 и NGC 1545 образуют двойную систему (в 1981 г. Бархатова с учениками опубликовали каталог 69 РЗС, входящих в двойные и кратные системы). В это же время, с 1956 по 1958 г., Бархатова занималась исследованием знаменитого РЗС NGC 188. Особенностью данного скопления являлась его большая удаленность от плоскости Млечного пути, обилие звезд, что могло свидетельствовать о его значительном возрасте. Исследование Бархатовой подтвердило это предположение. Скопление NGC 188 оказалось самым старым из изученных на конец 60-х гг. Согласно теории звездной эволюции старые скопления не могут содержать горячие звезды. Клавдия Александровна их обнаружила. Спустя много лет ученые обратили на них внимание и назвали их «голубые бродяги».

Итогом научной работы Клавдии Александровны и ее учеников явилось издание четырех томов «Атласа диаграмм цвет — величина РЗС» (1958—1961). Тома 3 и 4 выпущены совместно с В. В. Сыровым.

Позднее наблюдательный материал для фотометрии РЗС был получен в Абастуманской обсерватории, Крымской астрофизической обсерватории, Южной станции ГАИШ, где Бархатовой и ее ученикам всегда любезно предоставляли наблюдательное время.

12 августа 1958 г. в Москве открылся 10-й съезд МАС, его могли посетить многие астрономы нашей страны. К. А. Бархатова получила приглашение выступить на этом съезде. Свидетелями успешного, очень содержательного выступления К. А. Бархатовой были З. Н. Шукстова и студентка пединститута В. А. Кузьмина. Доклад Клавдии Александровны был посвящен системе РЗС в нашей Галактике и важности их всестороннего изучения. Как вспоминала после

этого выступления Шукстова, научный авторитет К. А. Бархатовой был поднят не необычайную высоту, ее работы получили мировое признание. В тот момент Э. Н. Шукстова поверила в то, что Клавдия Александровна очень уверенный, целеустремленный человек и она непременно добьется восстановления астрономии в университете.

Заместитель председателя Астросовета Академии наук СССР А. Г. Масевич посоветовала Бархатовой готовиться к наблюдениям спутников. Участие в наблюдениях — это единственный путь к возрождению кафедры и к своей обсерватории. 4 октября 1957 г. в стенах старого здания университета по улице 8 Марта было много студентов-энтузиастов, желающих наблюдать спутники. Среди них уже тогда Бархатова увидела будущих уральских астрономов.



К. А. Бархатова на зимней астрономической школе. 1985 г.

Телеграммы из Астросовета с эфемеридами спутников приходили по адресу: «Свердловск, Небо, Бархатовой». И подпись: «Космос». Свердловская станция слежения спутников оказалась одной из лучших в стране, отличалась точными наблюдениями.

В 1960 г. неимоверными усилиями, настойчивостью К. А. Бархатовой при УрГУ была восстановлена кафедра астрономии и геодезии, которой она заведовала с 1960 по 1986 г. На кафедре началась

подготовка студентов по специальности «астрономия и астрономо-геодезия». В 1968 г. К. А. Бархатовой присвоено звание профессора.

После восстановления кафедры К. А. Бархатова организовала строительство первой на Урале загородной, научной, самой восточной в Европе астрономической обсерватории. В этом трудном деле ее поддержали сотрудники и коллеги из Астросовета, ГАИШ и других обсерваторий страны. С момента открытия обсерватории (12 января 1965 г.) Бархатова была ее научным руководителем. В настоящее время обсерватория носит имя К. А. Бархатовой.



За становление астрономической науки на Урале, подготовку молодых кадров по астрономии и астрономогеодезии, за признание научных заслуг в области звездной астрономии К. А. Бархатова была награждена орденом «Знак Почета», юбилейной медалью «За доб-

лестный труд», медалью «За трудовое отличие», почетной медалью Советского фонда мира, знаком «Отличник высшей школы», медалями ВДНХ СССР, многочисленными грамотами Минвуза СССР. Ее имя присвоено малой планете № 5781, которая была открыта 24 сентября 1990 г. Г. Р. Кастель, ученицей К. А. Бархатовой, и сотрудницей КраО Л. В. Журавлевой. Как призналась Г. Р. Кастель, она дала малой планете имя «Barkhatova» в честь любимого учителя, это имя будет жить вечно.

Клавдия Александровна Бархатова была уникальной личностью, тем добрым волшебником, которая для многих моих сокурсников, выпускников кафедры, исполнила детскую мечту — стать астрономом. С первых дней учебы Клавдия Александровна внимательно относилась к проблемам и трудностям студенческой жизни. Она всегда приходила на помощь при разрешении многочисленных трудностей при выборе места практики и будущей работы. Каждая встреча на лекциях с Клавдией Александровной вызывала неизменное восхищение ее увлеченностью астрономией, умением просто и понятно объяснить трудные вопросы.

Круг интересов, увлечений Клавдии Александровны был обширен. Она была человеком разносторонним. Клавдия Александровна была не только известным ученым в области звездной астрономии, организатором науки, талантливым педагогом, она любила музыку, живопись, поэзию. Клавдия Александровна серьезно изучала творчество М. Ю. Лермонтова, знала много его стихотворений, побывала в Тарханах. Сотрудники музея, профессионалы, признавали в ней настоящего лермонтоведа.

Умерла Клавдия Александровна Бархатова 19 января 1990 г., похоронена на Ширококореченском кладбище Екатеринбурга.

В Екатеринбурге в настоящее время проживают ее сын Сергей Иосифович Тарлинский, невестка Лариса и внучки Ирина и Анна.

Клавдию Александровну Бархатову помнят коллеги, ее ученики, кто сейчас продолжает изучение рассеянных звездных скоплений и строение нашей Галактики. Выпускники кафедры продолжают традиции уральской астрономической школы в обсерваториях России и за рубежом.

Т. И. Левитская

ПРОЩАЙ, КЛИМ!



К. И. Чурюмов с макетом кометы Чурюмова—Герасименко

15 октября 2016 г. на 80-м году жизни скоропостижно скончался Клим Иванович Чурюмов, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, профессор кафедры астрономии Киевского национального университета им. Т. Г. Шевченко, директор Киевского планетария. 12 октября Клим Иванович отправился в Харьков на встречу с молодыми физиками и астрономами. В поезде ему стало плохо. В Харькове его встречала скорая помощь. Клим Иванович был госпитализирован, но спасти его врачам не удалось, он скончался от инфаркта.

Печальное сообщение о смерти знаменитого советского и украинского астронома Клим Ивановича Чурюмова повергло всех, кто его знал на Урале, в астрономической обсерватории и на кафедре астрономии и геодезии, в шок. Мы сострадаем близким и сожалеем о его преждевременной кончине.

Клим Иванович Чурюмов родился 19 февраля 1937 г. в Николаеве, в многодетной семье. Он был четвертым ребенком из восьмерых детей Ивана Ивановича и Антонины Михайловны Чурюмовых.

В 1942 г. отец погиб на фронте, в окружении, под Харьковом. Все заботы о детях легли на плечи любимой и дорогой мамы, ее не стало в 2003 г. Это она дала редкое имя своему сыну под впечатлением имени героя романа А. М. Горького «Жизнь Клим Самгина».

Известность и знаменитость пришли к Климу Ивановичу после открытия им двух комет: в 1969 г. кометы Чурюмова—Герасименко и в 1986 г. кометы Чурюмова—Солодовникова (в соавторстве с другими открывателями — Герасименко и Солодовниковым).

С 2004 г. имя Чурюмова стало известно во всем мире. К комете Чурюмова—Герасименко был направлен европейский космический аппарат «Розетта». Полет этого аппарата планировали к другой комете, но из-за технического сбоя времени запуска выбор остановили именно на комете Чурюмова—Герасименко. Клим Иванович с нетерпением ждал начала миссии «Розетты», посадки спускаемого аппарата на ее поверхность, снимков ядра кометы и первых научных результатов. И он стал свидетелем этого уникального проекта!

30 сентября 2016 г. завершилась миссия «Розетты»: космический аппарат разбился о поверхность кометы. Через две недели не стало и К. И. Чурюмова, одного из известных в мире исследователей физики комет, их происхождения и космогонии Солнечной системы.

Клим Иванович был частым гостем уральских студенческих зимних школ. Ему нравились суровая уральская природа, Чусовая, ее каменистые берега, сосны и ели, атмосфера доброжелательности, интересные научные диспуты и выступления известных астрономов. Студенты до отказа заполняли аудиторию, когда он увлеченно, доступно рассказывал об исследованиях комет, открытиях в кометной астрономии, об опасностях их появления в окрестностях Земли. Клим терпеливо отвечал на все вопросы ребят и был счастлив, что его работа, результаты вызывают большой интерес у молодежи.

Клим Иванович был нашим другом и коллегой. Личность, увлеченная наукой, кометами и просвещением молодежи, он был человеком настойчивым, упорным, активным, целеустремленным, открытым и добрым. В нашей памяти Клим Иванович Чурюмов останется жизнерадостным человеком, ученым и популяризатором астрономических знаний.

Т. И. Левитская

**ПАМЯТИ
ВИКТОРА ВЛАДИМИРОВИЧА ОРЛОВА**



Виктор Владимирович родился 3 октября 1956 г. в городе Беломорск, административном центре одноименного района Карельской АССР. В 1974 г. поступил на математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. Еще студентом он увлекся численным моделированием в рамках задачи трех тел, работая преимущественно под руководством кандидата физико-математических наук Ж. П. Аносовой. После окончания университета по специальности «астрономия» в 1979 г. В. В. Орлов работал под началом профессора Т. А. Агеяна на астрономическом отделении ЛГУ, а с 1986 г. — в Астрономической обсерватории ЛГУ/Научно-исследовательском астрономическом институте им В. В. Соболева (НИАИ) СПбГУ. В эти годы, продолжая исследования по задаче трех тел, В. В. Орлов под руководством Т. А. Агеяна активно занялся изучением движения в поле ротационно-симметричного потенциала. Полученные в последней области результаты легли в основу кандидатской диссертации «Свойства орбит в поле ротационно-симметричного потенциала», которую Виктор Владимирович защитил в 1990 г. Он с искренней благодарностью, теплотой и благо-

говением относился к своему научному руководителю и впоследствии всегда помогал ему в работах по этой теме вплоть до кончины Т. А. Агеяна в 2006 г.

Однако главным научным направлением для В. В. Орлова стало изучение динамики трех тел и систем большей кратности, в котором он, традиционно сотрудничая с Ж. П. Аносовой, со временем смог объединить в совместных проектах усилия многих отечественных и зарубежных исследователей в этой области (Л. Г. Киселева, А. Д. Чернин, В. Г. Шкодров, А. А. Мюллери, С. Аарсет, В. Себехей, П. П. Игглтон, М. Валтонен, А. В. Петрова, К. Таникава, М. М. Сайто, О. В. Кияева, А. В. Рубинов, А. И. Мартынова и многие другие). На основе полученных результатов В. В. Орлов подготовил докторскую диссертацию «Численно-экспериментальное исследование задачи трех тел в звездной динамике», которую защитил в 2005 г.

С 2006 г. до последнего дня жизни Виктор Владимирович трудился в должности профессора кафедры небесной механики СПбГУ. В 2013 г. ему было присвоено ученое звание профессора, а в 2014 г. — звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Виктор Владимирович являлся всемирно известным специалистом по кинематике, динамике и структуре звездных систем, в области галактической астрономии и по небесной механике. Ему принадлежат важные результаты в области исследования динамики тройных систем, кратных звезд, групп галактик, моделирования Галактики и наблюдательной космологии. Им был получен ряд новых результатов по моделированию динамической эволюции наблюдаемых кратных звезд, численно-экспериментальному изучению динамической эволюции тройных систем и изучению пространственного распределения внегалактических объектов.

В. В. Орлов является автором и соавтором 287 публикаций, среди которых два учебных пособия — «Динамика тройных систем» (2010, в соавторстве с А. И. Мартыновой, А. В. Рубиновым, Л. Л. Соколовым и И. И. Никифоровым) и «Задача N тел в звездной динамике» (2008, 2012, в соавторстве с А. В. Рубиновым). Последняя его книга “The Three-body Problem from Pythagoras to Hawking” (2016, в соавторстве с М. Валтоненом, Ж. П. Аносовой, К. В. Холшевниковым, А. А. Мюллери и К. Таникавой) вышла при жизни Виктора Владимировича, но свои авторские экземпляры он получить не успел. . .

С первых лет работы в университете В. В. Орлов активно занимался преподавательской деятельностью, особенно много усилий

и времени посвящая руководству научно-исследовательской работой студентов. В последние годы он читал общий курс «Теория вероятностей и математической обработки наблюдений», специальный курс «Задача N тел в звездной динамике» и вел другие занятия для студентов астрономического отделения, а также читал курс «Концепции современного естествознания» для студентов философского факультета СПбГУ.



В. В. Орлов на зимней астрономической школе в Коуровке. 2012 г.

Побывав первый раз в 2001 г. на зимней студенческой конференции в Коуровке, он почти без пропусков активно участвовал в ее проведении вплоть до 2012 г. и, конечно, снискал любовь студентов. Позже врачи запретили ему уезжать далеко от дома.

В. В. Орлова отличала неустанная трогательная забота о своих подопечных, и поэтому вокруг него их всегда было много, он создал свою школу учеников. Четыре аспиранта защитили кандидатские диссертации под его руководством (Р. Я. Жучков, А. А. Минц, А. А. Башаков, А. И. Маргынова). 14 июня 2016 г., уже после кончины В. В. Орлова, состоялась защита диссертации еще одного из его учеников (П. П. Ясько). Есть и другие его аспиранты, которые должны защититься вскоре. Кроме того, некоторые диссертанты более раннего периода времени (А. В. Петрова, Е. Э. Казакевич, А. В. Рубинов) также во многом обязаны его неформальному руководству. Виктор Владимирович оказывал помощь всем, кто к нему обращался, даже если не был их руководителем.

В течение многих лет, пока позволяло здоровье, В. В. Орлов был бессменным ученым секретарем совета по защите докторских и кандидатских диссертаций по астрономическим специальностям при СПбГУ и членом диссертационных советов в ГАО и ИПА. Виктор Владимирович был видным организатором науки: являлся членом бюро секции № 1 «Структура и динамика Галактики» Научного совета по астрономии РАН, был членом правления международной общественной организации «Астрономическое общество», многократно принимал участие в организации и проведении всероссийских и международных научных конференций. Он умел собирать вокруг себя коллег для совместной работы, поэтому трудно перечислить всех его российских и зарубежных соавторов.

Виктор Владимирович всего себя посвятил науке. Он остался холостым, у него не было личной жизни, он лишь изредка отдыхал с друзьями. Он работал и жил в своем кабинете в университете до тех пор, пока не начались серьезные проблемы со здоровьем. На праздники Виктор Владимирович ездил к родным, где был прописан, — в деревню Келози Ломоносовского района Ленинградской области. В этой маленькой однокомнатной квартире осталась его старенькая больная мать (87 лет) и брат моложе его на 8 лет. После сложных операций В. В. Орлову выделили отдельную однокомнатную квартиру в семейном общежитии университета. Он никогда ничего не просил, ни на что не претендовал и считал, что для работы у него есть все. Виктор Владимирович продолжал работу со студентами, аспирантами и коллегами у себя дома, проводил семинары в СПбГУ, пока позволяло здоровье.

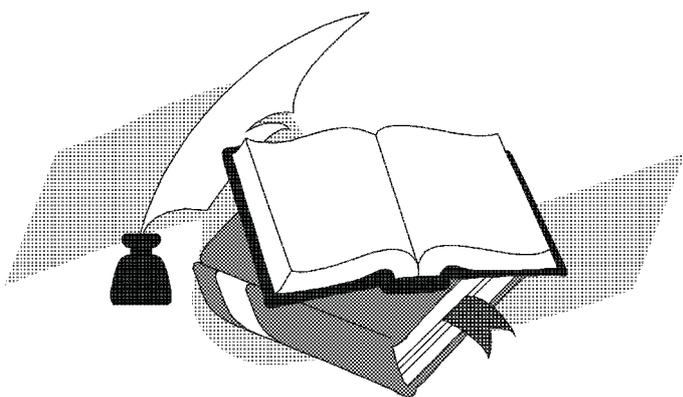
Виктор Владимирович оставил о себе светлую память, был исключительно скромным, общительным, доброжелательным, легко устанавливал контакты и легко вводил всех в круг своих знакомых. Он не торопил никого, но при этом был требовательным, последовательным и принципиальным к полученным результатам.

Последние месяцы жизни были для Виктора Владимировича очень тяжелыми, но он не был сконцентрирован на своей болезни, шутил, работал, даже когда уже не мог встать с постели, не терял чувства юмора и надежды на выздоровление, строил большие планы на будущее. Многие коллеги получили рабочие письма от него в ночь на последний день его жизни. . .

Смерть Виктора Владимировича Орлова 23 мая 2016 г. стала невосполнимой утратой для всех нас.

А. И. Мартынова, И. И. Никифоров, К. В. Холшевников

Литературные страницы



А. А. Соловьев

НЕ ПЕЧАЛЬСЯ, ДРУЖОК

Первый робкий снежок
На пожухлую зелень аллеи
И белёсый дымок
Из далёкой, за лесом, трубы...
Не печалься, дружок,
Пусть под снегом лужок,
Ещё кроны не все пожелтели,
Ещё листики не облетели
На деревьях судьбы,
На высоких деревьях судьбы...

Первый ломкий ледок
На зеркальных асфальтовых лужах,
Это — близкой зимы
Постановочный, пробный сеанс...
Не печалься, дружок,
Ты же не одинок,
Нам твой голос так важен, так нужен,
Без тебя не сойдется пасьянс,
Не составитя полного «МЫ»,
Не рассеется круг полутьмы...

Первый злой ветерок
Холодит под рубашкою сердце...
Не печалься, дружок,
Это — лёгкий оброк,
И живи с ним легко, как и прежде...
В край надежды
Ведёт эта дверца,
И на ней не защелкнут замок, —
Он ещё не иссяк, он совсем не истёк
Нам судьбою отпущенный срок...

Первый тонкий звонок
На московском прощальном вокзале
Не для нас прозвучал — для других...
Не печалься, дружок,
Ещё тесен кружок,
Музыканты своих
Скорбных скрипачек
В руки не взяли,
Не пролёг между датами штрих,
И звоночек вдали, далеко от земли,
В пифагоровых сферах затих...

5 ноября 2016, 05 часов утра

КОЛЬЦО

Еще одно расцеплено кольцо —
Десяток лет — на желтые страницы.
Осенней ночью, выйдя на крыльцо,
Вдруг замечаешь — улетают птицы...

И с ними — жизнь.

Под клики журавлей.

Живи сегодня, завтра будет поздно.
О прошлом не скули и не жалеи —
Оно у нас бескрыло и беззвёздно!

И нам его никак не изменить —
Сырой октябрь не станет светлым маем.
Сегодня жить, сегодня — и любить!
Мы слишком поздно это понимаем.

... Избави боже, — белкой в колесо
Вертеть безостановочные спицы,
Что на галерах подымать весло,
Зажатое в скрипучие ключицы...

Но... всяк в свою уключину забит,
Ведь так немного надо человеку!..

А жизнь — течет, меняется, скользит,
И ты во тьме стоишь, как Гераклит,
Нельзя войти в одну и ту же реку!

Ветшает мир, как старое пальто...

И внученьки — любимые созданыя —
Едва ступив на лесенку Познанья,
Совсем другое разложив лото,
Все чаще говорят мне: «Дед, не то!..» —
У них свои модели мирозданья!

... Пора и нам меняться в унисон
Причудливой космической погоде,
Пора, пора досматривать свой сон
О счастье, о покое, о свободе...

Пусть впереди — холодная зима,
С нечастыми погожими деньками,
С накопленными старыми долгами,
Которые не выплатишь деньгами, —
Пустым-пуста дорожная сума...

Не все дороги замкнуты в кольцо,
Еще не все обложены границы,
Но поздней ночью, выйдя на крыльцо,
Вдруг понимаешь — улетают птицы...

Список участников конференции



ФИО	Организация	E-mail
Абдуразаков Кубаныч Мадаминович	УрФУ	kuba_07@mail.ru
Аввакумова Екатерина Анатольевна	АО УрФУ	ekaterina.avvakumova@urfu.ru
Акимов Артем Вячеславович	УрФУ	tema_753@mail.ru
Алакоз Алексей Валерьевич	АКЦ ФИАН	l-sha@yandex.ru
Алексеев Илья Юрьевич	КрАО РАН	ilya-alekseev@mail.ru
Апетян Арина Артуровна	СПбГУ	aaapetyan@gmail.com
Аракчеев Артем Сергеевич	ИНАСАН	arakcheev@inasan.ru
Биктимирова Регина Альбертовна	УрФУ	bictr97@gmail.com
Бисикало Дмитрий Валерьевич	ИНАСАН	bisikalo@inasan.ru
Бисноватый-Коган Геннадий Семенович	ИКИ РАН	gkogan@iki.rssi.ru
Бисярина Анастасия Павловна	АО УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Блинкова Евгения Владимировна	ТГУ	zbizk322@mail.ru
Болдырева Екатерина Сергеевна	УрФУ	boldyreva.katerina13@yandex.ru
Боли Пол	АО УрФУ	pboley@urfu.ru
Бородина Ольга Игоревна	УрФУ	olga.o-bor@yandex.ru
Бурданов Артем Юрьевич	ULg	artem.bourdanov@gmail.com
Бухтияров Владислав Сергеевич	УрФУ	vlabukh@gmail.com
Васильев Андрей Александрович	СПбГУ	andrey.vasilyev@spbu.ru
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa1907@icloud.com
Васюнин Антон Иванович	МРЕ	anton.vasyunin@gmail.com
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Волков Константин Валерьевич	УрФУ	KVVolkov19@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	volna@sibmail.com
Гламазда Дмитрий Васильевич	УрФУ	antimuon@mail.ru
Глушихина Мария Владимировна	ИКИ РАН	m.glushikhina@iki.rssi.ru
Глушков Максим Вадимович	КФУ	sh345sqrt@gmail.com
Горбан Алёна Сергеевна	ЮФУ	physdekan@sfedu.ru
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	stanislav.gorda@urfu.ru
Гроховская Александра Александровна	ТГУ	grohovskaya.a@gmail.com
Гусев Владислав Денисович	УрФУ	Vlad06gusev@gmail.com
Дедов Евгений Олегович	УрФУ	dedov.ev98@gmail.com
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Емельяненко Вячеслав Васильевич	ИНАСАН	vvemel@inasan.ru
Ермаков Максим Юрьевич	УрФУ	myriad2006@ya.ru
Ершова Анастасия Павловна	ИПА РАН	vveyzaa@gmail.com
Ефремова Екатерина Викторовна	ИНАСАН	manulka9@gmail.com
Жуйко Сергей Валентинович	ГАИШ МГУ	proofrun@mail.ru
Жуклевич Глеб Сергеевич	УрФУ	spacemarine09@gmail.com
Загидуллин Артур Александрович	КФУ	arhtur.zagidullin@ya.ru
Закиров Максим Маратович	УрФУ	tnetro@mail.ru
Замоздра Сергей Николаевич	ЧелГУ	sezam@csu.ru
Захарова Полина Евгеньевна	УрФУ	polina.zakharova@urfu.ru
Землянуха Петр Михайлович	ИПФ РАН	petez@ipfran.ru

ФИО	Организация	E-mail
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Золотарёв Роман Викторович	ЮФУ	rv_zolotarev@mail.ru
Ильина Евгения Андреевна	ИНАСАН	narqelion@inbox.ru
Ионов Дмитрий Эрикович	ИНАСАН	ionovd@inasan.ru
Казанцев Максим Борисович	ЧелГУ	kazant@csu.ru
Калачёв Дмитрий Васильевич	УрФУ	kde_box@mail.ru
Калинин Александр Александрович	АО УрФУ	kaaurgu@rambler.ru
Калинина Наталия Дмитриевна	АО УрФУ	natalia.kalinina@urfu.ru
Квашнина Альвира Васильевна	УрФУ	alvira.kvashnina@urfu.ru
Киричек София Евгеньевна	ГУЗ	elenakirichek@gmail.com
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Кишкин Арсений Владимирович	УрФУ	arsenykishkin@gmail.com
Ковалева Дана Александровна	ИНАСАН	dana@inasan.ru
Кожевников Валерий Петрович	УрФУ	valery.kozhevnikov@urfu.ru
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	kozhevnikova-a@yandex.ru
Козлова Дарья Вадимовна	УрФУ	KozlovaDaria@list.ru
Козлова Олеся Владимировна	КрАО РАН	oles_kozlova@mail.ru
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Коротышева Вероника Валерьевна	УрФУ	nao.ku@mail.ru
Крушинский Вадим Владимирович	АО УрФУ	krussh@gmail.com
Крюкова Екатерина Андреевна	СибГАУ	kate-13-kr@yandex.ru
Кудряшова Анастасия Алексеевна	КФУ	akudryasova@yandex.ru

ФИО	Организация	E-mail
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	УрФУ	eduard.kuznetsov@urfu.ru
Кузнецова Ксения Андреевна	УрФУ	hoying_grassi@mail.ru
Кулаков Михаил Викторович	УрФУ	mikhail.kulakov.1999@mail.ru
Кулеш Максим Вячеславович	УрФУ	panoos@yandex.ru
Куликов Сергей Викторович	ИКИ РАН	kulikov@rx24.ru
Кутеева Галина Анатольевна	СПбГУ	g.kuteeva@spbu.ru
Кутков Олег Евгеньевич	ФГБУН КрАО РАН	kutkov.o@yandex.ru
Лебедев Никита Дмитриевич	ИПФ РАН	nekitlebedev@mail.ru
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	t.i.levitskaya@urfu.ru
Левкина Полина Анатольевна	ИНАСАН	ayvazovskaya@inasan.ru
Локтин Александр Васильевич	АО УрФУ	alexander.loktin@urfu.ru
Мазаева Елена Дмитриевна	ИКИ РАН	30.v@mail.ru
Максимова Ломара Аслановна	СПбГУ	murasuper@mail.ru
Малютин Иван Александрович	УрФУ	Smoke074@yandex.ru
Матвеева Екатерина Алексеевна	УрФУ	avelon@e1.ru
Медведева Мария Игоревна	ОГУ	nobodyhero125@mail.ru
Моисеенко Сергей Григорьевич	ИКИ РАН	moiseenko@iki.rssi.ru
Молярова Тамара Сергеевна	МФТИ (ГУ)	stripe.tea@gmail.com
Морозова Татьяна Игоревна	ИКИ РАН	timoroz@yandex.ru
Мурга Мария Сергеевна	ИНАСАН	mshramcova@gmail.com
Назаров Сергей Валентинович	КрАО РАН	astrotourist@gmail.com
Никифорова Виктория Вячеславовна	АО УрФУ	vikkitenni@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Олейник Ольга Сергеевна	ГАИШ МГУ	os.oleynik@physics.msu.ru
Орлов Сергей Алексеевич	СПбГУ	s_orl@mail.ru
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrey.Ostrovsky@urfu.ru
Павлова Елена Вадимовна	ЧелГУ	kampbrig@mail.ru
Павлюченков Ярослав Николаевич	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Панафидина Софья Александровна	ИКИ РАН	sofya.panafidina@phystech.edu
Панькив Алексей Петрович	АО УрФУ	ops-op@yandex.ru
Парфёнов Сергей Юрьевич	УрФУ	sergey.parfenov@uf.ru
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	perminov12@yandex.ru
Петров Никита Александрович	СПбГУ	petrov@astro.spbu.ru
Писклова Марина Алексеевна	ЧелГУ	pisklova10@gmail.com
Подюкова Анастасия Андреевна	УрФУ	nastya.podyukova@mail.ru
Положенцев Владимир Николаевич	УрФУ	reddy101@yandex.ru
Полушина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	tatyana.polushina@urfu.ru
Попов Александр Андреевич	УрФУ	apopov66@gmail.com
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.popova@urfu.ru
Попова Елена Андреевна	УрФУ	elenapopovalastikfantik@yandex.ru
Потоскуев Александр Эдуардович	АО УрФУ	alexfimjkee@gmail.com
Пугаева Ирина Витальевна	МФТИ (ГУ)	pugaevaarina@gmail.com
Пуанова Анна Фёдоровна	МРЕ	punanova@mpe.mpg.de
Романовская Анна Михайловна	ГАИШ МГУ	am.romanovskaja@physics.msu.ru
Русских Вячеслав Николаевич	ЧелГУ	rusvyacheslav@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Рыспаева Елизавета Борисовна	СПбГУ	e.ryspaeva@yandex.ru
Рябухина Ольга Леонидовна	ИПФ РАН	ryabukhina.ol@gmail.com
Рябчикова Татьяна Александровна	ИНАСАН	ryabchik@inasan.ru
Савельев Роман Викторович	ТГУ	legiontecos@gmail.com
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	Svetlana.Salii@urfu.ru
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli@vtomske.ru
Сафронова Виктория Сергеевна	УрФУ	vika483@bk.ru
Селезнев Антон Федорович	УрФУ	anton.seleznev@urfu.ru
Сивкова Евгения Эдуардовна	ИНАСАН	sivkovae@gmail.com
Сильченко Ольга Касьяновна	ГАИШ МГУ	olga@sai.msu.su
Скрипниченко Марианна Сергеевна	ЮФУ	mariankazayka@mail.ru
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	УрФУ	Andrej.Sobolev@urfu.ru
Соколов Леонид Леонидович	СПбГУ	lsok@astro.spbu.ru
Соколова Валерия Алексеевна	УрФУ	sokolova.valeriie@gmail.com
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@gao.spb.ru
Старовойт Елена Дмитриевна	ПРАО ФИАН	starovoyt.prao@gmail.com
Сюсина Ольга Михайловна	ТГУ	kleo77@sibmail.com
Тимиркеева Мария Андреевна	ПРАО ФИАН	marika-ko@yandex.ru
Толмачев Александр Михайлович	ПРАО АКЦ ФИАН	tolm@prao.ru
Томилова Валерия Сергеевна	УрФУ	valeriatomilova@yandex.ru
Топчиева Анастасия Павловна	ИНАСАН	stasyat@inasan.ru

ФИО	Организация	E-mail
Тырышкин Дмитрий Сергеевич	ТГУ	astro.tsu@mail.ru
Тюльбашев Сергей Анатольевич	ПРАО ФИАН	serg@prao.ru
Укубаева Канькей Бактыгэсовна	ТюмГУ	rector@utmn.ru
Усанин Владимир Сергеевич	КФУ	Vladimir.Usanin@kpfu.ru
Фёдорова Виктория Александровна	ПРАО ФИАН	fedorova-astrofis@mail.ru
Фесик Людмила Евгеньевна	СПбГУ	lucia555@yandex.ru
Филина Юлия Игоревна	УрФУ	drugoi.mir2011@yandex.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	УрФУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Холтыгин Александр Федорович	СПбГУ	afkholtygin@gmail.com
Холшевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хохрякова Алена Дмитриевна	МГУ	alenaohryakova@yandex.ru
Царегородцева Полина Михайловна	УрФУ	polly_2010@mail.ru
Цивилев Александр Прокопьевич	ПРАО АКЦ ФИАН	tsivilev@prao.ru
Черенков Александр Александрович	ИНАСАН	CherenkovAlexander@gmail.com
Чернышова Анна Игоревна	ПРАО ФИАН	anna2121695@gmail.com
Чувашов Иван Николаевич	ТГУ	chuvashovin@gmail.com
Чудакова Екатерина Михайловна	ГАИШ МГУ	artenik@gmail.com
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шарапов Константин Владиславович	УрФУ	shkval1993@ya.ru
Шевелев Антон Павлович	УрФУ	anton.3505@gmail.com
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	shematov@inasan.ru
Шмелева Ирина Михайловна	УрФУ	alinka_irinka@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@inasan.ru
Щепалова Анастасия Сергеевна	СПбГУ	shepalovanastya@mail.ru
Яговитина Ксения Александровна	УрФУ	yashaksenia@gmail.com

Содержание

Обзорные лекции	7
Алексеев И. Ю., Кожевникова А. В. Пятна и активные области в атмосферах холодных звезд	9
Васюнин А. И. Химия фосфора в космосе	24
Вибе Д. З., Воробьев Э. И., Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н. Эпизодическая аккреция и молекулярный состав протопланетных дисков	25
Галушина Т. Ю. Динамика астероидов — компаньонов планет земной группы	39
Дремова Г. Н. От «неподвижности» до сверхскоростей	50
Емельяненко В. В. Проблемы динамики и происхождения малых тел Солнечной системы	66
Зинченко И. И. Диски и биполярные истечения в областях образования массивных звезд	67
Кирсанова М. С. Структура областей звездообразования	76
Ковалева Д. А. Кратные звезды	83
Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция планетных систем	91
Моисеенко С. Г. Численные методы для моделирования астрофизических течений	92
Селезнев А. Ф. Звезды — голубые бродяги	93
Сильченко О. К. Эмпирические сценарии эволюции галактик	100
Соболев А. М. Современные парадигмы образования звезд в Галактике	111
Соколов Л. Л., Петров Н. А., Васильев А. А., Кутеева Г. А. Об опасных траекториях астероидов	125
Соловьев А. А. Опыт моделирования корональных петель	138
Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е. Физика аккреционных дисков	140
Хачай Ю. В., Анфилогов В. Н., Антипин А. Н. Раннее состояние Земли	141
Холшевников К. В., Орлов С. А. О форме облака частиц, выброшенных с поверхности небесного тела	148
Шустов Б. М. Российский научный космос в ФКП-25	169
Тезисы студенческих докладов	171
Апетян А. А. Поиск двойных среди близких карликов на основе анализа их изображений в различных обзорах неба	173
Бисноватый-Коган Г. С., Панафидина С. А. Исследование автомодельного решения о распространении сильной ударной волны в расширяющейся Вселенной	174

Блинкова Е. В. Разработка бортового алгоритма автономного прогнозирования движения низколетящего ИСЗ по измерениям системы ГЛОНАСС	175
Бородина О. И., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 4052, NGC 5715 и NGC 6834	176
Гроховская А. А. Математическое моделирование профилей излучения пульсаров	177
Ершова А. П. Орбиты комет, царапающих Солнце	178
Ильина Е. А., Черенков А. А., Бисикало Д. В. Численное моделирование атмосферы «горячего Юпитера» при прохождении сквозь КВМ с малым углом раствора	179
Крюкова Е. А. Новые переменные звезды в созвездии Ящерица	180
Кудряшова А. А. Каталог радиоисточников в обзоре неба на РАТАН-600	181
Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 1912, NGC 7142 и IC 2714	182
Лебедев Н. Д., Землянуха П. М. Исследование области активного образования массивных звезд SH2-187	183
Максимова Л. А. Шкала расстояний до планетарных туманностей и пространственная структура подсистем Галактики	184
Молярова Т. С. Молекула CO как индикатор массы протопланетных дисков	185
Никифорова В. В., Селезнев А. Ф. Исследование рассеянных звездных скоплений NGC 2099, NGC 6268 и Czernik 38	186
Олейник О. С. Миграция планет в аккреционном диске двойной системы	187
Панькив А. П., Кругликов Н. А. Разработка облачного сервиса болидной сети	188
Писклова М. А. Влияние остаточного магнитного поля на седиментацию заряженных пылевых частиц в аккреционных дисках молодых звезд	189
Попова Е. А., Соболев А. М., Цивилев А. П., Толмачев А. М., Алакоз А. В. Наблюдения мазерных источников в линии водяного пара	190
Потоскуев А. Э., Боли П. Фотометрия скопления галактик Abell 262	191
Русских В. Н. Влияние магнитного поля на гравитационную устойчивость аккреционных дисков	192
Рябухина О. Л., Землянуха П. М. Исследование фрагментации и кинематики филамента G192.76+00.10	193
Рябчикова Т. А., Романовская А. М. Стратификация химических элементов в атмосфере магнитной пекулярной (Ap) звезды HD 188041	194

Савельев Р. В. Исследование динамики некоторых АСЗ с использованием наблюдений, полученных на телескопе СБГ АО УрФУ	195
Соколова В. А., Островский А. Б., Васюнин А. И. Исследование влияния энергии десорбции атомарного кислорода на химическую эволюцию в областях звездообразования . .	196
Тырышкин Д. С. Приложение Space & Plays для визуализации орбитального движения	197
Фесик Л. Е. Определение состояний поляризации гравитационных волн для выделенного источника сигнала, детектируемого антеннами системы LIGO-Virgo	198
Фёдорова В. А. Оценка устойчивости работы нового радиотелескопа БСА ФИАН	199
Филина Ю. И., Царегородцева П. М., Селезнев А. Ф. Атлас рассеянных звездных скоплений	200
Щепалова А. С. Расстояние между орбитами астероидов . . .	201
Тезисы кратких сообщений	203
Алексеев И. Ю., Козлова О. В., Горда С. Ю., Аввакумова Е. А., Кожевникова А. В. Многолетняя спектральная переменность запятого гиганта IN COMAE	205
Аракчеев А. С. Ослабление потери массы горячими юпитерами под действием магнитного поля	206
Бисноватый-Коган Г. С., Глушихина М. В. Расчет коэффициентов теплопроводности электронов в замагниченном плотном веществе	207
Загидуллин А. А., Петрова Н. К., Нефедьев Ю. А. Численная модель физической либрации Луны — главная проблема	208
Замоздра С. Н., Павлова Е. В. Статистический анализ и численное моделирование двойных астероидов	209
Землянуха П. М., Зинченко И. И. Протозвездный диск в кластере S255N	210
Ионов Д. Э., Шематович В. И., Павлюченков Я. Н. Время жизни атмосферы экзопланеты, находящейся в «пустыне горячих нептун»	211
Крушинский В. В., Аввакумова Е. А. PySex — автоматизированная обработка эшелле-спектров, полученных на оптоволоконном спектрографе	212
Кутков О. Е., Назаров С. В. Камера обзора неба Крымской астрофизической обсерватории	213
Левкина П. А. Особенности движения фрагментов космического мусора вблизи устойчивой точки 75° в. д.	214

Мазаева Е. Д., Позаненко А. С., Румянцев В. В. Кривая блеска GRB 030329 в оптическом диапазоне: новые данные для яркого гамма-всплеска	215
Назаров С. В. Эхокартирование пяти активных ядер галактик	216
Перминов А. С., Кузнецов Э. Д. Исследование орбитальной эволюции планет-гигантов Солнечной системы на интервале времени 10 млрд лет	217
Рыспаева Е. Б., Холтыгин А. Ф. Связь между напряженностью магнитных полей и жесткостью рентгеновских спектров массивных O-звезд	218
Самбаров Г. Е., Сюсина О. М. Исследование влияния слабых возмущений на точность вероятностной модели движения астероидов, сближающихся с Землей	219
Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С. Эволюция пылевых частиц в зонах ионизованного водорода и ударных волнах в остатках сверхновых	220
Смирнова К. И., Парфёнов С. Ю., Вибе Д. З. Выделение областей звездообразования автоматическими методами в карликовых галактиках и галактиках с полярными кольцами	221
Тимиркеева М. А. К вопросу о поиске радио- и гамма-излучения от пульсаров	222
Топчиева А. П. Фотометрический анализ галактических областей ионизованного водорода	223
Тюльбашев С. А., Чернышова А. И. Поиск пульсаров в мониторинговых наблюдениях на частоте 111 МГц	224
Черенков А. А., Бисикало Д. В. Влияние давления излучения на газодинамику атмосфер экзопланет типа «горячий Юпитер»	225
Чувашов И. Н. Численное моделирование орбит объектов космического мусора	226
Чудакова Е. М. Толщины дисков линзовидных галактик скоплений южного неба	227
Стендовые доклады	229
Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю. Переменность эмиссионных линий Si II 6347 и 6371 Å в спектре звезды Ве Хербига HD 200775	231
Волков К. В., Попов А. А. Новые переменные звезды в созвездии Кассиопея	232
Горбан А. С. Динамическая эволюция двойных систем в звездных скоплениях	233
Калинин А. А. О свечении линии 422.7 нм нейтрального кальция в солнечных протуберанцах	234

Калинина Н. Д. О диагностике физических параметров в молекулярном ядре NGC 6334I	235
Квашнина А. В., Васюнин А. И. Расширение базы данных химических реакций кода MONACO для моделирования пребиотических молекул	236
Киричек С. Е., Соловьев А. А. Солнечный факел как колебательная система с переменной во времени жесткостью	237
Кожевников В. П. Фотометрия промежуточного поляра V2069 Cyg	238
Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В. Динамическая эволюция искусственных спутников Земли на высоких экваториальных орбитах с малыми эксцентриситетами	239
Кудряшова А. А. Поиск далеких объектов среди источников нового RZF каталога	240
Кудряшова А. А. Поиск звезд с радиоизлучением в континууме на RATAN-600	241
Локтин А. В., Попова М. Э. Влияние спиральной структуры на поле скоростей объектов диска Галактики	242
Назаров С. В., Кутков О. Е. Поиск переменных звезд в полях активных ядер галактик	243
Полушина Т. С., Горда С. Ю. ПЗС-мониторинг массивной тесной двойной звезды UU Cas	244
Салий С. В., Зинченко И. И., Соболев А. М. Оценки физических параметров выделенных областей молекулярного ядра S255 N по радиолиниям метанола	245
Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д. Применение метрики пространства орбит для исследования структуры пояса астероидов	246
Старовойт Е. Д. Эволюция планетной орбиты после взрыва сверхновой	247
Из истории науки	249
Левитская Т. И. К 100-летию со дня рождения Клавдии Александровны Бархатовой, «звездного профессора»	253
Левитская Т. И. Прощай, Клим!	262
Мартынова А. И., Никифоров И. И., Холшевников К. В. Памяти Виктора Владимировича Орлова	264
Литературные страницы	269
Соловьев А. А.	271
Список участников конференции	275

Научное издание

Физика Космоса

Труды 46-й Международной
студенческой научной конференции
(Екатеринбург,
30 января—3 февраля 2017 г.)

Редактор Т. А. Федорова

Оригинал-макет — Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 14.01.2017. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 17,9. Усл. печ. л. 16,8.
Тираж 160 экз. Заказ .

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел. (343) 350-56-64

ISBN 978-5-7996-1983-1

