Министерство образования и науки Российской Федерации

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

ФИЗИКА КОСМОСА

Труды 47-й Международной студенческой научной конференции

(Екатеринбург,

29 января — 2 февраля 2018 г.)

Екатеринбург Издательство Уральского университета 2018

Редколлегия:

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

Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. Ф503 конф. (Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2018 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 366 с.

ISBN 978-5-7996-2283-1

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 978-5-7996-2283-1

© Уральский федеральный университет, 2018

ФИЗИКА КОСМОСА 47-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

29 января — 2 февраля 2018 г.

Екатеринбург, Россия

Организационный комитет

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

Программный комитет

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

Жюри конкурса студенческих научных работ

К. В. Холшевников (председатель, Санкт-Петербургский государственный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), А. А. Соловьев (Главная Пулковская астрономическая обсерватория РАН), О. С. Угольников (Институт космических исследований РАН)

Финансовая поддержка

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района г. Екатеринбурга

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

Обзорные лекции



Septem artes liberales. Гравюра. XV в.

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ У ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

И. Ю. Алексеев¹, А. В. Кожевникова², О. В. Козлова¹ ¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, ²Уральский федеральный университет

Рассмотрены методы и результаты исследования холодных пятен, хромосферных неоднородностей, вспышечной активности и их долговременных изменений у звезд поздних спектральных классов.

ACTIVITY CYCLES OF LATE-TYPE STARS

I. Ju. Alekseev, A. V. Kozhevnikova, O. V. Kozlova ¹Crimean Astrophysical Observatory, ²Ural Federal University

We considered methods and results of the observations of long-term variations of stellar spots, chromospheric inhomogeneities, and flare activity on late-type stars.

Введение

Цикличность солнечной активности была открыта в середине XIX в. любителем астрономии Генрихом Швабе, и сейчас 11-летний солнечный цикл, регулирующий все стороны проявления активности Солнца от чисел Вольфа и солнечной запятненности, числа и размеров активных областей в хромосфере, частоты и интенсивности вспышек до структуры солнечной короны, характеристик солнечного ветра, солнечно-земных связей, является одним из наиболее известных явлений в жизни Солнца. Помимо этого цикла (или 22-летнего магнитного) известны также вековой (80-90 лет) цикл Глайссберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в дватри столетия. Такие длительные вариации солнечной активности исследуются уже с помощью толщин годовых колец деревьев, содержания в них изотопа ${}^{14}C$, слоистой структуры гренландских и антарктических льдов; они позволяют говорить об изменениях солнечной активности на протяжении нескольких тысячелетий. Исследование циклической активности других звезд позволяет говорить об изучении механизма генерации звездных магнитных полей и делать выбор между различными моделями звездного динамо.

[©] Алексеев И. Ю., Кожевникова А. В., Козлова О. В., 2018

⁷

Пятенная активность звезд

Электрофотометрия

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. На протяжении длительных (до 50 лет) промежутков времени общая переменность запятненных звезд составляет обычно $0.1-0.3^m$, также доходя у некоторых объектов до $0.43-0.56^m$ (у оранжевых карликов V775 Her, V833 Tau, BY Dra, красного карлика EV Lac или классических RS CVn систем IM Peg и HU Vir). Для Солнца, как запятненной звезды, такие эффекты составляют около 0.001^m .

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.).

Характерные времена таких циклов составляют $P_{cyc} = 3-30$ лет.

Фотопластинки

Долговременная переменность фотосферной активности холодных звезд была обнаружена для некоторых объектов при исследовании архивов фотопластинок. Так, Филлипс и Хартманн в 1978 г. обнаружили по пластинкам Гарвардской коллекции длительные (порядка 50—60 лет) изменения среднего блеска *BY Dra* и *CC Eri* с амплитудой до 0.5^m , по-видимому, аналогичные вековому циклу Глайссберга [1]. Сходные результаты получила на материалах пластинок ГАИШ, обсерваторий Зоннеберга и Одессы Бондарь, отметившая длительную и сильную цикличность у *V*833 *Tau*, *BY Dra* и особенно *PZ Mon*, у которой амплитуда переменности достигает 1.20^m . Добавление к фотографическим результатам данных многолетней электрофотометрии позволяет говорить о долговременных изменениях активности у *V*775 *Her* ($0.^m56$, $P_{cyc} = 80$ лет), *V*833 *Tau* (0.46^m , $P_{cyc} = 68$ лет) и *BY Dra* (0.48^m , $P_{cyc} = 55$ лет).

Площади и широты пятен

В ряде статей Алексеев и Кожевникова (2015—2017) [2, 3] рассматривали моделирование запятненности активных звезд различных типов — молодых звезд, прошедших стадию T Tauri (PTTS), оранжевых (спектральных классов GK) и красных (спектральных классов M) карликов, короткопериодических и классических систем типа $RS \ CVn$, одиночных быстровращающихся желтых гигантов асимптотической ветви типа $FK \ Com$.

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 50 активных звезд различных типов мы обнаружили у 28 объектов циклические изменения площади и средней широты фотосферных пятен. Длительности этих колебаний (5—40) хорошо согласуются с известными длительностями фотометрических циклов рассмотренных звезд.

Независимо от эволюционного статуса все программные звезды демонстрируют широтный дрейф пятен по мере их развития, т. е. роста полной площади. У большинства звезд (все они имеют спектральные 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 по модулю 0.2—2.9 градуса в год, в то время как солнечное значение скорости широтного дрейфа составляет 3—4 градуса в год. У наиболее холодных звезд выборки спектральных классов M мы видим, наоборот, дрейф пятен к полюсу со скоростями 0.2—1.4 градуса в год.

Хромосферная активность

Линии CaII

Широко известны циклы хромосферной активности карликов солнечного типа, определяемые по потокам в эмиссионных линиях CaII (*HK* проект Вильсона (1978) [4] и многочисленные работы, продолжающие программу). Было показано, что сотню звезд выборки можно разделить на следующие группы: 47 % — старые (с логарифмом возраста 9.46) звезды с относительно небольшой эмиссией и ее циклическими изменениями с периодами от 2.5 до 25 лет,

подобными солнечным, хотя наиболее уверенные циклы превышают по длительности 7 лет; 26 % — молодые (логарифм возраста 9.03) звезды с сильной и хаотически меняющейся кальциевой эмиссией и 26 % — еще более старые (логарифм возраста 9.86) звезды с постоянной эмиссией или с долговременными трендами или очень длительными циклами.

Линия \mathbf{H}_{α}

Наши последние результаты [5, 6] показывают, что циклическая активность видна также и в наблюдениях линии H_{α} , причем такие эффекты были обнаружены нами как для молодой *post T Tauri* звезды *VY Ari*, так и для быстровращающегося желтого ABГ гиганта *IN Com*. Отметим, что, в отличие от линий кальция, «водородные» циклы активности звезд совпадают по длительности с пятенными.

Вспышки

Для холодных M вспыхивающих карликов типа UV Cet EV Lac, AD Leo, YZ CMi обнаружены циклы вспышечной активности продолжительностью 7—8 лет, проявляющиеся в темпах энерговыделения вспышек и изменениях их энергетического спектра (зависимости частоты вспышек от энергии). Эти эффекты не коррелированы с запятненностью звезд.

Вращение звезды

Flip-flop эффект

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 [7]. Активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт [8] и поляризационных наблюдений [9]. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной хромосферной активности [10–14] и наиболее мощные вспышки [15].

В 1991 г. Йэтсу и др. [16] 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 [17].

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 [18].

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. Альтернативным вариантом является изучение долговременных изменений положений минимумов блеска звезды (главной и вторичной активных долгот) и их сопоставление с параметрами пятен. Таким образом, для этих звезд были получены оценки дифференциального вращения. Первые такие оценки были получены с помощью двухпятенной модели и показали для восьми десятков двойных звезд вращение солнечного типа (экватор вращается быстрее полюсов).

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 HK в течение цикла. Вместе с тем эти результаты тоже не являются окончатель-

ными, так как разные авторы отмечают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

На основе разработанной нами зональной модели мы получили оценки дифференциального вращения у нескольких десятков звезд разных типов [2, 3]. 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; 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.

Изменения положения активных долгот и фотометрических периодов звезды также могут показывать цикличность, синхронизированную с циклом пятенной активности звезды.

Заключение

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 ($\kappa Cet =$ = HD 20630), так и не показывать никакой корреляции (например, *BE Cet* 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 ABГ гиганта *IN Com* или молодой звезды *VY Ari* мы видим обратную картину.

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 HK 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 HK, вспышечная активность, дифференциальное вращение и даже 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 государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006). Работа И. Ю. Алексеева выполнена в рамках плановой темы ФГБУН КрАО РАН «Магнитные поля и эволюция магнитной активности звезд». Работа О. В. Козловой и И. Ю. Алексеева частично выполнена в рамках проекта «Активность звезд поздних спектральных классов на разных стадиях эволюции» (грант РФФИ 16-02-00689).

Библиографические ссылки

- Phillips M. J., Hartmann L. Long-term variability of dMe stars // Astrophys. J. 1978. Vol. 224. P. 182-184.
- Kozhevnikova A. V., Alekseev I. Y. Long-term spottedness variations of 16 RS CVn stars // Astronomy Reports. - 2015. - Vol. 59. - P. 937-951.
- Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V. Long-term variations in the spottedness of BY Dra M dwarfs // Astronomy Reports. — 2017. — Vol. 61. — P. 221—232.
- Wilson O. C. Chromospheric variations in main-sequence stars // Astrophys. J. 1978. Vol. 226. P. 379-396.
- 5. Alekseev I. Y., Kozlova O. V., Gorda S. Y. et al. Long-Term Spectral Variability of the Spotted Star IN Com // Stars: From Collapse to Collapse / ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2017. Vol. 510. P. 149.
- Kozlova O. V., Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V. Long-Term Spectral Variability of the Spotted Star in Com // Astrophysics. — 2017. — Vol. 60. — P. 41–56.

- Zeilik M., Blasi C. de, Rhodes M., Budding E. A Half Century of Starspot Activity on SV Cam // Bull. Am. Astron. Soc. – 1987. – Vol. 19. – P. 1086.
- Berdyugina S. V., Tuominen I. Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // Astron. Astrophys. 1998. Vol. 336. P. L25—L28.
- Huovelin J., Saar S. H., Tuominen I. Relations between broad-band linear polarization and CA II H and K emission in late-type dwarf stars // Astrophys. J. - 1988. - Vol. 329. - P. 882-893.
- Alekseev I. Y., Kozlova O. V. Spots and active regions on the emission-line, red dwarf star V775 Her. // Astrophysics. — 2000. — Vol. 43. — P. 245— 255.
- Alekseev I. Y., Kozlova O. V. Spots and Active Regions on the Emission-Line Star VY Ari // Astrophysics. - 2001. - Vol. 44. - P. 429-439.
- 12. Alekseev I. Y., Kozlova O. V. Starspots and active regions on the emission red dwarf star LQ Hydrae // Astron. Astrophys. 2002. Vol. 396. P. 203—211.
- Alekseev I. Y., Kozlova O. V. Starspots and active regions on the chromospherically active binary MS Ser // Astron. Astrophys. – 2003. – Vol. 403. – P. 205–215.
- Kozlova O. V., Alekseev I. Y. The stellar wind as a key to the understanding of the spectral activity of IN Com // Bull. Crimean Astrophys. Observatory. - 2014. - Vol. 110. - P. 37-44.
- Alekseev I. Y., Gershberg R. E. Spottedness of red dwarfs: Zonal spottedness models for 13 stars of the by dra type // Astrophysics. — 1996. — Vol. 39. — P. 33—45.
- Jetsu L., Pelt J., Tuominen I., Nations H. The spot activity of FK Comae Berenices // IAU Colloq. 130: The Sun and Cool Stars. Activity, Magnetism, Dynamos / ed. by I. Tuominen, D. Moss, G. Rüdiger : Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag. — 1991. — Vol. 380. — P. 381.
- 17. Berdyugina S. V., Usoskin I. G. Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // Astron. Astrophys. — 2003. — Vol. 405. — P. 1121—1128.
- Järvinen S. P., Berdyugina S. V., Tuominen I. et al. Magnetic activity in the young solar analog AB Dor. Active longitudes and cycles from longterm photometry. // Astron. Astrophys. — 2005. — Vol. 432. — P. 657— 664.

МИКРОФИЗИКА РАЗРУШЕНИЯ ПЫЛИ: МАЛЕНЬКИЕ КАТАСТРОФЫ ВСЕЛЕНСКИХ МАСШТАБОВ

Д. З. Вибе, М. С. Мурга, Е. Э. Сивкова

Институт астрономии Российской академии наук

Несмотря на многочисленные исследования, природа космических пылинок до сих пор известна нам только в общих чертах. Интерпретация наблюдений отчасти затруднена тем, что универсальной модели космической пыли не существует. Наблюдения убедительно свидетельствуют, что свойства пыли заметно варьируются и в пределах нашей Галактики, и тем более за ее пределами. Одним из ключевых процессов, определяющих параметры ансамбля пылевых частиц, является их разрушение в результате действия нескольких факторов. В лекции будут описаны микрофизические аспекты этого процесса, преимущественно в отношении органических пылинок.

MICROPHYSICS OF DUST DESTRUCTION: SMALL CATASTROPHES ON THE UNIVERSE SCALE

D. S. Wiebe, M. S. Murga, E. E. Sivkova

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Despite numerous studies we are still only aware of general features of the space dust nature. Interpretation of observations is in part hampered by the fact that the universal dust model simply does not exist. Observations definitely prove that dust properties vary significantly both within the Galaxy and even more so beyond its limits. One of the key processes, defining parameters of the dust grain ensemble, is their destruction under the action of several factors. In the lecture microphysical aspects of this process will be described, mostly in their relation to organic particles.

Введение

Один из основных компонентов нашей Вселенной — пыль. Она играет значительную роль в тепловом балансе межзвездного вещества, используется в качестве мощного инструмента для диагностики

[©] Вибе Д. З., Мурга М. С., Сивкова Е. Э., 2018

¹⁵

физических свойств межзвездной среды и, наконец, является важным фактором, искажающим результаты многих астрономических наблюдений. Это означает, что свойства космической пыли необходимо знать даже в тех случаях, когда сама по себе пыль исследователя не интересует.

Неудивительно, что исследования космической пыли привлекают значительное внимание как наблюдателей, так и теоретиков. Несмотря на это, природа космических пылинок во многом остается загадкой [1]. Фактически уверенно мы можем говорить лишь о том, что космические пылинки представляют собой смесь углистых и силикатных частиц с некоторым вкладом ароматических соединений либо в виде самостоятельных частиц, либо в виде структурного элемента более сложных гранул.

Ситуация осложняется тем, что универсальная модель пыли, которой можно было бы пользоваться при интерпретации широкого круга наблюдений, возможно, вообще отсутствует. На это указывает, например, различие кривых межзвездного ослабления в различных направлениях от Солнца [2], в темных глобулах [3], в других галактиках [4]. Причины этих различий кажутся очевидными: странствуя по галактике, пыль эволюционирует, и потому единства ее свойств не может быть в принципе. Это означает, что для корректной интерпретации наблюдений ансамбля пылевых частиц мы должны включать в модели процессы их роста и разрушения.

В этой лекции мы поговорим о процессах разрушения пылинок. Их рост в проэволюционировавших звездах, остатках сверхновых, молекулярных облаках и протопланетных дисках — отдельная большая тема.

Под разрушением понимается отрыв некоторого количества вещества пылинки, вплоть до отдельных атомов, в результате чего масса и размер пылинки уменьшаются. Как правило, разрушение представляет собой длительный процесс, а не одномоментное исчезновение пылевой частицы. Различают несколько механизмов разрушения пыли:

- тепловое испарение разрушение пылинки в результате ее нагрева до температуры сублимации;
- *распыление* разрушение пылинки в результате ее взаимодействия с частицами газа или фотонами;
- *дробление* разрушение в результате столкновений пылинок друг с другом.

Первый механизм эффективен только в непосредственных окрестностях звезд или в протозвездах, поскольку температура сублимации вещества пылинок достаточно высока (~ 1000 K), поэтому в целом в межзвездной среде разрушение пылинок происходит в результате распыления и (или) дробления. Существует, впрочем, особый случай — разрушение ледяных мантий, намерзающих на пылинки в плотных холодных молекулярных облаках. Температура сублимации вещества мантий может быть очень низкой, вплоть до ~ 20 K для наиболее летучих молекул. Поэтому мантии могут испаряться даже при незначительном нагреве, недостаточном для испарения тугоплавких ядер (в астрохимии распыление и испарение мантий часто называют общим термином «десорбция»). Однако в дальнейшем речь будет идти главным образом об испарении самих пылинок, а не намерзшего на них льда.

Взаимодействие с частицами газа

Распыление твердого вещества пылинки при столкновении с частицей газа является каскадным процессом, в ходе которого частица передает свою кинетическую энергию атомам твердого вещества, они, в свою очередь, передают ее другим соседним атомам и т. д. Некоторые из атомов при этом приобретают достаточную энергию, чтобы оторваться от поверхности пылинки. Основной характеристикой этого процесса является коэффициент распыления Y, который представляет собой число выбитых атомов в расчете на одну бомбардирующую частицу [5, 6]. Для данного сочетания вещества пылинки и типа бомбардирующих частиц коэффициент распыления зависит от энергии частицы E и угла падения θ : $Y = Y(E, \theta)$. В зависимости от частицы и бомбардируемой поверхности величина У может варьироваться в пределах от 10^{-5} до 10^3 [7]. Очевидно, что существует некоторая пороговая энергия E_{th}, такая что частицы с энергией ниже E_{th} не способны вызвать распыление вещества мишени. При росте энергии коэффициент распыления растет, достигает максимума Y_{max} при энергии E_{max}, а потом спадает, так как частицы с большой энергией пронзают пылинку насквозь.

В таблице приводятся параметры распыления для основных материалов космических пылинок и бомбардирующих частиц по данным [8] (коэффициент распыления усреднен по углам падения). Пороговая энергия порядка 30 эВ соответствует скорости падающей частицы от 75 км/с для водорода до 20 км/с для кислорода. В случае

Параметры распыления для основных материалов космических пылинок и бомбардирующих частиц

Вещество пылинки	Частица газа	$E_{\rm th},$ эВ	$Y_{\rm max}$	$E_{\rm max},$ эВ
Графит/ углерод	H He O/C	30 30 30	$0.03 \\ 0.2 \\ 1$	$200 \\ 400 \\ 3000$
Силикат/ ${ m SiO}_2$	$\stackrel{ m H^{'}}{ m He}O/ m Ar$	25 25 25	$0.03 \\ 0.3 \\ 2$	200 500 3000
Лед Н ₂ О	$egin{array}{c} \mathrm{H} \ \mathrm{He} \ \mathrm{O/Ne} \end{array}$	3 3 3	$ \begin{array}{c} 1 \\ 5 \\ 20 \end{array} $	200 400 3000

столкновений с тепловыми частицами такие скорости означают температуру не менее нескольких сотен тысяч кельвинов; столкновения с нетепловыми частицами на таких (и бо́льших) скоростях означают наличие ударных волн. Очевидно, что распыление силикатных и углистых пылинок в результате столкновений с частицами газа должно происходить преимущественно в остатках сверхновых. Хотя коэффициент распыления существенно выше для столкновений с углеродом и кислородом, доминировать в разрушении пылинки будут все-таки водород и гелий в силу более высокого содержания.

«Классический» подход к моделированию разрушения пылинок с использованием коэффициента распыления справедлив лишь для относительно крупных частиц (с количеством атомов 1 000 и более). Для мелких пылинок ситуация осложняется тем, что бомбардирующая частица взаимодействует не только с поверхностью, но со всей пылинкой. Соответственно выделяют два режима распыления [7]: за счет прямого выбивания (упругие столкновения) и за счет электронного возбуждения (неупругие столкновения). В первом случае падающая частица взаимодействует непосредственно с одним из атомов решетки, и ее энергия распределяется по небольшому количеству атомов. Во втором случае частица взаимодействует с электронным облаком пылинки, и ее энергия распределяется по всем атомам пылинки. Роль неупругих столкновений велика лишь при условии, что падающая частица имеет заряд.

Упругие и неупругие столкновения для макромолекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) детально рассмотрены в работах [9, 10]. Аналогичный формализм был распространен на

более крупные углеводородные частицы в работе [11]. Здесь возникают как минимум два принципиальных отличия от классических больших пылинок. Во-первых, даже частица с относительно невысокой скоростью может пролететь сквозь пылинку, не передав ей всю свою энергию. Во-вторых, не вся поглощенная энергия доступна для отрыва атомов решетки. Часть ее может расходоваться на отрыв электронов или переизлучаться. И поэтому для моделирования необходимо не только рассчитывать процесс диссоциации, но и детально рассматривать распределение поглощенной энергии внутри пылинки.

Взаимодействие с излучением

Фотоиспарение крупных тугоплавких пылинок, как видно из таблицы, в типичных межзвездных полях излучения должно быть неэффективным, поэтому взаимодействие с фотонами обычно рассматривается в контексте моделирования эволюции мелких алифатических и ароматических углеводородных пылинок. Хотя для обозначения последних все еще часто применяется сокращение ПАУ, в действительности структура космических углеводородных пылинок, вероятно, более сложная.

Согласно одной из самых современных моделей пыли [12] значительную долю космических пылинок составляют так называемые аморфные гидрогенизированные углистые пылинки, а-C(:H), охватывающие довольно значительный диапазон составов, от пылинок а-C:H со значительной долей атомов водорода (до 60 %) до пылинок а-C, в которых доля атомов H не превышает нескольких процентов.

В работе [13] рассмотрена двухэтапная фотодиссоциация таких пылинок. На *первом этапе* основным каналом диссоциации является отделение атомов водорода. Фотоны, проникающие в пылинку, разрывают связи С–Н, приводя к появлению свободного водорода. Разорванные связи атомов С замыкаются друг с другом, приводя к появлению в пылинке кольцевых структур: пылинка постепенно ароматизуется. Число разрушенных связей ограничено глубиной проникновения фотона внутрь пылинки, максимальное значение которой составляет ~ 200 Å. Иными словами, мелкие пылинки ароматизуются во всем объеме, а пылинки радиусом больше 200 Å — только в поверхностном слое. Когда доля атомов водорода $X_{\rm H}$ становится меньше 5 %, начинается *ворой этап*, на котором включается другой канал диссоциации — отделение группы C₂.

Фактически разрушение за счет отделения C_2 эффективно только для мелких пылинок или макромолекул. В частности, в работах [13, 14] показано, что второй этап играет существенную роль лишь для макромолекул с числом атомов менее 50. Для более крупных пылинок основным каналом диссоциации является отсоединение атома водорода [15]. Величина X_H , необходимая для начала второго этапа, у них не достигается.

При моделировании фотодиссоциации пылинок возникает та же проблема, что и при моделировании их распыления при взаимодействии с частицами газа: энергия поглощенного фотона может пойти не только на отрыв отдельных атомов или их групп, но также на ионизацию пылинки или генерацию излучения в инфракрасном диапазоне.

Столкновения пылинок

Процесс дробления пылинок в результате их столкновений друг с другом моделировать гораздо сложнее, чем распыление или испарение пылинок. Проблема в том, что в этом случае приходится рассматривать не одну пылинку, а весь ансамбль пылевых частиц и учитывать в модели распределение пылинок не только по размерам, но и по скоростям (впрочем, эти распределения не являются независимыми). Дополнительная сложность возникает из-за того, что при столкновениях на малых скоростях пылинки не дробятся, а слипаются. Строго говоря, при не слишком экстремальных условиях дробление является не процессом разрушения пыли, а процессом перераспределения пылинок по массам. Лишь при высокой относительной скорости пылинок столкновение может привести к испарению части их вещества.

Детальное исследование процесса столкновения двух пылинок представлено в работах [6, 16]. При столкновении по обеим пылинкам распространяются ударные волны. Если одна из пылинок существенно превосходит по размерам вторую, на поверхности большей пылинки образуется кратер. Расчеты показывают, что распределение образующихся фрагментов по размерам близко к распределению реальных пылинок, что может указывать на важную роль дробления в формировании свойств ансамбля космических пылевых частиц.

Заключение

Перечисленные процессы не единственные механизмы, ведущие к разрушению пылинок. Возможны и другие варианты, например, кулоновский взрыв, когда пылинка разрушается из-за слишком большого электрического заряда; химический взрыв, когда частичное разрушение пылинки (или ее мантии) происходит из-за выделения энергии в химических реакциях, и пр. Роль всех этих процессов в формировании свойств космической пыли очень значительна, однако, к сожалению, их численное описание весьма далеко от совершенства, поскольку значения очень многих параметров взаимодействия пылинок с газом и излучением либо известны очень плохо, либо неизвестны совсем (особенно это относится к оптическим свойствам пылинок). Одна из основных задач в данной области — теоретическое или экспериментальное определение этих параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00521.

Библиографические ссылки

- 1. Jones A. The physical and compositional properties of dust: what do we really know? // ArXiv e-prints. 2014. 1411.6666.
- Fitzpatrick E. L., Massa D. An analysis of the shapes of ultraviolet extinction curves. II - The far-UV extinction // Astrophys. J. – 1988. – Vol. 328. – P. 734–746.
- 3. Campeggio L., Strafella F., Maiolo B. et al. Total to Selective Extinction in the Dark Globule CB 107 // Astrophys. J. 2007. Vol. 668. P. 316–330.
- Gordon K. D., Clayton G. C., Misselt K. A. et al. A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 594. – P. 279–293.
- Draine B. T., Salpeter E. E. On the physics of dust grains in hot gas // Astrophys. J. - 1979. - Vol. 231. - P. 77-94.
- Tielens A. G. G. M., McKee C. F., Seab C. G., Hollenbach D. J. The physics of grain-grain collisions and gas-grain sputtering in interstellar shocks // Astrophys. J. – 1994. – Vol. 431. – P. 321–340.
- Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / под ред. Р. Бериш. М. : Мир, 1984.

- Jones A. P. Dust Destruction Processes : Astronomical Society of the Pacific Conference Series // Astrophysics of Dust / ed. by A. N. Witt, G. C. Clayton, B. T. Draine. – 2004. – Vol. 309. – P. 347.
- Micelotta E. R., Jones A. P., Tielens A. G. G. M. Polycyclic aromatic hydrocarbon processing in interstellar shocks // Astron. Astrophys. – 2010. – Vol. 510. – P. A36.
- Micelotta E. R., Jones A. P., Tielens A. G. G. M. Polycyclic aromatic hydrocarbon processing in a hot gas // Astron. Astrophys. – 2010. – Vol. 510. – P. A37. 0912.1595.
- Murga M. S., Khoperskov S. A., Wiebe D. S. Restructuring and destruction of hydrocarbon dust in the interstellar medium // Astronomy Reports. - 2016. - Vol. 60. - P. 233-251. 1612.00419.
- Jones A. P., Köhler M., Ysard N. et al. The global dust modelling framework THEMIS // Astron. Astrophys. – 2017. – Vol. 602. – P. A46.
- Allain T., Leach S., Sedlmayr E. Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. // Astron. Astrophys. — 1996. — Vol. 305. — P. 602.
- Jochims H. W., Ruhl E., Baumgartel H. et al. Size effects on dissociation rates of polycyclic aromatic hydrocarbon cations: Laboratory studies and astophysical implications // Astrophys. J. – 1994. – Vol. 420. – P. 307– 317.
- Zhen J., Castellanos P., Paardekooper D. M. et al. Laboratory formation of fullerenes from PAHs: Top-down interstellar chemistry // ArXiv e-prints. — 2014. 1411.7230.
- 16. Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J. Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // Astrophys. J. – 1996. – Vol. 469. – P. 740.

МИЛЛИМЕТРОВАЯ И СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

И. И. Зинченко

Институт прикладной физики РАН, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

В данном обзоре обсуждаются недавние достижения и актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии. Приводятся сведения о действующих, строящихся и проектируемых инструментах этого диапазона, как наземных, так и космических.

MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVE ASTRONOMY TODAY AND TOMORROW

I. I. Zinchenko

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

In this review, recent achievements and actual problems of millimeter and submillimeter astronomy are discussed. The article provides information on existing, under construction and projected instruments of this band, both ground-based and space ones.

Введение

Астрономия в настоящее время стала не только всеволновой, охватывая весь спектр электромагнитных волн, но и научилась использовать неэлектромагнитные каналы получения информации о Вселенной. Давно и успешно изучаются космические лучи. Уже несколько десятилетий работают детекторы нейтрино. Совсем недавно впервые удалось зарегистрировать гравитационные волны. Среди этого потока информации далеко не последнюю роль занимают результаты наблюдений на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. В настоящем обзоре рассматриваются основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии [1, 2], а также состояние и перспективы развития ее инструментальной базы. Описываются некоторые достижения последнего времени, подбор которых, конечно, отражает собственные интересы автора.

[©] Зинченко И. И., 2018

²³

Основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Один из основных объектов изучения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии — это так называемая «холодная» Вселенная, в основном межзвездные газопылевые облака, как в нашей Галактике, так и в далеких объектах. Интересны они прежде всего тем, что в них происходит процесс звездообразования, многие аспекты которого до сих пор не вполне понятны. Температура областей звездообразования составляет от нескольких до десятков кельвинов. Пик их излучения при такой температуре лежит в субмиллиметровом диапазоне. Этот диапазон также чрезвычайно насыщен спектральными линиями, отвечающими в основном переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. В межзвездных облаках найдено очень много разнообразных молекул. Это важно, поскольку наблюдения молекулярных линий позволяют изучать физические условия и процессы в межзвездных облаках, а также их химический состав. Основной компонент плотных межзвездных облаков — молекулярный водород — в этих условиях ненаблюдаем.

Задачи исследования межзвездных облаков, в частности областей звездообразования, многообразны. Во-первых, это изучение общих характеристик межзвездной среды в нашей Галактике и в других галактиках. Примером такой работы является обзор плоскости Галактики в линии CO J = 1 - 0 [3], который послужил основой для многих дальнейших исследований. Такой обзор дает общее представление о распределении и кинематике межзвездного вещества, однако имеет довольно низкое угловое разрешение и с трудом позволяет выделить и исследовать компактные области звездообразования. Для таких задач очень полезны обзоры значительных участков плоскости Галактики с существенно более высоким разрешением в континууме и в линиях некоторых молекул, выполненные при помощи наземных и космических инструментов. Среди них можно отметить наземные обзоры в континууме на волнах ~ 1 мм ATLASGAL (The APEX telescope large area survey of the galaxy at 870 μ m) [4, 5] μ BOLOCAM [6], a также обзор в линии ¹³CO J = 1 - 0 GRS (The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey) [7]. Очень много полезной информации дали космические аппараты, работавшие на волнах от дальнего ИК до ближнего ИК диапазонов (например, Spitzer Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire

- GLIMPSE [8], MIPS Inner Galactic Plane Survey - MIPSGAL [9], Herschel [10], Wide Field Infrared Survey Explorer - WISE [11]).

Одной из интересных задач являются исследования вариаций характеристик межзвездной среды и областей звездообразования, в частности, в зависимости от положения в Галактике. Имеются указания на то, что средняя плотность облаков и некоторые другие параметры меняются по радиусу Галактики [12–14]. Такие исследования лучше, конечно, проводить по наблюдениям соседних галактик. Довольно давно уже получены подробные карты распределения CO в M31 [15]. С появлением новых инструментов такие работы могут дать новые важные результаты.

Одним из ключевых вопросов астрофизики является исследование истории звездообразования во Вселенной. К настоящему времени проведены многочисленные исследования того, как менялась скорость звездообразования во Вселенной. Общая картина более или менее сложилась, но новые наблюдения далеких галактик с более высокой чувствительностью должны помочь с уточнением многих деталей [16].

Особенно интригующим является вопрос об образовании первых звезд и галактик. Здесь возникает проблема исследования «темных веков» Вселенной — промежутка времени между эпохой рекомбинации и рождением первых звезд. Пока нет никакой наблюдательной информации об этом периоде, и, как представляется, единственный способ получить такую информацию — это поиск искажений в спектре микроволнового реликтового фона, создаваемых простыми молекулами, которые могут уже присутствовать во Вселенной в это время [17]. Правда, ожидаемые искажения чрезвычайно малы. Одной из наиболее перспективных молекул является ион HeH⁺ [18–20]. Он пока не обнаружен в космосе, хотя теоретические модели предсказывают его заметное обилие при определенных условиях. Нами проведен поиск линии J = 1 - 0 HeH⁺ в спектре далекого квазара на красном смещении z = 6.42 [21]. Зарегистрирована возможная линия излучения с отношением сигнал/шум ~ 3, что не позволяет говорить о ее достоверном обнаружении.

Сами процессы звездообразования также вызывают еще немало вопросов. Особенно это касается звезд большой массы, которые в процессе формирования сильно воздействуют на окружающее их вещество родительского облака [22]. Основной вопрос здесь: образуются ли они так же, как звезды меньшей массы, путем дисковой аккреции или в данном случае работают другие механизмы? В последние

годы, благодаря наблюдениям на антенной решетке ALMA, удалось увидеть диски вокруг молодых массивных (прото)звезд [23–25] и даже впервые зарегистрировать вспышку в ИК диапазоне, обусловленную аккрецией вещества из диска у массивного молодого звездного объекта S255 NIRS3 [26, 27], а также связанную с ней вспышку мазера метанола на частоте 6.7 ГГц [28, 29]. Таким образом, имеются веские свидетельства того, что дисковая аккреция работает до масс по крайней мере ~ 20 M_☉. В то же время пока не удалось получить детальных изображений дисков вокруг массивных (прото)звезд, сравнимых с теми, которые уже получены для близких к нам звезд малой массы. Теоретические модели показывают, что эти диски могут быть очень неоднородны [30]. Требуются дальнейшие наблюдения таких дисков с более высоким угловым разрешением.

Помимо изучения «холодной» Вселенной миллиметровая и субмиллиметровая астрономия важна и в других областях астрофизических исследований [2]. В частности, в этом диапазоне можно реализовать угловое разрешение, которое позволит детально изучать процессы вблизи сверхмассивных черных дыр в центрах нашей Галактики и других галактик.

Одна из фундаментальнейших задач в исследованиях Вселенной — это поиск проявлений первичных гравитационных волн, которые возникают в инфляционных моделях. Единственным таким наблюдательным проявлением, как сейчас представляется, является В-мода поляризации реликтового микроволнового фона [31]. Недавнее сообщение о ее обнаружении в эксперименте BICEP2 не подтвердилось. Тем не менее эксперименты активно продолжаются со все возрастающей чувствительностью. Помимо первичных гравитационных волн В-мода может возникать вследствие гравитационного линзирования. Эта компонента измерена в ряде экспериментов [32]. Но задача поиска такой поляризации, обусловленной первичными гравитационными волнами, остается одной из важнейших.

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия может помочь в решении и такой научной проблемы, как поиск возможных вариаций некоторых фундаментальных констант. Такие вариации возможны в принципе как во времени, так и в пространстве. Последние возникают в моделях так называемых «хамелеонных» скалярных полей, существование которых было предложено для объяснения ускоренного расширения Вселенной [33]. В этих моделях некоторые физические константы, в частности отношение массы электрона к массе протона μ , зависят от локальной плотности барионной материи. По-

скольку эта плотность на Земле и в межзвездной среде отличается на много порядков величины, можно пытаться проверить эти модели сравнивая на Земле и в космосе частоты молекулярных переходов, которые по разному зависят от этого отношения. Один возможный вариант — это вращательные и инверсионные переходы разных молекул. Другой вариант — разные типы переходов в одной молекуле, например, в метаноле. К настоящему времени проведен ряд таких измерений в направлении холодных межзвездных облаков с узкими спектральными линиями. Эти измерения дали верхние пределы на возможные изменения отношения массы электрона к массе протона $|\Delta \mu/\mu| \lesssim 3 \times 10^{-8}$ [34, 35].

Существующие и перспективные инструменты

В одном из недавних сборников «Физика космоса» мной был представлен обзор существующих и проектируемых инструментов для миллиметровой и субмиллиметровой астрономии [36]. Ниже кратко повторяются основные моменты и отмечаются последние достижения.

Для наблюдений на миллиметровых и субмиллиметровых волнах используются как одиночные антенны, так и интерферометры (в основном это наземные инструменты, хотя есть и самолетная обсерватория SOFIA [37]), а также периодически проводятся измерения с аэростатов.

Из одиночных антенн, работающих на коротких миллиметровых волнах, одним из самых эффективных остается 30-м радиотелескоп Института миллиметровой радиоастрономии (IRAM), который расположен на высоте 2 920 м в горах Сьерра Невада, вблизи вершины Pico Veleta, в 50 км от Гранады (Испания). Он используется на частотах до ~ 350 ГГц (0.8 мм).

На волнах до ~ 3 мм активно используются 45-м радиотелескоп в Нобеяма (Япония), 20-м радиотелескоп радиообсерватории Онсала (Швеция), 22-м радиотелескоп MOPRA в Австралии, 22-м радиотелескоп Крымской астрофизической обсерватории, несколько 14-м радиотелескопов (в частности, в США, КНР и Финляндии), 12-м радиотелескоп на Китт Пик. В этом диапазоне может работать и 100-м радиотелескоп НРАО в Грин Бэнк, хотя его эффективность на волне 3 мм невелика. Вводятся в строй 64-м радиотелескоп на Сардинии [38] и 50-м Большой миллиметровый телескоп в Мекси-

ке [39]. Последний должен работать на волнах до ~ 1 мм. Пока попрежнему неясны перспективы завершения строительства 70-м радиотелескопа на плато Суффа в Узбекистане.

Есть несколько антенн диаметром 10—15 м, которые работают в субмиллиметровом диапазоне длин волн. К ним относятся, в частности, телескопы JCMT, APEX, CSO, HHT, SPO, ARO. Обсуждается возможность строительства 40-м субмиллиметрового телескопа в Чили.

Среди интерферометрических систем беспрецедентными возможностями обладает Большая миллиметровая/субмиллиметровая решетка в Атакаме (Аtacama Large Millimeter/submillimeter Array — ALMA), строительство которой было недавно завершено на высоте 5000 м в пустыне Атакама в Чилийских Андах совместными усилиями ряда организаций США, Европы и Японии. Продолжает эффективно использоваться Субмиллиметровая антенная решетка на Гавайях. Успешно осуществляется проект NOEMA (NOrthern Extended Millimeter Array) по удвоению числа антенн интерферометра на Плато де Бюр во французских Альпах.

Одиночные антенны и антенные решетки могут объединяться в глобальную интерферометрическую сеть. Такой сетью является Телескоп горизонта событий, основной целью которого является изучение сверхмассивных черных дыр в центре нашей Галактики и в центрах некоторых близких галактик.

После очень успешной работы субмиллиметровой космической обсерватории *Herschel* активно обсуждаются и готовятся новые космические проекты в этом диапазоне. Наиболее продвинутым из них является российский проект «Миллиметрон» [40], но изучаются и другие варианты.

Заключение

В последние годы, в основном благодаря появлению новых инструментов, особенно ALMA, наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах дали ряд новых важных астрофизических результатов. Этот диапазон интересен для многих областей астрофизики. В настоящее время создаются и проектируются новые инструменты. В недалеком будущем можно ожидать новых достижений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда научных иссле-

дований (проект 17-12-01256, раздел «Основные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии») и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-02-06098, раздел «Существующие и перспективные инструменты»).

Библиографические ссылки

- 1. Зинченко И. И. Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8—9. С. 641—659.
- 2. Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // Успехи физ. наук. 2014. Т. 184, № 12.
- Dame T. M., Hartmann D., Thaddeus P. The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey // Astrophys. J. 2001. Vol. 547. P. 792–813. astro-ph/0009217.
- Schuller F., Menten K. M., Contreras Y. et al. ATLASGAL The APEX telescope large area survey of the galaxy at 870 μm // Astron. Astrophys. - 2009. - Vol. 504. - P. 415-427. 0903.1369.
- Csengeri T., Urquhart J. S., Schuller F. et al. The ATLASGAL survey: a catalog of dust condensations in the Galactic plane // Astron. Astrophys. - 2014. - Vol. 565. - P. A75. 1312.0937.
- Aguirre J. E., Ginsburg A. G., Dunham M. K. et al. The Bolocam Galactic Plane Survey: Survey Description and Data Reduction // Astrophys. J. Suppl. Ser. - 2011. - Vol. 192. - P. 4. 1011.0691.
- Jackson J. M., Rathborne J. M., Shah R. Y. et al. The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey // Astrophys. J. Suppl. Ser. - 2006. - Vol. 163. - P. 145-159. astro-ph/ 0602160.
- Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L. et al. GLIMPSE. I. An SIRTF Legacy Project to Map the Inner Galaxy // Publ. Astron. Soc. Pac. - 2003. - Vol. 115. - P. 953-964. astro-ph/0306274.
- Carey S. J., Noriega-Crespo A., Price S. D. et al. MIPSGAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 microns, Survey Strategy and Early Results // American Astronomical Society Meeting Abstracts : Bulletin of the American Astronomical Society. — 2005. — Vol. 37. — P. 1252.
- Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al. Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // Astron. Astrophys. - 2010. - Vol. 518. - P. L1. 1005.5331.

- Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial Onorbit Performance // Astron. J. - 2010. - Vol. 140. - P. 1868-1881. 1008.0031.
- 12. Sakamoto S., Hasegawa T., Handa T. et al. An Out-of-Plane CO (J = 2–1) Survey of the Milky Way. II. Physical Conditions of Molecular Gas // Astrophys. J. 1997. Vol. 486. P. 276–+.
- Zinchenko I. Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. III. Statistics of the core parameters // Astron. Astrophys. – 1995. – Vol. 303. – P. 554.
- Zinchenko I., Pirogov L., Toriseva M. Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. - 1998. - Vol. 133. - P. 337-352.
- Nieten C., Neininger N., Guélin M. et al. Molecular gas in the Andromeda galaxy // Astron. Astrophys. — 2006. — Vol. 453. — P. 459—475. arXiv: astro-ph/0512563.
- Madau P., Dickinson M. Cosmic Star-Formation History // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2014. Vol. 52. P. 415-486. 1403.0007.
- Dubrovich V. K. Molecules of cosmological origin // Soviet Astronomy Letters. - 1977. - Vol. 3. - P. 128.
- Dubrovich V. K., Lipovka A. A. Radio absorption by HeH⁺ molecules in the spectra of remote QSOs. // Astron. Astrophys. — 1995. — Vol. 296. — P. 307.
- Dubrovich V. K. The huge enhancement of Spectral-Spatial Fluctuations (SSF) in the Cosmic Background Radiation (CBR) // Astron. Astrophys. - 1997. - Vol. 324. - P. 27-31.
- Galli D., Palla F. The Dawn of Chemistry // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2013. Vol. 51. P. 163-206. 1211.3319.
- Zinchenko I., Dubrovich V., Henkel C. A search for HeH⁺ and CH in a high-redshift quasi-stellar object // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2011. -Vol. 415. - P. L78-L80.
- Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al. Massive Star Formation // Protostars and Planets VI. - 2014. - P. 149-172. 1402.0919.
- 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.
- 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.

³⁰

- 25. 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.
- 26. 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.
- Caratti o Garatti A., Stecklum B., Garcia Lopez R. et al. Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object // Nature Physics. – 2017. – Vol. 13. – P. 276–279. 1704.02628.
- Fujisawa K., Yonekura Y., Sugiyama K. et al. A flare of methanol maser in S255 // The Astronomer's Telegram. - 2015. - Vol. 8286.
- Moscadelli L., Sanna A., Goddi C. et al. Extended CH₃OH maser flare excited by a bursting massive YSO // Astron. Astrophys. 2017. Vol. 600. P. L8.
- 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.
- Kamionkowski M., Kovetz E. D. The Quest for B Modes from Inflationary Gravitational Waves // Ann. Rev. Astron. Astrophys. - 2016. - Vol. 54. -P. 227-269. 1510.06042.
- 32. The POLARBEAR Collaboration, Ade P. A. R., Aguilar M. et al. A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Subdegree Scales from Two Years of polarbear Data // Astrophys. J. 2017. Vol. 848. P. 121. 1705.02907.
- Khoury J., Weltman A. Chameleon Fields: Awaiting Surprises for Tests of Gravity in Space // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 93, № 17. — P. 171104. astro-ph/0309300.
- 34. Levshakov S. A., Lapinov A. V., Henkel C. et al. Searching for chameleonlike scalar fields with the ammonia method. II. Mapping of cold molecular cores in NH₃ and HC₃N lines // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 524. — P. A32. 1008.1160.
- Daprà M., Henkel C., Levshakov S. A. et al. Testing the variability of the proton-to-electron mass ratio from observations of methanol in the dark cloud core L1498 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 472. — P. 4434—4443. 1709.03103.
- 36. Зинченко И. И. Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия на Земле и в космосе // Физика космоса : тр. 44-й Международ. студ. науч. конф. — 2015. — С. 37—45.

- 37. Gehrz R. D., Becklin E. E., de Pater I. et al. A new window on the cosmos: The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) // Advances in Space Research. – 2009. – Vol. 44. – P. 413–432.
- 38. Prandoni I., Murgia M., Tarchi A. et al. The Sardinia Radio Telescope: From a Technological Project to a Radio Observatory // ArXiv e-prints. — 2017. 1703.09673.
- Irvine W. M., Schloerb F. P. The Large Millimeter Telescope- El Gran Telescopio Milimetrico // Bull. Am. Astron. Soc. — 2005. — Vol. 37. — P. 652.
- Smirnov A. V., Baryshev A. M., Pilipenko S. V. et al. Space mission Millimetron for terahertz astronomy // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. - 2012. - Vol. 8442.

АСТРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ В ОРИОНЕ

М. С. Кирсанова

Институт астрономии Российской академии наук

Цель лекции — представить астрохимические исследования в молекулярных облаках Орион А и Орион В. Основное внимание будет уделено молекулярному облаку Orion Bar и туманности Конская голова.

ASTROCHEMICAL STUDIES OF MOLECULAR CLOUDS IN ORION

M. S. Kirsanova

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

The aim of the lecture is to outline astrochemical studies of Orion A and Orion B molecular clouds. Main attention is given to the Orion Bar and Horsehead nebula.

Молекулярные облака Орион A и Орион B — ближайшие к Солнцу области, где рождаются как массивные звезды, так и звезды малых масс. Туманность Ориона, расположенная в облаке Орион A, содержит молодое звездное скопление Трапеция, наиболее массивная из звезд которого Θ^1 Ori C имеет спектральный класс O7. Туманность IC434 (Конская голова) из облака Орион B освещается звездой σ Ориона со спектральным классом O9. Благодаря разнообразию звездного состава и близости к Солнцу молекулярные облака Орион A и B являются одними из лучших объектов на небе для проведения астрохимических исследований.

В лекции будут рассмотрены основные результаты исследований химического состава облаков в Орионе, а именно тех частей облаков, которые находятся вблизи молодых массивных звезд — от образования простейших гидридов до многоатомных молекул, от толстых ледяных мантий на поверхности пылинок до разрушения полиароматических углеводородов мощным ультрафиолетовым излучением звезд.

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

[©] Кирсанова М. С., 2018

ФУНКЦИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Д. А. Ковалева, О. Ю. Малков, А. Ю. Сытов, А. В. Тутуков, Д. А. Чулков, Л. Р. Юнгельсон Институт астрономии Российской академии наук

Приведен обзор проблем и задач, связанных с определением параметров функции звездообразования для двойных систем. Описан подход к исследованию начальных распределений двойных звезд по фундаментальным параметрам путем решения обратной задачи.

STAR FORMATION FUNCTION FOR BINARIES

D. A. Kovaleva, O. Y. Malkov, A. Y. Sytov, A. V. Tutukov, D. A. Chulkov, L. R. Yungelson Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We review tasks and problems related to determination of parameters of star formation function for binary systems. The approach toward investigation of initial distributions of binary stars over fundamental parameters via solving inverse problem is described.

Введение

Большинство звезд, доступных для исследования, оказываются двойными. Однако интерес исследователей к этим объектам вызван не только и не столько их многочисленностью, сколько разнообразием наблюдательных проявлений, позволяющим формировать и проверять наши представления о природе и эволюции звезд в целом. Благодаря динамической связи компонентов мы можем, в определенных случаях, прямыми способами определять физические характеристики системы и ее составляющих. В то же время взаимодействие между компонентами в ходе эволюции приводит к разнообразным астрофизическим явлениям и образованию различных объектов с привлекающими внимание наблюдательными проявлениями,

[©] Ковалева Д. А., Малков О. Ю., Сытов А. Ю.,

Тутуков А. В., Чулков Д. А., Юнгельсон Л. Р., 2018

³⁴

например, новых, сверхновых, звезд Вольфа—Райе, пульсаров, источников гамма-излучения, рентгеновских и симбиотических двойных звезд. Поздние стадии эволюции тесных (взаимодействующих) двойных звезд бывают связаны с образованием компактных релятивистских объектов, таких как черные дыры и нейтронные звезды, слияния которых были впервые зарегистрированы по всплескам гравитационных волн в 2016—2017 гг.

Для решения многих астрофизических задач важно понимать, какими рождаются двойные звезды, как распределены массы их компонентов, какие параметры орбиты характерны для молодых двойных звезд. Эти распределения связаны с характеристиками процесса звездообразования, а в перспективе определяют, например, частоту вспышек сверхновых Іа и гравитационных всплесков, которые мы можем наблюдать. Комплекс начальных распределений рождающихся двойных звезд по фундаментальным параметрам (такими параметрами часто считают массы и отношения масс компонентов, большие полуоси и эксцентриситеты орбит; этот выбор будет обсуждаться далее) мы будем называть функцией звездообразования двойных звезд.

Методы определения функции звездообразования двойных звезд

Статистика наблюдательных данных о двойных системах

Простой подход к определению характеристик образующихся двойных звезд состоит в том, чтобы приписать им такие же распределения по фундаментальным параметрам, которые обнаруживаются в наблюдательных наборах данных. Такой подход, разумеется, имеет основания, так как наличие прямой связи между начальными и наблюдательными распределениями очевидно. Слабые места такого подхода, однако, тоже достаточно предсказуемы. Наблюдательное распределение не тождественно существующему в настоящее время распределению всех звезд из-за сильного влияния многочисленных эффектов наблюдательной селекции, искажающих статистические свойства популяции двойных звезд, а существующее в настоящее время распределение характеристик двойных отличается от начального благодаря эффектам эволюции. Чтобы избежать искажений или снизить их влияние, часто стараются рассматривать выборки, предположительно обладающие полнотой в определенном

объеме, или группы звезд близкого, предпочтительно молодого, возраста (скопления, ассоциации) [1]. Однако наблюдательные данные о двойных в скоплениях и ассоциациях довольно скудны и исчерпываются обычно степенью кратности звезд ансамбля и распределением по угловому расстоянию между компонентами (см., например, [2, 3], а для молодых звездных ансамблей затруднительны из-за обилия пыли и газа [4]. Требование полноты ансамбля в объеме достаточно трудновыполнимо и часто ведет либо к небольшому объему выборки [5, 6], либо к значительным допускам в трактовке понятия полноты (ср., например, работы [7] и [8], каждая из которых в свое время претендовала на полноту для звезд близких спектральных классов почти в одном и том же объеме). В связи с этим в течение многих лет продолжает оставаться полезным и исследование статистических распределений на материале больших каталогов [9–14].

Построение статистических распределений на материале выборок проэволюционировавших двойных звезд, к тому же искаженных эффектами наблюдательной селекции, приводит к значительному разбросу оценок характера распределений двойных по характеристикам.

Так, наиболее популярные оценки характера распределения двойных звезд по большим полуосям орбит сводятся к двум вариантам: — степенное распределение

$$f(a) \sim a^{-\alpha} \tag{1}$$

в терминах плотности вероятности, при $\alpha = 1$ представляющее собой плоское в логарифмической шкале распределение, т. н. закон Эпика [15], и

— гауссово (или подобное ему) распределение по $\log a$ (или $\log P$), впервые предложенное Койпером [16].

Значительная часть современных статистических исследований двойных звезд обнаруживает логнормальное распределение по разделению между компонентами [7, 8, 17], однако диапазон расстояний (и периодов), в которых обнаруживается это распределение, настолько широк, что невозможно объяснить его результатом некоторого единого процесса ([12], см. также следующий раздел). С другой стороны, распределение по Эпику может быть интерпретировано как результат динамической релаксации при гравитационных взаимодействиях в скоплении [12] и имеет, таким образом, ясный физический смысл. Существуют интерпретации логнормального распределения (см., например, [1, 18, 19]) как результата искажения ло-
гарифмически плоского (динамической эволюцией, например, распадом части широких пар в более населенных звездных областях из-за гравитационного воздействия третьих тел, или недоучетом эффектов селекции) или совместным действием нескольких механизмов образования двойных, причем для разных разделений между компонентами доминируют разные сценарии.

Распределение по эксцентриситетам, как отмечают Токовинин и Кияева [20], является важным диагностическим критерием для теорий образования двойных звезд. Как известно, в тесных парах с периодом обращения меньше ~ 10 дней быстро происходит приливная циркуляризация орбит. Для более широких двойных, однако, эксцентриситеты, по-видимому, остаются неизменными [21], по крайней мере до тех пор, пока компоненты остаются на главной последовательности и не оказывают влияния на эволюцию друг друга. С физической точки зрения предпочтение отдается так называемому «тепловому» распределению, предложенному Амбарцумяном [22]:

$$f(e) \sim 2e \,. \tag{2}$$

В то же время исследования в различных выборках позволяют делать выводы и о «колоколообразном» [7], и о равномерном [8], и о степенном (но более «мягком», с меньшим показателем степени, чем у теплового) [20] видах распределения по эксцентриситетам. Отметим, что само определение эксцентриситетов возможно, как правило, для очень ограниченной выборки двойных звезд, что дополнительно затрудняет задачу, увеличивая количество задействованных эффектов селекции (добавляя т. н. «вычислительную селекцию»).

Исследование наблюдательных выборок и их свойств нередко приводит к выводам о связи распределений по некоторым параметрам, которые рассматривают в качестве фундаментальных (например, по расстояниям между компонентами и массой главного компонента [1]; по отношениям масс компонентов и по периоду или расстоянию между компонентами [8, 23]; по эксцентриситетам и периодам даже для широких пар [7]). В этих случаях требуется выяснять, объясняются ли наблюдаемые тренды, например, эффектами звездной и динамической эволюции или связаны с самими процессами рождения двойных систем.

Кроме того, тесные и широкие двойные системы зачастую демонстрируют разные статистические характеристики в отношении фундаментальных распределений (см., например, [7, 13, 14]). Так, в частности, среди тесных двойных оказывается избыточно много т. н.

«близнецов» — пар с близкими по массе компонентами (и соответственно отношением масс $q = M_2/M_1 \approx 1$), что может оказаться как следствием эффекта селекции (такие двойные имеют более высокую вероятность открытия как спектральные или затменно-двойные), так и отражением свойств процесса звездообразования (см. следующий раздел).

Еще в 1980-х гг., подробно исследовав и обобщив доступные на то время наблюдательные характеристики всех известных двойных систем (см., например, [13, 14, 24]), группа исследователей, возглавляемая А. В. Тутуковым и Л. Р. Юнгельсоном, предложила следующий обобщенный вид для функции звездообразования широких двойных звезд:

$$d^{3}V = M_{1}^{-2.5} dM_{1} \cdot 0.2d \log a \cdot q^{-2} dq \quad \mathrm{yr}^{-1},$$
(3)

где M_1 и *а* выражены в солнечных единицах.

О степени кратности звездного ансамбля

Долю двойных (и кратных) звезд в популяции характеризуют частотой встречаемости (Multiplicity frequency, MF):

$$MF = (B + T + Q + \dots)/(S + B + T + Q + \dots) \le 1$$
(4)

или долей вторичных компонентов (Companion star fraction, CF):

$$CF = (B + 2T + 3Q + \dots)/(S + B + T + Q + \dots),$$
(5)

которая может превышать 1. Хорошо известен и успешно воспроизводится моделированием тот факт, что MF существенно зависит от массы главного компонента и уменьшается с ее уменьшением. Вопрос скорее в том, каковы же на самом деле значения MF для различных главных компонентов. Современные наблюдательные оценки [1] имеют несколько больший разброс для M-карликов, в среднем указывая на MF ≈ 20 %, и лучше согласуются для массивных звезд, доходя до MF ≈ 60 %. Токовинин [25] дает MF = 46 % для F-, G-карликов в окрестности Солнца, что хорошо согласуется с более ранней усредненной оценкой 44 ± 2 % из [1].

Из общих соображений можно было бы ожидать, что MF уменьшается с возрастом рассматриваемой популяции звезд, по крайней мере из-за распада части пироких двойных. Однако, как отмечают Дюшен и Краус [1] в своем подробном обзоре, при сравнении разных

популяций такого тренда обнаружить не удается, возможно, из-за его незначительности на фоне других неопределенностей, связанных с определением MF.

Моделирование процессов звездообразования

Иной подход к определению параметров образования двойных систем предполагает моделирование физических процессов в области звездообразования.

Предполагается, что двойные звезды могут образовываться в различных процессах. Так, Бейт в обзоре [26] перечисляет:

- гравитационный захват (предполагающий изначальное раздельное формирование компонентов и требующий рассеяния избытка энергии в гравитационно возмущенном околозвездном диске) — процесс, по-видимому, возможный, но реализующийся в основном в специфических условиях, в небольших тесных группах молодых звезд с низкими относительными скоростями;
- расщепление быстровращающейся протозвезды одно из первых представлений о механизме возникновения двойных звезд, которое, однако, не удается воспроизвести в гидродинамических расчетах;
- гравитационная фрагментация, (a) «быстрая», порожденная гравитационной неустойчивостью в протозвездном облаке и ведущая к формированию кратной системы, и (б) фрагментация достаточно массивного и холодного диска около протозвезды.

Последний из названных процессов (гравитационная фрагментация) в настоящее время рассматривается [26] как ведущий в образовании двойных звезд. В связи с этим фундаментальным параметром образования двойных систем при моделировании процесса, связанного с аккрецией, оказывается скорее угловой момент двойной, а не расстояние между компонентами и их массы по отдельности.

Определенные характеристики наблюдательного ансамбля двойных и кратных звезд были хорошо воспроизведены в гидродинамических расчетах Бейта, учитывавших гравитационные и гидродинамические взаимодействия, а также простое уравнение состояния [27] (MF, отношения масс компонентов для маломассивных систем). Однако полученная начальная функция масс существенно отличалась от ожидаемой за счет переизбытка маломассивных звезд (коричневых карликов), а двойные с главным компонентом типа Солнца при



этом не получали достаточного количества маломассивных спутников. Для того чтобы воспроизвести статистические характеристики наблюдательного ансамбля с большей полнотой, потребовалось ввести в расчеты еще и обратную связь от излучения (radiative feedback) [28]. Таким образом, основными физическими процессами, создающими статистические характеристики двойных звезд, по-видимому, оказываются диссипативные динамические взаимодействия и взаимодействие посредством излучения между протозвездами, образующимися в группах или скоплениях [26]. Основная доля двойных звезд образуется в ходе гравитационной фрагментации, причем, повидимому, быстрая фрагментация (из-за неоднородностей газа) играет доминирующую роль, но и фрагментация в диске также реализуется, и, весьма вероятно, ее роль значительна. Захваты могут случаться в небольших скоплениях.

Гидродинамические расчеты позволяют или, наоборот, не позволяют воспроизвести некоторые особенности статистических характеристик двойных звезд. Так, динамические взаимодействия между протозвездами, как было показано [29], могут быть ответственными за обмен компонентами у тесных пар, который делает предпочтительным образование пар с компонентами-«близнецами». С другой стороны, Кроупа и Буркерт [30] показали, что предположение унимодального начального распределения по большим полуосям орбит/периодам не может быть согласовано с наблюдаемыми распределениями.

Подробное исследование вопроса о том, какие функции массы двойной системы и/или ее компонентов могут являться фундаментальными и к каким результатам при моделировании процесса звездообразования это приводит, было предпринято Ковенхофеном и др. [31]. Было разработано множество сценариев образования двойной (pairing scenarios, PS), в которых разными законами определяются массы компонентов, и/или масса системы, и/или отношение масс компонентов. В дальнейшем мы будем использовать и исследовать некоторые из этих сценариев.

Определение функции звездообразования двойных звезд путем решения обратной задачи

Можно рассмотреть проблему определения параметров функции звездообразования двойных звезд как обратную задачу нахождения начальных распределений двойных по фундаментальным парамет-

рам, исходя из наблюдательных распределений ансамбля двойных звезд по наблюдаемым характеристикам. Как это свойственно обратным задачам, она некорректна и может решаться только при условии наложения дополнительных ограничений на свойства искомых распределений. В качестве таких дополнительных ограничений мы опробовали как существующие гипотезы о виде начальных распределений двойных по фундаментальным параметрам, описанные в предыдущих разделах, так и некоторые экстремальные варианты. Нашей задачей было выбрать гипотезы, согласующиеся с наблюдаемыми распределениями, и отвергнуть те, согласовать которые с наблюдениями невозможно. Гипотезы, не предполагавшиеся ранее на основе статистических свойств наблюдательного ансамбля, были введены в рассмотрение специально для исследования и внутреннего контроля метода.

В качестве исходного набора наблюдательных данных была использована выборка двойных звезд из каталога визуальных двойных звезд WDS [32] V класса светимости и находящихся в радиусе 500 пк (на основании тригонометрических параллаксов Gaia DR1 TGAS [33]). Для этой очищенной выборки были исследованы эффекты наблюдательной селекции и выделена область в пространстве параметров, свободная от обусловленной ими наблюдательной неполноты: угловое разделение между компонентами было ограничено пределами от 2 до 200 секунд дуги при блеске главного компонента ярче 9.5 звездной величины, вторичного компонента — ярче 11.5 звездной величины и разности блеска не более 4 звездных величин (подробнее о построении выборки см. [10, 11]).

Мы использовали метод Монте-Карло для симулирования синтетического ансамбля двойных с такими же наблюдательными ограничениями, исходя из различных комбинаций начальных распределений по фундаментальным параметрам: четырех PS; двух вариантов начальной функции масс (Солпитера [34] и Кроупы [35]) для масс компонентов или систем в зависимости от PS; трех различных распределений по отношению масс компонентов q (для тех PS, которые допускают q как свободный параметр); трех вариантов распределения по расстоянию между компонентами и трех вариантов распределения по эксцентриситетам. Всего были рассмотрены 144 комбинации начальных распределений. Для каждой из этих комбинаций была смоделирована ближняя окрестность Солнца в пределах 500 пк, заполненная исключительно двойными звездами, сформировавшимися по описанным сценариям. При этом звезды сразу

приобретали статус одиночных, если их компонент имел субзвездную массу $M_2 \leq 0.08 M_{\odot}$. Существование кратных звезд мы на этом этапе игнорировали в силу большого количества неопределенностей, связанного с их образованием, и недостаточного наблюдательного материала. Плотность звезд была нормирована на определенную по Gaia DR1 [36]. Мы приняли барометрический закон распределения звезд по z и пренебрегли радиальным градиентом и поглощением в силу того, что рассматривается относительно близкая окрестность Солнца. Звезды рождались в соответствии с принятой скоростью звездообразования [37], зависящей от времени, и эволюционировали в соответствии с приближенными формулами Харли и др. [38]. И наконец, мы «провели наблюдения» каждого из синтетических ансамблей двойных звезд в той же области пространства параметров, которая была определена для наблюдательного набора, и сравнили результаты.

Критерии для сравнения результатов мы выделили следующие:

- количество звезд, «наблюдаемых» в синтетическом наборе данных, должно быть не меньше количества звезд в наблюдательной выборке (можно допустить, что выборка неполна, но не наоборот). Для учета стохастических отклонений мы формулируем требование как N_{synth} > N_{obs} − √N_{obs}, где N_{synt}, N_{obs} − соответственно количество данных в синтетическом и наблюдательном ансамблях. Рисунок 1 показывает доли комбинаций начальных распределений, которые приводят к приемлемым и отвергаемым по этому критерию результатам. Сценарии, в которых количество «наблюдаемых» в синтетическом наборе двойных звезд превышает количество звезд в наблюдательной выборке на порядки, вызывают сомнения, однако на данном этапе не отвергаются;
- аналогичное требование выдвигается к частоте встречаемости МF двойных звезд (4). Для каждой комбинации начальных распределений мы рассчитываем, какая доля звезд будет наблюдаться как двойные (прочие считаются одиночными, так как имеют компонент субзвездной массы, или наблюдаются как одиночные из-за эффектов наблюдательной селекции; пары, которые не наблюдаются вообще, в расчет MF не входят). Мы не знаем, какова в точности MF в наблюдательном ансамбле, однако знаем, что она увеличивается с массой главного компонента и что для наименее массивных главных компонентов она составляет по крайней мере 20 %. Эту величину



Рис. 1. Распределение модельных комбинаций начальных распределений по количеству двойных звезд, «наблюдаемых» в синтетической выборке. Серые столбцы соответствуют отвергаемым на основании этого критерия комбинациям начальных распределений, черные — неотвергаемым. Штриховая линия указывает количество двойных в наблюдательной выборке

можно принять за нижнюю границу MF в синтетических данных. Рисунок 2 иллюстрирует тот факт, что значительная доля сценариев приводит к неприемлемым значениям MF;

— наконец, можно сравнить распределения по наблюдательным параметрам (блеску и разности блеска компонентов, угловому и абсолютному расстоянию между компонентами) и рассчитать статистики, характеризующие их различия. Мы используем двухвыборочные статистики χ^2 Пирсона и D_{KS} Колмогорова— Смирнова, планируя, что они помогут нам сделать выбор между комбинациями начальных распределений, удовлетворяющими двум первым критериям.



Рис. 2. Распределение модельных комбинаций начальных распределений по доле двойных звезд MF, «наблюдаемых» в синтетической выборке. Серые столбцы соответствуют отвергаемым на основании этого критерия комбинациям начальных распределений, черные — неотвергаемым. Штриховая линия указывает MF = 0.2, принятое как минимально допустимое

Предварительные выводы, сделанные на основании моделирования описанного наблюдательного набора, оказались следующими:

- в целом приниматься или отвергаться могут не отдельные начальные распределения по фундаментальным характеристикам (PS, HΦM, отношение масс, расстояние между компонентами, эксцентриситетам), а их комбинации. Из распределений по отдельным параметрам можно уверенно наложить ограничение на распределение по большой полуоси орбиты: в (1) $\alpha > -1.5$;
- начальное распределение по эксцентриситетам слабо влияет на наблюдательные распределения, и, скорее всего, на него получить ограничения не удастся;
- для выбора между НФМ Солпитера и Кроупы, по-видимому,

требуется больше сведений о маломассивных двойных; для выбора между начальными распределениями по отношению масс больше наблюдательных данных о системах с большими значениями *q*. Таким образом, требуется привлекать к моделированию и другие наблюдательные выборки.

В момент написания этого текста наша группа анализирует результаты моделирования новых наблюдательных выборок, основанных как на данных о визуальных двойных WDS, так и на полных в объеме обзорах двойственности и кратности звезд спектральных классов А, F-G, M [5, 6, 8, 25, 39] и покрывающих разные области в пространстве параметров. Мы планируем получить согласованные результаты в отношении предпочтительных и, наоборот, недопустимых комбинаций начальных распределений для двойных систем и, таким образом, определить путем решения обратной задачи ограничения, накладываемые наблюдательными данными на функцию звездообразования двойных звезд.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-02-04053 и программы Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Библиографические ссылки

- Duchêne G., Kraus A. Stellar Multiplicity // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2013. Vol. 51. P. 269-310.
- 2. King R. R., Goodwin S. P., Parker R. J., Patience J. Testing the universality of star formation II. Comparing separation distributions of nearby star-forming regions and the field // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. Vol. 427. P. 2636–2646. 1209.2415.
- Lada C. J., Lada E. A. Embedded Clusters in Molecular Clouds // Ann. Rev. Astron. Astrophys. - 2003. - Vol. 41. - P. 57-115. astro-ph/ 0301540.
- Luhman K. L., McLeod K. K., Goldenson N. A Hubble Space Telescope Search for Substellar Companions in the Young Cluster IC 348 // Astrophys. J. - 2005. - Vol. 623. - P. 1141-1156. astro-ph/0501537.
- Ward-Duong K., Patience J., De Rosa R. J. et al. The M-dwarfs in Multiples (MINMS) survey I. Stellar multiplicity among low-mass stars within 15 pc // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2015. Vol. 449. P. 2618-2637. 1503.00724.
- De Rosa R. J., Patience J., Wilson P. A. et al. The VAST Survey III. The multiplicity of A-type stars within 75 pc // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2014. – Vol. 437. – P. 1216–1240. 1311.7141.

⁴⁵

- Duquennoy A., Mayor M. Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample // Astron. Astrophys. - 1991. - Vol. 248. - P. 485-524.
- 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.
- Andrews J. J., Chanamé J., Agüeros M. A. Wide binaries in Tycho-Gaia: search method and the distribution of orbital separations // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2017. - Vol. 472. - P. 675-699. 1704.07829.
- Kovaleva D., Malkov O., Yungelson L., Chulkov D. Visual binary stars: data to investigate formation of binaries // Baltic Astronomy. — 2016. — Vol. 25. — P. 419—426. 1701.00421.
- Kovaleva D., Malkov O., Yungelson L. et al. Statistical analysis of a comprehensive list of visual binaries // Baltic Astronomy. 2015. Vol. 24. P. 367—378. 1606.06784.
- Poveda A., Allen C., Hernández-Alcántara A. The Frequency Distribution of Semimajor Axes of Wide Binaries: Cosmogony and Dynamical Evolution // Binary Stars as Critical Tools for Tests in Contemporary Astrophysics / ed. by W. I. Hartkopf, P. Harmanec, E. F. Guinan : IAU Symposium. - 2007. - Vol. 240. - P. 417-425. 0705.2021.
- Vereshchagin S., Tutukov A., Iungelson L. et al. Statistical study of visual binaries // Astrophys. Space. Sci. — 1988. — Vol. 142. — P. 245—254.
- Popova E. I., Tutukov A. V., Yungelson L. R. Study of physical properties of spectroscopic binary stars // Astrophys. Space. Sci. – 1982. – Vol. 88. – P. 55–80.
- Öpik E. Statistical Studies of Double Stars: On the Distribution of Relative Luminosities and Distances of Double Stars in the Harvard Revised Photometry North of Declination -31 deg // Publications of the Tartu Astrofizica Observatory. — 1924. — Vol. 25.
- Kuiper G. P. The Nearest Stars // Astrophys. J. 1942. Vol. 95. -P. 201.
- 17. 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.
- Tokovinin A. Formation of wide binary stars from adjacent cores // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 468. — P. 3461—3467. 1703. 06794.
- Poveda A., Allen C. The distribution of separations of wide binaries of different ages // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series / ed. by C. Allen, C. Scarfe : Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series. - 2004. - Vol. 21. - P. 49-57.

- Tokovinin A., Kiyaeva O. Eccentricity distribution of wide binaries // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 456. — P. 2070—2079. 1512. 00278.
- Marks M., Kroupa P., Oh S. An analytical description of the evolution of binary orbital-parameter distributions in N-body computations of star clusters // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2011. — Vol. 417. — P. 1684—1701. 1106.5050.
- 22. Амбарцумян В. А. // Астрон. журн. 1937. Т. 14. С. 207.
- Moe M., Di Stefano R. Mind Your Ps and Qs: The Interrelation between Period (P) and Mass-ratio (Q) Distributions of Binary Stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. - 2017. - Vol. 230. - P. 15. 1606.05347.
- Масевич А. Г., Тутуков А. В. Эволюция звезд: Теория и наблюдения. — М. : Наука, 1988.
- Tokovinin A. From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // Astron. J. – 2014. – Vol. 147. – P. 87.
- Bate M. R. Origins of the Statistical Properties of Binary Systems // Living Together: Planets, Host Stars and Binaries / ed. by S. M. Rucinski, G. Torres, M. Zejda : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - 2015. - Vol. 496. - P. 37.
- Bate M. R. Stellar, brown dwarf and multiple star properties from hydrodynamical simulations of star cluster formation // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2009. - Vol. 392. - P. 590-616. 0811.0163.
- Bate M. R. Stellar, brown dwarf and multiple star properties from a radiation hydrodynamical simulation of star cluster formation // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 419. — P. 3115—3146. 1110. 1092.
- Bate M. R., Bonnell I. A., Bromm V. The formation of close binary systems by dynamical interactions and orbital decay // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2002. Vol. 336. P. 705-713. astro-ph/0212403.
- Kroupa P., Burkert A. On the Origin of the Distribution of Binary Star Periods // Astrophys. J. - 2001. - Vol. 555. - P. 945-949. astro-ph/ 0103429.
- Kouwenhoven M. B. N., Brown A. G. A., Goodwin S. P. et al. Exploring the consequences of pairing algorithms for binary stars // Astron. Astrophys. - 2009. - Vol. 493. - P. 979-1016. 0811.2859.
- 32. 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.
- 33. Lindegren L., Lammers U., Bastian U. et al. Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // Astron. Astrophys. - 2016. - Vol. 595. - P. A4. 1609.04303.

⁴⁷

- 34. Salpeter E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution // Astrophys. J. 1955. Vol. 121. P. 161.
- Kroupa P. On the variation of the initial mass function // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2001. Vol. 322. P. 231-246. astro-ph/0009005.
- Bovy J. Stellar inventory of the solar neighbourhood using Gaia DR1 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 470. — P. 1360—1387. 1704. 05063.
- 37. Yu S., Jeffery C. S. The gravitational wave signal from diverse populations of double white dwarf binaries in the Galaxy // Astron. Astrophys. 2010. Vol. 521. P. A85. 1007.4267.
- Hurley J. R., Pols O. R., Tout C. A. Comprehensive analytic formulae for stellar evolution as a function of mass and metallicity // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2000. - Vol. 315. - P. 543-569. astro-ph/0001295.
- Cortés-Contreras M., Béjar V. J. S., Caballero J. A. et al. CARMENES input catalogue of M dwarfs. II. High-resolution imaging with FastCam // Astron. Astrophys. - 2017. - Vol. 597. - P. A47. 1608.08145.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ В КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДАХ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Д. А. Кононов

Институт астрономии Российской академии наук

В обзорной лекции будут представлены результаты теоретических и наблюдательных исследований структуры течения в аккреционных дисках катаклизмических переменных звезд. В первой части лекции дано описание тех элементов течения, которые выявлены в результатах численного газодинамического моделирования и подтверждены посредством фотометрических и спектральных наблюдений. Во второй части лекции описаны методы наблюдений самых внутренних областей диска, которые могут быть использованы для наблюдательного подтверждения существования элементов, известных до сих пор только в результатах моделирования. В частности, будет представлен метод для непосредственного наблюдения спиральной прецессионной волны плотности.

THE INNER STRUCTURE OF ACCRETION DISKS IN CATACLYSMIC VARIABLE STARS: THEORY VS OBSERVATIONS

D. A. Kononov

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

In this review we present the current results of theoretical and observational studies of the flow structure in the accretion disks of cataclysmic variable stars. The first part of the review is focused on the flow elements that are well described by computer gas dynamical simulations and confirmed by photometric and spectroscopic observations. The second part is on the perspective observational methods that allow one to resolve the very inner regions of the disk. In particular we present a method that should allow observing the precessional spiral density wave as a spiral pattern.

ⓒ Кононов Д. А., 2018

Введение

Катаклизмические переменные звезды представляют собой тесные двойные системы, состоящие из белого карлика (далее — аккретор) и звезды позднего спектрального класса, заполняющей свою полость Роша (далее — донор). В результате заполнения полости Роша звездой-донором начинается перетекание вещества с ее поверхности в окрестности внутренней точки Лагранжа в полость Роша звезды-аккретора, что приводит к возникновению в полости Роша звезды-аккретора разнообразных потоков, струй, газовых дисков.

Исследования структуры течения в катаклизмических переменных звездах начались более пятидесяти лет назад. В частности, еще до развития методов численного газодинамического компьютерного моделирования, в конце 60-х гг. ХХ в., Горбацким [1] и Смаком [2] были выдвинуты предположения о том, что горб на кривой блеска катаклизмической переменной звезды, наблюдаемый перед главным затмением, может быть обусловлен наличием ударной волны в месте взаимодействия аккреционного диска со струей вещества из внутренней точки Лагранжа. Впоследствии это предположение полностью подтвердилось и в результатах моделирования, и в спектроскопических наблюдениях.

С развитием компьютерной техники начались активные исследования структуры течения в катаклизмических переменных посредством численного газодинамического моделирования. Уже в середине 80-х гг. ХХ в. были выполнены двумерные расчеты с помощью сеточных методов (см., например, [3]), которые позволили выявить такие элементы течения, как приливные ударные волны в дисках. В 1988 г. Томом Маршем и Кейтом Хорном [4] был разработан метод доплеровской томографии, который позволил значительно более детально изучить структуру течения с наблюдательной точки зрения.

В настоящее время, благодаря развитию вышеупомянутых методов теоретического и наблюдательного исследования, мы имеем достаточно детальное представление о том, что происходит со структурой течения вокруг звезды-аккретора в катаклизмических переменных звездах. Однако часть выявленных в теории феноменов до сих пор нуждается в прямом наблюдательном подтверждении. В данной обзорной лекции будут описаны как хорошо известные на данный момент газодинамические элементы, наличие которых в реальных системах подтверждено наблюдательно, так и элементы, предполагаемое проявление которых наблюдается пока только косвенно. Кроме

того, будут представлены перспективные методы наблюдений, которые позволят более детально исследовать самые внутренние области аккреционных дисков.

Структура течения в тесной двойной системе

Согласно многочисленным результатам газодинамического моделирования (см., например, [5, 6]) структура течения в немагнитной катаклизмической переменной звезде состоит из аккреционного диска и ряда газодинамических возмущений в этом диске (рис. 1).



Рис. 1. Модельное распределение плотности в экваториальной плоскости тесной двойной системы. Маркерами показаны основные элементы течения: 1.1 и 1.2 — рукава приливной ударной волны; 2 — «горячая линия»; 3 — отошедшая ударная волна. Также на рисунке хорошо выделяется прецессионная спиральная волна плотности во внутренней части диска

Основными газодинамическими возмущениями являются ударные волны: «горячая линия» (обозначена цифрой 2 на рис. 1) ударная волна, возникающая в результате взаимодействия вещества

диска со струей из внутренней точки Лагранжа; два рукава приливной ударной волны (1.1 и 1.2 на рис. 1), а также отошедшая ударная волна (цифра 3 на рис. 1), возникающая перед диском вследствие его орбитального движения в газе межкомпонентной оболочки. Наличие всех трех упомянутых выше ударных волн подтверждено, в том числе и наблюдательно. Так, например, как уже было сказано во введении, об ударной волне в месте взаимодействия струи и диска ученые догадались еще в конце 60-х гг. прошлого века, анализируя кривые блеска катаклизмических переменных звезд. Позднее результаты численного моделирования позволили уточнить структуру этой волны, первоначально названной горячим пятном, и показать, что на самом деле это целая система ударных волн, тянущаяся на достаточно большое расстояние вдоль края диска. Поэтому в данной лекции мы называем ее горячей линией. Кроме того, результаты доплеровской томографии также показывают протяженное яркое образование в том месте, где струя взаимодействует с диском. Также результаты доплеровской томографии позволили подтвердить наличие рукавов приливной ударной волны и отошедшей ударной волны в аккреционных дисках катаклизмических переменных (рис. 2).

Кроме вышеперечисленных ударных волн на рис. 1 во внутренних областях аккреционного диска хорошо выделяется еще один элемент течения. Это прецессионная спиральная волна плотности, которая была открыта в теоретических работах (см., например, [7]). Формируется эта волна в результате приливного воздействия звездыдонора на линии тока в аккреционном диске. Согласно выводам авторов (ссылки) под действием приливных сил возникает ретроградное апсидальное движение линий тока. Причем угловая скорость этого движения зависит от размера большой полуоси линии тока: чем больше размер полуоси, тем выше угловая скорость. В итоге с течением времени формируется структура, показанная на рис. 3.

На рис. 3 хорошо видно, что линии тока касаются друг друга в точках, близких к их апоастрам. Поскольку в апоастре скорость течения газа самая низкая, плотность, согласно закону сохранения массы, должна быть, наоборот, самой высокой. В итоге в структуре течения формируется спиральный узор (волна плотности), который ретроградно прецессирует. Согласно результатам последних теоретических исследований (см., например, [8–10]) прецессионная волна плотности представляет собой весьма важный элемент течения, который отвечает за возникновение множества физических эффектов и, возможно, наблюдательных проявлений катаклизмических пере-



Рис. 2. Соответствие между положениями ударных волн. Обозначение ударных волн соответствует рис. 1

менных звезд. Однако она же является одним из тех элементов течения, наличие которых до сих пор не подтверждено прямыми наблюдениями. В частности, эта волна не может быть обнаружена в результатах доплеровской томографии — одного из самых мощных методов наблюдательного исследования катаклизмических переменных, поскольку этот метод требует, чтобы картируемые элементы течения покоились в системе координат, вращающейся вместе с двойной системой. Многочисленные исследования показывают, что описанные выше ударные волны действительно покоятся во вращающейся системе координат. В то же время прецессионная волна плотности, ввиду своей физической природы, за один орбитальный период совершает во вращающейся системе чуть более одного полного оборота в направлении, обратном орбитальному вращению двойной звезды. Поэтому для наблюдательного подтверждения ее существования требуется модернизация имеющихся методик наблюдения, о которой пойдет речь в следующем разделе.



Рис. 3. Схематическое изображение формирования спиральных структур во внутренних газодинамически невозмущенных частях аккреционного диска

Метод непосредственного наблюдения прецессионной волны плотности

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее действенных методов визуализации элементов течения в аккреционных дисках катаклизмических переменных звезд является метод доплеровской томо-

графии [4]. Именно с помощью этого метода успешно наблюдаются основные ударные волны в дисках. Однако непосредственное применение метода доплеровской томографии для наблюдения прецессионной волны плотности невозможно по следующим причинам. По самому определению метода на результирующих томограммах отображаются только те элементы течения, которые покоятся в системе координат, вращающейся вместе с двойной звездой. И если для упомянутых ударных волн это условие соблюдается, то прецессионная волна плотности, ввиду характера ее ретроградного движения, за один орбитальный период делает чуть больше одного полного оборота во вращающейся системе координат. Таким образом, при построении доплеровской томограммы по спектральным данным, полученным в течение одного орбитального периода системы, вклад прецессионной волны в томограммы будет полностью размыт.

Однако вклад прецессионной волны все же можно выделить в профилях линий.

Согласно описанию волны плотности (например, [7]), период ее прецессии в системе координат наблюдателя (лабораторной системе) составляет десятки (и даже, в некоторых случаях, сотни) орбитальных периодов системы. Таким образом, за один орбитальный период для наблюдателя волна смещается на незначительный угол в направлении, противоположном орбитальному движению.

Допустим сначала, что в диске отсутствует волна плотности. Тогда два профиля спектральной линии, полученные на одной и той же орбитальной фазе с разницей в один орбитальный период (для простоты положим на $\phi = 0.0$ и на $\phi = 1.0$) не должны отличаться друг от друга, поскольку все элементы течения, покоящиеся во вращающейся системе координат, через один орбитальный период возвращаются в исходное положение. В то же время если в системе присутствует прецессионная волна плотности, то два упомянутых профиля будут отличаться друг от друга вследствие того, что за один орбитальный период в лабораторной системе координат волна плотности сместилась на некоторый угол.

Описанный выше эффект может быть положен в основу следующего относительно простого метода выделения вклада прецессионной волны в профили спектральных линий:

— необходимо провести наблюдения профилей спектральных линий системы на одних и тех же фазах (скажем, $\phi_1 = 0.0, \phi_2 =$ = 1.0, $\phi_3 = 2.0$ и т. д.) в течение достаточно длительного периода (в идеале — прецессионного периода волны плотности). Каждый из наблюдаемых профилей в таком случае будет отличаться от остальных именно вкладом прецессионной волны ввиду ее отличного положения на каждом следующем обороте системы;

- далее необходимо усреднить все полученные профили, чтобы получить профиль, свободный от вклада прецессионной волны и обусловленный исключительно элементами, покоящимися во вращающейся системе координат;
- наконец, путем вычитания среднего профиля из каждого индивидуального получить остаточные профили, которые обусловлены исключительно прецессионной волной плотности.

Полученные в результате описанной выше операции остаточные профили, обусловленные вкладом прецессионной волны плотности, теперь можно рассматривать как томографические проекции этой волны с тем лишь отличием, что для восстановления томограммы волны нужно использовать не орбитальный период системы, а прецессионный период волны. Фазовые углы $\tilde{\phi}$ проекций волны необходимо пересчитать с учетом прецессионного периода.

Для проверки работоспособности метода проведено численное моделирование тесной двойной системы с параметрами V455 And. По распределению плотности в аккреционном диске системы для одного из моментов времени после выхода решения на квази-стационарный режим течения, в смысле сохранения полной массы в вычислительной области, (см. рис. 1) хорошо видно, что во внутренних областях диска отчетливо выделяется прецессионная волна плотности.

Для моделирования процесса наблюдений нами были использованы более 20 моментальных распределений газодинамических параметров системы, последовательно отстоящих друг от друга ровно на один орбитальный период. С использованием этих распределений смоделированы профили спектральных линий и выделены вклады прецессионной волны в каждый из этих профилей. Для определения прецессионного периода волны плотности были построены кривые лучевых скоростей остаточных профилей. В результате аппроксимации кривой лучевых скоростей синусоидой был определен прецессионный период волны $P_{pr} = 12.709P_{orb}$. Здесь нужно отметить, что при моделировании прецессионный периода. Такой результат требует дополнительного исследования самого процесса газодинамического моделирования, однако никоим образом не меняет выводов данной работы и не нарушает условия описанного выше метода.

Будем обозначать орбитальные фазы системы буквой ϕ , а фазовые углы прецессионной волны относительно прецессионного периода $\tilde{\phi}$. Поставим в соответствие $\phi = 0.1 P_{orb}$ нулевой фазовый угол волны $\tilde{\phi} = 0$. Остальные фазовые углы остаточных профилей в таком случае вычисляются исходя из определенного прецессионного периода. Далее, с использованием информации о фазовых углах прецессионой волны в моменты наблюдений с использованием остаточных профилей построим доплеровские томограммы.

На рис. 4 показана томограмма прецессионной волны плотности в том положении, какое она занимала относительно других элементов системы (в частности, звезды донора и струи из точки L_1), когда система «наблюдалась» на орбитальной фазе $\phi = 0.1 P_{orb}$.



Рис. 4. Томографическое изображение прецессионной волны плотности в том положении, которое она занимала относительно основных элементов системы на орбитальной фазе $\phi = 0.1 P_{orb}$. Линиями показаны контур полости Роша в орбитальной плоскости в скоростных координатах и траектория струи вещества из точки L_1

Заключение

В обзорной лекции представлены современные данные о структуре течения в немагнитных катаклизмических переменных звездах. Рассмотрены структура аккреционного диска и теоретические и наблюдательные методы, которые позволили исследовать ее детально. Также в лекции представлен метод, позволяющий наблюдать прецессионную волну плотности в аккреционном диске катаклизмической переменной звезды непосредственно в виде спирали. Для проверки метода проведено моделирование процесса наблюдений с использованием результатов численных газодинамических расчетов. Построены синтетические профили спектральных линий, определены вклады прецессионной волны в каждый индивидуальный профиль в зависимости от фазы наблюдений двойной системы. Определен прецессионный период волны и построены ее томографические изображения для различных моментов времени.

Результаты работы показывают, что для качественного спектрального материала с использованием предложенного метода возможно наконец получить непосредственное наблюдательное подтверждение существования прецессионной волны плотности.

Библиографические ссылки

- Горбацкий В. Г. The Effects of Gaseous Jets in Close Binary Systems // Астрофизика. — 1967. — Т. 3. — С. 245.
- Smak J. Erruptive Binaries I. Hot Spots and Distortions of the Radial Velocity Curves // Acta Astron. — 1970. — Vol. 20. — P. 312.
- 3. Sawada K., Matsuda T., Hachisu I. Spiral shocks on a Roche lobe overflow in a semi-detached binary system // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1986. Vol. 219. P. 75.
- 4. Marsh T. R., Horne K. Images of accretion discs. II Doppler tomography // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1988. Vol. 235. P. 269-286.
- Bisikalo D. V. Numerical Modeling of Mass Transfer in Close Binaries // Astrophys. Space. Sci. – 2005. – Vol. 296. – P. 391.
- Bisikalo D. V., Kononov D. A., Kaigorodov P. V. et al. The matter-flow structure in the SS Cyg system in its quiescent state from comparisons of observational and synthetic Doppler tomograms // Astrophys. Space. Sci. - 2008. - Vol. 52. - P. 318.

- Bisikalo D. V., Boyarchuk A. A., Kaigorodov P. V. et al. Formation of the "precessional" spiral wave in the cool accretion disk in semidetached binaries // AIP Conference Proceedings. - 2005. - Vol. 797. - P. 295.
- Kaygorodov P. V., Bisikalo D. V., Kuznetsov O. A., Boyarchuk A. A. Superhumps in binary systems and their connection to precessional spiral density waves // Astr. Rep. - 2006. - Vol. 50. - P. 537.
- Bisikalo D. V., Kurbatov E. P., Kaygorodov P. V. Precessional Density Wave as a Reason of Turbulence in Accretion Disks of Non-magnetic Close Binary Stars // Astronomical Society of the Pacific. — 2015. — Vol. 498. — P. 41.
- Kononov D. A., Bisikalo D. V., Puzin V. B. et al. A possible mechanism for the formation of humps in the orbital light curves of WZ Sge cataclysmic variable stars // Astr. Rep. 2015. Vol. 59. P. 191.



ЭФФЕКТ ЯРКОВСКОГО И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ АСТЕРОИДОВ

Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

В лекции дается описание эффекта Ярковского. Рассматриваются суточный и сезонный эффекты и их зависимость от наклона оси вращения астероида. Описывается влияние эффекта Ярковского— О'Кифа—Радзиевского—Пэддэка (YORP-эффект) на угловую скорость вращения астероида. Приводятся сведения о методах обнаружения влияния эффекта Ярковского и YORP-эффекта по результатам наблюдений. Обсуждаются проявления эффекта Ярковского в наблюдаемом распределении орбит астероидов: сближение орбит астероидов в семействах, пары астероидов на близких орбитах, эволюционное расширение семейств астероидов, распределение астероидов по угловой скорости вращения и направлению оси вращения. Формулируются задачи для будущих исследований.

THE YARKOVSKY EFFECT AND DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROIDS

E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

The Yarkovsky effect is described in the lecture. Diurnal and season effects as well as their dependence on obliquity of axis of rotation of an asteroid are considered. Effect of the Yarkovsky—O'Keefe— Radzievskii—Paddack effect (YORP-effect) on rotation rate of an asteroid is described. Data about observational methods of the Yarkovsky and YORP effects detection are given. Evidences of the Yarkovsky effect in observed distribution of asteroids are discussed. These are orbital convergence in asteroid families, pairs of asteroids on close orbits, it is spreading of asteroids families, it is distribution of rotation rate and obliquity for asteroids. The goals for future works are previewed.

Введение

Иван Осипович Ярковский — русский ученый польского происхождения, инженер. В 1901 г. написал в брошюре «Плотность све-

[ⓒ] Кузнецов Э. Д., 2018

⁶⁰

тового эфира и оказываемое им сопротивление движению» [1, 2], что нагреваемая солнечным теплом вращающаяся в прямом направлении планета должна испытывать трансверсальное ускорение. И. О. Ярковский оценил величину рассмотренного эффекта, но его работа не нашла отклика и была забыта на несколько десятилетий.

В 1951 г. Э. Эпик [3] ввел работу И. О. Ярковского в научный оборот. Практически одновременно с этим в СССР В. В. Радзиевский [4] с коллегами рассматривали влияние светового давления на движение вращающегося тела, имеющего неоднородную поверхность, — участки поверхности тела различались значениями альбедо. Однако наблюдения не подтверждали наличия заметной вариации альбедо поверхности астероидов. Дальнейший толчок задаче придали С. Пэддэк [5] и Дж. О'Киф, которые рассмотрели тело нерегулярной формы и показали, что под действием солнечного излучения возможно изменение скорости осевого вращения тела. Был сделан вывод, что этот эффект является причиной наблюдаемого избытка быстровращающихся объектов среди небольших асимметричных астероидов, приводящего к их разрыву центробежными силами. Окончательно формулировка задачи и терминология были установлены в работе Д. Рабинкэма [6], который и предложил название «эффект Ярковского—О'Кифа—Радзиевского—Пэддэка» (YORP-эффект).

В 1965 г. группа В. В. Радзиевского рассмотрела задачу о движении синхронного спутника планеты под влиянием светового давления [7]. Идеи, изложенные в этой работе, позднее были использованы при рассмотрении задачи об эволюции двойных астероидов под влиянием светового давления [8]. Рассмотренный эффект получил название «binary YORP-эффект» или BYORP-эффект.

В конце 1990-х гг. начался современный этап исследований динамической эволюции малых тел Солнечной системы с учетом эффекта Ярковского и YORP-эффекта. Подробное описание этих эффектов дано в работах [9–11].

В настоящей работе будут приведены основные результаты, полученные в ходе исследования эффектов Ярковского и YORP, а также будут сформулированы задачи для будущих исследований.

Теория эффектов Ярковского и YORP

Рассмотрим простые аналитические модели эффектов Ярковского и YORP, описывающие основные качественные свойства этих эффектов.

Эффект Ярковского

Поглощенное и непосредственно отраженное солнечное излучение не приводит к долгопериодическим динамическим эффектам [12]. Эффект Ярковского определяется тепловым излучением тела, имеющего ненулевую тепловую инерцию. Для корректного учета влияния эффекта Ярковского требуется использовать теплофизическую модель тела. К счастью, оценка влияния эффекта Ярковского слабо зависит от формы объекта, поэтому даже простая сферическая модель позволяет получить удовлетворительные результаты.

Влияние эффекта Ярковского проявляется во всех элементах орбиты. Особенностью эффекта Ярковского является то, что он приводит к вековым возмущениям большой полуоси орбиты. Полагая, что сферическое тело движется по круговой орбите и вращается вокруг своей оси, получим среднюю скорость векового изменения большой полуоси орбиты *a*, складывающуюся под влиянием двух эффектов [11]:

суточного

$$\left(\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{diurnal}} = -\frac{8}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_{\omega}, \Theta_{\omega}) \cos\gamma \tag{1}$$

и сезонного

$$\left(\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{seasonal}} = \frac{4}{9} \frac{\alpha \Phi}{n} W(R_n, \Theta_n) \sin^2 \gamma \,. \tag{2}$$

Здесь

$$\Phi = \frac{\pi R^2 F}{mc},$$

где R — радиус тела; F — поток излучения Солнца на гелиоцентрическом расстоянии a; m — масса тела; c — скорость света; n — среднее движение тела; $\alpha = 1 - A$, причем A — сферическое альбедо [13]. Параметр Φ характеризует физические эффекты, связанные с поглощением или рассеянием света поверхностью тела. Обычно полагают $\Phi \propto 1/R$.

Более важно то, что и суточный, и сезонный эффекты Ярковского зависят от наклона оси вращения астероида γ . Величина суточного эффекта пропорциональна $\cos \gamma$ и может вызывать как увеличение, так и уменьшение большой полуоси орбиты, достигая максимума при значениях наклона $\gamma = 0$ и 180° (см. уравнение (1)). Вклад сезонного эффекта пропорционален $\sin^2 \gamma$ (см. уравнение (2)), поэтому

он всегда ведет к увеличению большой полуоси, достигая максимума при $\gamma=90^\circ.$ Амплитуда возмущений пропорциональна функции

$$W(R_{\nu}, \Theta_{\nu}) = \frac{k_1(R_{\nu})\Theta_{\nu}}{1 + 2k_2(R_{\nu})\Theta_{\nu} + k_3(R_{\nu})\Theta_{\nu}^2}, \qquad (3)$$

зависящей от теплофизических параметров тела и частоты ν , которая равна частоте вращения тела ω для суточного эффекта и среднему движению n для сезонного. Термические параметры зависят от свойств поверхности: коэффициента теплопроводности K, теплоемкости C, плотности ρ . Эти параметры вместе с частотой ν не входят явно в уравнение (3). При решении задачи диффузии тепла и при определении возмущений орбиты они комбинируются в два важных параметра. Первый — длина

$$\ell_{\nu} = \sqrt{\frac{K}{\rho C \nu}},$$

соответствующая характерной глубине слоя, в котором с частотой ν происходит переизлучение поглощенного тепла. Безразмерный радиус тела R_{ν} в (3) есть

$$R_{\nu} = \frac{R}{\ell_{\nu}} \,.$$

Второй параметр — тепловая инерция поверхности

$$\Gamma = \sqrt{K\rho C} -$$

определяет безразмерный тепловой параметр Θ_{ν} в (3):

$$\Theta_{\nu} = \frac{\Gamma \sqrt{\nu}}{\varepsilon \sigma T_{\star}^3} \,,$$

где ε — коэффициент теплового излучения поверхности; σ — постоянная Стефана—Больцмана; T_{\star} — температура подсолнечной точки ($\varepsilon \sigma T_{\star}^4 = \alpha F$).

В пределе большого тела, когда $R \gg \ell_{\nu}$, все три коэффициента k в (3) примерно равны 1/2 [14]. Следовательно, для больших тел функция W не зависит от размера R:

$$W \simeq W(\Theta_{\nu}) = -\frac{0.5\Theta_{\nu}}{1+\Theta_{\nu}+0.5\Theta_{\nu}^2}.$$
63

Отсюда получаем, что эффект Ярковского максимален, когда $\Theta_{\nu} \simeq 1$ (при малых или больших значениях Θ_{ν} эффект становится пренебрежимо малым). В этом случае вековые возмущения большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского,

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} \propto \frac{1}{R} \,. \tag{4}$$

Для небольших астероидов, движущихся в окрестности Земли и в главном поясе, $\Theta_{\omega} \sim 1$, а $\Theta_n \ll 1$ [11]. Из этого следует, что суточный эффект Ярковского доминирует над сезонным.

YORP-эффект

YORP-эффект является эквивалентом эффекта Ярковского, заключающимся в возрастании момента вращения астероида под влиянием солнечного излучения. Поглощенное астероидом излучение не приводит к вековым эффектам орбитального движения [15]. Однако рассеянное в оптическом диапазоне излучение и переизлученное тепловое на длительных интервалах времени вносят вклад в динамику осевого вращения. Причем рассеяние и переизлучение по-разному влияют на осевое вращение. Вдобавок тепловая компонента имеет временную задержку, связанную с конечным значением тепловой инерции поверхности.

YORP-эффект пренебрежимо мал для тел простой формы (например, для эллипсоида вращения [15]) и проявляется для тел сложной и неправильной формы [5]. В качестве нулевого приближения для описания YORP-эффекта можно выбрать следующую модель:

- пренебрегаем тепловой инерцией поверхности;
- предполагаем, что отражение и переизлучение происходят изотропно и удовлетворяют закону Ламберта;
- рассматриваем тела, поверхность которых можно аппроксимировать многогранниками или сферическими функциями;
- полагаем, что тело вращается относительно главной оси инерции;

— пренебрегаем взаимным затенением элементов поверхности. После осреднения по орбитальному и суточному периодам долгопериодические изменения угловой скорости осевого вращения ω и наклона оси вращения γ принимают вид [11]

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\Lambda}{C} \sum_{n \ge 1} A_n P_{2n}(\cos\gamma) \,, \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t} = \frac{\Lambda}{C\omega} \sum_{n \ge 1} B_n P_{2n}^1(\cos\gamma) \,. \tag{6}$$

Здесь

$$\Lambda = \frac{2FR^3}{3c},$$

C — момент инерции, соответствующий оси вращения (наиболее короткая ось тензора инерции), $P_{2n}(\cos \gamma)$ — полиномы Лежандра четных степеней, $P_{2n}^1(\cos \gamma)$ — присоединенные функции Лежандра. Отметим свойства полиномов Лежандра четных степеней и соответствующих им присоединенных функций Лежандра первого порядка в уравнениях (5) и (6) относительно замены $\gamma \leftrightarrow \pi - \gamma$ (прямое и обратное отражение): скорость вращения симметрична относительно этой замены переменных, наклон оси вращения — антисимметричен. Поскольку полином Лежандра второй степени обращается в нуль при $\gamma \approx 55^{\circ}$ и $\gamma \approx 125^{\circ}$, как следует из уравнения (5), влияние YORP-эффекта на угловую скорость вращения ω при указанных наклонах γ становится пренебрежимо малым [11].

Поскольку $C \propto R^5$, из уравнений (5) и (6) следует, что

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \propto \frac{1}{R^2}, \qquad \frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t} \propto \frac{1}{R^2}.$$
 (7)

Это указывает на важное различие между эффектами Ярковского и YORP (сравним уравнения (4) и (7)) и означает, что малые астероиды под влиянием YORP-эффекта могут приобретать высокую угловую скорость вращения. Однако для слишком малых тел эффект Ярковского перестает действовать. Когда характерный радиус R становится сравнимым с характерной глубиной слоя ℓ_{ω} , астероид прогревается полностью и разность температур на его поверхности становится очень малой.

BYORP-эффект

Впервые YORP-эффект применительно к двойному астероиду (BYORP-эффект) был рассмотрен в работе [8]. Было показано, что синхронно вращающийся асимметричный спутник астероида подвержен действию результирующей силы, направленной по касательной к его орбите. Поскольку спутник находится в спин-орбитальном резонансе 1:1 и вращается синхронно, то он периодически ускоряется и тормозится, двигаясь по раскручивающейся или скручивающейся спирали соответственно. Необходимым условием проявления

ВYORP-эффекта является синхронное вращение хотя бы одного тела. BYORP-эффект должен приводить или к сближению астероидов по скручивающейся спирали, или к разрыву двойной системы. В работе [16] показано, что характерное время существования двойных астероидов в главном поясе или среди астероидов, сближающихся с Землей (AC3), составляет 100 тыс. лет.

Детальная аналитическая модель BYORP-эффекта разработана в [17] и [18]. Выражение для силы светового давления разлагается в ряд Фурье в системе координат, жестко связанной со спутником астероида. Этот подход позволяет рассматривать тела произвольной формы и выполнять осреднение по времени. Основной результат — возможность описания BYORP-эффекта с помощью «BYORPкоэффициента» B, однозначно вычисляемого при задании модели, представляющей форму объекта. Если спутник астероида движется по орбите, близкой к круговой, тогда влияние BYORP-эффекта описывается простыми эволюционными уравнениями для большой полуоси a и эксцентриситета e (в приближении $e \ll 1$):

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} = \frac{FB}{c\eta'} \frac{a^{3/2}}{m_2\sqrt{\mu}}\,,\tag{8}$$

$$\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = -\frac{FB}{4c\eta'}\frac{ea^{3/2}}{m_2\sqrt{\mu}}\,.\tag{9}$$

Здесь F — поток излучения Солнца на гелиоцентрическом расстоянии, равном большой полуоси гелиоцентрической орбиты астероида $a', \eta' = \sqrt{1 - {e'}^2}, e'$ — эксцентриситет гелиоцентрической орбиты астероида, c — скорость света, $\mu = G(m_1 + m_2)$ — гравитационный параметр двойной системы, G — гравитационная постоянная, m_1 , m_2 — массы астероида и его спутника соответственно. Как следует из уравнений (8) и (9), если орбита расширяется (B > 0), тогда эксцентриситет стабилизируется, в противном случае эксцентриситет растет. Для эллиптических орбит ситуация усложняется и необходимо учитывать дополнительные слагаемые в разложении силы светового давления в ряд Фурье [17].

Коэффициент *В* зависит от формы тела и наклона плоскости орбиты двойного астероида к плоскости гелиоцентрической орбиты. Примем, что мгновенное значение силы светового давления $\mathbf{F}_{SPR}(M,M')$, действующей на спутник, зависит от средней аномалии второго астероида M на астероидоцентрической орбите и средней аномалии двойного астероида M' на гелиоцентрической орбите.

В этом случае для нахождения коэффициента *В* необходимо выполнить двукратное осреднение по средним аномалиям *M*, *M'* и найти проекцию на направление орбитального движения двойного астероида (**t** — соответствующий единичный вектор):

 $B = \mathbf{t} \cdot \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\mathbf{F}_{SPR}}{P(r_s)} \, \mathrm{d}M \, \mathrm{d}M', \tag{10}$

где

$$P(r_s) = \frac{F}{c} \left(\frac{a'}{r_s}\right)^2$$

есть давление света на единицу площади тела на гелиоцентрическом расстоянии r_s . BYORP-коэффициент B имеет размерность площади, и его можно нормировать, разделив на квадрат эффективного радиуса спутника астероида. Коэффициент B является функцией различных физических параметров, описывающих альбедо, топографию поверхности и ее теплофизические свойства. Однако наиболее существенные изменения коэффициента B связаны с вариациями наклона плоскости орбиты второго тела относительно плоскости гелиоцентрической орбиты двойного астероида. При изменении наклона от 0 до 180° коэффициент B плавно изменяется, переходя от положительных значений к отрицательным и обратно. Предполагается, что при захвате в синхронное вращение вероятность того, что коэффициент B будет иметь положительное или отрицательное значение, близка к 50 %.

Мы рассмотрели изолированный BYORP-эффект. Учет дополнительных эволюционных эффектов в системах двойных астероидов может привести к качественным изменениям характера эволюции. В частности, в работе [19] показано, что влияние приливов может компенсировать уменьшение большой полуоси орбиты синхронно вращающегося спутника астероида, вызываемого BYORP-эффектом при отрицательном значении коэффициента B, если первый астероид вращается с угловой скоростью большей, чем среднее движение спутника астероида. В этом случае под влиянием приливов большая полуось орбиты спутника должна увеличиваться. Основываясь на теории диссипации энергии в астероидах, имеющих строение типа «груда булыжников» (rubble pile), показано, что для всех двойных астероидов со спутниками на синхронных орбитах с коэффициентом B < 0 должен наблюдаться переход к устойчивому равновесию, в котором влияние этих эффектов уравновешивается. В этом случае

действие BYORP-эффекта приводит к возможности существования двойных астероидов на длительных интервалах времени.

Наблюдения проявлений эффектов Ярковского и YORP

Точные наблюдения астероидов позволяют фиксировать проявления эффектов Ярковского и YORP.

Проявления эффекта Ярковского по данным наблюдений

Наблюдения астероидов не позволяют непосредственно измерить вековое изменение большой полуоси орбиты da, обусловленное эффектом Ярковского. Но возникающее, как следствие, приращение среднего движения

$$\mathrm{d}n = -\frac{3}{2}\frac{n}{a}\,\mathrm{d}a$$

приводит к дополнительному сдвигу положения тела на орбите, пропорциональному t^2 , где t — интервал времени между эпохами наблюдений. Аналогичная зависимость величины проявления действия эффекта от времени справедлива и для YORP-эффекта.

Первыми астероидами, для которых удалось экспериментально подтвердить действие эффекта Ярковского, стали (6489) Golevka [20] в 2003 г. и (152563) 1992 ВF [21] в 2008 г. В табл. 1 приведен список астероидов для которых получены оценки влияния эффекта Ярковского по результатам наблюдений по состоянию на декабрь 2014 г. [11]. В табл. 1 включены астероиды, для которых отношение сигнал—шум SNR больше 5. Здесь $\bar{r} = a\sqrt{1-e^2}$ — среднее взвешенное по потоку излучения расстояние от Солнца, D — оценка диаметра астероида, da/dt — оценка векового изменения большой полуоси, Δt — интервал времени, на котором оценивалось влияние эффекта Ярковского.

К настоящему времени влияние эффекта Ярковского оценено для более чем 70 астероидов [22]. По результатам обработки наблюдений астероидов, выполняемых астрометрическим спутником Gaia, предполагается оценить влияние эффекта Ярковского для 64 астероидов [23].

Таблица 1. Список астероидов, для которых подтверждено влияние эффекта Ярковского

Астероид	\overline{r} , a. e.	D, м а	$da/dt \times 10^{-4}$, а. е./(млн лет)	SNR	$\Delta t,$ годы
(101955) Bennu (2340) Hathor (152563) 1992 BF (2009) BD (2005) ES70 (4179) Toutatis (2062) Aten (1999) MN (6489) Golevka (1862) Apollo (2006) CT (3908) Nyx (2000) PN8 (162004) 1991 VE	1.10 0.75 0.87 1.01 0.70 1.96 2.01 1.22 1.07 1.71 1.22 0.67	493 210 510 4 61 2800 1300 175 280 4400 119 1000 130 827	$\begin{array}{c} -18.95 \pm 0.10 \\ -17.38 \pm 0.70 \\ -17.38 \pm 0.70 \\ -11.82 \pm 0.56 \\ -489 \pm 35 \\ -68.9 \pm 7.9 \\ -3.75 \pm 0.45 \\ -6.60 \pm 0.80 \\ 54.6 \pm 6.8 \\ -4.52 \pm 0.60 \\ -1.58 \pm 0.24 \\ -47.6 \pm 7.7 \\ 9.6 \pm 1.7 \\ 49.3 \pm 8.7 \\ 19.2 \pm 3.6 \end{array}$	$194.6 \\ 24.9 \\ 21.0 \\ 13.9 \\ 8.7 \\ 8.4 \\ 8.3 \\ 8.1 \\ 7.5 \\ 6.5 \\ 6.2 \\ 5.8 \\ 5.7 \\ 5.3 \\ 1000$	$\begin{array}{r} 1999-2013\\ 1976-2014\\ 1953-2011\\ 2009-2011\\ 2005-2013\\ 1934-2014\\ 1995-2014\\ 1999-2014\\ 1991-2011\\ 1930-2014\\ 1991-2014\\ 2000-2014\\ 2000-2014\\ 1954-2014 \end{array}$

Проявления YORP-эффекта по данным наблюдений

Анализ популяции малых астероидов показывает, что YORPэффект влияет на эволюцию их угловых скоростей вращения и наклонов осей вращения. Однако по результатам наблюдений отдельных астероидов пока удается определить только вековые эффекты изменения угловой скорости вращения ω . В простейшем случае определить влияние YORP-эффекта на угловую скорость вращения ω можно на основе анализа измерений фазы φ . Если частота f линейно меняется со временем

$$f = f_0 + \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}t\,,$$

то фаза φ будет изменяться по квадратичному закону

$$\varphi = \varphi_0 + f_0 t + \frac{1}{2} \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} t^2.$$

Сложность состоит в том, что вариации частоты f_0 со временем приводят к линейному сдвигу фазы даже в том случае, когда YORP-эффект не действует. Если исключить корреляцию между f_0 и df/dt, то условием фиксации YORP-эффекта на интервале времени t станет изменение фазы

$$\Delta \varphi \simeq \frac{1}{8} \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} t^2.$$

Таблица 2. Список астероидов, для которых подтверждено влияние YORP-эффекта

Астероид	$\frac{\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t\times10^{-8}}{(\mathrm{cyr.})^{-2}},$	<i>Н</i> , зв. вел.	<i>Р</i> , часы	γ , град.	\overline{r} , a. e.	Ссылки
(54509) YORP (25143) Itokawa (1620) Geographos (1862) Apollo (3103) Eger (161989) Cacus	$\begin{array}{c} 350\pm 35\\ 3.5\pm 0.4\\ 1.2\pm 0.2\\ 5.5\pm 1.2\\ 1.4\pm 0.6\\ 1.9\pm 0.3 \end{array}$	22.6 18.9 15.6 16.3 15.3 17.5	$\begin{array}{c} 0.203 \\ 12.132 \\ 5.223 \\ 3.065 \\ 5.710 \\ 3.755 \end{array}$	$ 173 \\ 178 \\ 152 \\ 162 \\ 176 \\ 178 \\ 178 $	$\begin{array}{c} 0.98 \\ 1.27 \\ 1.18 \\ 1.22 \\ 1.32 \\ 1.10 \end{array}$	$\begin{matrix} [24,\ 25] \\ [26] \\ [27] \\ [28,\ 29] \\ [30] \\ [31] \end{matrix}$

К настоящему времени надежно определено изменение угловой скорости осевого вращения $d\omega/dt$, вызываемое YORP-эффектом, для шести астероидов (табл. 2). Здесь H — абсолютная звездная величина астероида, P — период осевого вращения.

BYORP-эффект

Выявить влияние BYORP-эффекта на эволюцию двойных астероидов по результатам наблюдений пока не удалось. В настоящее время реализуется несколько кампаний по наблюдению двойных астероидов с целью оценки влияния как «чистого» BYORP-эффекта, так и смешанных эффектов. Для выявления BYORP-эффекта требуется определить приращение средней аномалии спутника астероида, связанное с изменением большой полуоси его орбиты. Этот дрейф будет пропорционален квадрату времени. Относительное изменение ΔM средней аномалии M спутника астероида, обусловленное BYORP-эффектом за время t, равно

$$a\,\Delta M = -\frac{3}{4}n\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}t^2\,,$$

где n — среднее движение спутника, производная da/dt берется из уравнения (7). Соответственно задержка момента наступления покрытия астероида составит

$$\delta t \simeq -\frac{3}{4} \frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} \frac{1}{a} t^2 \,.$$

Одним из наиболее существенных является результат, полученный в работе [32]: в течение 17-летнего периода наблюдений двойного астероида (175706) 1996 FG3 не обнаружен дрейф, соответствующий BYORP-эффекту.

Приложения эффекта Ярковского

Определение физических свойств астероидов

Эффект Ярковского может быть использован как инструмент для исследования физических свойств астероидов. Это возможно, поскольку величина дрейфа больших полуосей орбит астероидов зависит от их физических свойств: в первую очередь от наклона оси вращения, размера и массы, а также от тепловых и отражательных свойств поверхности и угловой скорости вращения. Высокоточные наблюдения позволяют определять форму и направление вращения астероидов.

Сведения о параметрах, характеризующих эффект Ярковского, позволяют получить статистическое описание популяции астероидов. Оказалось, что в большинстве случаев da/dt < 0 (см., например, табл. 1), 78 % астероидов имеют обратное вращение [11]. Большинство астероидов, для которых определена величина дрейфа большой полуоси, обусловленная эффектом Ярковского, относятся к астероидам, сближающимся с Землей. Эти астероиды выбрасываются в область движения планет земной группы из главного пояса после того, как они попадают или в зону векового резонанса ν_6 , или в зону резонанса средних движений 1:3 с Юпитером. Область векового резонанса ν_6 находится вблизи внутренней границы пояса астероидов, следовательно, для попадания в нее дрейф большой полуоси орбиты астероида должен быть отрицательным da/dt < 0, а осевое вращение астероида — обратным. Орбиты астероидов, приходящих в зону резонанса 1:3, могут иметь как положительный, так и отрицательный знак дрейфа большой полуоси, в этом случае между астероидами с прямым и обратным направлениями осевого вращения должен наблюдаться паритет [33].

Оценка потенциальной опасности падения астероидов

Позиционные наблюдения астероидов позволяют получать надежные орбиты, которые могут использоваться для оценки вероятности столкновения с Землей потенциально опасных объектов. После этого наступает второй этап исследований — получение данных о физических параметрах астероидов, чтобы в модели возмущающих сил учесть негравитационные возмущения, включая эффект Ярковского. Сейчас в рамках решения этой задачи наиболее активно исследуются астероиды (101955) Bennu, (29075) 1950 DA, (99942) Apophis.

Источник метеоритов

Вопрос о происхождении метеоритов, обнаруживаемых на Земле, долгое время оставался нерешенным. Анализ орбит метеороидов показывал, что большинство из этих объектов пришли к Земле из главного пояса астероидов. Теория медленного дрейфа астероидов из главного пояса в область движения планет земной группы под влиянием эффекта Ярковского этого объяснить не могла, так как для этого требовались нереальные предположения о теплофизических свойствах объектов или о скорости их осевого вращения. В работе [34] был предложен механизм быстрой доставки астероидов главного пояса к Земле. Астероиды, двигаясь в главном поясе, сталкиваются и дробятся на более мелкие тела (предшественники метеороидов). Чем меньше размеры этих тел, тем более сильное влияние эффекта Ярковского они испытывают. Под действием эффекта Ярковского они дрейфуют к областям векового резонанса ν_6 , расположенным у внутренней границы главного пояса, или резонанса средних движений с Юпитером 1:3 и выбрасываются в окрестности орбит планет земной группы. После этого, в течение относительно короткого времени, метеороиды сталкиваются с планетами.

Оценка возраста молодых семейств и пар астероидов: сближение орбит

Эффект Ярковского используется для оценки возраста относительно молодых (до 10 млн лет) семейств астероидов [35, 36]. Для этих семейств проявления детерминированного хаоса еще малы. Исходя из предположения, что семейства сформировались в результате распада и дробления крупных родительских тел, анализируя дрейф долготы восходящего узла и долготы перицентра, можно оценить интервал времени, прошедший с момента, когда орбиты всех тел были максимально близки. Скорость движения узлов и перицентров существенно зависит от значения большой полуоси, которая может изменяться вековым образом под влиянием эффекта Ярковского.

Аналогичный подход можно применить и для исследования пар астероидов на близких орбитах. Принимая во внимание эффект Ярковского, можно оценить время, когда оба астероида находились в пределах сферы Хилла родительского тела [37, 38].
Оценка возраста старых семейств астероидов: рассеяние орбит

Для определения возраста старых (старше 10 млн лет) семейств астероидов метод поиска момента максимального сближения орбит неприменим вследствие проявления детерминированного хаоса в динамической эволюции орбит: динамическая система «забывает» свое исходное состояние. Для оценки возраста и описания свойств семейств астероидов используют собственные элементы орбит [39] (заметим, что из наблюдений определяются оскулирующие элементы [40]), являющиеся квазиинтегралами уравнений движения [41]. В то время как детерминированный хаос, проявляющийся на длительных интервалах времени, приводит к медленной диффузии собственных эксцентриситетов *е*_{*P*} и наклонов *i*_{*P*}, эффект Ярковского является основным фактором, изменяющим значения собственных больших полуосей *а*_{*P*} орбит астероидов километрового размера. В зависимости от направления осевого вращения большие полуоси орбит либо увеличиваются (прямое вращение), либо уменьшаются (обратное вращение). С уменьшением размера астероида скорость изменения большой полуоси растет, что приводит к формированию V-образного распределения астероидов на диаграмме «абсолютная звездная величина H — собственная большая полуось a_P » (см. рисисунок,a).



Семейство Erigone [11]

На рисунке показаны распределение 432 астероидов семейства Erigone (черные точки) на диаграмме « $H - a_P$ » (a) и зависимость 73

числа астероидов от значения собственной большой полуоси a_P при $H = 16^m$ (b). Звездочкой отмечено положение астероида (163) Erigone. Серые линии (a) и стрелки (b) соответствуют уравнению $0.2H = \lg (|a_P - a_0|/C)$ для $a_0 = 2.3705$ а. е. при трех значениях C = 1, 2, 3. Оценивая скорость удаления собственных больших полуосей a_P от a_0 для различных значений H, которые коррелируют с размером астероидов, можно статистически оценить время, прошедшее от начала формирования семейства. Рассмотренный метод позволяет оценивать возраст семейств астероидов на интервалах времени от нескольких десятков миллионов до 2—3 млрд лет.

Приложения YORP- и BYORP-эффектов

Распределение угловых скоростей вращения и наклонов осей вращения астероидов

Распределение частот вращения больших астероидов главного пояса удовлетворяет распределению Максвелла со средним значением периодов 8—12 ч. Однако для астероидов, имеющих размер менее 20 км, наблюдается заметное отклонение от этого распределения с большим количеством астероидов, имеющих очень медленные или очень быстрые скорости вращения. Заметим, что для AC3 также наблюдается аналогичное распределение угловых скоростей вращения. После исключения из рассмотрения двойных астероидов распределение угловых скоростей вращения астероидов главного пояса километрового размера становится равномерным [42].

Подобное распределение угловых скоростей вращения можно объяснить влиянием YORP-эффекта. Экстремальные значения скорости вращения (очень малые или очень большие) зависят от размеров астероидов. Астероиды, эволюционирующие с увеличением скорости вращения, теряют массу в процессе разрушения под действием центробежной силы (модель «груды булыжников»!). Астероиды, имеющие слишком малую скорость углового вращения, переходят в режим хаотического кувыркания, при котором угловая скорость вращения остается малой. В результате столкновений астероидов скорости вращения могут изменяться. В этом случае дальнейшая эволюция скорости вращения будет идти по одному из двух описанных сценариев: либо расти до предельных значений, приводящих к разрушению астероидов, либо оставаться малой.

Распределение наклонов осей вращения больших астероидов главного пояса почти изотропное с небольшим избытком тел, вращающихся в прямом направлении. С другой стороны, полюса малых (менее 30 км) астероидов ориентированы в направлении северного и южного полюсов эклиптики. Это проявление YORP-эффекта, под влиянием которого наклоны вращения стремятся к экстремальным значениям [43].

Формирование и долговременная эволюция двойных астероидов

ВYORP-эффект играет важную роль в эволюции двойных астероидов. Весьма вероятно, что большинство наблюдаемых двойных астероидов с компонентами малой массы, имеющими строение «груды булыжников», находятся в равновесном состоянии, где влияние BOYRP-эффекта и приливных сил уравновешено.

Среди нерешенных задач, связанных с динамической эволюцией двойных астероидов, можно отметить исследование особенностей миграции полюса орбиты в двойной системе. В работе [8] была выдвинута идея, что эта эволюция происходит аналогично влиянию YORP-эффекта. В развитие этой идеи в работе [44] было показано, что наклон орбиты должен мигрировать к одному из асимптотических значений: 0, 90 или 180°. Учет зависимости BYORPкоэффициента B от наклона и, следовательно, возможности перемены знака коэффициента B приводит к выводу о том, что углы наклона должны концентрироваться в промежутках между асимптотическими значениями [16]. В дополнение отметим результат работы [18], в которой показано, что сжатие центрального астероида не должно вызывать изменений наклона орбиты астероида, являющегося спутником. Очевидно, что пока нет полного понимания особенностей эволюции орбит в системах двойных астероидов.

Заключение

Процесс исследования эффектов Ярковского и YORP, а также проявлений этих эффектов в динамической эволюции малых тел еще далек от завершения. Количество астероидов, для которых будут определены параметры, описывающие влияние этих эффектов, будет расти, что позволит уточнить вклад каждого из эффектов в долгопериодическую эволюцию астероидов.

Поиск проявлений BYORP-эффекта в системах двойных астероидов (обнаружение сигнала от BYORP-эффекта или подтверждение его отсутствия) позволит уточнить представления об эволюции двойных астероидов, особенностях их образования, физических параметрах и времени жизни.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и гранта РФФИ № 18-02-00015.

Библиографические ссылки

- 1. *Ярковский И. О.* Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. — Брянск : Тип. Юдина, 1901.
- 2. Beekman G. I. O. Yarkovsky and the Discovery of 'his' Effect // Journal for the History of Astronomy. 2006. Vol. 37. P. 71-86.
- Opik E. J. Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter // Proc. R. Irish Acad. Sect. A. – 1951. – Vol. 54. – P. 165–199.
- Радзиевский В. В. Механизм разрушения астероидов и метеоритов // Астрон. журн. — 1952. — Т. 29. — С. 162—170.
- Paddack S. J. Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure. // J. Geophys. Res. – 1969. – Vol. 74. – P. 4379–4381.
- Rubincam D. P. Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids // Icarus. - 2000. - Vol. 148. - P. 2–11.
- Виноградова В. П., Радзиевский В. В. Об ускорении спутников Марса и стабилизации орбит искусственных спутников Земли // Астрон. журн. — 1965. — Т. 42. — С. 424.
- Ćuk M., Burns J. A. Effects of thermal radiation on the dynamics of binary NEAs // Icarus. - 2005. - Vol. 176. - P. 418-431.
- Bottke W. F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D. P., Broz M. The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids // Asteroids III / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. – 2002. – P. 395–408.
- Bottke W. F., Jr., Vokrouhlický D., Rubincam D. P., Nesvorný D. The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2006. — Vol. 34. — P. 157— 191.
- 11. Vokrouhlický D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al. The Yarkovsky and YORP Effects / D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, S. R. Chesley et al. //

Asteroids IV / ed. by P. Michel, F. E. De
Meo, W. F. Bottke. - 2015. - P. 509–531.

- 12. Vokrouhlický D., Milani A. Direct solar radiation pressure on the orbits of small near-Earth asteroids: observable effects? // Astron. Astrophys. 2000. Vol. 362. P. 746—755.
- Vokrouhlický D., Bottke W. F., Jr. The Yarkovsky thermal force on small asteroids and their fragments. Choosing the right albedo // Astron. Astrophys. - 2001. - Vol. 371. - P. 350-353.
- Rubincam D. P. Asteroid orbit evolution due to thermal drag // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. P. 1585-1594.
- Breiter S., Michalska H., Vokrouhlický D., Borczyk W. Radiation-induced torques on spheroids // Astron. Astrophys. — 2007. — Vol. 471. — P. 345— 353.
- Cuk M. Formation and Destruction of Small Binary Asteroids // Astrophys. J. Lett. 2007. Vol. 659. P. L57-L60.
- 17. McMahon J., Scheeres D. Secular orbit variation due to solar radiation effects: a detailed model for BYORP // Celest. Mech. Dyn. Astr. 2010. Vol. 106. P. 261–300.
- McMahon J., Scheeres D. Detailed prediction for the BYORP effect on binary near-Earth Asteroid (66391) 1999 KW4 and implications for the binary population // Icarus. - 2010. - Vol. 209. - P. 494-509.
- Jacobson S. A., Scheeres D. J. Long-term Stable Equilibria for Synchronous Binary Asteroids // Astrophys. J. Lett. - 2011. - Vol. 736. - P. L19. 1104.4671.
- Chesley S. R., Ostro S. J., Vokrouhlický D. et al. Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka // Science. - 2003. - Vol. 302. - P. 1739-1742.
- Vokrouhlický D., Chesley S. R., Matson R. D. Orbital Identification for Asteroid 152563 (1992 Bf) Through the Yarkovsky Effect // Astron. J. – 2008. – Vol. 135. – P. 2336–2340.
- 22. Faggioli L., Del Vigna A., Milani A. et al. Detection of Yarkovsky effect and solar radiation pressure on Near-Earth Asteroids // AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts : AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. - 2016. - Vol. 48. - P. 311.07.
- Mouret S., Mignard F. Detecting the Yarkovsky effect with the Gaia mission: list of the most promising candidates // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2011. Vol. 413. P. 741–748.
- 24. Lowry S. C., Fitzsimmons A., Pravec P. et al. Direct Detection of the Asteroidal YORP Effect // Science. 2007. Vol. 316. P. 272.

- Taylor P. A., Margot J.-L., Vokrouhlický D. et al. Spin Rate of Asteroid (54509) 2000 PH5 Increasing Due to the YORP Effect // Science. 2007. Vol. 316. P. 274.
- Lowry S. C., Weissman P. R., Duddy S. R. et al. The internal structure of asteroid (25143) Itokawa as revealed by detection of YORP spin-up // Astron. Astrophys. - 2014. - Vol. 562. - P. A48.
- Durech J., Vokrouhlický D., Kaasalainen M. et al. Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos // Astron. Astrophys. — 2008. — Vol. 489. — P. L25—L28.
- Durech J., Vokrouhlický D., Kaasalainen M. et al. New photometric observations of asteroids (1862) Apollo and (25143) Itokawa an analysis of YORP effect // Astron. Astrophys. 2008. Vol. 488. P. 345-350.
- Kaasalainen M., Durech J., Warner B. D. et al. Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques // Nature. — 2007. — Vol. 446. — P. 420—422.
- Durech J., Vokrouhlický D., Baransky A. R. et al. Analysis of the rotation period of asteroids (1865) Cerberus, (2100) Ra-Shalom, and (3103) Eger - search for the YORP effect // Astron. Astrophys. - 2012. - Vol. 547. -P. A10. 1210.2219.
- Durech J., Vokrouhlicky D., Pravec P. et al. YORP and Yarkovsky effects in asteroids (1685) Toro, (2100) Ra-Shalom, (3103) Eger, and (161989) Cacus // ArXiv e-prints. — 2017. 1711.05987.
- Scheirich P., Pravec P., Jacobson S. A. et al. The binary near-Earth Asteroid (175706) 1996 FG₃ An observational constraint on its orbital evolution // Icarus. 2015. Vol. 245. P. 56-63. 1406.4677.
- Morbidelli A., Vokrouhlický D. The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids // Icarus. - 2003. - Vol. 163. - P. 120-134.
- 34. Vokrouhlický D., Farinella P. Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies // Nature. 2000. Vol. 407. P. 606–608.
- Nesvorný D., Bottke W. F., Jr., Dones L., Levison H. F. The recent breakup of an asteroid in the main-belt region // Nature. 2002. Vol. 417. P. 720-771.
- Nesvorný D., Bottke W. F., Levison H. F., Dones L. Recent Origin of the Solar System Dust Bands // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 591. – P. 486– 497.
- Vokrouhlický D., Nesvorný D. Pairs of asteroids probably of a common origin // Astron. J. – 2008. – P. 280–290.
- Vokrouhlický D., Nesvorný D. The Common Roots of Asteroids (6070) Rheinland and (54827) 2001 NQ8 // Astron. J. - 2009. - Vol. 137. -P. 111-117.

- Knežević Z., Milani A. Proper element catalogs and asteroid families // Astron. Astrophys. - 2003. - Vol. 403. - P. 1165-1173.
- 40. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. М. : Наука, 1968.
- Knežević Z., Lemaître A., Milani A. The Determination of Asteroid Proper Elements // Asteroids III / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. 2002. P. 603-612.
- 42. Pravec P., Harris A. W., Vokrouhlický D. et al. Spin rate distribution of small asteroids // Icarus. 2008. Vol. 197. P. 497-504.
- Čapek D., Vokrouhlický D. The YORP effect with finite thermal conductivity // Icarus. - 2004. - Vol. 172. - P. 526-536.
- 44. Steinberg E., Sari R. Binary YORP Effect and Evolution of Binary Asteroids // Astron. J. 2011. Vol. 141. P. 55. 1010.2676.

СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Л. И. Машонкина

Институт астрономии Российской академии наук

В лекции описан вклад спектроскопии высокого разрешения в исследования химической эволюции галактик.

HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY FOR A STUDY OF GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION

L. I. Mashonkina

Institute of Astronomy, RAS

This paper reviews a role of high-resolution spectroscopy in studies of galactic chemical evolution.

Наша Галактика — Млечный Путь (МП) окружена системой спутников, большая часть которых была обнаружена в последнее десятилетие. Сейчас их насчитывается около 50 и число продолжает расти. Самые известные и массивные (~10 млрд солнечных масс) из них — Большое и Малое Магеллановы Облака. Но лекция будет посвящена карликовым галактикам, среди которых выделяют классические сфероидальные (dwarf spheroidals, dSphs) с массами $\sim 10^8 \ M_{\odot}$ и галактики с ультранизкой поверхностной яркостью (Ultra Faint Dwarfs, UFDs), число звезд в которых сравнимо и даже меньше, чем в шаровых скоплениях. Звездообразование в большинстве карликовых галактик давно остановилось, но наблюдения свидетельствуют о том, что даже в самых маленьких из них происходила химическая эволюция. В малых звездных системах и число сверхновых, обогативших галактическое вещество металлами, было невелико. Поэтому содержание химических элементов в звездах, сформировавшихся в эпоху нуклеосинтеза и сохранившихся до настоящего времени, отражает относительный выход элементов в единичных эпизодах нуклеосинтеза, в отличие от нашей Галактики, где мы почти всегда имеем дело с усредненным по многим эпизодам выходом элементов. Сравнение наблюдаемого распределения содержания у звезд в карликовых галактиках с теоретическим выходом элементов у звезд разных масс, позволяет судить о массах сверхновых и

[©] Машонкина Л. И., 2018

⁸⁰

начальной функции масс системы. Сравнение разных галактик необходимо для уточнения наших представлений о зависимости процессов звездообразования от массы системы. Другое важное направление — механизмы и места производства химических элементов, эффективность перемешивания продуктов нуклеосинтеза в межзвездной среде. До сих пор не установлено астрофизическое место быстрого (rapid, r) процесса нейтронных захватов — ядерных реакций, в которых синтезируются изотопы тяжелых элементов (Z > 28); неизвестны ни механизм, ни место синтеза в ранней Галактике таких элементов, как Sr, Y, Zr; требуют улучшения модели синтеза элементов с нечетным зарядом ядра Na и Al. В течение всего времени своего существования галактические спутники испытывали приливные эффекты со стороны МП. Это изменило звездное население как карликовых галактик, так и МП. Сравнительный анализ разных галактик помогает понять, как происходило «загрязнение» гало нашей Галактики. Проблемы и достижения в изучении карликовых галактик по состоянию на 2009 г. изложены в обзоре [1].

Наблюдательные данные для изучения химической эволюции системы и ее важнейших параметров — начальной функции масс и скорости звездообразования — получают путем определения содержания химических элементов у звезд разного возраста. Наилучшим образом для этой цели подходят звезды поздних спектральных классов — маломассивные и долгоживущие, со временем эволюции, сравнимым с возрастом Галактики. А детальный анализ химического состава возможен только по спектрам высокого разрешения с R = $\lambda = \lambda/\Delta \lambda \geq 30\,000$. Прогресс наблюдательной техники позволяет получать такие спектры для наиболее ярких звезд в ближайших галактиках. И все-таки статистика наблюдений, особенно в режиме низкой металличности ([Fe/H] = $\log(n_{\rm Fe}/n_{\rm H}) - \log(n_{\rm Fe}/n_{\rm H})_{\odot} < -2)$ и особенно для UFDs, невелика. Поэтому для поиска закономерностей в поведении содержания того или иного элемента в отдельной галактике и сравнения разных галактик очень важно иметь точные и однородные данные, полученные с использованием современных методов расчета теоретического спектра и определения параметров атмосферы звезды.

Лекция состоит из следующих частей:

- определение и проверка атмосферных параметров для холодных гигантов с дефицитом металлов на примере звезд в галактиках в созвездиях Скульптор, Малая Медведица и др.;
- введение в методы моделирования формирования спектраль-

ных линий в неравновесных условиях звездных атмосфер;

- результаты определения содержания элементов, синтезируемых в α-процессе и r-процессе, элементов группы Fe, элементов с нечетным зарядом ядра у звезд в разных карликовых галактиках в сравнении с нашей Галактикой;
- анализ галактических трендов элементных отношений с точки зрения химической эволюции галактик.

Результаты определения содержания химических элементов у звезд в семи карликовых галактиках и их интерпретация даны в работах [2, 3].

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований РАН, подпрограмма «Астрофизические объекты как космические лаборатории».

Библиографические ссылки

- Tolstoy E., Hill V., Tosi M. Star-Formation Histories, Abundances, and Kinematics of Dwarf Galaxies in the Local Group // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 2009. – Vol. 47. – P. 371–425. 0904.4505.
- Mashonkina L., Jablonka P., Pakhomov Y. et al. The formation of the Milky Way halo and its dwarf satellites; a NLTE-1D abundance analysis.
 I. Homogeneous set of atmospheric parameters // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 604. — P. A129. 1704.07656.
- Mashonkina L., Jablonka P., Sitnova T. et al. The formation of the Milky Way halo and its dwarf satellites; a NLTE-1D abundance analysis. II. Early chemical enrichment // ArXiv e-prints. — 2017. 1709.04867.

КОСМИЧЕСКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ФОН: КАК ЕГО СМОДЕЛИРОВАТЬ И КАК РАЗОБРАТЬСЯ В ПУТАНИЦЕ

С. В. Пилипенко

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

Неоднородный космический инфракрасный фон, созданный далекими галактиками, представляет существенную проблему для будущих наблюдений в дальнем ИК диапазоне, на длинах волн 100— 1000 мкм. Галактик в этом диапазоне на небе оказывается так много, что разрешения телескопов ближайшего будущего не хватит для наблюдения этих галактик по отдельности. Для борьбы с фоном в будущем необходимо научиться его моделировать, чему и посвящена настоящая лекция.

COSMIC INFRARED BACKGROUND: HOW TO MODEL IT AND HOW TO BEAT THE CONFUSION

S. V. Pilipenko Lebedev Physical Institute

The inhomogenious infrared background created by distant galaxies poses a serious problem for future observations in the Far InfraRed wavelength range, on the wavelengths of 100—1000 microns. There are so many galaxies in the sky in this range, so the resolution of the telescopes of the near future will be insufficient to observe all these galaxies separately. In order to beat the effects of background, it is needed to learn how to model it, and this is the subject of the current lecture.

Введение

Наша Вселенная наполнена фоновыми излучениями во всем диапазоне электромагнитного спектра — от радио до гамма. Наибольшей интенсивностью обладает реликтовое излучение, представляющее собой почти идеальное излучение черного тела с температурой 2.73 К. Максимум интенсивности фона приходится на длину волны

[©] Пилипенко С. В., 2018

⁸³

около 1 мм. На более коротких волнах, около 0.3 мм, присутствует еще один мощный пик излучения, имеющий другую природу: это инфракрасное (ИК) излучение, созданное пылью.

Основная масса пыли нагревается светом звезд до температуры не более нескольких десятков кельвинов и излучает тепловым образом. Пыль имеется в нашей Галактике, что хорошо известно из наблюдений поглощения света звезд. С развитием внеатмосферной ИК астрономии стало наблюдаться и излучение пыли нашей Галактики. Наиболее подробная карта всего неба в излучении пыли была получена на космическом телескопе Планк [1]. Излучение пыли наиболее сильно в плоскости диска и сильно ослабевает к полюсам Галактики. Но кроме нашей Галактики в ИК-фоне присутствует вклад других галактик.

Суммарное излучение пыли нашей Галактики сравнительно слабое, около 10^{-4} от ее оптической светимости. Есть галактики, в которых пыли так много, что почти все излучение звезд в них перехватывается и переизлучается пылью в дальнем ИК диапазоне. Такие галактики называют субмиллиметровыми, так как их максимум светимости приходится на длины волн меньше миллиметра. В собственной системе излучения галактики максимум приходится на длину волны около 100 мкм, но из-за космологического красного смещения этот максимум смещается в более длинноволновую область.

Сейчас в большинстве окружающих нас галактик пыли сравнительно немного, однако раньше, при возрасте Вселенной в 2—5 млрд лет, слияния галактик происходили гораздо чаще, чем теперь. Это вызывало мощные вспышки звездообразования и появление большого количества пыли. Поэтому в указанный временной период значительная часть галактик были субмиллиметровыми.

Наблюдения на длинах волн 100—300 мкм с поверхности Земли невозможны, наша атмосфера полностью непрозрачна в этом диапазоне. Для исследований в нем необходим телескоп в стратосфере или в космосе. Такие телескопы сильно ограничены в размерах: максимальный диаметр апертуры телескопа в дальнем ИК диапазоне на сегодня составляет 3.5 м у телескопа им. Гершеля, который уже прекратил свою работу. Планируемая космическая обсерватория Миллиметрон будет иметь диаметр главного зеркала 10 м. На длине волны 250 мкм угловое разрешение Гершеля составляло 12 угловых секунд, а у Миллиметрона составит 5 секунд. При максимальной чувствительности Гершеля, достижимой при многочасовом накоплении сигнала, количество субмиллиметровых галактик на небе достигает

10⁵ град.⁻², и в поле зрения в среднем попадает 0.9 галактик. Это означает, что часто в поле зрения находится более одной галактики, и отличить их невозможно. Данная проблема в астрономии носит название проблемы путаницы. Иными словами, изображения, получаемые с Гершеля, содержат неоднородный кашеобразный фон, из которого невозможно выделить слабые точечные источники.

По измерениям Гершеля предел путаницы, т. е. минимальный уровень потока, на котором возможно выделять отдельные источники, составляет 6 мЯн (миллиянских) на длине волны 250 мкм. Здесь следует сделать замечание, что это относится лишь к фотометрическим наблюдениям, проводимым в широкой полосе спектра. При наблюдениях спектральных линий такой проблемы не возникает, так как галактики на разных расстояниях обладают разными спектрами за счет разных красных смещений, и можно точно сказать, сколько галактик имеется в данном поле зрения.

Что известно про ИК-фон

Важнейшая характеристика субмиллиметровых галактик — это их количество на единицу площади неба в зависимости от потока (с потоками больше заданного), так называемая «диаграмма log N log S» (рис. 1). Для потоков выше, чем предел путаницы для существующих телескопов, возможно прямое измерение этой зависимости. Для более низких потоков, т. е. для неразрешенных галактик, проводится экстраполяция с учетом того, что суммарный поток с единицы площади неба от неразрешенных и разрешенных источников должен давать средний по небу ИК фон.

Одна из часто применяемых в литературе моделей зависимости числа галактик от потока для разных длин волн приведена в работе [2]. Используя эти зависимости, можно получить простые оценки предела путаницы, оценив поток, при котором одна галактика будет приходиться на площадь неба, в несколько раз большую, чем площадь диаграммы направленности телескопа. Подобные и несколько более сложные оценки приведены в работе [2]. Однако для многих задач, например, для изучения влияния фона на конкретные типы изображений астрономических объектов, проверки работы алгоритмов выделения источников, изучения методов борьбы с пределом путаницы, необходимы карты фона неба.

Простейшую карту неба можно создать, распределив источники по небу случайно и присвоив им потоки в соответствии с диаграммой

log N — log S. Но при этом не будет информации о расстоянии до галактик, а также на карте не будет проявляться крупномасштабная структура Вселенной. По данным измерений анизотропии ИК-фона на телескопах Гершель и Планк [3, 4], фон показывает значительные отклонения от случайного распределения. Поэтому для задач, выходящих за рамки простых оценок, необходимо создавать более сложную модель фона.



Рис. 1. Подсчеты источников в четырех диапазонах (диаграмма log N — log S). Сплошные линии — наша модель [5], штриховые — аппроксимация реальных данных из работы [2]

Космологический подход к моделированию фона

Современная космологическая модель предсказывает статистические характеристики распределения материи во Вселенной. На основе этих предсказаний строятся численные модели, которые дают конкретную реализацию распределения материи в некотором модельном

объеме — кубе численной модели. Расчет такой модели — сложная вычислительная задача, требующая применения параллельных суперкомпьютеров. Многие из таких расчетов опубликованы в общем доступе, например, Millenium, MultiDark.

Известно, что темной материи в нашей Вселенной в несколько раз больше по массе, чем видимой. Поэтому галактики образуются там, где образовалось гравитационно-связанное скопление из темной материи — гало. Численное моделирование образования галактик из обычной материи — крайне сложная и до конца не решенная задача, поэтому моделируется, как правило, только эволюция темной материи (она подвержена действию одной лишь силы гравитации). В общедоступных базах данных представлены каталоги гало для примерно сотни срезов по времени. Для каждого гало приводятся координаты, масса, скорость и другие характеристики. Для построения модели ИК фона необходимо каждому гало присвоить инфракрасную светимость.

В свое время такая же задача решалась для моделирования излучения галактик в видимом диапазоне, иными словами — для присвоения гало массы содержащихся в нем звезд. Самая простая идея — поставить знак пропорциональности между звездной массой (или светимостью) и массой темного гало. Однако такая модель сильно противоречит наблюдательным данным. В частности, самые массивные темные гало с массой 10^{14} — 10^{15} M_☉ содержат в себе не отдельные галактики, а скопления галактик. Имеется механизм, который подавляет образование звезд в массивных гало. Считается, что это происходит за счет активности центральной сверхмассивной черной дыры, которая нагревает газ и тем самым не дает образоваться новым звездам.

С другой стороны, в гало малых масс взрывы сверхновых способны выбросить значительную часть газа во внегалактическое пространство, также снизив скорость звездообразования. Поэтому зависимость звездной массы от массы гало имеет колоколообразную форму. Детальные гидродинамические численные модели образования отдельных галактик предсказывают хорошую корреляцию между светимостью и массой темного гало.

Пыль производится звездами, поэтому логично предположить, что для ИК светимости вид формулы для связи светимости с массой можно использовать такой же, как и для звезд. Важная особенность пыли в том, что она разрушается со временем, поэтому высокая ИК светимость должна сохраняться какое-то время после вспышки звез-

дообразования, а потом спадать. Именно по этой причине большинство галактик в современную эпоху не относятся к субмиллиметровым.

Чтобы превратить гало из численной модели в субмиллиметровые галактики, необходимо присвоить каждому гало время с момента вспышки звездообразования и скорость спадания ИК светимости. Для этого мы опробовали два подхода. По современным представлениям слияния галактик вызывают вспышки звездообразования, а для гало в общедоступных каталогах приводится время с момента слияния с сопоставимым по массе объектом. В первом варианте модели мы будем считать время с момента слияния временем с момента вспышки звездообразования. Во втором варианте можно ввести в формулу масса—светимость явную зависимость от красного смещения. В данной лекции мы используем только первый подход, второй применялся в нашей работе [5].

Мы использовали вид соотношения масса—светимость из работы [6] с некоторыми модификациями:

$$L(M, z) = L_0 \exp\left(-\frac{(\log(M) - \log(M_0))^2}{2\sigma_L^2}\right) \max\left(1., \frac{t_0}{t_m}\right), \quad (1)$$

где $\log(M_0) = 12.4$; $\sigma_L^2 = 0.12$; $t_0 = 600$ млн лет; $L_0 = 4.2 \times 10^{10} L_{\odot}$ для интегральной светимости в диапазоне от 8 до 1 000 мкм в системе отсчета галактики; t_m — время с момента слияния гало.

Кроме соотношения масса—светимость мы еще учли гравитационное линзирование галактик друг на друге. Для этого мы отбирали близкие по углу пары галактик и вычисляли коэффициент усиления для более далекой галактики в паре. Подробно это описано в нашей работе [5]. Данный эффект несколько увеличивает количество ярких источников.

Определение модельных параметров и построение карты

Наша модель имеет четыре свободных параметра: L_0 , M_0 , σ_L и t_0 . Для определения их значений мы подгоняли подсчеты галактик (log N — log S) из работы [2]. Для подгонки использовался генетический алгоритм, так как для каждой итерации подгонки необходимо создать модельный каталог галактик, что требует некоторых вычислительных ресурсов.

Используемый нами исходный каталог содержит около миллиона гало с массами от 3×10^{10} до $3\times10^{14}~{\rm M}_{\odot}$. Наиболее массивные гало, соответствующие скоплениям галактик, содержат внутри себя большое количество гало-спутников, которые должны представлять отдельные галактики в скоплении. Мы используем и эти галоспутники.



Рис. 2. Типичный спектр субмиллиметровой галактики

В модельном каталоге галактик имеется информация об интегральной ИК светимости каждой галактики, о расстоянии до нее и ее красном смещении. Для вычисления потока от каждой галактики на конкретной длине волны необходимо также иметь спектры. Мы для простоты считаем, что спектры всех галактик имеют в дальнем ИК диапазоне одинаковую форму, такую же, как на рис. 2. Детальные расчеты, например в работе [7], дают серию спектров для галактик с разной интенсивностью звездообразования. Однако спектр пылевой части в первом приближении в этих моделях отличается только амплитудой и небольшим сдвигом. За амплитуду спектра в нашей модели отвечает уравнение (1), а сдвигом мы пренебрегаем. Если спектральное распределение энергии галактики дается функцией $f(\lambda)$ (в единицах Bt/Γ ц), где λ — длина волны наблюдения, то поток от галактики определяется как

$$F = f\left(\frac{\lambda}{1+z}\right)\frac{1+z}{4\pi d_L^2},\tag{2}$$

где d_L — космологическое расстояние по светимости; z — красное смещение.

Следующим шагом является построение карты, т. е. переход от трехмерных координат и потоков для галактик к яркости на двумерной сетке из пикселей. Чтобы сделать такой переход, мы используем интерполяцию «облако в ячейке» (англ. Cloud-in-Cell, CiC). Пусть $x_{i,j}, y_{i,j}$ — координаты правого верхнего края пикселя i, j, в который попадает галактика; X, Y — координаты галактики на небе (мы считаем ее точечным источником). Тогда галактика с потоком F дает вклад в интенсивность четырех ближайших пикселей:

$$\begin{aligned}
I(i,j) &= F \cdot (X - x_{i,j})/dx (Y - y_{i,j})/dy /A, \\
I(i+1,j) &= F \cdot (1 - (X - x_{i,j})/dx) (Y - y_{i,j})/dy /A, \\
I(i,j+1) &= F \cdot (X - x_{i,j})/dx (1 - (Y - y_{i,j})/dy) /A, \\
I(i+1,j+1) &= F \cdot (1 - (X - x_{i,j})/dx) (1 - (Y - y_{i,j})/dy) /A, \\
\end{aligned}$$
(3)

где dx, dy — размеры пикселя; A = dxdy — его площадь. Получаемая величина имеет размерность интенсивности, в астрономии часто используется размерность Ян/стерадиан. Способ интерполяции СiC сохраняет некоторую информацию о положении галактики внутри пикселя, в отличие от простейшего способа, при котором весь поток от галактики попадает в один пиксель.

Для моделирования наблюдений необходимо свернуть полученную карту с диаграммой направленности телескопа. Для телескопа с диаметром апертуры D и идеальным дифракционным качеством изображения диаграмма направленности будет представлять собой функцию Эйри. Однако для упрощения и ускорения вычислений можно заменить ее двумерной функцией Гаусса с параметром $\sigma =$ = 0.42 λ/D . Участок полученной карты показан на рис. 3.

Проблема путаницы и выделение точечных источников

Автоматический поиск точечных источников на изображениях — одна из часто решаемых задач в астрономии. Однако, если источников на изображении слишком много, их выделение становится про-



Рис. 3. Один и тот же участок модельной карты на 300 мкм для телескопа диаметром 10 м. Точками показаны источники, размер пропорционален логарифму потока. Левое верхнее изображение: заложенные в модель источники; правое верхнее: выделено с помощью метода локальных максимумов; левое нижнее: алгоритм SEXTRACTOR; правое нижнее: алгоритм getsources 100+300 мкм

блематичным. Обычно возможно выделить источники ярче некоторого предельного потока, так как число ярких источников всегда меньше, чем более тусклых. Этот предел называют пределом путаницы. Для его определения существуют несколько методов. Как уже говорилось ранее, его можно оценить из диаграммы log N — log S. Площадь диаграммы направленности телескопа можно оценить как $(\lambda/D)^2$. Считается, что источники можно надежно разделять, если на одну диаграмму направленности в среднем приходится 0.1 источника. Таким образом можно найти предельное значение N числа объектов на единицу площади, а из нее по диаграмме log N — log S уже определить предельный поток S_{lim} .

Для получения более точного ответа мы взяли модельную карту обзора неба и попробовали выделить на ней источники несколькими методами. А именно, 1) с помощью метода поиска локальных максимумов; 2) SEXTRACTOR [8]; 3) getsources [9, 10].

Алгоритм поиска локальных максимумов годится исключительно для модельных изображений, свободных от шума приемника, поскольку для поиска максимумов используются производные от интенсивности. Численное взятие второй производной приводит к значительному росту ошибок, если таковые имеются. Тем не менее данный алгоритм работает сравнимо с выделением источников глазом на данной карте.

SEXTRACTOR представляет собой программу для выделения источников произвольной формы, не только точечных. Сначала он попиксельно разбивает изображение на фон и источники, а затем те пиксели, которые не относятся к фону, разделяются на отдельные источники. Данный алгоритм не очень хорошо работает в случае серьезной путаницы, что и демонстрирует наша попытка проанализировать им модельные карты на рис. 3.

Алгоритм, заложенный в getsources, наоборот, рассчитан на обработку данных со значительным эффектом путаницы. Он применялся для анализа многих изображений, полученных в дальнем ИК диапазоне на телескопе им. Гершеля. Кроме того, getsources может одновременно анализировать изображения одного и того же участка неба в нескольких диапазонах. На более коротких длинах волн, где угловое разрешение выше, можно разделить большинство источников, а затем можно использовать информацию об их координатах для анализа изображений на более длинных волнах, где эти источники уже сливаются друг с другом. С помощью модельных карт мы протестировали данную возможность.

Для измерения качества работы алгоритмов мы строим зависимость числа найденных источников от потока (log N — log S) и находим поток, на котором число источников падает в два раза по сравнению с заложенным в модель. Иными словами, мы определяем уровень, на котором алгоритм находит половину от всех источников. В таблице мы приводим эту характеристику для трех алгоритмов на длине волны 300 мкм. Как видно, оценка дает неплохую точность, а применение getsources к многодиапазонным изображениям действительно позволяет в несколько раз понизить предел путаницы.

Предел путаницы для длины волны 300 мкм и диаметра зеркала телескопов им. Гершеля (3.5 м) и Миллиметрон (10 м)

Алгоритм	Для Гершеля, мЯн	Для Миллиметрона, мЯн
Оценка по $\log N - \log S$	9	0.7
Поиск максимумов	9	0.6
SEXTRACTOR	80	12
getsources 300 мкм	14	0.7
getsources 100 $+300$ мкм	3	0.1

Заключение. Особенности реализации модели

В данной лекции продемонстрированы шаги, необходимые для создания искусственного каталога галактик на основе космологических численных моделей и проведен анализ проблемы путаницы на полученных модельных картах. Показано, что простая оценка дает неплохое приближение для предела путаницы на длине волны 300 мкм. Также продемонстрирована зависимость предела путаницы от диаметра телескопа.

Для получения каталога гало мы использовали сайт http://cosmosim.org И скачали оттуда ланные модели SmallMultiDark Planck. Также эти данные имеются на сайте http://skiesanduniverses.iaa.es/. Для преобразования отдельных срезов по времени в конус модельного обзора мы написали свой код на Fortran-90. Общедоступных кодов для подобного преобразования мы не нашли.

Дальнейший анализ выполнялся на языке программирования Python 2.7. Подгонка модельных параметров генетическим алгоритмом доступна в пакете scipy.optimize.differential_evolution. Реализация CiC возможна и на Python, но для ускорения мы использовали код на языке Cu, включаемый в программу на Python с помощью пакета weave. Для выполнения свертки модельной карты с диаграммой направленности использовался пакет astropy.convolution.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-01043.

Библиографические ссылки

1. Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al. Planck early results. XIX. All-sky temperature and dust optical depth from Planck and IRAS. Constraints on the "dark gas" in our Galaxy // Astron. Astrophys. - 2011. - Vol. 536. - P. A19. 1101.2029.

- Béthermin M., Daddi E., Magdis G. et al. A Unified Empirical Model for Infrared Galaxy Counts Based on the Observed Physical Evolution of Distant Galaxies // Astrophys. J. Lett. — 2012. — Vol. 757. — P. L23. 1208.6512.
- Planck Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N. et al. Planck early results. XVIII. The power spectrum of cosmic infrared background anisotropies // Astron. Astrophys. - 2011. - Vol. 536. - P. A18. 1101.2028.
- Viero M. P., Wang L., Zemcov M. et al. HerMES: Cosmic Infrared Background Anisotropies and the Clustering of Dusty Star-forming Galaxies // Astrophys. J. – 2013. – Vol. 772. – P. 77. 1208.5049.
- Pilipenko S. V., Tkachev M. V., Ermash A. A. et al. A model of the cosmic infrared background produced by distant galaxies // Astronomy Letters. - 2017. - Vol. 43. - P. 644-655. 1710.06665.
- Shang C., Haiman Z., Knox L., Oh S. P. Improved models for cosmic infrared background anisotropies: new constraints on the infrared galaxy population // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 421. — P. 2832– 2845. 1109.1522.
- Chary R., Elbaz D. Interpreting the Cosmic Infrared Background: Constraints on the Evolution of the Dust-enshrouded Star Formation Rate // Astrophys. J. - 2001. - Vol. 556. - P. 562-581. astro-ph/0103067.
- 8. Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1996. Vol. 117. P. 393-404.
- Men'shchikov A., André P., Didelon P. et al. A multi-scale, multiwavelength source extraction method: getsources // Astron. Astrophys. – 2012. – Vol. 542. – P. A81. 1204.4508.
- Men'shchikov A. A multi-scale filament extraction method: getfilaments // Astron. Astrophys. - 2013. - Vol. 560. - P. A63. 1309.2170.

новая концепция солнечного цикла

А. А. Соловьев

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Калмыцкий государственный университет

Новые данные о солнечных g-модах и быстровращающемся ядре Солнца (Fossat et al., 2017) позволяют предположить, что генерация магнитного поля Солнца происходит не у основания конвективной зоны в тахоклине, а гораздо глубже — на границе солнечного ядра, с периодом обращения семь дней, в то время как период обращения радиативной зоны составляет 27 дней. На этом уровне радиальный градиент угловой скорости вращения Солнца чрезвычайно велик. Генерируемое здесь магнитное поле входит в гидростатическую зону радиационного переноса, которая вращается твердотельно и не деформирует магнитное поле. Таким образом, магнитное поле в этой зоне становится бессиловым. Осевая симметрия и бессиловая природа поля однозначно определяют решение слоевой структуры магнитного поля в радиативной зоне. Оно имеет вид концентрических вложенных слоев, последовательный выход которых на поверхности Солнца описывает развитие солнечного цикла во всех его деталях.

NEW CONCEPT OF SOLAR CYCLE

A. A. Solovjev

The principal astronomical observatory of the Russian Academy of Sciences (Pulkovo), Kalmyk State University

New data about solar g-modes and fast rotating core of the Sun (Fossat et al., 2017) allow us to assume that the generation of the solar magnetic field occurs not at the base of the convective zone, in tachocline, but much deeper — on the boundary of the solar core, with the period of revolution of 7 days, and the radiative transfer zone (the period of revolution is 27 days). At this level the radial gradient of the angular

© Соловьев А. А., 2018



velocity of solar rotation is extremely large. The magnetic field generated there enters not in the turbulent medium of the convective zone, but in the hydrostatic zone of radiative transfer, which rotates solidly and does not deform the magnetic field. Thus, the magnetic field in this zone turns out to be a force free field. The axial symmetry and force free conditions uniquely determine the solution for the layered structure of the magnetic field in radiative zone. It has the form of concentric embedded layers, the successive output of which on the surface of the Sun draws the development of the solar cycle in all its details.

Введение

Недавно в [1] сообщено об открытии д-мод на Солнце и быстром вращении солнечного ядра, которое делает оборот за 7 дней, как раннее Солнце, а расположенная над ним зона лучистого равновесия (ЛЗ) вращается твердотельно с периодом 27 дней. Это позволяет по-новому подойти к проблеме солнечных магнитных полей. полагая, что генерация («намотка») магнитного поля Солнца происходит в основном не на нижней границе конвективной зоны (K3), в тахоклине, а много глубже — на границе ядра и ЛЗ, где имеется большой радиальный градиент угловой скорости вращения. Важно, что магнитное поле, по мере его непрерывной «намотки» на этой границе, генерируется не в турбулентной КЗ, а попадает в гидростатическую, лишенную хаотических движений и дифференциального вращения среду ЛЗ, где оно не подвергается случайному запутыванию и сразу формируется как регулярная, правильная, крупномасштабная магнитная структура. Тепло в ЛЗ переносится поглощением и переизлучением электромагнитных квантов, магнитное поле на этот перенос влияния не оказывает, не изменяет радиальные гидростатические профили давления и плотности. Значит, магнитное поле в ЛЗ неизбежно должно релаксировать к бессиловому состоянию: $[\operatorname{curl} B \times B] = 0$. Это центральная идея работы.

Магнитное поле в зоне лучистого переноса

В отсутствие дифференциального вращения уравнение осесимметричного бессилового поля в координатах (r, θ, φ) имеет вид

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{\sin\theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial A}{\partial \theta} \right) = -\frac{1}{2} \frac{d\Omega^2}{dA}, \qquad (1)$$

где

$$A(r,\theta) = -\int_0^r B_\theta \sin\theta r \, dr$$

есть поток магнитного поля вдоль меридиана через единичную площадку;

$$\Omega(r,\theta) = -\frac{4\pi}{c} \int_0^r j_\theta \sin\theta r \, dr$$

аналогичный поток электрического тока, а составляющие вектор
а ${\cal B}$ выражаются формулами

$$B_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \theta}; \qquad B_\theta = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial r}; \qquad B_\varphi = \frac{\Omega}{r \sin \theta}. \tag{2}$$

Разделим переменные в функции потока:

$$A(r,\theta) = \sum_{i} S_i(r) f_i(\theta) ,$$

где *i* — номер гармоники. Угловой оператор

$$\frac{\sin\theta}{r^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial f(\theta)}{\partial\theta}\right)$$

имеет следующие собственные функции (производные от полиномов Лежандра) и собственные числа:

$$\left.\begin{array}{l}
f_{1}(\theta) = \sin^{2}\theta, & \lambda_{1} = -2\\
f_{2}(\theta) = \sin^{2}\theta\cos\theta, & \lambda_{2} = -6\\
f_{3}(\theta) = \sin^{2}\theta(5\cos^{2}\theta - 1), & \lambda_{3} = -12\\
f_{4}(\theta) = \sin^{2}\theta\cos\theta(\frac{7}{3}\cos^{2}\theta - 1), & \lambda_{4} = -20\\
\dots\\
f_{i} = \frac{2^{i}i!(i-1)!}{(2i)!}\sin^{2}\theta P_{i}'(\cos\theta) & \lambda_{i} = -i(i+1)
\end{array}\right\}$$
(3)

В линейном случае $\Omega(r,\theta) = \alpha A(r,\theta)$, где α — константа, определяющая мощность токов. Тогда, согласно (2), тороидальное поле

пропорционально $\alpha \cdot A$:

$$B_{\varphi}(r,\theta) = \frac{\Omega}{r\sin\theta} = \frac{\alpha A(r,\theta)}{r\sin\theta} = \alpha R \frac{A(r,\theta)}{r\sin\theta \cdot R}.$$
 (4)

Решения для $S_i(r)$ после подстановки $A(r,\theta) = \sum_i S_i(r)f_i(\theta)$ в уравнение (1) и учета (3) выражаются через Бесселевы функции полуцелого аргумента. Они знакопеременны, и этим обеспечивается основное свойство полученного решения — слоистая структура магнитного поля по радиусу Солнца. Для краткости изложения мы не выписываем функции $S_i(r)$, а сразу покажем примеры магнитных поверхностей (A = const) для четырех гармоник с функциями f_1, f_2, f_3, f_4 . Коэффициенты в $S_i(r)$ выбраны так, чтобы в момент, представленный на рис. 1, функция A обращалась в нуль на границе ядра ($r_c \simeq 0.2R, R$ — радиус Солнца).



Рис. 1. Нечетные 1-я и 3-я гармоники не равны нулю на экваторе. Черные полукольца — положение тахоклина, $r \simeq 0.7R$, и слоя на границе ЛЗ, где идет непрерывная намотка и релаксация поля к бессиловой структуре. На рисунке слева стрелки показывают смену знака поля на границе слоя

Динамика подфотосферного магнитного поля и солнечный цикл

Турбулентная среда КЗ отторгает внешнее магнитное поле, но его напряженность под нею, в нижележащей ЛЗ, постоянно растет вследствие непрерывного генерирующего действия огромного градиента угловой скорости на границе ЛЗ с ядром. Это растущее магнитное поле, достигая некоторой критической величины, время от времени (циклически, послойно) продавливается, прорывается сквозь



Рис. 2. Четные 2-я и 4-я гармоники на экваторе обращаются в ноль. Согласно (4) тороидальные магнитные поля, формирующие солнечные пятна, имеют структуру, близкую к представленной; 4-я гармоника выделяет «королевскую» зону пятнообразования на широтах от 0 до 40°

толщу КЗ на поверхность Солнца, «прорисовывает» на ней цикл солнечной активности (CA) и затем, необратимо диссипируя, уходит в межпланетное пространство, унося с собой угловой момент. На рис. 1, 2 свободный токовый параметр задачи α выбран так, что на толщине КЗ укладывается один магнитный слой, который при выходе наверх даст два максимума 11-летней пятнообразовательной деятельности: граница между магнитными слоями соответствует максимуму тороидального поля, формирующего пятна. Таким образом, два последующих максимума СА образуются одной топологически связанной магнитной структурой. При этом второй, последующий, максимум несколько выше первого, поскольку на нижнем обходе слоя, который выходит наверх как единое целое, поле несколько сильнее. Так обеспечивается известное правило Гневышева-Оля: 1) нечетный 11-летний цикл выше, чем предшествующий четный иикл: 2) четный иикл с последующим нечетным ииклом образуют физическую пару, единое целое [2]. Другая особенность СА — квазидвухлетние вариации пятен, т. е., по сути, вариации тороидального поля, возможно, формируются как его деформации, в моменты, когда поля послойно прорываются из ЛЗ в КЗ через относительно тонкий переходный слой — тахоклин. Такова, может быть, чисто механическая природа квазидвухлетних вариаций СА.

Часть магнитного потока, прорвавшегося в K3, турбулизуется в ней, приобретает хаотический, перемежающийся (может быть, мультифрактальный) характер, но, несмотря на турбулентное перемеши-

вание в K3, происходящее в относительно малых масштабах, магнитная структура, возникшая в Л3, сохраняет в общих чертах свою изначальную регулярную слоистую конфигурацию и проявляется на поверхности Солнца в виде крупномасштабного магнитного поля, которое создает силовой каркас активных областей, формирует цикл солнечных пятен, порождает южно-северную асимметрию СА. Последовательный выход магнитных слоев автоматически обеспечивает «переполюсовку» — смену полярности магнитного поля на полюсах в фазе максимума пятен (см. стрелки на рис. 1) без каких-либо магнитных пересоединений, которые в турбулентной среде КЗ было бы крайне трудно реализовать в последовательной регулярной форме).

В рамках нашей модели объясняется правило Вальдмайера: чем выше скорость роста цикла пятен, тем он мощнее. Это правило диктуется скоростью выхода верхнего магнитного слоя в фотосферу. Если выход замедлен, то поток поля B_{φ} , отвечающего за формирование пятен, растягивается, расширяется, поле ослабевает, цикл получается слабым; если выход слоя ускорен, то поток поля B_{φ} сжимается, цикл — сильный. Скорость выноса тороидального поля на поверхность Солнца, как показано ниже, пропорциональна $\eta_T \alpha^2$. Обе эти величины в КЗ подвержены случайным флуктуациям.



Рис. 3. Слева — сумма шести гармоник с амплитудами $a_1 = a_3 = 0, a_2 = 1, a_4 = 0.75, a_5 = 0, a_6 = 0.075$ дает картину выхода магнитных слоев на поверхность Солнца, бабочки Маундера. Взято $\alpha R = 24$. Справа — малая добавка 1 и 3 гармоник: $a_1 = -0.1, a_3 = 0.1$ создает северо-южную асимметрию СА. Стрелка снизу — направление времени

Еще одно значительное проявление СА заключается в повороте солнечного диполя в течение цикла [3, 4]. В нашей модели это явление обусловлено тем, что, как можно показать, магнитные моменты двух соседних слоев в полученной бессиловой конфигурации антипараллельны, в то время как минимуму магнитной энергии системы отвечает их параллельная ориентация. Поэтому, когда верхний магнитный слой, выйдя на поверхность Солнца и сбросив плотную фотосферную плазму, начинает «искать» ориентацию, минимизирующую его энергию, он поворачивается вдоль меридиана относительно нижележащего магнитного слоя, который еще прочно вморожен в плотные фотосферные слои и изменить ориентацию не может. Эта модель излагалась в [5, 6]. Попытка описать магнитный цикл как последовательный выход на поверхность Солнца слоистых магнитных полей была предпринята в [7], но там речь шла о появлении таких структур в турбулентной КЗ, что выглядело проблематично. Новые данные о быстром вращении ядра позволяют вернуться к этой идее.

Продвижение магнитного слоя в конвективной зоне

Поле, попавшее в КЗ, подвергается турбулентной диффузии с коэффициентом $\eta_T = (l_c \cdot u_c)/3$, где l_c — длина пути перемешивания; u_c — среднеквадратичная скорость турбулентных пульсаций. В фотосфере

$$\eta_T \simeq 1/3 \cdot 10^8 \,\mathrm{cm} \cdot 10^5 \,\mathrm{cm/c} = 3 \cdot 10^{12} \,\mathrm{cm}^2/\mathrm{c}.$$

Примем эту оценку для всей толщины КЗ. Согласно уравнению индукции

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\eta_T \operatorname{curl} \operatorname{curl} B + \operatorname{curl} \left[V \times B \right] = \\
= -\alpha^2 \eta_T B - e_\theta \left(\frac{\partial (rV_r B_\theta - rV_\theta B_r)}{r \partial r} \right) - \\
- e_\varphi \left[\frac{\partial (rV_r B_\varphi - rV_\varphi B_r)}{r \partial r} - \frac{\partial (V_\varphi B_\theta + V_\theta B_\varphi)}{r \partial \theta} \right] + \\
+ e_r \frac{\partial (\sin \theta (V_r B_\theta - V_\theta B_r))}{r \sin \theta \partial \theta}.$$
(5)

В отсутствие динамического члена curl $[V\times B]$ магнитное поле в K3 было бы рассеяно за короткое время порядка

$$\tau_T = \frac{R^2}{\eta_T (R\alpha)^2} = \frac{49 \cdot 10^{20}}{3 \cdot 10^{12} \, 12^2} \simeq 0.36 \, \text{года.}$$

Но в КЗ, кроме турбулентных пульсаций, существуют регулярные течения, в частности, дифференциальное вращение, генерирующее поле, и радиальный подъем магнитного поля (члены в (5), содержащие V_r), также противостоящий его диссипации. Как видно из (5), сохранение поля на масштабе 11 лет и более возможно, если выполнено равенство типа A = B - C, где B и C — относительно большие и примерно равные по модулю величины, так что A в норме близко к нулю. Оба этих члена в турбулентной КЗ подвержены случайным флуктуациям. Даже относительно малые флуктуации близких по модулю величин ведут к значительным вариациям их разности.

В этом состоит основная принципиальная трудность прогнозирования СА.

Рассмотрим баланс правой части (5) на примере тороидального компонента:

$$\frac{\partial B_{\varphi}}{\partial t} = -\eta_T \alpha^2 B_{\varphi} - \left[\frac{\partial (rV_r B_{\varphi} - rV_{\varphi} B_r)}{r \partial r} - \frac{\partial (V_{\varphi} B_{\theta} + V_{\theta} B_{\varphi})}{r \partial \theta} \right].$$

Раскроем член в скобке с V_r:

$$\frac{\partial r B_{\varphi}}{\partial t} = -\eta_T \alpha^2 r B_{\varphi} - r B_{\varphi} \frac{\partial V_r}{\partial r} - V_r \frac{\partial (r B_{\varphi})}{\partial r} + \left[\frac{\partial (r V_{\varphi} B_r)}{\partial r} + \frac{\partial (V_{\varphi} B_{\theta} + V_{\theta} B_{\varphi})}{\partial \theta} \right].$$
(6)

Поле в КЗ не исчезнет слишком быстро, если правая часть (6) близка к нулю. Члены в квадратной скобке описывают эффекты дифвращения, компенсирующие диссипацию, — они очень близки по модулю к диссипативному члену. Для того чтобы рассмотреть радиальный выход поля в том его виде, как оно образовалось в ЛЗ, учтем влияние членов в скобке тем, что введем в диссипативное слагаемое малый множитель $\delta < 1$, показывающий степень компенсации этого слагаемого за счет дифвращения. Тогда

$$\frac{\partial V_r}{\partial x} + V_r \frac{\partial \ln(x B_0^{-1} B_{\varphi})}{\partial x} = -\delta \eta_T \alpha^2 R,$$

102

где x = r/R; B_0 — мера напряженности поля;

$$xB_0^1B_\varphi = \frac{\alpha \widetilde{A}(x,\theta)}{R\sin\theta},$$

 \widetilde{A} — обезразмеренная функция потока. Решение уравнения:

$$V_r(x,\theta) = \frac{1}{\widetilde{A}} \left(C(\theta) \sin^2 \theta \cdot \cos \theta - \delta \eta_T \alpha^2 R \int_{0.7}^x \widetilde{A} dx \right), \tag{7}$$

где $C(\theta)$ — некоторая функция угла; множитель $\sin^2 \theta \cos \theta$ выделен в ней для удобства. Первое слагаемое в скобке — скорость подъема поля B_{φ} , когда нижний край слоя находится на дне K3, r = 0.7 R. Слой пройдет K3 за время

$$\tau = R \int_{0.7}^{1} \widetilde{A}(x,\theta) \left(C \sin^2 \theta \cdot \cos \theta - \delta \eta_T \alpha^2 R \int_{0.7}^{x} \widetilde{A} dx \right)^{-1} dx.$$
(8)

Оценим τ для второй и четвертой гармоник, обеспечивающих тороидальное поле в королевской зоне:

$$\tau = R \int_{0.7}^{1} \frac{3S_2 + S_4(7\cos^2\theta - 3)}{C - \delta\eta_T \alpha^2 R \int_{0.7}^{x} (3S_2 - S_4(7\cos^2\theta - 3)) dx} \, dx \, .$$

Для угла примем $\theta = 60^{\circ}$ и введем перед S_2 дополнительный амплитудный множитель 0.6, чтобы обеспечить положительность функции \tilde{A} на интервале от 0.7 до 1. Тогда

$$\tau = 3R \int_{0.7}^{1} \frac{0.6S_2(x) - 0.417S_4(x)}{C - \delta\eta_T \alpha^2 3R \int_{0.7}^{x} (S_2 - 0.417S_4) dx} dx$$

Численный расчет дает длительность цикла 8 лет, если взять $\delta = 0.3$, C = 4.866 см/с; 11 лет, если принять $\delta = 0.3$, C = 4.8614 см/с; 13.3 года, если положить C = 4.86107 см/с. Приведенный численный пример носит, конечно, сугубо модельный характер, но он ясно показывает, что описание цикла СА в данной модели нуждается в очень тонкой «настройке»: длительность цикла заметно меняется даже при малых вариациях свободной константы C.

Плюсы и минусы модели

Плюсы. На качественном уровне просто и наглядно описываются основные свойства СА: королевская зона пятнообразования, бабочки Маундера, асимметрия цикла пятен, правила Гневышева—Оля

и Вальдмайера, переполюсовка магнитных полей; дана оценка длительности цикла, объяснен механизм поворота солнечного диполя.

Но имеются и очевидные трудности: мы не знаем напряженности магнитного поля, которое наматывается в основании ЛЗ и потому не можем сопоставить наблюдаемые магнитные поля с теми полями, которые участвуют в процессе их генерации вблизи ядра; не знаем, как поле в ЛЗ релаксирует к бессиловому состоянию и какие факторы определяют значение токового параметра α . Это предмет будущих разработок. Пока нельзя считать предложенное описание СА альтернативой имеющимся динамо-теориям, но хочется рассчитывать на появление новых данных, которые снимут хотя бы часть указанных проблем.

Работа поддержана РНФ (проект 15-12-20001).

Библиографические ссылки

- 1. Fossat E., Boumier P., Corbard T. et al. Asymptotic g modes: Evidence for a rapid rotation of the solar core // Astron. Astrophys. 2017. Vol. 604. P. A40. 1708.00259.
- Nagovitsyn Y. A., Nagovitsyna E. Y., Makarova V. V. The Gnevyshev-Ohl rule for physical parameters of the solar magnetic field: The 400-year interval // Astronomy Letters. - 2009. - Vol. 35. - P. 564-571.
- Livshits I. M., Obridko V. N. Variations of the dipole magnetic moment of the sun during the solar activity cycle // Astronomy Reports. — 2006. — Vol. 50. — P. 926—935.
- 4. Obridko V. N., Shelting B. D. Temporal variations in the position of the heliospheric equator // Astronomy Reports. 2008. Vol. 52. P. 676—679.
- Соловьев А. А., Киричек Е. А. Релаксационная модель глобального магнитного цикла на Солнце // Современные проблемы солнечной цикличности : тр. международ. конф., 26—30 мая 1997 г. — СПб. : ГАО РАН, 1997. — С. 226—231.
- Соловьев А. А., Киричек Е. А. Механизм вращения гелиосферы // Структура и динамика солнечной короны : тез. международ. конф., 4—8 окт. 1999 г. — М. : ИЗМИРАН, 1999. — С. 52.
- Соловьев А. А., Киричек Е. А. Диффузионная теория солнечного магнитного цикла. — Элиста ; СПб., 2004.

ОБЛАКА И АЭРОЗОЛЬ ВЫШЕ ТРОПОСФЕРЫ: ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И НОВЕЙШАЯ ИСТОРИЯ

О. С. Угольников

Институт космических исследований РАН

В лекции рассказывается о твердых и жидких частицах, появляющихся в стратосфере и мезосфере Земли. Описываются существующие методы и результаты измерений микрофизических свойств аэрозольных частиц, оптические явления, которые они вызывают на небе. Показывается высокая эффективность измерений фона неба с помощью широкоугольных цветных и поляризационных камер для измерения размеров частиц. Особенный акцент делается на серебристые облака, появляющиеся в области глубокого летнего температурного минимума в верхней мезосфере Земли и отражающие процесс быстрого похолодания этого слоя в последние десятилетия.

CLOUDS AND AEROSOL ABOVE TROPOSPHERE: OPTICAL OBSERVATIONS. THE NEWEST HISTORY

O. S. Ugolnikov Russian Space Research Institute

In this lecture the solid and liquid particles in stratosphere and mesosphere of the Earth are described. The methods of study of microphysical properties of particles and the optical phenomena that they cause in the sky are described. High effectiveness of sky background measurements by color and polarization all-sky cameras for size estimation is shown. The basic attention is paid to noctilucent clouds appearing in the layer of deep summer temperature minimum in upper mesosphere and reflecting the process of fast cooling of this layer during the recent decades.

История наблюдений

Высокие слои атмосферы в течение многих веков оставались «белым пятном», совершенно неизвестным ученым. Даже окружающее

[©] Угольников О. С., 2018

¹⁰⁵

космическое пространство, не говоря уже о нижних слоях атмосферы, имело более понятные свойства. Отправить хотя бы в стратосферу какой-либо прибор, способный изучить ее состав, было невозможно до первой половины XX в. Изучить высокие слои атмосферы удаленно (например, по взаимодействию среды с излучением) было затруднительно из-за значительно более сильного влияния плотных нижних слоев. Данная проблема могла быть решена в период сумерек, когда нижние слои атмосферы погружаются в тень Земли (см. обзор [1]). Приземные слои по-прежнему будут вносить вклад в яркость неба посредством многократного рассеяния, тем не менее именно в период сумерек оптические особенности высоких слоев (и, в частности, наличие там аэрозольных частиц) проявляются сильнее всего.

Мезосфера Земли, расположенная на высотах 50—90 км, остается труднодоступной для прямых измерений даже сейчас: в ней невозможны ни полеты аэростатов, ни движение искусственных спутников Земли. Прямые измерения носили лишь кратковременный характер и проводились с середины XX в. с борта геофизических ракет. До этого скудные данные о мезосфере удавалось получить на основе анализа полета метеорных тел. Высоты сгорания метеоров (60—100 км) были определены еще в конце XVIII в. Сам факт столь большой высоты указывал на то, что линейное уменьшение температуры с высотой, имеющее место у поверхности Земли, на каком-то уровне должно останавливаться и сменяться ее ростом. Однако до открытия озонового слоя в начале XX в. ничего не было точно известно о высотах, где этот рост начинается, и о причинах данного явления.

Еще более скудной была информация о возможности существования в высоких слоях атмосферы аэрозольных частиц. В разреженном воздухе уже при размере около нескольких микрометров частица должна достаточно быстро опускаться вниз. Увеличение температуры в стратосфере в сочетании с низким давлением делает невозможной кристаллизацию льда (исключение, как сейчас известно, может иметь место только в зимней полярной стратосфере при температурах ниже 190 К). Видимые облака располагались ниже самых высоких горных вершин. Более высокие слои воздуха долгое время считались абсолютно чистыми от аэрозоля.

Подобное мнение сохранялось почти до конца XIX в., пока не случилось событие, в корне перевернувшее все эти представления и, по сути, ставшее стартовой точкой всей науки об аэрозоле в высоких

слоях атмосферы. 23 августа 1883 г. началось извержение вулкана Кракатау между островами Суматра и Ява (Индонезия). 27 августа оно достигло максимума. Полная мощность извержения составила 200 млн т в тротиловом эквиваленте [2].

Выброшенные при извержении пепел и аэрозоль уменьшили прозрачность атмосферы к оптическому излучению Солнца и ослабили его поток на поверхности Земли. Результатом стало похолодание на нашей планете в среднем на 1.5 К в течение последующих лет. Это был уже не первый случай похолодания на Земле вследствие вулканических извержений. Достаточно вспомнить «годы без лета» на Руси в 1601—1603 гг., вызвавшие массовый голод и фактически положившие начало периоду Смутного времени. Вероятной причиной этого тяжелого для нашей страны события является извержение вулкана Уайнапутина в Южной Америке в феврале 1600 г. По своей мощности оно было сопоставимо с извержением Кракатау в 1883 г. Однако напрямую связать климатические изменения с активностью вулкана, да еще и столь отдаленного, в XVII в. еще не было возможности. В конце XIX в. эта связь была твердо установлена.

Через некоторое время после извержения в разных местах поверхности Земли стали наблюдаться оптические атмосферные явления, невидимые ранее. Обзор этих явлений приведен в книге [3]. Одно из таких явлений — аномально низкая яркость Луны во время полного затмения 4 октября 1884 г., которое было видно в Европе. В середине затмения Луна практически исчезла с неба Земли. На связь этой аномалии с вулканом обратил внимание Камилл Фламмарион [4]. Тот факт что вулканические выбросы препятствовали распространению солнечного излучения через атмосферу Земли к Луне, указывал на значительную высоту выбросов (10 км и выше) и их глобальное распространение над всей поверхностью Земли.

Другие два явления были связаны с появлением в атмосфере качественно новых (по крайней мере, как считалось в то время) образований, и каждому из них была посвящена статья в уже существовавшем тогда журнале Nature. Оба новых объекта были видны в сумерки, когда Солнце подсвечивает слои атмосферы, начиная с определенной высоты. Эта высота определяется текущим положением Солнца под горизонтом и может быть легко вычислена.

Буквально вскоре после извержения резко изменился цвет вечерней и утренней зари, в нем значительно усилились красно-пурпурные оттенки [5]. Необычный цвет сохранялся в течение сумерек достаточно долго, из чего был сделан вывод, что атмосферная субстанция,

вызывающая это явление, располагается в широком слое со средней высотой более 20 км. Ряд исследователей объясняли окраску зари эффектами дифракции [6], однако более правильная интерпретация была дана позже [7] и состояла в покраснении света Солнца у горизонта при наблюдении из высоких слоев атмосферы, содержащих вулканическую пыль. Длительность периодов наблюдений эффекта пурпурных зорь и обширность зон их наблюдения указывали на то, что продукты вулканических выбросов быстро переносятся ветрами и надолго задерживаются в стратосфере. К примеру, выбросы Кракатау за 12 дней совершали полный оборот над экватором Земли. Явления пурпурных зорь наблюдались регулярно и в последующее время, усиливаясь после вулканических извержений [8].

Однако самое неожиданное оптическое явление случилось почти через два года после извержения Кракатау. Практически одновременно, начиная с 8 июня 1885 г., наблюдатели в нескольких странах — Германии, России, Чехии, Эстонии — заметили странные облака, которые светились в достаточно глубокие сумерки, вблизи местной полуночи. Вскоре статья о новом типе атмосферных объектов появилась в журнале Nature [9]. Это свечение в темные сумерки дало возможность легко определить высоту облаков, которая составляла от 80 до 85 км [10]. Существование облаков на такой высоте казалось невозможным, хотя понимание, что атмосфера доходит до этих высот, уже было, так как высоты сгорания метеоров были определены триангуляционным способом за век до появления серебристых облаков и были близки к ним по значению.

На возможную связь серебристых облаков с метеорами, как главными поставщиками пыли в верхнюю атмосферу, указывал факт появления облаков не только в поствулканическую эпоху. Нужно отметить, что наполнение мезосферы вулканическими выбросами возможно только при очень сильных извержениях, наподобие Кракатау в 1883 г. Тем не менее облака оставались видимыми в конце XIX и начале XX в., их яркость резко увеличилась в первые дни июля 1908 г., после падения Тунгусского метеорита. Аномально светлые ночи наблюдались в Европе и Азии от Англии до Центральной Сибири места предполагаемого падения. Это требовало особого объяснения, которое было дано в рамках гипотезы о кометном происхождении Тунгусского метеорита. До столкновения с Землей он двигался под некоторым углом к радиусу-вектору, и частицы кометного хвоста выпадали в атмосферу над длинной полосой, в которой и регистрировались аномально светлые ночи.
После некоторого спада активности к середине XX в. частота появления серебристых облаков вновь стала увеличиваться, что особенно хорошо заметно по спутниковым наблюдениям [11]. В настоящее время на широтах, соответствующих средней полосе России, серебристые облака можно регулярно наблюдать июньскими и июльскими ночами. В северных районах нашей страны в это время ночи очень светлые, однако там серебристые облака часто бывают видны в августе. Все это относится и к вулканически спокойным периодам, и к эпохам умеренной метеорной активности. Очевидно, что действует какой-то вековой процесс, изменивший физические условия в мезосфере и сделавший условия для появления серебристых облаков более благоприятными.

Аналогичная ситуация имеет место с аэрозолем в стратосфере, который не исчезает в вулканически спокойные эпохи. Более того, содержание такого «фонового» аэрозоля в последние годы проявляет тенденцию к устойчивому росту [12]. Поиск причин этих трендов стало важной задачей физики атмосферы на рубеже тысячелетий. Проблема проявляет тесную связь с физикой и химией стратосферного и мезосферного аэрозоля, которые будут описаны в следующей главе.

Физика и химия аэрозольных частиц

Дискуссии относительно свойств и состава частиц серебристых облаков начались сразу же после их обнаружения. Тем не менее основная модель — ледяная — была окончательно подтверждена только на рубеже XX и XXI вв. в ходе работы спутника UARS (Upper Atmosphere Research Satellite [13]). Образование льда при низких давлениях (примерно 5×10^{-6} от давления на поверхности Земли) возможно только при очень низких температурах, что и вызывало сомнения в ледяной природе облаков в течение многих десятилетий. Измерения температур в верхней мезосфере стали возможны только во второй половине XX в., они показали наличие глубокого минимума вблизи мезопаузы. Примечательно, что наиболее низкие температуры фиксируются летом, а не зимой. Это связано с особенностями прохождения через атмосферу акустико-гравитационных волн и переноса воздуха. Летом в мезосфере высоких широт преобладают восходящие потоки, в которых воздух быстро охлаждается.

На рис. 1 показаны примеры вертикальных профилей давления насыщенного пара и парциального давления H₂O по измерениям на



Рис. 1. Вертикальные профили температуры и парциального давления водяного пара в сравнении с предельными значениями для кристаллизации льда

спутнике EOS Aura [14] для зимы и лета на широте $70^{\circ}N$. Эти же профили можно интерпретировать как зависимости температуры и порога кристаллизации для частиц льда (верхняя горизонтальная ось на том же рисунке). Образование льда возможно, если температура ниже пороговой или, то же самое, парциальное давление больше давления насыщенного пара. По графикам видно, что такая ситуация достаточно стабильно реализуется в тропосфере, где и возникает большинство облаков. В более высоких слоях атмосферы подобная картина может иметь место только в узких слоях и в определенные сезоны года. Один из таких слоев — верхняя летняя мезосфера (80— 90 км), где образуются серебристые облака.

Необходимость низких температур, как представляется в настоящее время, и является основной причиной молодости серебристых облаков и увеличивающейся частоты их наблюдения. Измерения последних десятилетий указывают на вероятность негативных температурных трендов в верхней мезосфере, особенно в высоких широтах летом [15, 16]. То есть до конца XIX в. на широтах, соответствующих Центральной Европе, мезосферная температура могла не опускаться до порога замерзания льда. Резкая зависимость условий возник-

новения серебристых облаков от температуры является причиной частого появления волновой структуры в картине облаков. Через мезосферу проходят акустико-гравитационные волны, и температура на гребне волны и между волнами может отличаться на десятки градусов.

Негативный температурный тренд в мезосфере заставляет задуматься о его причинах, в том числе антропогенных [17]. Интересно, что они могут быть общими с «глобальным потеплением» у поверхности Земли и состоять в увеличении содержания парниковых газов, прежде всего CO₂ [18, 19]. В мезосфере молекулы диоксида углерода сталкиваются с атомами кислорода и высвечивают энергию в виде инфракрасного излучения, тем самым уводя тепло из атмосферы.

Тем не менее нельзя говорить о том, что мезосферные облака не существовали до конца XIX в. Вероятнее всего, они имели меньшую область распространения, образуясь только в приполярных широтах, где температурный минимум наиболее глубокий. Эти облака оставались незамеченными не столько из-за малонаселенности приполярных районов Земли, сколько из-за полярного дня и белых ночей, совпадающих по времени с температурным минимумом. В XX в. спутниковые наблюдения [20] показали практически непрерывное наличие облаков вблизи полюса. Подобные облака, состоящие из малых частиц и незаметные визуально, принято называть полярными мезосферными облаками, а термин «серебристые» относится к облакам, доступным для непосредственных наблюдений с поверхности Земли.

Помимо низкой температуры для образования ледяной частицы в разреженной среде необходимо наличие ядер конденсации. В их качестве могут выступать гидратные ионы [21], а также частицы метеорного происхождения [22]. Короткий период наблюдений (июнь июль) в средних широтах, не охватывающий периодов активности сильных метеорных потоков, не дает возможность проверить их корреляцию с появлением серебристых облаков, однако в более северных широтах, где облака наблюдаются и в августе, существует тенденция к усилению их активности после максимума Персеид (см. далее).

Сами метеорные частицы достаточно крупные, но при попадании в атмосферу Земли они дробятся на более мелкие и, в пределе, на микрочастицы «метеорного дыма» [23] размером всего в несколько нанометров. Они могут находиться вблизи мезопаузы (90 км) длительное время, собирая вокруг себя водяной лед. Увеличиваясь в размере и массе, частицы опускаются вниз. На высотах менее 80 км

температура уже превышает 150 К и лед быстро испаряется. Именно этим объясняется то, что серебристые облака видны несколько ниже слоя температурного минимума и диапазон наблюдаемых высот очень узок: способность частицы с размером менее длины волны рассеивать свет зависит от ее радиуса r как r^6 , и мы видим только самую крупную фракцию частиц (до 0.1 мкм). Это же делает измерение радиуса частиц важным для понимания свойств летней мезосферы высоких широт.

Другой слой атмосферы, где может возникнуть лед, как видно на рис. 1, — полярная стратосфера, только теперь уже зимняя. В большинстве случаев над зимним полюсом образуется устойчивый полярный стратосферный вихрь, препятствующий проникновению теплого воздуха из низких широт. Ледяные частицы образуют полярные стратосферные или перламутровые облака. Они наблюдаются достаточно редко, но, если это случается, представляют собой очень красивое зрелище. Частицы полярных стратосферных облаков значительно крупнее (до 1 мкм и более) и характеризуются сложным химическим составом. Помимо водяного льда они могут состоять из переохлажденного раствора серной и азотной кислот. В начале весны, при проникновении в стратосферу солнечного ультрафиолетового излучения, на поверхности частиц стратосферных облаков начинаются химические реакции, приводящие, в частности, к уничтожению молекул озона O₃ и появлению «озоновых дыр».

Над большей частью поверхности Земли, включая средние широты, полярные стратосферные облака образоваться практически не могут из-за слишком высокой температуры. Из этого можно сделать вывод, что стратосферный аэрозоль, создающий эффект «пурпурных зорь» и появляющийся после вулканических извержений, имеет иную природу. В середине XX в. начались прямые аэростатные измерения состава стратосферы, в ходе которых Юнге и соавторы [24] обнаружили аэрозольные частицы на высоте около 20 км, этот слой был назван слоем Юнге. Их химический состав был изучен спустя 10 лет [25]: частицы представляли собой концентрированный раствор серной кислоты H₂SO₄, который может существовать во всем диапазоне температур, наблюдающемся в стратосфере.

Механизм образования стратосферного аэрозоля связан не с вулканическим пеплом, как это казалось ранее, а с выбросами сернистого газа SO_2 . В тропосферных условиях этот газ не вступает в активные химические реакции, поэтому слабые извержения вулканов, выбросы которых не достигают стратосферы, особо не сказываются на

оптических характеристиках воздуха вдали от самих вулканов. Ситуация кардинально меняется в стратосфере. Существующие в ней озон, свободные атомы кислорода и радикалы гидроксила ОН через промежуточные продукты (SO₃, HSO₃) превращают сернистый газ в серную кислоту, переходящую в жидкое состояние.

В 70-е гг. XX в. началось регулярное аэростатное зондирование стратосферного аэрозоля в штате Вайоминг (США) [26], продолжающееся до настоящего времени. За этот период произошло два мощных извержения вулканов (Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г.), были и вулканически спокойные отрезки времени, когда стратосферный аэрозоль был в фоновом состоянии. Измерения показали, что фоновый и вулканический аэрозоль отличаются не только количеством, но и размером частиц, у вулканического аэрозоля он существенно больше (до 0.3—0.4 мкм против 0.1 мкм у фоновых частиц). Попадая в полярную стратосферу, частицы сульфатного аэрозоля могут становиться ядрами конденсации для полярных стратосферных облаков, которые, таким образом, также коррелируют с вулканической активностью.

Еще в XX в. было обращено внимание на постепенное увеличение содержания фонового аэрозоля, но в то время это могло быть связано с изменением качества и чувствительности измерительной аппаратуры. В XXI в. данный рост был уже надежно установлен [12], и он также может быть связан с антропогенной деятельностью, а именно с увеличением выбросов сернистого газа в атмосферу. Таким образом, как и в случае серебристых облаков, вопрос о наблюдении стратосферного аэрозоля имеет экологический аспект. Контроль за количеством и составом аэрозоля важен и вне периодов вулканической активности.

Измерение микрофизических параметров частиц

Основной проблемой изучения стратосферных и особенно мезосферных аэрозольных частиц является трудность контактных измерений с борта прибора, расположенного непосредственно в нужном атмосферном слое. Если в стратосферу еще можно отправить аэростат, то в мезосфере невозможны длительные полеты каких-либо аппаратов.

В такой ситуации основную функцию по изучению микрофизики аэрозоля могут взять на себя методы удаленного зондирования как с Земли, так и с борта ее искусственных спутников. В подавляющем большинстве случаев зондирование происходит на оптической основе: аэрозольные частицы рассеивают свет Солнца или какого-либо другого (в том числе искусственного) источника света. Свойства рассеяния зависят от размера частиц и в случае сфер субмикронных и микронных радиусов описываются теорией Ми. Рассеянный свет в той или иной степени поляризован, поэтому измерения поляризации могут существенно уточнить данные о размерах частиц.

Спутниковый анализ может быть особенно эффективным, если он использует лимбовую схему измерений: аппарат находится сбоку от исследуемого слоя, и регистрируемое рассеянное (или поглощаемое) излучение распространяется по касательной к этому слою. Данный способ позволяет достичь хорошего разрешения по высоте, а также может усилить чувствительность за счет большой длины луча сквозь данный слой.

Суть спутниковых измерений размера частиц, как правило, сводится к измерению коэффициента рассеяния или поглощения единицы объема воздуха, содержащего аэрозоль, на разных длинах волн и сравнению полученных данных друг с другом. Если количество инструментальных цветовых полос не меньше трех, то можно поставить задачу восстановления распределения частиц по размерам. В случае стратосферного и мезосферного аэрозоля это распределение обычно считается логнормальным (нормальным по логарифму радиуса частицы):

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta r}} \exp \frac{-\ln^2(r/r_0)}{2\zeta^2}; \quad \zeta = \ln \sigma.$$
 (1)

Здесь r_0 — среднелогарифмический радиус частицы (будем далее называть его просто средним), σ — ширина распределения, причем для монодисперсного распределения (все частицы одинаковые) σ = = 1. Спутниковое зондирование стратосферного аэрозоля лимбовым методом проводится в ряде экспериментов, в том числе OSIRIS на шведско-канадском аппарате Odin [27], а изучение серебристых облаков проводилось в конце XX в. на спутнике SAGE II [28] и в начале XXI в. при помощи аппаратуры SCIAMACHY на европейском спутнике Envisat [29].

Похожая методика используется в лидарном зондировании, при котором область атмосферы освещается мощным вертикальным лазерным импульсом, после чего регистрируется обратный рассеянный сигнал. За счет очень высокого разрешения этого сигнала по времени удается достичь высотного разрешения, недостижимого для других

методов (существенно лучше 1 км). Данные о размерах частиц получаются на основе сравнения рассеянных сигналов в разных длинах волн. Метод использовался для анализа стратосферного аэрозоля [30]. Лидарный анализ систематически применялся для изучения серебристых облаков, обзор результатов приведен в [31]. Для решения ряда задач, в том числе для поиска несферичных частиц, эффективны кросс-поляризационные лидарные измерения, при которых лазер и приемник работают во взаимно перпендикулярных направлениях поляризации [32].

Лимбовая спутниковая и лидарная схемы измерений опираются на данные при одном угле рассеяния (180° для лидара и какое-то одно фиксированное значение, определяемое текущей геометрией, для спутника). Другие методы измерений связаны с одновременным анализом свойств рассеяния света под разными углами. Очевидно, при этом нужно делать предположение о пространственной однородности микрофизических свойств частиц. Подобная схема может быть реализована с помощью камер всего неба, фиксирующих фон рассеянного излучения. Для изучения стратосферы или мезосферы подобные измерения нужно производить в определенный период сумерек, когда исследуемый слой еще освещен Солнцем, а более низкие и плотные слои погружены в тень Земли. В этот момент аэрозоль будет проявлять себя наиболее заметно, изменяя интенсивность, спектральный состав и поляризацию фона неба. Необходимо отметить, что к началу XXI в. данные о поляризации света серебристых облаков имелись только для углов рассеяния, не превышающих 80° [33].

С 2011 г. в Чепелево (Московская область) начала работу поляризационная камера всего неба [34, 35]. Одной из ее задач было измерение температуры в мезосфере [36]. За время наблюдений в полосе с эффективной длиной волны 540 нм дважды были зафиксированы общирные поля серебристых облаков на углах рассеяния вплоть до 130°. Особого внимания заслуживают очень яркие облака вечером 5 июля 2015 г., покрывавшие большую часть неба. Метод выделения поля облаков на фоне сумеречного неба и определения его поляризации подробно описан в [37]. На рис. 2 показаны зависимости поляризации света, рассеянного серебристыми облаками, от угла рассеяния. Для сравнения приведена релеевская кривая, соответствующая малым частицам (менее 100 нм), она оказывается в хорошем согласии с измерениями.

Другой эффект, который может использоваться для определения размеров частиц серебристых облаков, — изменение их цвето-



Рис. 2. Поляризация света, рассеянного частицами серебристых облаков, по данным наблюдений в сравнении с теоретической кривой для малых частиц

вых характеристик в зависимости от угла рассеяния. Для размеров ледяных частиц, характерных для серебристых облаков, теория Ми предсказывает практически одинаковые угловые распределения интенсивности рассеянного света для разных длин волн в оптическом диапазоне. Изменение цветового индекса рассеяния очень невелико и линейно по косинусу угла рассеяния [38], наклон определяется размером частиц. В области зари должно наблюдаться незначительное посинение облаков. При этом необходимо принимать в расчет все другие факторы, влияющие на цвет облаков (поглощение в полосах Шапюи озона, релеевское рассеяние и т. д.). Данный эффект был зарегистрирован по наблюдениям с трехцветной (RGB) камерой всего неба, установленной на станции Ловозеро в Мурманской области. На рис. 3 показана зависимость цветового индекса от угла рассеяния, на которой указанный эффект хорошо заметен. Интересно, что яркие и обширные серебристые облака наблюдались там в ночь с 12 на 13 августа 2016 г., менее чем через сутки после максимума метеорного потока Персеиды.

На рис. 4 показаны области возможных значений параметров логнормального распределения частиц серебристых облаков по размерам на основе поляризационного и цветового анализа в сравнении с результатами лидарного, ракетного и спутникового зондирования,



Рис. 3. Цветовой индекс серебристых облаков в альмукантарате с зенитным расстоянием 45° в зависимости от углового расстояния от Солнца (угла рассеяния)

приведенными в обзорах [31, 39]. Мы видим хорошее согласие результатов. Эффективный размер частицы (или ее размер в случае монодисперсного распределения с $\sigma = 1$) составляет около 55 нм, а средний размер при распределении с $\sigma = 1.4$, принимаемом в большинстве работ, примерно вдвое меньше, около 30 нм.

Аналогичная работа может производиться для стратосферного аэрозоля, в этом случае эффективными будут одновременные измерения цвета и поляризации (в каждой из длин волн). Разработанные для стратосферного аэрозоля методы (цветовой и поляризационный) [40] позволяют определить средний размер частиц в зависимости от высоты. На рис. 5 показаны профили для вечерних сумерек 27 марта 2016 г. в сравнении со спутниковым профилем эксперимента OSIRIS [27] на другую дату и пункт Земли. Профили достаточно похожи, на них заметен максимум на высоте около 22 км, соответствующий слою Юнге. Этот максимум менее выражен на сумеречных профилях, что связано с более низким высотным разрешением. При этом само распределение частиц по размерам очень близко к типичным значениям, полученным в ходе аэростатных измерений [26]: $r_0 = 0.09$ мкм, $\sigma = 1.6$.



Рис. 4. Параметры логнормального распределения частиц серебристых облаков по размерам на основе поляризационного и цветового анализа (по двум парам длин волн)

Заключение

В данной работе были рассмотрены два класса частиц в земной атмосфере: ледяные частицы в верхней летней мезосфере, образующие серебристые облака, и сульфатные частицы в стратосфере. Эти частицы, хотя и имеют разную природу и области появления, связаны несколькими общими свойствами. Во-первых, они одновременно обратили на себя внимание наблюдателей вслед за извержением вулкана Кракатау в 1883 г., хотя, бесспорно, они существовали в атмосфере и ранее. Во-вторых, в настоящее время, буквально в последние годы и десятилетия, оба типа объектов обнаруживают тенденцию к увеличению числа частиц и частоты появления, и в обоих случаях это может иметь антропогенные причины.

Как серебристые облака, так и стратосферный аэрозоль (сюда можно включить и полярные стратосферные облака) порождают красивые оптические явления, которые можно наблюдать невооруженным глазом в период сумерек. Столь заметное проявление на небе дает возможность проводить исследования физических особенностей аэрозольных частиц посредством цветовых и поляризационных камер всего неба. Будучи значительно более дешевыми и простыми в использовании, нежели лидары или космические аппара-



Рис. 5. Примеры вертикальных профилей среднего размера частиц по данным цветового и поляризационного анализа фона сумеречного неба в сравнении со спутниковыми измерениями

ты, эти приборы могут давать сопоставимую по точности информацию о микрофизике аэрозоля. Необходимо отметить, что в настоящее время большое количество цветных камер всего неба установлено в северных широтах для регулярного мониторинга полярных сияний; данные камеры можно также использовать как сеть аэрозольных измерений. Для этого время их работы нужно расширить в сумерки, включая светлые летние ночи.

Автор выражает благодарность И. А. Маслову (ИКИ РАН), Б. В. Козелову и А. В. Ролдугину (Полярный геофизический институт, г. Апатиты) за разработку приборов и сотрудничество в проведении экспериментальных исследований средней и верхней атмосферы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-05-00170.

Библиографические ссылки

- 1. Розенберг Г. В. Сумерки. М. : Физ.-мат. лит., 1963.
- Self S., Rampino M. R. The 1883 eruption of Krakatau // Nature. 1981. – Vol. 294. – P. 699.

- 3. Symons G. J. The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena (Report of the Krakatoa Committee of the Royal Society). L., 1888.
- 4. Flammarion C. L'eclipse totale de lune du 4 Octobre // L'Astronomie. 1884. Vol. 3. P. 401.
- 5. Clark J. E. The remarkable sunsets // Nature. 1883. Vol. 29. P. 130.
- 6. Russell F. A. R. Proximate physical cause of the unusual twilight glows in 1883-4 // The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena. 1888. P. 178.
- Gruner P., Kleinert H. Die Dammerungserscheinungen (Grand, Hamburg, Germany). – 1927. – P. 10.
- Lee R. L., Hernandez-Andres J. Measuring and modeling twilight's purple light // Applied Optics. - 2003. - Vol. 42. - P. 445.
- 9. Leslie R. C. Sky Glows // Nature. 1885. Vol. 32. P. 245.
- 10. Jesse O. Die Hohe der leuchtenden Nachtwolken // Astron Nachr.
— 1896. Vol. 140. P. 161.
- DeLand M. T., Thomas G. E. Updated PMC trends derived from SBUV data // J. Geophys. Res. - 2015. - Vol. 120. - P. 2140.
- Solomon S., Daniel J. S., Neely III R. R. et al. The persistently variable "background" stratospheric aerosol layer and global climate change // Science. - 2011. - Vol. 333. - P. 866.
- Hervig M., Thompson R. E., McHugh M. et al. First confirmation that water ice is the primary component of polar mesospheric clouds // Geophys. Res. Lett. - 2001. - Vol. 28. - P. 917.
- Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L. et al. Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // J. Geophys. Res. - 2008. - Vol. 113. - P. D15S11.
- Beig G., Keckhut P., Lowe R. P. et al. Review of Mesospheric Temperature Trends // Rev. Geophys. - 2003. - Vol. 41. - P. 1015.
- 16. Beig G. Trends in the mesopause region temperature and our present understanding an update // Phys. Chem. Earth. 2006. Vol. 31. P. 3.
- Beig G. Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 1. Anthropogenic influences // J. Geophys. Res. – 2011. – Vol. 116. – P. A00H11.
- Houghton J. T. Absorption and emission by carbon dioxide in the mesosphere // Quart. J. Royal Met. Soc. - 1970. - Vol. 96. - P. 767.
- Roble R. G., Dickinson R. E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // Geophys. Res. Lett. – 1989. – Vol. 16. – P. 1441.

- 20. Donahue T. M., Guenther B. The altitude of the scattering layer near the mesopause over the summer pole // J. Atmos. Sci. 1973. Vol. 30. P. 515.
- 21. Witt G. The nature of noctilucent clouds // Space Res. 1969. Vol. 9. P. 157.
- Rosinski J., Snow R. H. Secondary particulate matter from meteor vapors // J. Meteorol. - 1961. - Vol. 18. - P. 736.
- Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere // J. Atmos. Sci. – 1980. – Vol. 37. – P. 1342.
- Junge C. E., Changnon C. W., Manson J. E. Stratospheric aerosols // J. Meteorol. - 1961. - Vol. 18. - P. 81.
- Rosen J. M. The boiling point of stratospheric aerosols // J. Appl. Meteorol. - 1971. - Vol. 10. - P. 1044.
- Deshler T., Hervig M. E., Hofmann D. J. et al. Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41 N), using balloon-borne instruments // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. P. D54167.
- Bourassa A. E., Degenstein D. A., Llewellyn E. J. Retrieval of stratospheric aerosol size information from OSIRIS limb scattered sunlight spectra // Atmos. Chem. Phys. Discuss. - 2008. - Vol. 8. - P. 4001.
- Bingen C., Fussen D., Vanhellemont F. A global climatology of stratospheric aerosol size distribution parameters derived from SAGE II data over the period 1984-2000: 1. Methodology and climatological observations // J. Geophys. Res. - 2004. - Vol. 109. - P. D06201.
- Savigny C. von, Burrows J. P. Latitudinal variation of NLC particle radii derived from northern hemisphere SCIAMACHY / Envisat limb measurements // Adv. Space. Res. - 2007. - Vol. 40. - P. 765.
- Jumelet J., Bekki S., David C., Keckhut P. Statistical estimation of stratospheric particle size distribution by combining optical modelling and lidar scattering measurements // Atmos. Chem. Phys. 2008. Vol. 8. P. 5435.
- Baumgarten G., Fiedler J., Rapp M. On microphysical processes of noctilucent clouds (NLC): observations and modeling of mean and width of the particle size distribution // Atmos. Chem. Phys. - 2010. - Vol. 10. -P. 6661.
- Baumgarten G., Fricke K. H., Cossart G. von. Investigation of the shape of noctilucent cloud particles by polarization lidar technique // Geophys. Res. Lett. - 2002. - Vol. 29. - P. 1.

- Tozer W. F., Beeson D. E. Optical model of noctilucent clouds based on polarimetric measurements from two sounding rocket campaigns // J. Geophys. Res. - 1974. - Vol. 79. - P. 5607.
- 34. Угольников О. С. Атмосфера Земли: строение и оптика // Физика космоса : тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 158.
- 35. Угольников О. С. Верхняя атмосфера: встреча Земли и космоса // Физика космоса : тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3—7 февр. 2014 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — С. 112.
- Ugolnikov O. S., Maslov I. A. Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // J. Atmos. Terr. Phys. - 2013. - Vol. 105. - P. 8.
- Ugolnikov O. S., Maslov I. A., Kozelov B. V., Dlugach J. M. Noctilucent cloud polarimetry: Twilight measurements in a wide range of scattering angles // Plan. Space Sci. - 2016. - Vol. 125. - P. 105.
- Ugolnikov O. S., Galkin A. A., Pilgaev S. V., Roldugin A. V. Noctilucent cloud particle size determination based on multi-wavelength all-sky analysis // Plan. Space Sci. - 2017. - Vol. 146. - P. 10.
- 39. Kokhanovsky A. A. Microphysical and optical properties of noctilucent clouds // Earth-Sci. Rev. 2005. Vol. 71. P. 127.
- Угольников О. С., Маслов И. А. Исследования фонового стратосферного аэрозоля с помощью многоцветных широкоугольных измерений фона сумеречного неба // Косм. исслед. — 2018. — Т. 56.

РЯД ЛАПЛАСА ТЕЛ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И УРОВЕННОГО ЭЛЛИПСОИДА

К. В. Холшевников^{1,2}, Д. В. Миланов¹, В. Ш. Шайдулин¹

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

Теория фигур равновесия активно развивалась в XIX столетии, когда выяснились причины, по которым наблюдаемые массивные небесные тела (Солнце, планеты, спутники) обладают близкой к эллипсоидальной формой. Было установлено, что существуют и в точности эллипсоидальные фигуры. Гравитационный потенциал таких фигур представляется рядом Лапласа. Его коэффициенты (гармонические коэффициенты, или постоянные Стокса I_n) определяются одним из двух способов. Во-первых, с помощью некоторого интегрального оператора, если известно распределение плотности внутри тела. Во-вторых, с помощью преобразования внешнего гравитационного потенциала, если известен последний. В представленной работе первым способом найдена асимптотика І_n для эллипсоида, эквиденситы (поверхности равной плотности) которого являются эллипсоидами вращения с возрастающим от центра к периферии сжатием. Оказалось, что асимптотика зависит только от средней плотности, плотности на поверхности внешнего эллипсоида и его сжатия. Вторым способом найдены I_n и их асимптотика для уровенного эллипсоида. Эти асимптотики совпадают только для эллипсоидов Маклорена. Следовательно, если уровенный эллипсоид не является маклореновским, его эквиденситы не могут быть эллипсоидами.

LAPLACE SERIES FOR ELLIPSOIDAL STRUCTURE'S BODIES AND LEVEL ELLIPSOID

K. V. Kholshevnikov^{1,2}, D. V. Milanov¹, V. Sh. Shaidulin¹ ¹Saint Petersburg State University, ²Institute of Applied Astronomy RAS

© Холшевников К. В., Миланов Д. В., Шайдулин В. Ш., 2018



Theory of the figures of equilibrium was developed actively during XIX century when causes were discovered making the form of observable massive celestial bodies (the Sun, planets, moons) almost ellipsoidal. The existence of exactly ellipsoidal figures was established. The gravitational potential of such figures can be presented by the Laplace series. Its coefficients (harmonic coefficients, or Stokes constants I_n) are determined via one of two ways, first, by a definite integral operator if density distribution inside the body is known, second, by a certain transformation of the outer gravitational potential if it is known. In the present paper asymptotics of I_n is found using the first approach for an ellipsoid if its equidensites (surfaces of equal density) are ellipsoids of revolution. It is supposed that equidensites' oblateness increases from the centre to the periphery. It turned up that asymptotics depend on the mean density, density on the surface of the boundary ellipsoid, and its oblateness only. Coefficients I_n and their asymptotics are found using the second approach for a level ellipsoid. Both asymptotics coincide for Maclaurin ellipsoids only. Hence, if the level ellipsoid is not a Maclaurin one then its equidensites cannot be ellipsoids.

Введение

Представление гравитационного потенциала эллипсоидов со времен Ньютона являлось важной областью математического естествознания. Сотни работ посвящены этой теме. Результаты собраны в многочисленных монографиях, см., например, [1-8]. В частности, еще Лежандр [9] сумел вычислить коэффициенты Стокса ряда Лапласа однородного эллипсоида вращения, и этот результат приводится в учебниках и монографиях. В работах [10, 11] он обобщен на случай эллипсоида вращения, эквиденситами (поверхностями равной плотности) которого служат произвольные эллипсоиды, подчиненные лишь ограничению возрастания их сжатия от центра к периферии. В остальном распределение масс подчинено лишь условию убывания плотности от центра к периферии. Наложенные условия естественны. А. М. Ляпуновым доказано, что равномерно и медленно вращающиеся фигуры, находящиеся в равновесии под действием гравитации, гидростатического давления и центробежных сил, являются фигурами вращения [12]. Как показал Клеро [1, гл. 4], [8, гл. 1], для таких фигур выполняется условие возрастания сжатия. Здесь мы исследуем свойства коэффициентов Стокса ряда Лапласа уровен-

ного эллипсоида вращения, для которого распределение масс неизвестно. Оказывается, что за исключением эллипсоидов Маклорена эквиденситы уровенного эллипсоида не могут быть эллипсоидами.

Коэффициенты Стокса эллипсоидальных фигур

В этом параграфе мы кратко опишем результаты работы [11]. Введем криволинейные координаты u, θ, λ , удобные для исследования эллипсоидальных фигур вращения:

$$\begin{aligned} x &= au \sin \theta \cos \lambda, \\ y &= au \sin \theta \sin \lambda, \\ z &= a\varphi(u) \cos \theta. \end{aligned}$$
 (1)

Сплошной эллипсоид $T \in \mathbb{R}^3$ представляет собой образ множества $[0,1] \times [0,\pi] \times [0;2\pi)$ при отображении (1) и расслаивается на семейство эллипсоидов вращения $\{S(u)\}$

$$\frac{x^2 + y^2}{u^2} + \frac{z^2}{\varphi^2(u)} = a^2.$$
 (2)

Считаем функцию φ гладкой на промежутке $0\leqslant u\leqslant 1$ и, кроме того, наложим еще четыре условия:

- поверхности семейства $\{S(u)\}$ не пересекаются и вложены друг в друга;
- семейство $\{S(u)\}$ стягивается к точке S(0), общему центру эллипсоидов S(u);
- эллипсоиды S(u) сжаты, причем сжатие $(u-\varphi)/u$, а тем самым и квадрат первого $\varphi_1(u) = (u^2 \varphi^2)/u^2$, и квадрат второго эксцентриситета $\varphi_2(u) = (u^2 \varphi^2)/\varphi^2$ меридионального сечения эллипсоида возрастают (хотя бы нестрого) вместе с u;
- наружный эллипсоид S = S(1) не является сферой, так что с учетом первого условия его сжатие α и эксцентриситет ε заключены строго между нулем и единицей. Связь между сжатием и эксцентриситетом однозначна:

$$\varepsilon = \sqrt{2\alpha - \alpha^2}, \quad \alpha = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-3)!!}{(2n)!!} \varepsilon^{2n} = (3)$$
$$= \frac{1}{2} \varepsilon^2 + \frac{1}{8} \varepsilon^4 + \frac{1}{16} \varepsilon^6 + \dots,$$
$$125$$

где коэффициенты ряда положительны и он сходится абсолютно и равномерно при $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Эти условия выполнены в случае твердотельно вращающихся самогравитирующих фигур равновесия, как отмечено во введении. Из них легко вывести нужные нам свойства функции φ [11].

Пусть T — эллипсоидальная фигура, эквиденситы которой — эллипсоиды S(u), так что плотность ϱ тела зависит только от u. Считаем $\varrho(u)$ интегрируемой, убывающей (хотя бы нестрого) и ограниченной. Обозначим через ($\mathcal{G}M/a$)V гравитационный потенциал тела T. Здесь \mathcal{G} — гравитационная постоянная, M — масса T. По осевой симметрии ряд Лапласа для V содержит лишь зональные гармоники [7]. Именно, в произвольной точке Q(x, y, z) вне объемлющей T сферы

$$V(Q) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n\left(\frac{z}{r}\right).$$
(4)

В частности, на положительной части оси z в точке $Q_0(0, 0, r)$

$$V(Q_0) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} .$$
(5)

Коэффициенты Стокса (гармонические коэффициенты) I_n определяются интегралами по телу T:

$$I_n = \frac{1}{Ma^n} \iiint_T r^n P_n\left(\frac{z}{r}\right) \varrho \, d\tau, \quad M = \iiint_T \varrho \, d\tau, \tag{6}$$

где $d\tau$ — элемент объема; P_s — многочлен Лежандра со стандартной нормировкой $P_s(1) = 1$. Обратим внимание, что *а* является радиусом объемлющей сферы.

По симметрии север-юг гармоники нечетного порядка обращаются в нуль [7].

В [11] тройной интеграл (6) для четных n сведен к определенному интегралу по u:

$$I_n = (-1)^{n/2} J_n$$
, $J_n = \frac{1}{\bar{\varrho}} \int_0^1 \varrho(u) \Phi_n(u) \, du.$ (7)

Здесь и ниже $\overline{\varrho}$ — средняя плотность (отношение массы к объему), ϱ^* — наибольшая плотность, ε — эксцентриситет меридионального сечения наружного эллипсоида S, Φ — некоторая положительная функция от u.

Справедлива оценка

$$0 < J_n < \frac{B\varepsilon^n}{n(n+1)}, \qquad B = \frac{3\varrho^*}{\overline{\varrho}}$$
 (8)

и асимптотика

$$J_n \sim \frac{B_1 \varepsilon^n}{n^{\sigma}}, \qquad \sigma = 2, \qquad B_1 = \frac{3\varrho(1)}{\overline{\varrho}}.$$
 (9)

Последняя справедлива при условии непрерывности ρ в точке u = 1и $\rho(1) > 0$. Если $\rho(1) = 0$, то в (9) $\sigma > 2$ и гармонические коэффициенты J_n убывают быстрее. Напротив, бесконечная в центре (но интегрируемая) плотность не нарушает асимптотики (9).

Из (9) вытекает, что ряд (4) сходится абсолютно и равномерно вне и на поверхности сферы S_0 и расходится внутри нее. Сфера сходимости S_0 задается уравнением

$$r = a\varepsilon. \tag{10}$$

Напомним, что ряд Лапласа сходится именно к потенциалу (т. е. в (4) имеет место равенство) в пересечении указанной области и внешнего к эллипсоиду пространства. Таким образом, при малых ε ряд (4) представляет потенциал во всем внешнем пространстве, а при больших ряд расходится в части внешнего пространства в окрестности полюсов. Критическое значение эксцентриситета определяется равенством линейного эксцентриситета меридионального эллипсоида $a\varepsilon$ и полярной полуоси $c = a\sqrt{1-\varepsilon^2}$, откуда $c/a = \varepsilon = 1/\sqrt{2}$. Граничный эллипсоид изображен на рисунке.

Коэффициенты Стокса уровенного эллипсоида вращения

В предыдущем параграфе наши построения базировались на распределении плотности в теле сплошного эллипсоида T. В гравиметрии существует и другой подход, где внутреннее строение T игнорируется, а взамен предполагается, что его поверхность S является уровенной для потенциала силы тяжести (суммы гравитационных и центробежных сил) при равномерном вращении T вокруг полярной оси. В этом случае внешний гравитационный и центробежный потенциал выражаются через три параметра — a, ε и предложенный

Клеро безразмерный параметр q [12]:

$$q = \frac{3\omega^2}{4\pi \mathcal{G}\bar{\varrho}} = \frac{\omega^2 a^3 \sqrt{1-\varepsilon^2}}{\mathcal{G}M},\tag{11}$$

где ω — угловая скорость вращения. В теории медленно вращающихся фигур равновесия безразмерные величины ε^2 и q считаются малыми одного порядка.

Конкретизируем криволинейные координаты (1), полагая $u = \varepsilon \operatorname{ch} \xi, \, \varphi(u) = \varepsilon \operatorname{sh} \xi$:

$$x = a\varepsilon \operatorname{ch} \xi \sin \theta \cos \lambda,$$

$$y = a\varepsilon \operatorname{ch} \xi \sin \theta \sin \lambda,$$

$$z = a\varepsilon \operatorname{sh} \xi \cos \theta.$$
(12)

Каноническое уравнение (2) граничного эллипсоида ${\mathcal S}$ переходит в

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2(1 - \varepsilon^2)} = 1,$$
(13)

что в криволинейных координатах (12) записывается в виде

$$\xi = \chi. \tag{14}$$

Здесь χ однозначно определяется соотношениями

$$\operatorname{ch} \chi = \frac{1}{\varepsilon}, \qquad \operatorname{sh} \chi = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon}, \qquad \operatorname{th} \chi = \sqrt{1 - \varepsilon^2}.$$
 (15)



Сечение меридиональной плоскостью эллипсоида Tи семейства стягивающихся к точке эквиденсит; $c/a = \sqrt{2}/2 = 0.7071$; слева $\varphi(u) = 0.7071u$ (эллипсоиды S(u) подобны), справа $\varphi(u) = u - 0.2929u^2$ (сжатие эллипсоидов S(u) возрастает от центра к краю)

Обозначим через $(\mathcal{G}M/a)V$ гравитационный, а через $(\mathcal{G}M/a)W$ — центробежный потенциал. Постоянство суммы V+W на S однозначно определяет оба потенциала при $\xi \ge \chi$, т. е. во внешнем пространстве и на поверхности S. В координатах (12) они имеют простой вид [13]:

$$V = A_1 G_1(\operatorname{sh} \xi) + A_2 G_2(\operatorname{sh} \xi) P_2(\cos \theta),$$

$$W = A_3 \operatorname{ch}^2 \xi \left[1 - P_2(\cos \theta) \right].$$
 (16)

Здесь и ниже

$$G_1(\operatorname{sh}\xi) = \operatorname{arcctg}\operatorname{sh}\xi, \quad G_2(\operatorname{sh}\xi) = (3\operatorname{sh}^2\xi + 1)G_1(\operatorname{sh}\xi) - 3\operatorname{sh}\xi,$$

$$G_3(\operatorname{sh}\xi) = G_2(\operatorname{sh}\xi)\operatorname{th}\xi. \tag{17}$$

Постоянные A_s зависят только от ε и q:

$$A_{1} = \operatorname{ch} \chi = \frac{1}{\varepsilon}, \qquad A_{3} = \frac{q\varepsilon^{2}}{3\sqrt{1-\varepsilon^{2}}},$$
$$A_{2} = \frac{q}{3G_{3}(\operatorname{sh} \chi)} = \frac{q}{3\Psi(\varepsilon)},$$
$$\Psi(\varepsilon) := \left(\frac{3}{\varepsilon^{2}} - 2\right)\sqrt{1-\varepsilon^{2}}\operatorname{arcsin} \varepsilon - \frac{3}{\varepsilon}\left(1-\varepsilon^{2}\right). \tag{18}$$

В [12] найдено разложение

$$\Psi(\varepsilon) = 2\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2-k)(2k)!!}{(2k+5)!!} \varepsilon^{2k+3} =$$

$$= \frac{4}{15} \varepsilon^3 \left(1 + \frac{1}{7} \varepsilon^2 - \frac{8}{231} \varepsilon^6 - \ldots \right).$$
(19)

Ряд (19) сходится абсолютно и равномерно при $0 \le \varepsilon \le 1$. Ниже понадобятся следующие свойства $\Psi(\varepsilon)$. Из (18), (19) немедленно следует, что $\Psi(0) = \Psi(1) = 0$. Из (19) вытекает, что $\Psi(\varepsilon)/\varepsilon^3$ непрерывна и выпукла вверх как функция от ε^2 . Поэтому $\Psi(\varepsilon)$ положительна при $0 < \varepsilon < 1$.

Центробежный потенциал (а тем самым и постоянная A_3) нам не понадобятся. Потенциал же гравитационный надо представить рядом Лапласа. Распределение масс нам неизвестно, поэтому воспользоваться формулами (6) нельзя. Но есть другой путь. Достаточно знать внешний потенциал в точке $Q_0(0,0,r)$ на положительной части

оси z [7]. Эллипсоидальные координаты точки Q_0 суть sh $\xi = r/(a\varepsilon)$, $\theta = 0$, тогда как долготе λ на оси вращения можно придать любое значение. При указанных значениях координат

 $G_1 = \operatorname{arcctg} \zeta, \qquad G_2 = (3\zeta^2 + 1) \operatorname{arcctg} \zeta - 3\zeta, \qquad P_2 = 1, \quad (20)$

где

$$\zeta = \frac{r}{a\varepsilon} \,.$$

Нашей ближайшей целью является ряд Лорана по степеням rдля V.Поэтому следует воспользоваться известным разложением арккотангенса

$$G_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)\zeta^{2k+1}}, \qquad |\zeta| > 1,$$
(21)

откуда элементарно находим ряд для G₂:

$$G_2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{k-1}k}{(2k+1)(2k+3)\zeta^{2k+1}}, \qquad |\zeta| > 1.$$
(22)

Подставляя (21, 22) в (16), получим

$$V(Q_0) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n [2n(A_1 - 2A_2) + 3A_1] (a\varepsilon)^{2n+1}}{(2n+1)(2n+3)r^{2n+1}} \,.$$
(23)

Сравнивая (5) и (23), найдем коэффициенты Стокса I_n . При нечетных n они обращаются в нуль, а при четных n равны

$$I_n = (-1)^{n/2} J_n, \qquad J_n = \frac{n(A_1 - 2A_2) + 3A_1}{(n+1)(n+3)} \varepsilon^{n+1}.$$
 (24)

Как и должно быть по общей теории, $I_0 = J_0 = 1$.

Свойства коэффициентов Стокса уровенного эллипсоида вращения

Формула (24) показывает, что нужно рассмотреть два варианта: 1. $A_1 - 2A_2 = 0$, или, что то же,

$$q = q^*, \quad q^* := \frac{3\Psi(\varepsilon)}{2\varepsilon} = 3\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2-k)(2k)!!}{(2k+5)!!} \varepsilon^{2k+2} = (25)$$
$$= \frac{2}{5} \varepsilon^2 \left(1 + \frac{1}{7} \varepsilon^2 - \frac{8}{231} \varepsilon^6 - \dots \right).$$
$$130$$

Выражение для коэффициентов Стокса упрощается:

$$J_n = \frac{3}{(n+1)(n+3)} \varepsilon^n.$$
⁽²⁶⁾

Этот результат совпадает с результатом Лежандра для однородных эллипсоидов, как и должно быть, поскольку (25) тождественно соотношению (4.14) из [12] для эллипсоидов Маклорена.

Асимптотика (9) остается справедливой. Область сходимости $r \ge a\varepsilon$ ряда Лапласа (4) совпадает с найденной выше для эллипсоидальных фигур.

2. $A_1 - 2A_2 \neq 0$.

В этом случае асимптотика *J*_{*n*} при больших *n* другая:

$$J_n \sim \frac{B_2}{n^{\sigma}} \varepsilon^n, \ \sigma = 1, \ B_2(\varepsilon) = (A_1 - 2A_2)\varepsilon = 1 - \frac{2q\varepsilon}{3\Psi(\varepsilon)}.$$
 (27)

Замкнутое выражение и ряд для $\Psi(\varepsilon)$ приведены в (18) и (19). Общий член ряда для $\Psi^{-1}(\varepsilon)$ нам найти не удалось, но первые члены находятся без труда:

$$B_2(\varepsilon) = 1 - \frac{5q}{2\varepsilon^2} \left(1 - \frac{1}{7} \varepsilon^2 + \frac{1}{49} \varepsilon^4 + \frac{359}{11319} \varepsilon^6 \dots \right), \ |\varepsilon| < 1.$$
(28)

Из установленных в параграфе 2 свойств функции Ψ следует, что $B_2(\varepsilon) \rightarrow -\infty$ при $\varepsilon \rightarrow 1$, а ряд (28) расходится к бесконечности при $\varepsilon = 1$. Поэтому вычисления лучше проводить с рядом (19).

Замечание. Большие значения |B| (а тем более отрицательная бесконечность) кажутся парадоксальными. Но для медленно вращающихся тел они не встречаются. Напомним, что при малых q мал и ε .

Открытая область сходимости ряда (4) та же, что и в первом случае: $r > a\varepsilon$. Однако в точках сферы $r = a\varepsilon$ ряд (4) сходится абсолютно вне полюсов и лишь условно в полюсах.

Примечательно, что асимптотики (27) и (9) не совпадают. Именно, показатели степени σ отличаются на единицу. Таким образом, при $A_1 - 2A_2 \neq 0$ не существует уровенных эллипсоидов с эллипсоидальными эквиденситами. Напомним, что мы ограничиваемся эллипсоидами вращения.

Примеры

Рассмотрим три примера. Числовые данные возьмем из [14-16].

- 1. Земля. Для Земл
и $\alpha=0.00335, \, \varepsilon=0.0818, \, q=0.00345, \, q^*=0.00268.$
- 2. Сатурн. Заметим, что в Солнечной системе среди больших планет, их регулярных спутников и самого Солнца наибольшим сжатием обладает Сатурн: $\alpha = 0.0980$, $\varepsilon = 0.432$, q = 0.140, $q^* = 0.0765$.

Для обеих планет q^* значимо меньше q, что свидетельствует о быстром убывании плотности от центра к периферии.

3. Пульсар PSR B0531+21 в Крабовидной туманности: $\omega = 188 \text{ c}^{-1}$. При типичных для нейтронной звезды значениях a = 12 км и массы, равной 1.4 солнечной [17], согласно (11)

$$Q := \frac{q}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} = 3.3 \cdot 10^{-4}.$$
 (29)

Если принять $q = q^*$, то придем к

$$q = 0.00033, \qquad \varepsilon = 0.029, \qquad \alpha = 0.00042.$$

При большей массе и $q > q^*$ сжатие будет еще меньше.

Тысячу лет назад величины $q, Q, \varepsilon, \alpha$ были иными: пульсар теряет угловую скорость, перерабатывая энергию вращения в излучение. Снабдим значения этих величин сразу после взрыва сверхновой индексом 1. Значение начального периода в 19 мс, приведенное в [18], дает

$$\omega_1 = 331 \,\mathrm{c}^{-1}, \qquad Q_1 = 0.0010.$$
 (30)

Отсюда можно сделать вывод, что значительную часть углового момента унесла выброшенная при взрыве сверхновой материя. В самом деле, пусть коллапс не сопровождается выбросом массы. Тогда по закону сохранения момента импульса

$$a_1^2 \omega_1 = a_0^2 \omega_0, \tag{31}$$

где индекс 0 отмечает значения величин непосредственно перед взрывом. Для оценки примем a_0, q_0 равными значениям для Солнца. Соответствующее значение параметра Q обозначим через \tilde{Q}_1 . Из (11) и (31) следует

$$\widetilde{Q}_1 = \frac{a_0}{a_1} Q_0 \,. \tag{32}$$
132

Даже для медленно вращающегося Солнца $q_0 = 2.13 \cdot 10^{-5}$, так что правая часть (32) оценивается снизу величиной 1.24, что на три порядка расходится с оценкой (30).

Отношение угловых моментов Солнца и пульсара можно оценить по формуле

$$\frac{K_{\odot}}{K_{\text{puls}}} = \sqrt{\frac{Q_0 a_0}{Q_1 a_1} \left(\frac{M_{\odot}}{M_{\text{puls}}}\right)^3} > 21.3, \tag{33}$$

где M_{\odot} , M_{puls} — массы Солнца и пульсара.

Замечание. Соотношения (31) и (33) не учитывают изменения в форме и распределении масс при коллапсе. Соответствующую поправку для Солнца рассчитать несложно, структура же нейтронной звезды известна менее надежно. Простейшая из разумных оценок — постоянная плотность — дает значение поправочного коэффициента для правых частей (32) и (33), равное 0.15. Оценка, вероятно, занижена, поскольку плотность пульсара может изменяться на восемь порядков от центра к внешним слоям [17].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00552.

Библиографические ссылки

- 1. Пуанкаре А. Фигуры равновесия жидкой массы. М. ; Ижевск : РХД, 2000. С. 208.
- 2. Аппель П. Фигуры равновесия вращающейся жидкости. Л. ; М. : ОНТИ, 1936. С. 376.
- 3. Сретенский Л. Н. Теория ньютоновского потенциала. М. ; Л. : ГИТТЛ, 1946. С. 320.
- 4. Гобсон Е. В. Теория сферических и эллипсоидальных функций. М. : ИЛ, 1952. С. 476.
- 5. Дубошин Г. Н. Теория притяжения. М. : Физматлит, 1961. С. 288.
- 6. Чандрасекар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия. М. : Мир, 1973. С. 289.
- 7. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. М. : Наука, 1988. С. 272.
- 8. Кондратьев Б. П. Теория потенциала и фигуры равновесия. М. ; Ижевск : Изд. ИКИ, 2003. С. 624.
- 9. Legendre A. M. Mémoires présentés par les savants étrangers, X. 1785.

- Холшевников К. В., Миланов Д. В., Шайдулин В. Ш. Коэффициенты Стокса сжатого эллипсоида вращения, эквиденситы которого подобны его поверхности // Вестн. С.-Петербург. ун-та.— Сер. 1. — 2017. — Т. 4(62), вып. 3. — С. 516—524.
- 11. Холшевников К. В., Миланов Д. В., Шайдулин В. Ш. Ряд Лапласа эллипсоидальных фигур вращения // Вестн. С.-Петербург. ун-та.— Сер. 1. — 2017. — Т. 4(62), вып. 4. — С. 695—703.
- Питьев Н. П., Титов В. Б., Холшевников К. В. Фигуры равновесия небесных тел. — СПб. : Изд. СПбГУ, 2002. — С. 108.
- 13. *Грушинский Г. П.* Теория фигуры Земли. М. : Наука, 1976. С. 512.
- 14. Аллен К. У. Астрофизические величины. М. : Мир, 1977. С. 279.
- Ravit H., Galanti E., Kaspi Y. Saturn's fast spin determined from its gravitational field and oblateness // Nature. 2015. Vol. 520, iss. 7546. P. 202-204.
- Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M. The Australia telescope national facility pulsar catalogue // Astron. J. – 2005. – Vol. 129, iss. 4. – P. 1993–2007.
- 17. Потехин А. Ю. Физика нейтронных звезд // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, вып. 12. С. 1279—1304.
- 18. Kaspi V. M., Helfand D. J. Constraining the birth events of neutron stars // arXiv preprint astro-ph/0201183. 2002.

МЕТЕОРИТЫ КАК СВИДЕТЕЛИ И ПРОДУКТЫ ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, УГРОЗА И РЕСУРС НА БУДУЩЕЕ

Б. М. Шустов

Институт астрономии Российской академии наук

В этой вводной лекции затрагиваются представления о происхождении метеоритов как производных эволюции астероидов и комет (основная тема), а также угроза, связанная с метеоритами, астероидами и кометами, и тема метеоритов, астероидов и комет как космических ресурсов.

METEORITES AS WITNESSES AND PRODUCTS OF THE EVOLUTION OF THE SOLAR SYSTEM, THREAT AND RESOURCE FOR THE FUTURE

B. M. Shustov Institute of Astronomy RAS

The introductory lecture addresses understanding of the origin of meteorites as product of evolution of asteroids and comets (major topic); the threats associated with meteorites, asteroids and comets and meteorites, asteroids and comets as cosmic resources.

Введение

Современные мощные наблюдательные средства (например, радиоинтерферометр ALMA, Космический телескоп Хаббла) дали мощный толчок к развитию представлений об образовании планетных систем. Такие данные позволяют проверять и уточнять многие важные элементы наших космогонических теорий (хотя, как это и типично для науки, при этом появляются новые вопросы). В последние годы развитие космической техники позволило изучать планеты, астероиды, кометы нашей Солнечной системы что называется in situ. Но все-таки наиболее доступным средством изучения вещества твердых тел нашей Солнечной системы (кроме Земли и, в некоторой степени, Луны и Марса) остаются метеориты. Метеориты хранят следы

[©] Шустов Б. М., 2018

сложнейшего комплекса процессов, определявших образование Солнечной системы и ее эволюцию от стадии формирования первичных сгустков газо-пылевого вещества до современного состояния.

В первой части этой лекции описаны основные свойства метеоритов и обсуждается, как они согласуются с представлениями о происхождении метеоритов из их родительских тел — астероидов и комет. Во второй части лекции кратко рассматриваются вопросы изучения метеоритов, астероидов и комет, имеющие очевидный практический интерес. Представлены сведения о прогрессе в решении проблемы астероидно-кометной опасности, причем сделан акцент на недавних работах российских ученых. Также упомянуты перспективные исследованиям по разработке методов и средств использования ресурсов малых тел Солнечной системы.

Об определениях

Для начала напомним определения, используемые при рассмотрении различных классов малых тел Солнечной системы. Неопределенность используемых в научной литературе значений границ между некоторыми классами малых тел до сих пор остается довольно большой. Так, согласно официальному определению Международной метеорной организации (IMO), «метеороид — это твердый объект, движущийся в межпланетном пространстве, размером значительно меньше астероида, но значительно больше атома» (см. http: //www.imo.net/glossary\#letterm). Еще более расплывчатое определение дано там же понятию «астероид» («один из объектов, размером от менее километра до примерно 1000 км»). Эта расплывчатость понятий иногда приводит к определенным сложностям. В [1] приведен ряд примеров некорректных и сбивающих с толку использования терминов «метеороид», «метеорит», «метеорный поток» и других даже в среде профессионалов.

В значительной степени неопределенность разграничения понятий «астероид» и «метеороид» обусловлена тем, как понятие «астероид» было введено в астрономическую практику. В. Гершель более двух веков назад ввел термин «астероид» (звездообразный) для описания наблюдаемых движущихся небесных объектов, которые выглядели как звезды. То есть любой объект, который отражает достаточно солнечного света, чтобы быть наблюдаемым, и выглядит в телескопе как звезда (т. е. светящаяся точка), но отличается от звезд относительно быстрым перемещением, следует называть

астероидом. Согласно этому исходному определению даже крупный, но ненаблюдавшийся объект нельзя назвать астероидом, и, наоборот, небольшой, но (по счастливой случайности) попавший в поле зрения мощного телескопа космический скиталец классифицируется как астероид. Хороший пример — 3-метровый объект, вошедший в атмосферу Земли 7 октября 2008 г. Объект был обнаружен примерно за сутки до падения и назван астероидом 2008 TC3. На месте падения были найдены метеориты, т. е. фрагменты исходного тела. Кстати, падение 2008 TC3 было первым предсказанным падением естественного небесного тела на Землю. А с другой стороны, гораздо более крупное тело (около 17 м), вход которого в атмосферу Земли вызвал знаменитое Челябинское событие 15 февраля 2013 г., не классифицировано как астероид, так как оно вообще не наблюдалось до входа в атмосферу. Это тело можно назвать метеороидом.

Даже разделение малых тел на астероиды и кометы не всегда однозначно. Основное различие между астероидом и кометой состоит в том, что в составе основного тела (ядра) кометы содержатся летучие вещества (льды), которые в процессе приближения к Солнцу испаряются и формируют вокруг ядра газовую или газо-пылевую оболочку — кому. В развитой фазе может также сформироваться хвост или система хвостов. Эти структуры — кома и хвост — отсутствуют у астероида. Однако отличить комету, поверхностная активность у которой после неоднократных сближений с Солнцем закончилась вследствие истощения летучих или образования толстой теплоизолирующей корки тугоплавких веществ, от астероида очень сложно. Один из примеров такой выродившейся (также используют название спящей, скрытой) кометы — сближающийся с Землей астероид (14827) Гипнос [2]. Так что периодические кометы рано или поздно теряют все свои летучие вещества и превращаются в тела, трудноотличимые от астероидов. С другой стороны, ряд тел, всегда считавшихся «нормальными» астероидами, неожиданно проявляют признаки кометной активности. Пример — астероид «Дон Кихот». На протяжении тридцати лет большой околоземный астероид «Дон Кихот» (3552 Don Quixote) был известен астрономам именно как астероид. При помощи телескопа «Спитцер» установлено, что это совсем не астероид, а вполне полноценная комета с комой и еле заметным хвостом [3]. Она проявляет все признаки активности, чего по каким-то непонятным причинам не было заметно на протяжении трех десятков лет. В последнее время большое внимание привлекают т. н. активные астероиды Главного пояса. Активные астероиды (еще

Основные типы малых тел Солнечной системы

Тип малого тела	Размер тела ${\cal D}$	Свойства
Пылинка Микрометеороид	Менее 1 мм	Не имеют значения
Метеороид (все необнаруженные тела)	Более 1 мм	Состав как у метеоритов или комет
Астероид	Более 10 м условно	Состав как у метеоритов. Орбиты в основном круговые
Комета	Более 10 м условно	Состав: летучие с включением пыли и камней. Орбиты, как правило, сильно вытянутые

одно название — кометы Главного пояса) имеют орбиты, близкие к круговым, но они проявляют кометоподобную активность, вызванную массовой потерей вещества. Эта потеря может быть вызвана сублимацией, последствиями ударов, быстрого вращения и т. д. [4].

Еще один параметр, отличающий астероиды от комет, — вытянутость орбиты. Орбиты кометного типа, как правило, более эллиптичные (вытянутые), иногда со значением эксцентриситета, приближающимся к единице. Орбиты астероидов в массе менее вытянутые. Доля существенно эллиптичных орбит (характерных, например, для астероидов, сближающихся с Землей, — АСЗ) невелика, но, поскольку общее число астероидов очень велико, то количество АСЗ в целом существенно превышает количество комет, хотя и здесь выделить «истинные» астероиды и «вымершие» кометы весьма сложно. Согласно [5] примерно 6 % всех объектов, сближающихся с Землей, являются вымершими кометами, которые уже полностью истощили свои запасы летучих веществ.

Мы видим, что классификация малых тел не вполне однозначна. Нужно каждый раз уточнять, что за объект имеется в виду. Но для практических целей подобная «демократия» определений и толкований недопустима. Поэтому мы, имея в виду, что строго установленных стандартов нет, в книге [6] ввели классификацию малых тел Солнечной системы (см. таблицу).

Также напомним, что метеорит — это тело космического происхождения, упавшее на поверхность другого небесного объекта (обычно планеты, спутника планеты, астероида, кометы). С появлением

космических аппаратов микрометеориты могут быть найдены и на этих объектах. В литературе, в том числе в специальных монографиях (например, в книге Е. Л. Кринова «Тунгусский метеорит»), неверно используют этот термин. В случае падения Тунгусского тела нет достоверных доказательств существования твердых остатков (осколков) этого тела. Пока доминирует гипотеза о его полном испарении. Если что-то будет найдено, это и будет Тунгусским метеоритом. В отношении Челябинского тела (до его разрушении в атмосфере) нужно употреблять термин «метеороид» или просто Челябинское тело, а вот найденные и пока не найденные остатки Челябинского тела действительно метеориты. Ксати, болидами и метеорами называются не тела, а явления, сопровождающие высокоскоростные прохождения космического тел (большой и малой массы соответственно) в атмосфере Земли.

Общие сведения о метеоритах

Метеорное тело (метеороид) входит в атмосферу Земли на скорости от 11 до 70 км/с. За счет абляции (обгорания) масса тела значительно уменьшается. В результате из десятков и сотен тонн начальной массы до поверхности Земли может долететь всего несколько килограммов или даже граммов вещества. На Землю ежедневно поступает более 100 т внеземного вещества, в основном в виде пыли. Около 1 % этого количества — крупные обломки (метеориты).

Выделяют падения — это метеориты, прохождение которых через атмосферу Земли наблюдалось (на октябрь 2016 г. зафиксировано 1 151 официально подтвержденных падений), и находки. Находок намного больше. В базе данных The Meteoritical Society по состоянию на 20.01.2017 указаны 55 457 метеоритов с именами, 8 053 с предварительными названиями, 8 457 полнотекстовых отчетов (см. https: //www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php).

Согласно самой общей классификации метеориты делятся на примитивные метеориты, содержание тугоплавких элементов в которых близко к солнечному (например, хондриты), и дифференцированные метеориты. Последние происходят из родительских тел, которые претерпели значительное фракционирование химических элементов. Некоторые из них состоят практически из чистого металла (их называют железными, или, более точно, железоникелевыми метеоритами), другие содержат значительную долю металлического железа (железокаменные метеориты), а могут и вообще не содер-

жать металлов (некоторые ахондриты). Ахондриты и хондриты — это каменные метеориты (рис. 1).



Рис. 1. Статистика хондритов, ахондритов, железных и железокаменных метеоритов среди падений

Так что уже эта общая классификация, основанная на химическом составе метеоритов, отражает предысторию образования метеоритов, да и самой Солнечной системы. Полная классификация метеоритов приведена на рис. 2. В рамках небольшой лекции невозможно подробно описать все многообразие типов метеоритов. Мы остановимся только на наиболее важных с эволюционной точки зрения особенностях.

Хондриты — самые распространенные метеориты. Хондриты разделяют на три больших класса в зависимости от степени окисления содержащегося в них железа: углистые (С), обыкновенные (О) и энстатитовые (Е). В этом порядке в них увеличивается содержание металлического железа и уменьшается окисленного (двух- и трехвалентного) железа.

Обыкновенные хондриты весьма распространены, их около 80 % среди падений. Они состоят из силикатной матрицы, включающей частицы никелистого железа, и сложенные силикатами хондры (зерна миллиметрового и субмиллиметрового размера). Объем хондр от общего — до 80 %). Силикаты представлены главным образом минералами группы оливина (Fe,Mg)₂SiO₄ и пироксена (Fe,Mg)SiO₃. Содержание элементов (кроме летучих) в них близко к солнечному. В составе хондритов найдены так называемые Ca-Al включения (KAB), возраст которых 4 567.3 млн лет, их принимают как нуль-



Рис. 2. Классификация метеоритов

пункт временной шкалы эволюции Солнечной системы. В пределах типа О хондриты классифицируются по содержанию общей массы Fe, которая коррелирует с массой свободного железа. Выделяют подтипы H, L и LL. Доля массы железа в них меняется от 28 до 19 % и свободного железа от 8 до 2 % для подтипов H и LL соответственно.

Помимо химико-минералогических свойств метеоритов, несомненно отражающих историю их образования, важная информация содержится в их петрологических характеристиках, в которых отражается, например, тепловая история вещества метеорита. Так, в каждой группе обыкновенных хондритов отмечается различная степень теплового метаморфизма. В [7] была введена петрологическая схема классификации: Н, L и LL группы подразделены на подгруппы — от 3 до 6. На рис. 3 показана текстурная эволюция L хондритов как функция петрологического типа (силикатные текстуры видны в проходящем свете в L3-L6 хондритах). Длительный (млн лет) нагрев хондритов приводит к химическим и текстурным изменениям, прежде всего к развитию ситуации химического равновесия и постепенному исчезновению хондр и матрицы из петрологического типа L3 — малый нагрев до L6 — наибольший нагрев. Теперь даже неспециалисту понятно, что означает тип LL5 Челябинского метеорита.

Углистые (C) хондриты (3.6 % падений) содержат много железа, которое почти все находится в соединениях силикатов. Благодаря



Рис. 3. Степень теплового метаморфизма обыкновенных хондритов типа L $\,$

магнетиту (Fe₃O₄), графиту, саже и некоторым органическим соединениям углистые хондриты приобретают темную окраску. Они также содержат значительное количество гидросиликатов (серпентин, хлорит, монтмориллонит и др.). С-хондриты классифицируются по степени изменения их свойств на группы. При обозначении группы к названию класса добавляется буква эталонного метеорита этой группы.

Энстатитовые (Е) хондриты (2 % всех хондритов) состоят в основном из свободного железа и силикатных соединений, в которых железо почти отсутствует. Пироксен в метеоритах этого типа содержится в виде энстатита $Mg_2[Si_2O_6]$. Е-хондриты, судя по их структурным и минералогическим особенностям, были подвергнуты тепловому метаморфизму при максимальных температурах (600— 1000 ° C), поэтому в них присутствует меньше всего летучих соединений, а среди других классов хондритов энстатитовые признают самыми восстановленными.

Еще несколько слов о дифференциированных метеоритах. Железные метеориты почти целиком состоят из FeNi — никелистого железа и содержат небольшие количества минералов в виде включений. При высоком содержании Ni (30—50 %) никелистое железо находится в основном в форме тэнита, при низком (6—7 %) в форме камасита, минералов, отличающихся структурой кристаллической решетки. Характерная только для металлических метеоритов внутренняя структура в виде «видманштеттеновых фигур» (проявляются на протравленном распиле) обусловлена очень медленным (в течение миллионов лет) процессом остывания FeNi и фазовыми превращениями в его монокристаллах.

Железокаменные метеориты делятся на два типа, которые отличаются по химическим и структурным свойствам: палласиты и мезосидериты. В палласитах силикаты состоят из кристаллов магнезиального оливина или их обломков, заключенных в сплошной матрице из никелистого железа. В мезосидеритах — смеси из разных силикатов, входящие также в ячейки металла.

В ахондритах хондр нет. По составу и структуре близки к земным базальтам. Все ахондриты в той или иной степени претерпели плавление, которое и уничтожило хондры. Большинство из известных ахондритов относятся к так называемому HED типу и, по мнению многих геохимиков, происходят от астероида Веста. Другие ахондриты происходят с Марса, Луны и других пока не идентифицированных астероидов.

Таким образом, подробная классификация метеоритов отражает важные детали условий их образования и дальнейшей эволюции твердого вещества в Солнечной системе.

Происхождение метеоритов

Метеориты, как они есть, вряд ли могли образоваться напрямую из космической пыли. Сам процесс образования камней (pebbles) пока изучен не до конца. Однако такой процесс шел на самых ранних стадиях эволюции протопланетного диска, когда из газо-пылевой смеси формировались кометы. Существование камней в составе комет вытекает из предположения о том, что именно распавшиеся кометы являются прародителями метеорных потоков. Наблюдения кометы 67Р/Чурюмова—Герасименко также подтверждают наличие камешков миллиметрового—сантиметрового размера [8].

Большая часть метеороидов, превратившихся на Земле в метеориты, имела своих «родителей» в виде астероидов, хотя некоторая часть могла иметь в виде «родителей» кометы и другие тела Солнечной системы. Самая общая схема их образования выглядит примерно так, как показано на рис. 4.

Понятно, что дифференцированные метеориты могли образоваться не просто из астероидов, а из астероидов, прошедших глубокое преобразование. Можно выделить следующие этапы:

- коагуляция пыли и рост пылевых сгустков в протопланетных дисках;
- рост планетезималей и образование планет;
- дифференциация в достаточно крупных телах;

- столкновения и разрушение планетезималей;
- транспорт на Землю.



Рис. 4. Схема происхождения метеоритов

Столкновение дифференцированных тел, приводящее к появлению ахондритов, железокаменных и железных метеоритов, проиллюстрировано на рис. 5.



Рис. 5. Схема образования ахондритов, железокаменных и железных метеоритов в результате столкновений крупных тел в Солнечной системе

Список нерешенных проблем в этом чрезвычайно интересном направлении исследований (как принято говорить, на стыке наук астрономии, геохимии, планетологии) весьма обширен. Здесь можно упомянуть лишь две проблемы: проблему образования хондр и КАВ и проблему соответствия состава астероидов и метеоритов. Повидимому, установлено, что хондры и КАВ образовались из первич-
ных пылевых сгустков (комплексов). Но остаются важные нерешенные вопросы: откуда в холодном протопланетном диске берется такая энергетика, способная обеспечить нагрев вещества до тысячи градусов, и как хондры и КАВ распространялись во всем объеме диска? Вторая проблема состоит в серьезном статистическом расхождении распространенности метеоритов и астероидов сходных классов. Подавляющее большинство объектов в Главном поясе астероидов (ГП) составляют астероиды трех основных классов:

- класс С их 75 %: альбедо 3–9 %, состав близок к углистым хондритным метеоритам, встречаются во внешней зоне ГП, пример – Гигея;
- класс S 17 %: альбедо 10—23 %, состав силикаты Fe, Mg, отсутствие каких-либо углеродных соединений, встречаются во внутренней части ГП, до 2.5 а. е., пример — Юнона;
- класс М 10 %: альбедо 10—19 %, богаты Ni и Fe, могут быть фрагментами металлических ядер крупных планетезималей, встречаются преимущественно в центральных областях ГП на расстоянии 2.7 а. е. от Солнца, пример — Клеопатра.

Как видно из этой статистики и из рис. 1, относительные количественные оценки астероидов и метеоритов сходных классов заметно отличаются. Общепринятое решение этой проблемы еще не найдено.

Риски, связанные с астероидами, кометами и метеоритами

Метеориты на исторической памяти не причинили человечеству сколь-нибудь значительного ущерба. Но время от времени на Землю падают более крупные тела — астероиды и кометы. Эти события являются источниками угрозы, называемой астероидно-кометной опасностью (AKO). Об этой проблеме написано много. Из недавно изданных русскоязычных работ можно посоветовать коллективную монографию [6]. В России занимаются проблемой АКО на инициативной основе, и, хотя государственная поддержка таких исследований отсутствует, отмечаются некоторые достижения. Именно они кратко представлены в этом разделе.

Обычно практическое решение проблемы АКО разделяют на три основные составляющие:

- а) обнаружение (выявление) всех опасных небесных тел и определение их свойств;
- б) оценка риска и принятие соответствующих решений;

 выработка мер и средств противодействия и уменьшения ущерба.

Астрономия играет ключевую роль в решении проблем 1 (это чисто астрономическая задача) и 2 (в части оценки вероятности столкновений), а также в решении проблемы 3. При решении каждой из задач важно знать свойства опасных небесных тел (OHT). Метеориты, наряду с дистанционными наблюдениями ОНТ, являются важным источником такой информации.

В части наблюдений ОНТ в России наметился определенный прогресс. В ИСЗФ СО РАН появился свой телескоп для обнаружения ОНТ в дальнем космосе. Это проект крупного (1.6 м) широкоугольного (2.8°) обзорного телескопа АЗТ-ЗЗВМ. Телескоп АЗТ-ЗЗВМ и первые снимки, выполненные на этом перспективном инструменте, показаны на рис. 6. Телескоп по своим возможностям сравним со знаменитым инструментом PanSTARRS. К сожалению, не обошлось без трудностей. Телескоп введен в опытную эксплуатацию в декабре 2015 г., но до сих пор не может заработать в полную силу из-за отсутствия средств на современный широкопанорамный приемник излучения.



Рис. 6. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые снимки, выполненные на нем

Проблема обнаружения ОНТ стоит по-прежнему остро. На рис. 7 проиллюстрирована полнота наших сведений об ОНТ. Конкретная информация приведена для АСЗ, т. е. для астероидов с перигелийным расстоянием, не превышающим 1.3 а. е. Более 98 % открытий ОНТ производится средствами США. Российские ученые и специалисты участвуют в международной кооперации по обнаружению ОНТ. К сожалению, вклад наших наземных средств, обсерваторий и сетей ISON и MACTEP, пока весьма скромен. По-прежнему мы ожидаем, что государство окажет поддержку.



Рис. 7. Полнота обнаружения AC3 (штриховая линия) и прогнозируемое распределение популяции AC3 по размерам (сплошная линия). Темными столбцами показано количество известных на 1 января 2015 г. AC3 в интервале размеров (данные предоставлены R. Landis, NASA)

Современная (с учетом опыта Челябинского события 15 февраля 2013 г.) трактовка противодействия угрозе АКО включает задачу обнаружения не только крупных (более 100 м), но также и относительно малых ОНТ (декаметровых) тел. Особенно остро стоит проблема с обнаружением опасных небесных тел, приходящих с дневного неба. Такая задача для своего решения требует выведения телескопов в космос. В [9] предложен вариант создания системы обнаружения околоземных ОНТ. В результате проработки аван-проекта СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) удалось разработать экономичные варианты (реализации) такой системы. Космическая система состоит из одного или двух КА, помещаемых в окрестность точки L1 (в системе Земля—Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли. Телескоп, находящийся в окрестности точки L1, будет видеть ОНТ, летящие к Земле от Солнца, при благоприятных для наблюдений значениях фазового угла. Показано, что задача обнаружения декаметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца, может быть реше-

на с помощью относительно небольшого телескопа апертурой ~0.3 м. На рис. 8 приведена схема работы обсерватории СОДА. Главный режим работы — создание конусного барьера(ов) с помощью одного или нескольких телескопов. ОНТ наблюдается при пересечении барьера(ов) с тем чтобы за 3—4 ч до возможного столкновения (при скорости сближения 20 км/с), т. е. на расстоянии ~250 тыс. км от Земли, орбита ОНТ и место возможного столкновения были определены с заданной точностью. На рис. 8 показано два конических барьера, но их может быть больше.



Рис. 8. Принципиальная схема работы космического аппарата СОДА

Российские ученые принимают активное участие в разработке надежных способов оценки рисков. В работе [10] детально рассчитаны последствия падения 300-метрового тела на Землю. Некоторые выводы на первый взгляд кажутся парадоксальными. Например, на рис. 9 показаны распределения максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м

под различными углами к поверхности. Как видно из рисунка, при вертикальном ударе область избыточного давления намного меньше, чем при косом ударе.



Рис. 9. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли при ударах астероида диаметром 300 м под разными углами к поверхности. В случае косого удара астероид движется сверху (из области X > 0) вниз и в точке X = 0, Y = 0 касается поверхности

Малые тела Солнечной системы — будущий ресурс человечества

Метеориты дают некоторые представления о возможной ценности астероидов и комет как естественных природных ресурсов. Уже более 30 лет астероиды вполне серьезно рассматриваются как значительный потенциальный ресурс сырья для человечества (см. [11]). Многие AC3 относительно легкодостижимы с точки зрения затрат энергии. Астероиды имеют очень низкую гравитацию на поверхности, что облегчает транспортировку сырья с них. Кроме того, природа уже выполнила значительную переработку (обогащение) вещества таких тел для нас. Например, металлические астероиды содержат золота и платины около ста частей на миллион. Элементы группы платиноидов настолько ценны для нас (не из-за ювелирной стоимости, а, например, в качестве промышленных катализаторов), что, возможно, в будущем станет выгодно «импортировать» их из космоса. При сегодняшних ценах на эти элементы один маленький

металлический астероид около 200 м в диаметре может стоить много миллиардов долларов. Астероиды класса С относительно богаты летучими, что может иметь большое значение для будущего. Например, можно будет наладить обеспечение водой прямо в космосе. Вода и солнечная энергия — основа производства водорода и кислорода элементов ракетного топлива для будущих космических миссий.

Вполне серьезные исследования по выбору коммерчески интересных объектов, разработке методов транспортировки добывающего оборудования на астероиды и ценных материалов с астероидов на Землю и многих других аспектов космодобычи начаты в ряде частных компаний (в некоторых случаях с государственной поддержкой). В апреле 2012 г. компания Planetary Resources впервые в истории объявила о планах добычи на астероидах металлов платиновой группы, а также воды для систем жизнеобеспечения и получения водородно-кислородного ракетного топлива. Еще одна американская компания, Energy and Space Engineering LLC, в настоящее время активно занимается разработкой коммерческой миссии к астероиду, богатому ресурсами, для транспортировки его на низкую околоземную орбиту. Компания Deep Space Industries объявила, что намерена запустить целую группу (флот) беспилотных кораблей, которые смогут перехватывать небольшие астероиды и, возможно, смогут найти такие металлы, как платина. Гонка за космическими ресурсами началась.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 17-12-01441.

Библиографические ссылки

- 1. Beech M., Steel D. On the definition of the term meteoroid // Q. J. R. Astron. Soc. 1995. Vol. 36. P. 281–284.
- Whitman K., Morbidelli A., Jedicke R. The size frequency distribution of dormant Jupiter family comets // Icarus. - 2006. - Vol. 183. - P. 101-114. astro-ph/0603106.
- Mommert M., Hora J., Farnocchia D. et al. Spitzer observations of two mission-accessible, tiny asteroids // Asteroids, Comets, Meteors 2014 / ed. by K. Muinonen, A. Penttilä, M. Granvik et al. – 2014.
- 4. Jewitt D. The Active Asteroids // Astron. J. 2012. Vol. 143. P. 66. 1112.5220.
- Morbidelli A., Bottke W. F., Jr., Froeschlé C., Michel P. Origin and Evolution of Near-Earth Objects // Asteroids III / ed. by W. F. Bottke, Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. - 2002. - P. 409-422.

- Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия, ред. В. А. Пучков. — М. : ΦΓБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.
- 7. Van Schmus W. R., Wood J. A. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1967. Vol. 31. P. 747.
- Bauer J. M., Kramer E., Mainzer A. K. et al. WISE/NEOWISE Preliminary Analysis and Highlights of the 67p/Churyumov-Gerasimenko near Nucleus Environs // Astrophys. J. - 2012. - Vol. 758. - P. 18.
- Шустов Б. М., Шугаров А. С., Нароенков С. А., Прохоров М. Е. Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к проблеме астероидно-кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. журн. 2015. Т. 92. С. 867—880.
- 10. Shuvalov V. V., Svettsov V. V., Artem'eva N. A. et al. Asteroid Apophis: Evaluating the impact hazards of such bodies // Solar System Research. 2017. Vol. 51. P. 44–58.
- Asteroids. Prospective Energy and Material Resources, ed. by V. Badescu. — M. : Springer-Verlag, 2013.



ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «EROS» ДЛЯ ПОИСКА УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

В. С. Блинова

Томский государственный университет

Для решения вопросов об отождествлении пары астероидов, об отнесении объекта к семейству астероидов, о поиске пар астероидов, которые ранее могли образовывать двойные астероиды, и других требуются новые наблюдения. С помощью программного комплекса «EROS» для Пулковской, Коуровской, Симеизской обсерваторий и обсерватории «Пик Терскол» были исследованы 80 пар астероидов на близких орбитах. Было обнаружено, что 20 из них на момент исследования были уже отождествлены. Для остальных объектов были получены ближайшие интервалы наблюдений на следующие 5 лет для указанных обсерваторий с учетом максимально наблюдаемых на них звездных величин.

APPLICATION OF "EROS" SOFTWARE FOR SEARCHING FOR CONDITIONS OF OBSERVATIONS OF ASTEROIDS ON CLOSE ORBITS

V. S. Blinova

Tomsk State University

To solve questions about the identification of a pair of asteroids, the assignment of an object to the family of asteroids, the search for asteroid pairs which could have formerly been binary asteroids, etc., new observations are required. Using the software "EROS" for the Pulkovo, Kourovka, Crimea-Simeiz and "Peak Terskol" observatories 80 pairs of asteroids in close orbits were investigated. It was found that 20 of them at the time of the research were already identified. For the rest of the objects, the future observation intervals were obtained for the next 5 years for observatories taking into account the maximum magnitudes observed in them.

Исследование объектов на близких орбитах позволяет решать вопросы об отождествлении пары объектов, об отнесении объекта к семейству астероидов, о поиске пар астероидов, которые ранее могли

[©] Блинова В. С., 2018

¹⁵⁵

образовывать двойные астероиды, и др. В УрФУ [1], применяя метрики пространства кеплеровых орбит, получены 399 пар объектов на близких орбитах. Из них в данной работе рассмотрено 80 пар с наименьшими значениями метрики пятимерного пространства кеплеровых орбит, которая используется для определения расстояния между орбитами на заданную эпоху.

В ТГУ совместно с УрФУ разрабатывается программный комплекс «EROS» (Ephemeris Researches and Observation Services) [2], предназначенный для упрощения и автоматизации процесса подготовки к наблюдениям. Рассчитывая эфемериды и проверяя, видны ли исследуемые объекты на Пулковской, Коуровской, Симеизской обсерваториях и обсерватории «Пик Терскол», было обнаружено, что 20 из выбранных пар на момент исследования были уже отождествлены. Для остальных объектов с помощью «EROS» были получены ближайшие интервалы наблюдений в период с 16 ноября 2017 г. по 16 ноября 2022 г. для указанных обсерваторий с учетом максимально наблюдаемых звездных величин на них. В силу малой яркости большинства объектов наибольшая возможность их наблюдать представляется с «Пика Терскол» и Симеизской обсерватории, которые могут наблюдать до 22 и 20 звездной величины соответственно, но некоторые можно наблюдать и с двух других обсерваторий.

Библиографические ссылки

- Кузнецов Э. Д., Сафронова В. С. Приложение метрик пространства кеплеровых орбит для поиска астероидов на близких орбитах // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. (В печати).
- Логинова М. О., Скрипниченко П. В., Галушина Т. Ю. Астрометрическая поддержка позиционных наблюдений в программном комплексе EROS // Тр. ТГУ: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : международ. молодеж. науч. конф., 17—19 нояб. 2014 г. 2015. Т. 296. С. 133—136.

УЧЕТ НЕРАЗРЕШЕННЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ МАССЫ ЗВЕЗДНОГО СКОПЛЕНИЯ

О. И. Бородина, А. Ф. Селезнев, В. М. Данилов

Уральский федеральный университет

При различных предположениях о функции масс компонент двойных систем оценивается, как наличие неразрешенных двойных систем влияет на определение массы скопления.

CONSIDERATION OF UNRESOLVED BINARIES WITH EVALUATION OF THE MASS OF STAR CLUSTERS

O. I. Borodina, A. F. Seleznev, V. M. Danilov Ural Federal University

An influence of the presence of unresolved binaries onto star cluster mass estimation is evaluated with different assumptions on the mass function of binary components.

Одна из проблем, с которой сталкиваются исследователи звездных скоплений при оценивании их массы по функции светимости, это наличие в скоплении неразрешенных двойных систем. Особенно важно учитывать это обстоятельство при исследовании рассеянных звездных скоплений (P3C), где доля двойных может составлять десятки процентов.

Цель настоящей работы — оценить, насколько учет неразрешенных двойных систем изменяет массу скопления при разных предположениях о функции масс компонент двойных систем и о распределении интегральных звездных величин двойных систем. Чаще всего при моделировании двойных систем в звездных скоплениях используется предположение о плоском распределении компонент двойных систем по массам.

Для моделирования были использованы функции светимости скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 6834, NGC 7142 и IC 2714 [1], полученные по звездным подсчетам на основе данных каталога 2MASS [2], проведенным методом kernel estimator. Для функции масс компонент двойных систем были рассмотрены несколько случаев, в том числе два крайних: случай плоского распределения и случай,

[©] Бородина О. И., Селезнев А. Ф., Данилов В. М., 2018

¹⁵⁷

когда оба компонента всегда имеют одинаковую массу. Для распределения интегральных звездных величин двойных систем использовалось предположение о равномерном распределении, т. е. доля двойных одинакова для всех звездных величин в рассматриваемом диапазоне.

В основе алгоритма — определение масс компонент двойной системы, имеющей данную звездную величину при заданном соотношении масс компонент. При этом используются соотношение массы и звездной величины (светимости), содержащееся в изохроне для каждого из скоплений [3], и квадратичная зависимость масса светимость из работы [4].

При различных предположениях о спектре масс компонентов двойных систем построены зависимости коэффициента, показывающего, во сколько раз возрастает масса скопления при наличии неразрешенных двойных, от предполагаемой доли двойных систем. Эти зависимости не являются универсальными. Различия объясняются в первую очередь различиями функций светимости скоплений.

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК №АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства РФ (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- Никифорова В. В., Бородина О. И., Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Структурные и динамические характеристики девяти рассеянных звездных скоплений // Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. конф., (Екатеринбург, 29 янв.—2 февр. 2018 г). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 175—176.
- 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.
- Marigo P., Girardi L., Bressan A. et al. A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase // Astrophys. J. - 2017. - Vol. 835. - P. 77.
- Eker Z., Soydugan F., Soydugan E. et al. Main-Sequence Effective Temperatures from a Revised Mass-Luminosity Relation Based on Accurate Properties // Astron. J. - 2015. - Vol. 149. - P. 131.

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ МАЛОГО ОТКЛОНЕНИЯ БЛЕСКА ДЛЯ ПОИСКА КАНДИДАТОВ В ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Е. А. Брылякова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Представлен алгоритм поиска малого отклонения блеска звезд по фотометрическим рядам. Суть алгоритма заключается в анализе аппроксимирующего полинома выборок фотометрического ряда. Данный алгоритм предлагается использовать для выявления как малоамплитудных переменных звезд, так и кандидатов в экзопланеты по ПЗС-наблюдениям.

ALGORITHM FOR DETECTION OF SMALL DEVIATIONS STAR'S LIGHT FOR THE SEARCH OF CANDIDATES FOR VARIABLE STARS

E. A. Brylyakova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

This article describes searching algorithm of small deviation in photometrical series of a star. The essence of the algorithm lies in the analysis of the approximating polynomial of samples of the photometric series. This algorithm is proposed to be used to detection of low-amplitude variable stars and candidates for exoplanets from CCD (charge-coupled device) observations.

Предложен алгоритм, позволяющий выявлять звезды с возможным переменным блеском. Суть алгоритма сводится к анализу аппроксимирующих функций для всех выборок из фотометрического ряда. Алгоритм включает в себя предварительную подготовку и анализ данных фотометрии.

Предварительная подготовка материала:

а) разбиение фотометрического ряда звезды $\{m_i; t_i\}$ на сеты по признаку временной «непрерывности», к одному сету следует отнести фотометрические данные наблюдений, полученных в течение определенного промежутка времени с равномерными интервалами, например, в течение одной ночи;

[©] Брылякова Е. А., 2018

¹⁵⁹

- б) исключение промахов из ряда измерений (применение «правила 3σ» или критерия Шовене);
- в) аппроксимация каждого сета и линейной функцией, и полиномом $P^{(n)}$ оптимальной степени n.

Определение возможной переменности сводится к проверке следующих критериев:

- а) угол наклона аппроксимирующей прямой. Для постоянных звезд он равен нулю. Возможны случаи, когда аппроксимирующая прямая и для переменной звезды также будет иметь нулевой наклон. В таких случаях следует рассмотреть 2^x- и 3^xкратное дробление временного сета наблюдений и построения средней прямой по новым сетам;
- б) симметричность. Фотометрический ряд звезды {m_i; t_i} с постоянным блеском симметричен относительно оси симметрии на временном интервале сета. Однако для некоторых типов переменности фотометрические ряды могут быть симметричны, если ось симметрии проходит через экстремум кривой блеска. В таких случаях смещение оси симметрии в ту или иную строну позволит выявить асимметрию, а следовательно, и переменность;
- в) анализ аппроксимирующего полинома. О переменности звезды можно судить по интервалам монотонности и разнице максимального и минимального значения степенного полинома на временном интервале конкретного сета.

По сумме критериев предполагается, что данный алгоритм позволит выявлять малоамплитудную переменность звезд с возможностью выявления переменности, которая вызвана транзитом крупных экзопланет.

ПОИСК ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД С МНОЖЕСТВЕННОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ ПО МАТЕРИАЛАМ УЧЕБНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ СибГУ

Е. А. Брылякова, Е. Г. Лапухин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

В работе представлены 18 переменных пульсирующих звезд с двойной и более периодичностью.

SEARCH OF VARIABLE STARS WITH MULTIPLE PERIODICITY BY MATERIALS RECEIVED FROM SIBSU OBSERVATORY

E. A. Brylyakova, E. G. Lapukhin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

This article presents 18 variable pulsating stars with a double and more periodicity.

В работе представлены 18 пульсирующих переменных звезд, имеющих двойную и более периодичность.

Поиск проводился среди более 900 переменных звезд, выявленных в учебной обсерватории СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Наблюдательный материал был получен на зеркально-линзовом телескопе диаметром 400 мм, с фокусным расстоянием 915 мм, оборудованным ПЗС-камерой с полем зрения 2.3 × 2.3°, масштаб снимка при этом составляет 2.7″/пиксель.

Выбор звезд-кандидатов с двойной и более периодичностью осуществлялся среди общего количества звезд по внешнему виду кривой блеска, приведенной к одному периоду. Основным критерием выбора был разброс значений блеска звезд, не характерный для нормального разброса ошибок измерений.

Периоды изменения блеска определялись с помощью программы WinEfk B. П. Горанского, методом Диминга и Лафлера—Кинмана.

В таблице представлены номер звезды по каталогу 2MASS, диапазон изменения блеска, периоды изменения блеска P_0 и P_1 . Знак «+» рядом с номером каталога означает наличие дополнительных периодов P_i изменения блеска.

© Брылякова Е. А., Лапухин Е. Г., 2018 161

$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $				
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2MASS	mag	P_0	P_1
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00121590 + 5929271 +	$13.163 - 13.209^m$	0.133409^{d}	0.124212^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00140702 + 5808017	$13.476 - 13.515^m$	0.121662^{d}	0.134584^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00143751 + 5930211 +	$12.315 - 12.342^m$	0.061470^{d}	0.069308^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00170519 + 6007496 +	$12.670 - 12.724^m$	0.081863^{d}	0.082803^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00185472 + 5851093 +	$13.615 - 13.639^m$	0.178979^{d}	0.249698^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00222528 + 5821028 +	$12.998 - 13.039^m$	0.109196^{d}	0.144257^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	00423063 + 5709079 +	$12.893 - 12.957^m$	0.153337^{d}	0.095458^{d}
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	21522929 + 5911531 +	$12.830 - 12.860^m$	0.207168^{d}	0.150633^{d}
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	21530870 + 5912011	$12.557 - 12.601^m$	0.101807^{d}	0.110155^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	21560033 + 5944417	$13.412 - 13.496^m$	0.337443^{d}	0.674836^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	21592323 + 5924569 +	$14.265 - 14.731^m$	0.102731^{d}	0.079166^{d}
$\begin{array}{ccccccc} 22014683 + 5945322 & 12.761 - 12.843^m & 0.358002^d & 0.526826^d \\ 22443695 + 5123264 + & 13.963 - 14.015^m & 0.054577^d & 0.101399^d \\ 22514584 + 5234098 & 13.001 - 13.028^m & 0.098844^d & 0.11281^d \\ 22535274 + 5157086 + & 12.657 - 12.681^m & 0.066599^d & 0.069591^d \\ 22550221 + 5141411 & 13.144 - 13.178^m & 0.084509^d & 0.104880^d \\ 22551266 + 5211196 & 12.236 - 12.271^m & 0.040770^d & 0.043187^d \\ \end{array}$	22002116 + 6033420 +	$13.769 - 13.890^{m}$	0.294804^{d}	0.998530^{d}
$\begin{array}{c ccccc} 22443695 + 5123264 + & 13.963 - 14.015^m & 0.054577^d & 0.101399^d \\ 22514584 + 5234098 & 13.001 - 13.028^m & 0.098844^d & 0.11281^d \\ 22535274 + 5157086 + & 12.657 - 12.681^m & 0.066599^d & 0.069591^d \\ 22550221 + 5141411 & 13.144 - 13.178^m & 0.084509^d & 0.104880^d \\ 22551266 + 5211196 & 12.236 - 12.271^m & 0.040770^d & 0.043187^d \\ \end{array}$	22014683 + 5945322	$12.761 - 12.843^m$	0.358002^{d}	0.526826^{d}
$\begin{array}{c ccccc} 22514584+5234098 & 13.001-13.028^m & 0.098844^d & 0.11281^d \\ 22535274+5157086+ & 12.657-12.681^m & 0.066599^d & 0.069591^d \\ 22550221+5141411 & 13.144-13.178^m & 0.084509^d & 0.104880^d \\ 22551266+5211196 & 12.236-12.271^m & 0.040770^d & 0.043187^d \\ \end{array}$	22443695 + 5123264 +	$13.963 - 14.015^m$	0.054577^{d}	0.101399^{d}
$\begin{array}{cccc} 22535274 + 5157086 + & 12.657 - 12.681^m & 0.066599^d & 0.069591^d \\ 22550221 + 5141411 & 13.144 - 13.178^m & 0.084509^d & 0.104880^d \\ 22551266 + 5211196 & 12.236 - 12.271^m & 0.040770^d & 0.043187^d \end{array}$	22514584 + 5234098	$13.001 - 13.028^m$	0.098844^{d}	0.11281^{d}
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	22535274 + 5157086 +	$12.657 - 12.681^m$	0.066599^{d}	0.069591^{d}
$22551266 + 5211196 \qquad 12.236 - 12.271^m \qquad 0.040770^d \qquad 0.043187^d$	22550221 + 5141411	$13.144 - 13.178^m$	0.084509^{d}	0.104880^{d}
	22551266 + 5211196	$12.236 - 12.271^m$	0.040770^{d}	0.043187^{d}

Звезды с двойной и более периодичностью

О ВОЗМОЖНЫХ СБЛИЖЕНИЯХ И СОУДАРЕНИЯХ АСТЕРОИДА 2008 EX5 С ЗЕМЛЕЙ

Е. А. Гильдебрант

Санкт-Петербургский государственный университет

В работе выполнен поиск сближений и соударений астероида 2008 EX5 с Землей. Уравнения движения астероида интегрируются численно с помощью программ, разработанных на кафедре небесной механики СПбГУ. Полученные результаты сравниваются с данными NASA и NEODyS.

ABOUT POSSIBLE APPROACHES AND IMPACTS OF THE 2008 EX5 ASTEROID WITH THE EARTH

E. A. Gildebrant

Saint-Petersburg State University

A search for approaches and impacts of the 2008 EX5 asteroid with the Earth is presented. Equations of asteroid's motion are numerically integrated with programs developed at the Department of Celestial Mechanics of St. Petersburg State University. Results are compared with NASA and NEODyS data.

Нахождение и исследование траекторий, ведущих к соударениям астероидов с Землей, необходимо для предотвращения соударений или минимизации ущерба. Трудность задачи связана с потерей точности прогнозирования в типичном случае резонансных возвратов. С использованием методов, алгоритмов и программ, разработанных на кафедре небесной механики СПбГУ, были получены траектории возможных сближений и соударений с Землей опасного астероида 2008 EX5. Эти результаты обсуждаются и сравниваются с аналогичными результатами, приведенными на сайтах NASA и NEODyS. Обсуждаются основные характеристики траекторий соударения (даты и моменты соударений, относительные положения и размеры ведущих к соударениям щелей, минимальные планетоцентрические расстояния при соударениях) и различные способы их получения, а также точность этих характеристик. Анализируются сближения, предшествующие соударениям. Выделены семейства соударений, связанные с резонансными возвратами, для них исследуется рассеяние возможных траекторий. В целом методами, разработанными на кафедре

[©] Гильдебрант Е. А., 2018

¹⁶³

небесной механики СПбГУ, найдено существенно больше соударений, чем представлено на сайтах NASA и NEODyS. Структура положений ведущих к соударениям щелей близка к фрактальной.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (грант 6.37.341.2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА SETI-ОБЪЕКТОВ НА РАТАН-600 В 2015—2016 гг.

А. А. Кудряшова¹, Н. Н. Бурсов²

¹Казанский федеральный университет, ²Специальная астрофизическая обсерватория

В настоящей работе исследованы SETI-объекты, наблюдавшиеся на РАТАН-600 в цикле наблюдений 2015—2016 гг. 30 объектов (28 солнцеподобных звезд и 2 шаровых скопления с высокой металличностью) наблюдались на широкополосном 3-частотном приемном комплексе с высокой чувствительностью на южном секторе радиотелескопа.

THE RESULTS OF MONITORING OF THE SETI-OBJECTS AT RATAN-600 IN 2015-2016

A. A. Kudryashova¹, N. N. Bursov² ¹Kazan Federal University, ²Special Astrophysical Observatory

In the present work SETI-objects observed on radiotelescope RATAN-600 were investigated. Observations were carried out in 2015—2016 on a broadband 3-frequency receiving system with a high sensitivity in the southern sector of the radio telescope. The objects of observations are 28 sunlike stars and 2 globular clusters with high metallicity.

В течение 2 лет на РАТАН-600 проводились плановые работы по поиску сигналов от объектов SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence). Наблюдения проведены на приемо-измерительном комплексе «Эридан-2» на южном секторе антенны с плоским отражателем. Список SETI-объектов составил 28 звезд и два шаровых скопления. Выборка в основном была составлена по общедоступным данным Сети. В нее вошли:

- солнцеподобные звезды, у которых обнаружены планеты:
 HD1461, HD10700, HD13931, HD38858, HD45184, HD69830,
 HAT-P-43, HD75732, HD89307, HD95128, HD134987, HD150433,
 HD154088, HD164595, CoRoT-9, Kepler-69, Kepler-452;
- солнцеподобные звезды HD50692, HD99491, HD154088, HD172051, близкие к плоскости эклиптики;
- звезды-адресаты первых радиопосланий с Земли: HD50692, HD75732, HD95128, HD186408, HD197076;

[ⓒ] Кудряшова А. А., Бурсов Н. Н., 2018

¹⁶⁵

 — шаровые звездные скопления NGC 6553 и PAL 10 с металличностью -0.18 и -0.10, что не отличается от металличности многих звезд.

В 2015 г. проведено 1 321 наблюдение SETI-объектов и 1 701 наблюдение в 2016 г. на двух длинах волн: 2.7 и 6.2 см. Распределение числа наблюдений по источникам приведено на рисунке.



Левая панель: распределение числа SETI-объектов по числу записей на волне 2.7 и 6.2 см (темные столбцы). Правая панель: плотность потоков (мЯн) SETI-объектов на 2.7 (светлые столбцы) и 6.2 см за 2015 и 2016 гг. Верхний предел оценки получен по уровню шума при накоплении данных

Данные были обработаны по оригинальной методике, которая включала первичную редукцию записей, привязку по времени и по амплитуде по опорным источникам. На заключительном этапе были получены оценки плотности потоков объектов по уровню шума (по верхнему пределу) при накоплении данных за все время наблюдений (см. рисунок). Анализ мониторинга SETI-объектов из-за отсутствия непрерывности в наблюдениях был сведен к оценке корреляции между данными на 2.7 и 6.2 см и поиску сигналов, превышающих заданный уровень с доверительной вероятностью 0.95.

Основные результаты:

- в течение 2015—2016 гг. проведены несколько циклов наблюдений и последующая обработка 28 SETI-звезд и двух шаровых скоплений с высокой металличностью;
- в обработке использован метод накопления сигнала, корреляции данных между волнами и поиск сигналов, превышающих заданное значение (по уровню обнаружения 0.95);
- результат исследования: не выявлена корреляция между волнами и не обнаружено значимых сигналов от SETI-объектов за два года наблюдений на РАТАН-600, получен только верхний предел по плотности потока для источников.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗВЕЗДНЫХ ПОДСЧЕТОВ В ДЕВЯТИ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ ПО ДАННЫМ 2MASS И GAIA DR1

М. В. Кулеш, О. И. Бородина, В. В. Никифорова, А. Ф. Селезнев

Уральский федеральный университет

Звездные подсчеты с помощью метода kernel estimator проведены для скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6268, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38. Для подсчетов были использованы данные каталога Gaia DR1. Полученные результаты сравниваются с результатами звездных подсчетов по данным каталога 2MASS.

COMPARISON OF THE RESULTS OF STAR COUNTS IN NINE OPEN STAR CLUSTERS BY THE DATA OF 2MASS AND GAIA DR1

M. V. Kulesh, O. I. Borodina, V. V. Nikiforova, A. F. Seleznev Ural Federal University

Star counts were carried out for the clusters NGC 1912, NGC 2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6268, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38 with the use of kernel estimator by Gaia DR1 data. Results are compared with the results of star counts by 2MASS data.

Запуск и успешная работа космической миссии Gaia фактически стали началом новой эпохи в звездной астрономии. Исследования Галактики и ее подсистем, в том числе подсистемы рассеянных звездных скоплений, в ближайшие десятилетия будут определяться результатами этой миссии.

Представляют несомненный интерес проведение звездных подсчетов в полях рассеянных звездных скоплений (P3C), определение структурных и динамических характеристик P3C на основе данных Gaia DR1 [1] и сравнение их с результатами звездных подсчетов по данным обзора 2MASS.

С этой целью на основе данных Gaia DR1 были проведены звездные подсчеты для девяти рассеянных скоплений (NGC 1912, NGC

© Кулеш М. В., Бородина О. И., Никифорова В. В., Селезнев А. Ф., 2018

Сравнение результатов звездных подсчетов по каталогам 2MASS и Gaia DR1 для NGC 1912

2MAS	s				Gaia			
J mag	$\overset{\mathfrak{m}}{\mathfrak{M}_{\odot}}$	R arcmin	Ν	\mathfrak{m}_{\odot}	G mag	R arcmin	Ν	\mathfrak{m}_{\odot}
11	2.7	12.1	33	110	11.4	9.8	21	64
		± 2.8	± 21	± 70		± 0.5	± 14	± 45
12	2.0	12.7	86	240	12.6	13.4	120	280
		± 1.1	± 30	± 120		± 0.8	± 40	± 150
13	1.4	12.3	220	480	14.1	15.6	230	460
		± 0.7	± 60	± 170		± 0.4	± 70	± 200
14	1.1	16.7	310	600	15.4	15.3	250	490
		± 3.6	± 100	± 230		± 0.2	± 120	± 280
15	0.9	19.1	530	830	16.7	19.5	860	1100
		+2.3	+150	+290		+0.4	+250	+440
16	0.7	18.2	750	1000	18.3	19.5	1250	1410
-0		± 3.4	± 180	± 350	- 510	± 0.3	± 280	± 530

2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6234, NGC 6268, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38) по той же методике, что и звездные подсчеты по данным 2MASS [2].

В таблице показан пример сравнения данных звездных подсчетов для скопления NGC 1912. Для других скоплений выборки различия более заметны. Обсуждаются возможные причины таких различий.

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК №АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства РФ (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // Astron. Astrophys. – 2016. – Vol. 595. – P. A2.
- 2. Никифорова В. В., Бородина О. И., Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Структурные и динамические характеристики девяти рассеянных звездных скоплений // Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 янв.—2 февр. 2018 г. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 175—176.

РЕЗОНАНС ЛИДОВА—КОЗАИ В ДИНАМИКЕ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

О. Н. Летнер, Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

В работе представлены результаты поиска геометрического резонанса Лидова—Козаи в динамике астероидов, сближающихся с Землей (AC3). На интервале времени около 2000 лет построена орбитальная эволюция всех AC3, известных на август 2017 г., и проанализировано поведение характеристик резонансного движения (резонансный аргумент и резонансное соотношение). Анализ полученных результатов показал, что лишь для 0.3 % астероидов из общего числа AC3 возникает острый резонанс (резонансное соотношение проходит через ноль).

LIDOV-KOZAI RESONANCE IN THE DYNAMICS OF NEAR-EARTH ASTEROIDS

O. N. Letner, T. Yu. Galushina

Tomsk State University

The paper presents the results of the search for the geometric resonance of Lidov—Kozai in the dynamics of Near-Earth asteroids (NEAs). In the time interval of about 2 000 years, the orbital evolution of all NEAs known for August 2017 was constructed and the behavior of the resonance motion characteristics (resonance argument and resonance relation) was analyzed. Analysis of the obtained results showed that only for 0.3 % of asteroids out of total NEAs there is an accurate resonance (the resonance relation passes through zero).

Исследование особенностей динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), является одной из важных задач небесной механики, так как полученные результаты могут внести вклад в решение проблемы астероидной опасности для Земли. Среди особенностей движения АСЗ, оказывающих значительное влияние на их динамику, следует отметить резонансные взаимодействия астероидов с планетами и проявление хаотичности в движении АСЗ. Известно, что наличие хотя бы одного неустойчивого резонанса может привести к проявлению хаотичности [1].

[©] Летнер О. Н., Галушина Т. Ю., 2018

¹⁶⁹

Важной, но недостаточно изученной особенностью в движении АСЗ являются вековые резонансы (резонансы, обусловленные соизмеримостями между скоростями прецессий орбит астероида и планеты). В данной работе представлены результаты поиска векового резонанса типа Лидова-Козаи в динамике всех АСЗ, известных на август 2017 г. Резонанс Лидова-Козаи по своей природе является геометрическим резонансом, так как он не содержит частот, связанных с движением возмущающих тел, но позволяет выявить те области орбитального пространства, где имеет место равновесие в действии на вековое движение перицентров орбит астероида и планеты. На интервале времени около 2000 лет была построена орбитальная эволюция астероидов и эволюция таких характеристик векового резонанса, как резонансный аргумент и его первая производная по времени (так называемое резонансное соотношение). Исследование выполнялось численно-аналитическими методами с использованием программного комплекса ИДА [2]. Полученные результаты показали, что для большинства АСЗ отклонение значений резонансного соотношения от нуля не превышает одной угловой секунды в сутки, из них лишь для 50 астероидов возникает острый резонанс (прохождение резонансного соотношения через ноль).

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

Библиографические ссылки

- Бордовицына Т. В., Томилова И. В. Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // Изв. вузов. Физика. — 2016. — Т. 59, вып. 3. — С. 41—48.
- Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Батурин А. П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89—96.

СИСТЕМА ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Л. А. Максимова, А. Ф. Холтыгин

Санкт-Петербургский государственный университет

Нами уточнены расстояния до 554 галактических планетарных туманностей (ПТ) с использованием соотношения между ионизированной массой туманности μ и параметром оптической толщины τ , полученного [1]. Мы определили типы туманностей согласно [2] в модификации [3]. Полученные нами расстояния до галактических ПТ использовались для получения шкалы высот h различных подсистем Млечного Пути. Были найдены следующие значения: $h = 208 \pm 10$ пк для объектов тонкого диска, $h = 600 \pm 54$ пк для толстого диска и $h = 1378 \pm 180$ пк для ПТ гало.

SYSTEM OF GALACTIC PLANETARY NEBULAE

L. A. Maksimova, A. F. Kholtygin

St. Petersburg State University

We recalculated the distance to 554 galactic Planetary Nebulae (PNe) using the relation between the ionized mass of the nebula μ and the optical thickness parameter τ obtained by [1]. We classified these nebulae according to [2] types modified by [3]. The obtained by us distances to galactic PNe were used to obtain the scale heights h for different subsystems of the Milky Way. The following values of h were obtained: $h = 208 \pm 10$ pc for thin disk objects, $h = 600 \pm 54$ pc for thick disk ones, and $h = 1378 \pm 180$ pc for halo PNe.

Планетарные туманности (ПТ) являются потомками звезд с начальными массами на главной последовательности в диапазоне от 0.8 до $8M_{\odot}$. Они расположены в различных подсистемах Галактики и обладают широким разнообразием пространственных, кинематических, химических и морфологических характеристик.

Изучение пространственного распределения галактических ПТ может быть использовано для проверки различных моделей галактической эволюции и уточнения структуры Галактики.

К сожалению, расстояния до ПТ известны плохо. Индивидуальные расстояния с приемлемой точностью получены менее чем для

[©] Максимова Л. А., Холтыгин А. Ф., 2018

¹⁷¹

1 % галактических ПТ. Для большинства ПТ приходится использовать статистические шкалы расстояний, которые могут быть ненадежны. Индивидуальные статистические расстояния до ПТ, полученные различными методами, часто сильно различаются.

В данной работе мы использовали новую калибровку существующих шкал расстояний для галактических ПТ, полученную [1] для пересчета расстояний до 554 галактических ПТ. Использовано пространственно-кинематическое моделирование ансамбля галактических ПТ, предложенное [4]. Затем мы разделили ПТ с определенными нами расстояниями по типам [2] согласно модификации Quireza et al., основанной на Байесовых оценках вероятности [3], используя встроенные функции языка для статистической обработки данных — R (https://www.r-project.org/).

В итоге мы получили следующие значения шкал высот галактических подсистем: для объектов тонкого диска $h = 208 \pm 10$ пк, $h = 600 \pm 54$ пк для толстого диска и $h = 1.378 \pm 180$ пк для ПТ гало.

Библиографические ссылки

- Akimkin V. V., Nikiforov I. I., Kholtygin A. F. Distance scale calibration from kinematic analysis of an ensemble of the galactic planetary nebulae // Astron. Astroph. Trans. – 2012. – Vol. 27, iss. 2. – P. 365–368.
- Peimbert M. Chemical abundances in planetary nebulae // Planetary Nebulae, Observations and Theory. 1978. Vol. 76, Ser. IAU Symp. P. 215—224.
- 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.
- 4. *Никифоров И. И., Боброва А. Ю. //* Кинематика и физика небесных тел. 1999. Т. 2. С. 29—33.

ОДНОМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО КОЛЛАПСА ОБЛАКА

А. А. Никитенко

Челябинский государственный университет

Построена численная модель релятивистского свободного коллапса сферически-симметричного облака пыли. Модель успешно протестирована с помощью аналитических решений и асимптотических соотношений.

ONE-DIMENSIONAL MODELING OF RELATIVISTIC COLLAPSE OF A CLOUD

A. A. Nikitenko

Chelyabinsk State University

The numerical model of the relativistic free collapse of a sphericallysymmetric dust cloud is developed. The model is successfully tested with the help of analytical solutions and asymptotic relations.

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений исследований в области общей теории относительности являются численные решения уравнений Эйнштейна для различных задач астрофизики. В данной работе рассматривается численная модель релятивистского коллапса сферически-симметричного пылевидного облака [1].

Цель работы — разработать такую численную модель сферически-симметричного релятивистского коллапса, в которой после модификации можно будет учесть давление. Для достижения данной цели были поставлены две задачи: 1) написать программу, которая численно решает уравнения Эйнштейна, описывающие сферически-симметричный коллапс пылевидного облака; 2) проверить ее корректность на аналитических решениях [2] и асимптотических соотношениях для свободного коллапса.

В разрабатываемой модели уравнения Эйнштейна решаются совместно с уравнениями движения релятивистской жидкости. Разностные схемы, аппроксимирующие уравнения свободного коллапса в релятивистском и нерелятивистском случаях, совпадают, если заменить абсолютное время на собственное, связанное со свободно коллапсирующим веществом. Это позволяет использовать численный метод Самарского—Попова [3].

[©] Никитенко А. А., 2018



В результате работы написана программа, успешно решающая уравнения Эйнштейна для соответствующих случаев. Программа проверена на аналитическом решении для пылевидного облака. Корректность работы программы также проверена на асимптотических соотношениях для релятивистского свободного коллапса. Они получены на основе метода вывода классических асимптотических соотношений и имеют тот же самый вид.

Автор выражает огромную благодарность научному сотруднику ИНАСАН Жилкину Андрею Георгиевичу и научному руководителю Замоздре Сергею Николаевичу за консультации по трудным вопросам и критические замечания.

Библиографические ссылки

- 1. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. М. : Мир, 1977.
- 2. Жилкин А. Г. Автомодельная фокусировка волны разрежения в релятивистском коллапсирующем облаке // Астрон. журн. 2009. Т. 86. С. 44—57.
- Самарский А., Попов Ю. Разностные методы решения задач газовой динамики. — М. : Наука, 1992.

СТРУКТУРНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕВЯТИ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

В. В. Никифорова, О. И. Бородина, М. В. Кулеш, А. Ф. Селезнев

Уральский федеральный университет

В рамках проекта по созданию однородного каталога структурных и динамических характеристик рассеянных звездных скоплений звездные подсчеты с помощью метода kernel estimator проведены для скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6268, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38. Для подсчетов были использованы данные каталога 2MASS. Для скоплений выборки построены карты распределения и радиальные профили поверхностной плотности, получены оценки функций светимости и функций масс, определены положения центров, получены оценки радиусов, чисел звезд и масс скоплений.

STRUCTURAL AND DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF NINE OPEN STAR CLUSTERS

V. V. Nikiforova, O. I. Borodina, M. V. Kulesh,

A. F. Seleznev Ural Federal University

Within the framework of the project of a development of the uniform catalog of structural and dynamical characteristics of open star clusters, star counts were carried out for the clusters NGC 1912, NGC 2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6268, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38 with the use of kernel estimator by 2MASS data. Two-dimensional maps and radial profiles of a surface density, estimates of luminosity functions and mass functions have obtained for the sample clusters. The positions of cluster centres and estimates of the cluster radii, number of stars and masses have been determined.

Данная работа была выполнена в рамках проекта по созданию однородного каталога структурных и динамических характеристик рассеянных звездных скоплений на основе звездных подсчетов по данным обзоров неба в инфракрасном диапазоне (2MASS [1], UKIDSS [2]).

OНикифорова В. В., Бородина О. И., Кулеш М. В., Селезнев А. Ф., 2018175

Главной особенностью будущего каталога является приведение всех параметров РЗС к одной предельной звездной величине. Благодаря этому станут возможными сравнение РЗС, находящихся на разных расстояниях от Солнца, исследование взаимодействия РЗС с другими объектами диска Галактики, а также получение более достоверных распределений параметров РЗС, чем в предыдущих исследованиях.

Все функции распределения, используемые в данной работе, были получены с помощью метода функции-ядра (kernel estimator [3]). Главной особенностью данного метода является непрерывность и дифференцируемость оценок функций распределения.

Для скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 4052, NGC 5715, NGC 6268, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714, Czernik 38 звездные подсчеты были проведены по данным каталога точечных источников 2MASS. При этом были построены карты поверхностной плотности до разных предельных величин, линейные и радиальные профили плотности. По кривым линейных плотностей определены центры скоплений. По радиальным профилям плотности были получены радиусы скоплений и значение средней плотности фона; путем интегрирования профилей плотности получены количество звезд скоплений и оценки массы скоплений. Кроме того, были получены функции светимости и функции масс скоплений, что дает альтернативную, более точную оценку массы скоплений.

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства РФ (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- 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.
- Lucas P. W., Hoare M. G., Longmore A. et al. The UKIDSS Galactic Plane Survey // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2008. – Vol. 391. – P. 136–163.
- Seleznev A. F. Kernel density estimation in the study of star clusters // Baltic Astronomy. — 2016. — Vol. 25. — P. 267—274.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ЭВЕРХАРТА В ЗАДАЧАХ АСТЕРОИДНОЙ ДИНАМИКИ

Е. А. Переворочаева

Томский государственный университет

Данная работа посвящена сравнению эффективности двух интеграторов, Эверхарта и Гаусса—Эверхарта, и исследованию их параметров. Моделировалось движение четырех объектов Солнечной системы с разной динамикой (532 Herculina, 4179 Toutatis, 394130 2006 HY51, 99942 Apophis). Полученные результаты показывают, что интегратор Гаусса—Эверхарта заметно эффективнее интегратора Эверхарта. Однако интегратор Эверхарта имеет более высокую эффективность для уравнений второго порядка, чем для первого. Отметим, что при увеличении числа итераций эффективность интеграторов уменьшается. Из полученных результатов также следует, что выбор шага разными методами оказывает несущественное влияние на эффективность интегратора Гаусса— Эверхарта.

THE EFFICIENCY RESEARCH OF APPLICATION OF VARIOUS PARAMETERS IN EVERHART METHOD IN ASTEROID DYNAMICS PROBLEMS

E. A. Perevorochaeva Tomsk State University

This work is devoted to comparison of the efficiency of two integrators, Everhart and Gauss-Everhart, and to the study of their parameters. Motion of four objects of the Solar System with different dynamics (532 Herculina, 4179 Toutatis, 394130 2006 HY51, 99942 Apophis) was modelled. The obtained results showed that the integrator of Gauss— Everhart is much more efficient than the integrator of Everhart. However, the integrator of Everhart is more effective for equations of the second order than for the first order. Note that as the number of iterations increases, the efficiency of the integrators decreases. From the results obtained, it also follows that the choice of a step by different methods has an insignificant effect on the efficiency the integrator of Gauss—Everhart .

[©] Переворочаева Е. А., 2018

В настоящее время численное моделирование является мощным средством для изучения движения астероидов. В 1973 г. Эверхартом был предложен метод, разработанный специально для численного исследования орбит, который имеет широкую область применения, и сегодня этот метод является популярным в области небесной механики. В данной работе для решения задач использовались два интегратора: Эверхарта (RADA27) и его модификация Гаусса-Эверхарта (GAUSS32), разработанная В. А. Авдюшевым. Сравнение проводилось на примере исследования движения объектов с разной динамикой (532 Herculina, 4179 Toutatis, 394130 2006 HY51, 99942 Apophis). Были поставлены следующие задачи: сравнить между собой интеграторы Эверхарта и его модификацию Гаусса—Эверхарта; выяснить, как влияет увеличение числа итераций; изучить в интеграторе Эверхарта такой параметр, как порядок системы дифференциальных уравнений (NCLASS); исследовать интегратор Гаусса-Эверхарта и установить, какой из реализованных в нем методов выбора шага более эффективен. Таким образом, были получены соответствующие результаты, на основании которых можно сделать следующие выводы. При сравнении двух интеграторов Эверхарта и Гаусса-Эверхарта выяснилось, что эффективнее интегратор Гаусса-Эверхарта. Следует также отметить, что увеличение числа итераций (NI) неблагоприятно влияет на эффективность интегратора, т. е. эффективность уменьшается. Сравнив результаты интегрирования дифференциальных уравнений первого и второго порядков для интегратора Эверхарта, можем отметить, что интегратор Эверхарта существенно эффективнее для уравнений второго порядка. Из полученных результатов можно также сделать следующий вывод, что выбор шага интегрирования разными методами незначительно влияет на эффективность интегратора Гаусса-Эверхарта.

О ПОЛОЖЕНИИ ЗВЕЗД, ИОНИЗУЮЩИХ ТУМАННОСТИ, НА ИНФРАКРАСНЫХ ДИАГРАММАХ

А. Н. Плотникова¹, А. М. Соболев²

 1 Уральский федеральный университет, $^2 A строномическая обсерватория Ур<math display="inline">\Phi {\rm Y}$

В работе рассмотрены положение звезд, ионизующих туманности, на инфракрасных диаграммах, и влияние околозвездного поглощения на их покраснение.

ABOUT LOCATION OF THE STARS THAT IONIZE NEBULOSITIES ON INFRARED DIAGRAMS

A. N. Plotnikova¹, A. M. Sobolev²

¹Ural Federal University, ²Astronomical observatory UrFU

In this work the location of stars, ionizing nebulosities, on the infrared diagrams and the influence of circumstellar absorption on their reddening was examined.

На основе данных каталога точечных источников инфракрасных обзоров всего неба WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) и 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) об ионизующих туманности звездах, взятых из работы В. С. Аведисовой и Г. И. Кондратенко [1], были определены положения звезд на двуцветных диаграммах и диаграммах цвет—величина (см. рисунок).

Полученные результаты были сопоставлены с представленной в статье G. Marton с соавт. [2] двуцветной диаграммой (W1—W2, W2— W3) для цветов WISE. Отличие в положениях сгущений звезд на этой диаграмме между нашими данными и данными G. Marton с соавт. связаны с различным количеством околозвездного вещества в рассматриваемых объектах. Эти данные содержат важную информацию о покраснении звезд за счет околозвездного поглощения. Получена оценка наклона статистической кривой околозвездного поглощения в среднем инфракрасном диапазоне.

© Плотникова А. Н., Соболев А. М., 2018



Диаграмма в цветах (W1-W2, W2-W3)

Библиографические ссылки

- 1. Avedisova V. S., Kondratenko G. I. Exciting stars and the distances of the diffuse nebulae // Nauchnye Informatsii. 1984. Vol. 56. P. 59.
- Marton G., Tóth L. V., Paladini R. et al. An all-sky support vector machine selection of WISE YSO candidates // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2016. --Vol. 458. - P. 3479-3488. 1602.05777.
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ АМ:РМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АСТРОМЕТРИИ И ФОТОМЕТРИИ АСТЕРОИДОВ

А. А. Подюкова, Д. В. Козлова

Уральский федеральный университет

Представлены результаты тестирования программы AM:PM, разработанной в Коуровской обсерватории, для астрометрических и фотометрических измерений астероидов. Тестирование проводилось на данных, полученных на телескопах SBG и MASTER. Измерялись ошибки определения положений и блеска звезд в диапазоне 11—18 звездной величины, а также астероидов Florence (1981ET3), Norton (1981JE), Wirt (1950 VE). Для объектов с отношением сигнал/шум более 15 ошибки положения не превышают 0.1 пикселя (<0.2 угловой секунды для использованных в тестах кадров), для объектов с отношением сигнал/шум 3 ошибки достигают 0.5 пикселя. Ошибки определения блеска лежат в диапазоне от 0.5 до 5 % для объектов с отношением сигнал/шум более 20.

RESULTS OF TESTING THE PROGRAM AM:PM FOR AUTOMATED ASTROMETRY AND PHOTOMETRY OF ASTEROIDS

A. A. Podyukova, D. V. Kozlova Ural Federal University

We report results of testing the AM:PM program developed at the Kourovka Observatory for astrometric and photometric measurements of asteroids.

The test was carried out using data from the SBG and MASTER telescopes for stars in the range of 11–18 magnitude and for asteroids Florence (1981ET3), Norton (1981JE), Wirth (1950 VE). For objects with a signal-to-noise ratio more than 15 position errors do not exceed 0.1 pixels; for objects with a signal-to-noise ratio of 3, errors increase to 0.5 pixels. Photometry errors lie in the range from 0.5% to 5% for objects with a signal-to-noise ratio better than 20.

[©] Подюкова А. А., Козлова Д. В., 2018 181

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ МАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЛИНИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Е. А. Попова¹, А. М. Соболев¹, А. П. Цивилев² ¹Уральский федеральный университет, ²Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН

В работе были визуально проанализированы спектры 25 мазерных источников, наблюденные на частоте 22 235.08 МГц в сентябре 2016 г. Изменения надежно обнаружены в W3OH, W51E8, W49N. Все три объекта имеют много компонент линии и высокую яркость. Для поиска переменности в таких источниках на примере W49N использовалась следующая методика: сначала осуществлялась нормировка спектра, затем с помощью индексов, которые отражают возможность наличия изменения, были найдены каналы (соответствующие лучевым скоростям) — кандидаты на переменность, после чего для этих каналов была построена зависимость, отражающая изменение потока со временем. Таким образом мы увидели переменность для скоростей 57.75, 13.56 и -47.25 км/с за время около 150 ч.

STUDY OF SHORT-TERM VARIABILITY OF MASERS IN WATER-VAPOR LINE

E. A. Popova¹, A. M. Sobolev¹, A. P. Tsivilev² ¹Ural Federal University, ²Pushchino Radio Astronomy Observatory ASC LPI RAS

Sample of 25 masers observed at frequency 22 235.08 MHz (water-vapor line) in September, 2016, were studied visually. Changes were found in W3OH, W51E8, W49N. All the three objects have many spectral line components and high brightness. The following procedure was used to find the variability in such sources using W49N example: first the spectra was normalized, then special indicator indices were used to find spectral channels (radial velosities, respectively) with possible variations, after that we plotted time-series of normalised flux for selected velocity channels. So we saw variability of the velosities of 57.75, 13.56 and -47.25 km/s within the time period of about 150 hours.

[©] Попова Е. А., Соболев А. М., Цивилев А. П., 2018

¹⁸²

Проанализированы данные наблюдений, полученные при участии автора в сентябре 2016 г. на радиотелескопе РТ-22 Пущинской радиоастрономической обсерватории. Линия водяного пара (соответствует переходу с частотой 22 235.08 МГц) исследована в 25 мазерных источниках визуально, изменения (на временных масштабах порядка дней) надежно обнаружены в трех из них: W3OH, W51E8, W49N. Для источников с несколькими компонентами линии, поток излучения от которых высокий, проведен анализ с использованием индексов — индикаторов изменений в каналах.

Спектры были нормированы: значение в каждом канале разделено на суммарное по всем каналам. При поиске меняющихся деталей учитывался факт, что отклонения интенсивности в каналах, вызванные шумом, происходят с одинаковой амплитудой в сторону увеличения или уменьшения относительно среднего значения в канале за весь интервал наблюдения. А изменение, вызванное природой объекта, на этот шум наложится. Тогда отклонение от среднего значения в канале возрастет в меньшую либо в большую сторону (при условии, что происходило оно в течение времени, меньшего, чем половина всего времени наблюдения).

Поиск каналов с такими изменениями осуществлялся с помощью индекса: $I_1 = F_{mean} - \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$, где F_{mean} — значение в исследуемом канале, усредненное по всем спектрам источника за интервал наблюдения; F_{max} и F_{min} — соответственно максимальное и минимальное значения в канале из всех спектров. I_1 примет значение, близкое к нулю, если переменности нет или увеличение и уменьшение интенсивности скомпенсировано на интервале наблюдения. В случае наличия изменений компонент линии также ожидается отличие разброса значений в канале от шума (который считаем пуассоновским, т. е. пропорциональным сигналу). Ищется с использованием второго индекса: $I_2 = \frac{F_{max} - F_{min}}{\sqrt{F_{mean}}}$. Необходимо отметить, что использование его для слабых источников затруднено: рост индекса вызывается как возможным изменением, так и близким к нулю средним значением. Для анализа данных были использованы два индекса и выбраны каналы — кандидаты на изменение. Для этих каналов построены временные ряды, которые дают возможность увидеть переменность в линии.

Для источника W49N выявлены изменения компонент на скоростях 57.75 и $-47.25~{\rm кm/c}$ (рост яркости на 48 ± 5 и 32 ± 5 % соответственно), 13.56 км/с (уменьшение яркости на 22 ± 5 %) на протяжении 150 ч.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ НИТЕВИДНЫХ СТРУКТУР В ОБЛАСТИ G192.76+00.10

О. Л. Рябухина^{1,2}, И. И. Зинченко^{1,2}, А. М. Соболев³ ¹Нижегородский государственный университет, ²Институт прикладной физики РАН³, Уральский федеральный университет

Исследование волокнообразных облаков межзвездного газа сейчас является одной из актуальных тем в астрофизике. Последние исследования выявили наличие вытянутых структур, расположенных перпендикулярно основному волокну, которые, по-видимому, ориентированы параллельно линиям магнитного поля. Эти структуры называют «striations». Предполагается, что вдоль этих структур вещество течет в основное волокно или от него

SEARCH AND INVESTIGATION OF STRIATIONS IN THE FIELD G192.76+00.10

O. L. Ryabukhina^{1,2}, I. I. Zinchenko^{1,2}, A. M. Sobolev³ ¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, ²Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, ³Ural Federal University

One of the actual topics in astrophysics is investigation of filamentary clouds of interstellar gas. Recent studies have revealed the presence of elongated structures, located perpendicular to the main filament, which are aligned along the magnetic field. These structures are called "striations". It is assumed that along these structures the matter flows into or out of the main filament.

Согласно исследованиям «Herschel» [1] волокнообразные облака межзвездного газа возникают вследствие аккреции вещества вдоль нитевидных структур, в англоязычной литературе называемых «striations» или «fibers». Эти структуры образуют сеть слабых, узких и длинных нитей, расположенных перпендикулярно основному волокну. Считается, что эти нити вытянуты параллельно линиям магнитного поля. Однако до сих пор нет теоретически установленного физического механизма, объясняющего их появление. Идентифицировать такие нити можно, построив диаграммы «положение скорость» (PV-диаграммы) параллельно основному волокну в линиях ¹²СО [2], — наблюдается периодическая картина синего и красного смещения.

[©] Рябухина О. Л., Зинченко И. И., Соболев А. М., 2018

¹⁸⁴

В нашей работе для идентификации нитей были использованы данные наблюдений объекта G192.76+00.10 в линиях $^{12}{\rm CO}$ (2–1), полученные на 30-м телескопе IRAM, и в линиях $^{12}{\rm CO}$ (1–0), полученные на 10-м SMT. Непосредственно увидеть нити сложно, так как пространственное разрешение полученных карт по порядку величины сравнимо с шириной нитей, однако их можно увидеть косвенным методом по PV-диаграммам. В построенных нами диаграммах наблюдаются структуры с периодом T $\sim 0.5-1$ пк.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01256.

Библиографические ссылки

- 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.
- Heyer M., Goldsmith P. F., Yıldız U. A. et al. Striations in the Taurus molecular cloud: Kelvin-Helmholtz instability or MHD waves? // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2016. - Vol. 461. - P. 3918-3926. 1606.08858.

ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ: ВРАЩЕНИЕ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЭВОЛЮЦИЯ

Е.С.Семёнова

Казанский (Приволжский) федеральный университет

В рамках данной работы проводится изучение наблюдаемых параметров химически пекулярных звезд, таких как скорости и периоды вращения, характеристики магнитных полей и фундаментальные параметры атмосферы, что должно позволить проследить эволюцию магнитных полей подобных объектов на временах их жизни на ГП.

CHEMICALLY PECULIAR STARS: ROTATION, MAGNETIC FIELDS, EVOLUTION

E. Semenova

Kazan (Volga region) Federal University

The aim of this work is to study observable properties of chemically peculiar stars, such as rotational properties, magnetic field strength and topology as well as fundamental parameters of their atmospheres which allow us to estimate evolutionary status of these objects. We aim to trace the evolution of magnetic fields in magnetic chemically peculiar stars in their lifetime on the MS.

Представленная работа посвящена изучению химически пекулярных (СР) звезд — звезд спектральных классов А и В главной последовательности, демонстрирующих аномальное распределение химических элементов в верхних слоях их атмосфер. Магнитные химически пекулярные (mCP) звезды к тому же демонстрируют наличие глобального сильного магнитного поля, стабильного в течение десятилетий. До сих пор открытым остается вопрос о зарождении и эволюции магнитных полей подобных объектов, — проследить их изменение напрямую не представляется возможным.

Данная работа основана на данных, полученных в режиме спектрополяриметрии на Основном звездном спектрографе (ОЗСП), установленном на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. На данный момент выборка состоит из 82 звезд и продолжает расширяться.

[©] Семёнова Е. С., 2018



Измерения эффективного продольного магнитного поля проводились по проявлению эффекта Зеемана в спектрах mCP-звезд с использованием четырех различных методов — двух позиционных, регрессионного и решения уравнения свертки (LSD). Скорости вращения звезд в данной работе определялись по полной ширине спектральной линии на половине глубины применительно к сильным неблендированным линиям с малым фактором Ланде. Описанные выше методы реализованы автором на языке программирования Python применительно к спектрам, полученным на ОЗСП. Периоды вращения определялись по временным рядам измерений магнитного поля и, при наличии, фотометрии с использованием периодограммы Ломба-Скаргла. Совместно с оценкой радиуса звезды полученные характеристики вращения позволяют определять скорость вращения на экваторе и угол наклона оси вращения к лучу зрения. На основе проведенных измерений установлена обратно пропорциональная зависимость между величиной среднеквадратичного магнитного поля и скоростью вращения mCP-звезд.

Фундаментальные параметры атмосфер СР-звезд, такие как эффективная температура и ускорение силы тяжести на поверхности, определяются по методу синтетического спектра, первоначальная оценка данных параметров проводится по калибровкам для фотометрических данных в Женевской системе и системе Стремгрена. Исходя из полученных оценок параметров атмосфер определяется положение звезды на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, что должно позволить проследить эволюцию магнитных полей mCP-звезд за время их жизни на главной последовательности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОТРОННЫХ СПЕКТРОВ ВЫБОРКИ ПОЛЯРОВ

Н. А. Серебрякова

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Представлены результаты моделирования циклотронных линий в сериях спектров трех поляров по наблюдениям на БТА с использованием спектрографа SCORPIO-2 (CRTS CSS081231 J071126+440405, BS Tri, 1RXS J184542.4+483134) и в одиночных спектрах четырех поляров по данным SDSS (SDSS J153023.64+220646.4, SDSS J092122.83+203857.0, SDSS J103100.55+202832.1, SDSS J032855.00+052254.0). Определены параметры аккреционных пятен: напряженность магнитного поля и температура.

MODELING CYCLOTRON SPECTRA FOR THE SAMPLE OF POLARS

N. A. Serebriakova

Kazan (Volga region) Federal University

We presented results of modeling cyclotron lines in the series of spectra of three polars observed on BTA telescope of SAO RAS with the SCORPIO-2 spectrograph (CRTS CSS081231 J071126+440405, BS Tri, 1RXS J184542.4+483134). In addition we have modeled spectra of four polars obtained from the SDSS database (SDSS J153023.64+220646.4, SDSS J092122.83+203857.0, SDSS J103100.55+202832.1, SDSS J032855.00+052254.0). The magnetic field strength and the temperature of the cyclotron emission regions were determined.

Работа посвящена моделированию циклотронного излучения поляров — тесных двойных систем, состоящих из сильно намагниченного белого карлика ($B \sim 10-100 \text{ MFc}$) и холодного карлика главной последовательности, заполняющего свою полость Роша. Вещество холодного компонента перетекает на поверхность белого карлика, образуя горячие ($T_e \sim 10 \text{ кэB}$) аккреционные пятна вблизи его магнитных полюсов. Эти области являются источником мощного рентгеновского излучения, а также сильного циклотронного излучения, наблюдаемого в оптическом диапазоне.

 $[\]textcircled{O}$ Серебрякова Н. А., 2018

¹⁸⁸

Моделирование спектров излучения пятен проводилось в рамках простой модели, предполагающей термодинамическое равновесие излучающей среды, а также ее температурную и магнитную однородность. Вид циклотронного спектра зависит от напряженности магнитного поля B, его направления, температуры среды T_e и ее размеров. Полная интенсивность циклотронного излучения складывается из интенсивностей обыкновенной I_+ и необыкновенной волны I_- :

$$I = I_{+} + I_{-}.$$
 (1)

Решение уравнения переноса для двух мод поляризации имеет вид

$$I_{\pm} = I_{RJ} (1 - \exp(-\alpha_{\pm} l)), \tag{2}$$

где α_{\pm} — коэффициенты циклотронной непрозрачности, определяемые сверткой распределения Максвелла со спектром медленных электронов; l — геометрический размер излучающей среды; I_{RJ} — интенсивность Рэлея—Джинса.

Метод был применен для исследования выборки поляров. Определены параметры аккреционных пятен: напряженность магнитного поля и температура.

ОНЛАЙН-АТЛАС РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Ю. И. Филина, А. Ф. Селезнев, Е. А. Аввакумова, А. В. Квашнина

Уральский федеральный университет

Использование онлайн-атласа рассеянных звездных скоплений демонстрируется на ряде примеров.

ONLINE ATLAS OF OPEN STAR CLUSTERS

J. I. Filina, A. F. Seleznev, E. A. Avvakumova, A. V. Kvashnina Ural Federal University

An application of the online atlas of open star clusters is demonstrated on a number of examples.

При исследовании рассеянных звездных скоплений (P3C) часто возникает задача отождествить сгущения звезд, видимые на изображении участка звездного неба, или районы повышенной звездной плотности на карте плотности, построенной для какой-либо области неба.

Для решения этой задачи желательно получить карту расположения известных скоплений, построенную точно для такой же области, что и на нашем изображении или карте плотности. При этом необходимо, чтобы на карте правильно отображались размеры скоплений, попадающих на нее.

С этой целью предлагается использовать атлас рассеянных звездных скоплений, работающий как онлайн-приложение по адресу http://astro.ins.urfu.ru/atlas. Процедура создания атласа и краткая инструкция по работе с ним описаны в работе [1].

Еще одна задача, для которой атлас очень удобен, — выбор областей сравнения в ближайших окрестностях исследуемого скопления (например, при получении функции светимости скопления). При этом очень важно, чтобы области сравнения не перекрывались с другими скоплениями, находящимися поблизости. Также очень важно знать о возможном перекрытии проекции исследуемого скопления с соседними скоплениями.

[©] Филина Ю. И., Селезнев А. Ф., Аввакумова Е. А., Квашнина А. В., 2018 190

В докладе демонстрируется практическая работа с онлайнатласом РЗС на нескольких примерах. Показываются изменения, облегчающие работу с атласом, внесенные в интерфейс уже после публикации работы [1].

Предполагается сделать онлайн-атлас РЗС (и его «классический» вариант) в виде набора карт стандартного размера, как и исторический атлас Альтера и Рупрехта [2], постоянно дополняемым с учетом данных о вновь открываемых скоплениях или кандидатах, данных об изменении статуса объектов, новых данных о размерах скоплений. Показываются направления дальнейшего совершенствования интерфейса атласа и выводимых с его помощью карт.

Авторы надеются, что онлайн-атлас рассеянных скоплений станет полезным инструментом для всех, кто занимается исследованиями РЗС.

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- Seleznev A. F., Avvakumova E. A., Kulesh M. V. et al. New atlas of open star clusters // Open Astron. - 2017. - Vol. 26. - P. 80-87.
- 2. Alter G., Ruprecht J. The system of open star clusters and our galaxy. Atlas of open star clusters. 1963.

МОДЕЛЬ ДИНАМО В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ТОРЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВО ВНЕШНИХ КОЛЬЦАХ ГАЛАКТИК

А. Д. Хохрякова, Е. А. Михайлов

Московский государственный университет

Рассмотрена модель для динамо в торе прямоугольного сечения. Задача решалась численно с помощью конечно-разностных методов. Получен порог генерации магнитного поля, который отличается от значения, полученного как в случае планарного приближения, так и в случае динамо в круглом торе. Представлены характерные зависимости магнитного поля от пространственных координат и времени.

MODEL OF A DYNAMO IN A RECTANGULAR TORUS FOR THE STUDY OF MAGNETIC FIELDS IN THE OUTER RINGS OF GALAXIES

A. D. Khokhryakova, E. A. Mikhailov Moscow State University

This study considers a model for a dynamo in a torus of rectangular cross section. The problem was solved numerically using finitedifference methods. We obtained the limit of generation of the magnetic field, which is different from the value obtained in the case of planar approximation, and in the case of a dynamo in a round torus. We present the characteristic dependencies of the magnetic field on spatial coordinates and time.

Ряд спиральных галактик имеют крупномасштабные магнитные поля. Их эволюция связана с действием динамо. Это механизм, который связан с переходом турбулентных движений в энергию магнитного поля за счет альфа-эффекта и дифференциального вращения. Генерации поля противодействует его разрушение из-за диффузионных эффектов, поэтому возможность роста магнитного поля зависит от кинематических характеристик галактики. Как правило, эволюция поля исследуется с помощью планарного приближения, в рамках которого предполагается, что радиальные размеры галактики значительно больше вертикальных.

[©] Хохрякова А. Д., Михайлов Е. А., 2018

¹⁹²

Многие галактики обладают внешними кольцами. В них также присутствуют дифференциальное вращение и альфа-эффект, поэтому можно предположить там наличие магнитных полей. Простейшие оценки, основанные на планарном приближении, были получены в более ранних работах. Однако в случае внешних колец не вполне корректно считать толщину малым параметром. Форма колец гораздо ближе к тору. На данный момент существует представление о действии динамо в торе круглого сечения. Нами была рассмотрена модель для динамо в торе прямоугольного сечения, поскольку оно лучше описывает форму внешнего кольца.

Задача решалась численно с помощью конечно-разностных методов. Был получен порог генерации магнитного поля, который отличается от значения, полученного как в случае планарного приближения, так и в случае динамо в круглом торе. Представлены характерные зависимости магнитного поля от пространственных координат и времени.

Тезисы кратких сообщений



ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ИДА», ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

Т. Ю. Галушина, Л. Е. Быкова, О. Н. Летнер

Томский государственный университет

Прикладной программный комплекс «ИДА» позволяет осуществлять высокоточное прогнозирование движения астероидов и исследование особенностей их динамики, таких как сближения и резонансы (орбитальные и вековые) с планетами, хаотичность и предсказуемость движения и др.

SOFTWARE "IDA" FOR ASTEROID MOTION STUDY

T. Yu. Galushina, L. E. Bykova, O. N. Letner Tomsk State University

The software "IDA" is intended for high-precision prediction of asteroid motion and investigation of special features of their dynamics such as close approaches and resonances (mean motion and secular) with planets, chaotisity and predictability of motion and some others.

Изучение динамики астероидов, особенно сближающихся с Землей и другими планетами, представляет собой нетривиальную задачу, поэтому ее решение требует создания специального программного обеспечения. Прикладной программный комплекс «ИДА» (Исследование динамики астероидов) [1, 2] разработан в НИИ прикладной математики и механики ТГУ для высокоточного прогнозирования движения таких объектов и всестороннего исследования особенностей их динамики. Рассматриваемый комплекс позволяет решать следующие задачи: численное интегрирование дифференциальных уравнений движения методом Эверхарта; выявление резонансов (орбитальных, вековых) и сближений с большими планетами; оценка времени предсказуемости движения с помощью параметров хаотичности MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits) и OMEGNO (Orthogonal MEGNO); улучшение орбиты на основе позиционных наблюдений; построение начальной доверительной области линейным и нелинейными методами; исследование вероятностной орбитальной эволюции; оценка вероятности столкновения

[©] Галушина Т. Ю., Быкова Л. Е., Летнер О. Н., 2018

¹⁹⁷

астероида с планетами и Луной; демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера.

В программном комплексе реализована возможность учета следующих возмущающих факторов: влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады и Весты; сжатие Солнца, Земли и Юпитера; релятивистские эффекты от Солнца и планет. Рассматриваемый комплекс реализован в виде совокупности подсистем, предназначенных для решения различных задач и реализованных на языках Delphi и Fortran.

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

Библиографические ссылки

- Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю., Батурин А. П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89—96.
- Раздымахина О. Н. Алгоритмическое и программное обеспечение для определения параметра хаотичности MEGNO в задачах динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2011. — Т. 54, вып. 6/2. — С. 31—38.

О ТРАЕКТОРИЯХ ПЕРЕЛЕТА К РЕСУРСНО-ПЕРСПЕКТИВНЫМ ОКОЛОЗЕМНЫМ АСТЕРОИДАМ

Е. В. Ефремова

Институт астрономии Российской академии наук

В работе рассматриваются возможные траектории перелета с Земли к околоземному астероиду 163243 (2002 FB3). Астероид принадлежит к группе Аполлонов и предположительно является богатым металлами. Диаметр астероида составляет 1.682 км, наклонение орбиты 20.3°, эксцентриситет 0.6. Показано, что оптимальным перелетом с наименьшим значением импульса является перелет с использованием гравитационного маневра в окрестности Земли.

ON THE TRAJECTORIES TO THE RESOURCE-PERSPECTIVE NEAR-EARTH ASTEROIDS

E. V. Efremova

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

The paper considers possible trajectories of the flight from the Earth to the near-Earth asteroid 163243 (2002 FB3). The asteroid belongs to the Apollo group and is supposedly metal-rich. The diameter of the asteroid is 1.682 km, the inclination of the orbit is 20.3°, the eccentricity is 0.6. It is shown that the optimal flight with the lowest value of the momentum is a flight using gravitational maneuver near the Earth.

Изучение астероидов, в том числе сближающихся с Землей (AC3), имеет первостепенное значение для решения целого ряда современных научных и прикладных проблем, важнейшими из которых являются происхождение жизни на Земле, астероидно-кометная опасность (AKO), космогония Солнечной системы и поиск внеземных природных ресурсов. Последняя тема приобретает особую актуальность в связи с проблемой истощения некоторых необходимых для индустриального развития полезных ископаемых на Земле. Согласно сайту Asterank (www.asterank.com) вероятная стоимость полезных ископаемых на некоторых астероидах в сумме может дости-

[©] Ефремова Е. В., 2018

гать 100 трлн долларов США. Решающее значение для исследования и использования астероидов играют космические миссии. Однако далеко не все из обнаруженных на данный момент 16000 АСЗ могут быть достижимы при современном уровне развития космической техники. Наиболее легкодостижимы те астероиды, которые находятся на орбитах с малым эксцентриситетом, небольшим наклонением и значениями большой полуоси в пределах 0.9-1.2 а. е. По данным NASA JPL, на текущий момент под перечисленные ограничения попадают 596 астероидов. В работе рассматриваются различные варианты перелета космического аппарата к перспективному в ресурсном плане астероиду 163 243 (2002 FB3) с Земли. Астероид 163 243 (2002 FB3) спектрального класса S, Q представляет собой околоземный астероид из группы Аполлонов и является кандидатом в астероиды, богатые металлами [1]. Диаметр астероида составляет 1.682 км, наклонение орбиты 20.3°, эксцентриситет 0.6. Параметры орбиты астероида близки к параметрам орбиты Земли, что делает его удобным для достижения. Проведен анализ различных вариантов перелета, включая прямой перелет, трехимпульсный некомпланарный перелет и перелет с использованием гравитационного маневра вокруг Земли. Показано, что оптимальным перелетом с точки зрения наименьшего значения необходимого характеристического импульса dV является перелет с использованием гравитационного маневра вокруг Земли.

Библиографические ссылки

 Drube L., Harris A. W. Finding metal-rich asteroids - a NEOShield-2 Study. – 2015. – Vol. 47, Ser. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. – P. 106.04.

АНАТОМИЯ ЯДРА S255N

П. М. Землянуха¹, И. И. Зинченко^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН, ²Нижегородский университет им. Н. И. Лобачевского

Представлена работа по изучению кинематики ядра S255N на разных пространственных масштабах. В работе обнаружены пять фрагментов в ядре, а также гигантский околозвездный тор. Также проведены оценки физических параметров газа.

THE ANATOMY OF S255N

P. M. Zemlyanukha¹, I. I. Zinchenko^{1,2} ¹Institute of applyed physics RAS, ²University of Nizniy Novgorod

We introduce the S255N core kinematics at different spatial scales. At least 5 fragments were detected, as well as a giant circumstellar torus. Also, we estimate some physical parameters of the gas.

Ядра S255N и S255IR образуют гигантское молекулярное облако, расположенное между двумя расширяющимися зонами ионизированного водорода S255 и S257 [1]. В S255N происходят процессы образования звезд большой массы [2]. В работе [3] показано наличие двух спектральных компонент в линии $NH_3(1,1)$ в газе, не содержашем горячих сгустков. Анализ комбинированных данных одиночной антенны 30 m IRAM и интерферометра SMA в линиях CO(2-1), $N_2H^+(3-2)$, а также $NH_3(1,1)$ (VLA) показывают, что газ в ядре распределен крайне неоднородно и распадается на пять кинематических фрагментов (см. рисунок). Наиболее крупные расположены в направлении на зоны S255 и S257. Фрагменты меньших размеров находятся в центральной части. К ним относится волокнообразная структура, соединяющая сгустки SMA2-1-3, а также околозвездный тор, находящийся внутри этой структуры. Наблюдается активное взаимодействие между сгустками SMA1-NE, SMA1-SW, тором и волокнообразной структурой.

Анализ пространственно-кинематической структуры ядра выполнен при поддержке гранта РНФ 17-12-01256.

[©] Землянуха П. М., Зинченко И. И., 2018

²⁰¹



Карты доплеровской скорости спектральных компонент линии N_2H^+ + (3—2) по комбинированным данным наблюдений SMA и IRAM 30m. Изображение слева отражает скорость «синей» компоненты в спектре, справа — «красная» спектральная компонента. Контурами приведена пиковая интенсивность линии аммиака с линией уровня [4., 5.3, 6.7, 8.1, 9.5] К. Белыми звездочками отмечено положение сгустков по данным [3]

Библиографические ссылки

- Miralles M. P., Salas L., Cruz-González I., Kurtz S. Discovery of Jets and HH-like Objects near the S255 IR Complex // Astrophys. J. – 1997. – Vol. 488. – P. 749–759.
- 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.
- 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.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ ПОИСКА И СБОРА ВНЕЗЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

H. А. Кругликов^{1,2,3}, В. В. Крушинский¹, В. И. Гроховский¹

¹ Уральский федеральный университет, ²Институт физики металлов УрО РАН, ³ Уральский государственный экономический университет

Представлены результаты работы, направленной на повышение эффективности поиска внеземного вещества с использованием методов наблюдательной астрономии. Описываются методика проведения наблюдений, принципы построения болидной сети и особенности ее организации. Обсуждаются вопросы сбора вещества в холодных и горячих пустынях.

MODERN APPROACHES FOR EXTRATERRESTRIAL MATTER COLLECTION

N. A. Kruglikov^{1,2,3}, V. V. Krushinsky¹, V. I. Grokhovsky¹ ¹Ural Federal University, ²Institute of Metal Physics, UB of RAS, ³Ural State Economical University

We present results of the activity aimed at increase in search efficiency of extraterrestrial matter collection, using methods of observational astronomy. Approaches for observations and technical features of appropriate fireball network structure are described. Results of traditional meteorite collection in cold and hot deserts with accumulation mechanisms are compared to modern methods.

С 2016 г. ведутся работы по созданию российской болидной сети, реализован специализированный облачный сервис [1], разработано программное обеспечение на языке Python для клиентской части и отлажены алгоритмы распознавания, позволившие вести корреспондирующие наблюдения в непрерывном режиме [2]. Тестирование методик было проведено на оборудовании разных классов, включая ПЗС камеры с высокой чувствительностью и самые дешевые вебкамеры. На настоящем этапе организуется взаимодействие между узлами сети с целью проведения корреспондирующих наблюдений с базисами от 40 до 200 км.

[©] Кругликов Н. А., Крушинский В. В., Гроховский В. И., 2018

²⁰³

Кроме того, идет планомерная работа по определению траекторий различных тел, попадающих в земную атмосферу, по данным как любительской фото- и видеосъемки, так и специально организованных стационарных точек наблюдения. В России за последний год было зарегистрировано несколько событий, которые могли закончиться выпадением внеземного вещества. Все они были зафиксированы силами очевидцев и позволили отладить методику перекрестных расчетов траектории совместно с финской болидной группой при помощи аналитических и геометрических методов. Как показал опыт болида, вошедшего в атмосферу над Финляндией 16/11/2017 в 18:40 (GMT+2), время определения района падения уменьшилось до одного дня (при наличии необходимого набора видеозаписей) с точностью, определяемой географической привязкой видеозаписей.

С 2015 по 2017 г. было организовано три экспедиции: в ледяную антарктическую пустыню в район станции Новолазаревская, пустыню Деште-Лут (Иран) и пустыню Атакама (Чили). Все пустыни имеют большой возраст и соответствующие механизмы накопления метеоритов. Эффективность (по количеству вещества) проведения метеоритных экспедиций пока значительно превосходит результаты поиска внеземного вещества по данным фото-, видеонаблюдений, но, по всей видимости, эта тенденция будет меняться по мере исчерпания накопленного в пустынях материала и постепенного развития болидной сети.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Деформация», № 01201463327), проекта УрО РАН № 15-17-2-11 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (базовое финансирование по проекту № 5162) и Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- Панькив А. П., Кругликов Н. А. Разработка облачного сервиса болидной сети // Физика космоса : тр. 46-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2017 г. — Екатеринбург : Издво Урал. ун-та, 2017. — С. 188.
- Лыкосова А. А., Финогенов В. А., Нелаев К. А. и др. Методика проведения базисных наблюдений гетерогенных объектов в околоземном пространстве // Сборник трудов : тр. 23-й Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-23, 1—9 апр. 2017 г. Екатеринбург : Ассоциация студентов-физиков и молодых ученых России, 2017. С. 290—291.

АМ:РМ, АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ АСТРОМЕТРИЯ И ФОТОМЕТРИЯ АСТЕРОИДОВ

В. В. Крушинский

Астрономическая обсерватория УрФУ, Уральский федеральный университет

Разработан пакет программ AM:PM для автоматической фотометрии и астрометрии астероидов. Автоматизированная обработка включает в себя подготовку калибровочных кадров, первичную калибровку, астрометрию, измерение положения и блеска объекта, привязку к каталогам из базы Vizier. Пакет программ тестировался в операционных системах Win10 и Ubuntu 16.04 с использованием кадров, полученных на телескопах SBG и MASTER Коуровской астрономической обсерватории.

AM:PM, AUTOMATIC ASTROMETRY AND PHOTOMETRY OF ASTEROIDS

V. V. Krushinsky

Astronomical observatory UrFU, Ural Federal University

A software package AM:PM was developed for automatic photometry and astrometry of asteroids. Automated processing includes preparation of calibration frames, dark-frame/flat-field reduction, astrometry, measurement of position and brightness of the object and referencing relative to catalogs from the Vizier database. The software package was tested in Win 10 and Ubuntu 16.04 operating systems using frames obtained at the SBG and MASTER telescopes of the Kourovka Astronomical Observatory and artificial datasets.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00015.

© Крушинский В. В., 2018

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОГО ГАЗА В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S255-S258

Д. А. Ладейщиков¹, А. М. Соболев¹, М. С. Кирсанова²

¹ Уральский федеральный университет, ² Институт астрономии Российской академии наук

Для исследования плотного газа в области звездообразования S255-S258 были получены карты трассеров различной плотности газа, в том числе карта излучения молекулы HCO⁺ по собственным данным, карта поглощения в цвете V, карта лучевой концентрации молекулы CO, а также карта излучения в континууме на длине волны 1.1 мм. Была исследована корреляция между распределением молодых зведных объектов и плотным газом на разных пространственных масштабах. В результате получено, что наибольшая (> 50 %) корреляция наблюдается на масштабах более 1.5 угловые минуты между молодыми звездными объектами I класса и трассерами плотного газа — картой поглощения, излучения HCO⁺ и излучения в континууме на длине волны 1.1 мм. Высокая корреляция между молодыми звездными объектами I класса и трассерами плотного газа показывает эволюционную связь между плотным газом и наиболее молодыми звездными объектами I класса.

STUDY OF THE HIGH-DENSITY GAS IN STAR FORMATION REGION S255-S258

D. A. Ladeyschikov¹, **A. M. Sobolev**¹, **M. S. Kirsanova**² ¹Ural Federal University, ²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

© Ладейщиков Д. А., Соболев А. М., Кирсанова М. С., 2018

To study the dense gas in the star formation region S255-S258 we use tracers of different gas density, including HCO^+ line emission, extinction map, CO column density map and Bolocam continuum emission at 1.1 mm. The correlation between the distribution of young stellar objects and dense gas at different spatial scales was studied. As a result, it was found that the closest (> 50 %) correlation is observed at the scales greater than 1.5 arcmin between the young stellar objects of Class I and tracers of dense gas — extinction maps, HCO^+ emissions and continuum emission at a wavelength of 1.1 mm. A high correlation between the young stellar objects of Class I and the tracers of dense gas reveal the evolutionary connection between dense gas and the youngest stellar objects of Class I.

Поиск пространственной корреляции между распределением молодых звездных объектов и различными трассерами газа проведен по методу WWCC, описанному в работе [1]. Из графика корреляций можно заключить, что молодые звездные объекты I класса лучше всего коррелируют (> 50 %) с плотным газом, который трассируется по картам излучения HCO⁺, поглощению A_V и излучению в континууме на длине волны 1.1 мм. При исключении из рассмотрения центральной области S255, которое является ярким молодым скоплением, результат качественно не меняется для трассеров плотного газа, но для молекулы СО корреляция становится незначительной (< 30 %). Таким образом, трассеры плотного газа лучше всего отражают места, где образуются наиболее молодые звезды, причем излучение HCO⁺ имеет самую высокую степень корреляции по сравнению с другими трассерами. Так как объекты I класса более молодые, чем объекты II класса, следовательно, они еще не успели далеко улететь от места своего рождения — окружающего плотного газа, поэтому наблюдается высокая степень корреляция с газом. Корреляции между молодыми звездными объектами II класса и трассерами плотного газа не прослеживается (< 20 %).

Библиографические ссылки

 Arshakian T. G., Ossenkopf V. Wavelet-based cross-correlation analysis of structure scaling in turbulent clouds // Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 585. — P. A98.

ОСРЕДНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЛАНЕТНОЙ ЗАДАЧИ В ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА

Д. В. Микрюков

Санкт-Петербургский государственный университет

Выполнено осреднение уравнений движения двупланетной задачи до второго порядка по возмущающим массам в гелиоцентрической системе отсчета. Использована комплексная форма канонических элементов Пуанкаре. Разложение возмущающей функции построено при помощи коэффициентов Лапласа. Осреднение выполнялось методом Хори—Депри. Результаты настоящей работы легко обобщаются на случай исследования движения произвольного числа N планет.

AVERAGING OF THE PLANETARY PROBLEM EQUATIONS IN THE HELIOCENTRIC REFERENCE FRAME

D. V. Mikryukov Saint Petersburg State University

Averaging of the planetary three-body problem equations in the heliocentric reference frame is realised. The complex Poincaré canonical elements are used. The disturbing function is expanded by means of Laplace coefficients. We use the Hori—Deprit method to perform an average equations of motion at order two in the planet masses. The results of the present work can be easily generalised to the case of the general planetary N-body problem.

Построение каждой аналитической теории планетного движения выполняется в определенной системе координат. Гелиоцентрические координаты [1] имеют много преимуществ перед другими широко используемыми системами.

Уравнения планетного движения представляют собой записанную в нормальной форме систему дифференциальных уравнений, правые части которой зависят сложным образом от всех фазовых переменных. В качестве последних обычно выбирают какую-либо из систем оскулирующих элементов. Этим обеспечивается разбиение фазовых переменных на группу медленных и группу быстрых переменных.

[©] Микрюков Д. В., 2018



Для исследования эволюции элементов орбит на космогонических интервалах времени необходимо выполнить осреднение составленной системы по быстрым переменным. Правые части осредненной системы зависят только от медленных переменных. Это позволяет, с одной стороны, интегрировать уравнения относительно медленных и быстрых переменных независимо друг от друга, а с другой, выполнить это интегрирование с существенно бо́льшим шагом по времени. После определения изменения медленных переменных быстрые находятся квадратурой известных функций. Формулы замены переменных позволяют в итоге исследовать эволюцию оскулирующих элементов.

В настоящей работе представлен алгоритм осреднения уравнений движения N планет вокруг центральной звезды в гелиоцентрической системе координат [1]. В качестве системы фазовых переменных выбрана комплексная форма вторых элементов Пуанкаре [2]. Уравнения планетного движения в этих переменных имеют гамильтонову форму. В этом случае наиболее эффективной модификацией метода осреднения является метод Хори—Депри [3]. Разложение возмущающей функции строится методом Ласкара и Робютеля [2], использующим коэффициенты Лапласа.

Работа выполнена при финансовой поддержке СПбГУ (грант 6.37.341.2015).

Библиографические ссылки

- 1. *Уинтнер А.* Аналитические основы небесной механики. М. : Наука, 1967.
- Laskar J., Robutel P. Stability of the Planetary Three-Body Problem I. Expansion of the Planetary Hamiltonian // Celest. Mech. Dyn. Astr. — 1995. — Vol. 62. — P. 193—217.
- 3. Холшевников К. В. Асимптотические методы небесной механики. Л. : Изд-во ЛГУ, 1985.

ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ СО ВСПЫШКАМИ СВЕТИМОСТИ

Т. С. Молярова¹, В. В. Акимкин¹, Д. З. Вибе¹, Э. И. Воробьев²

¹Институт астрономии Российской академии наук, ²Венский университет

Вспышки светимости у маломассивных молодых звезд могут приводить к существенным изменениям в химической структуре окружающих их околозвездных дисков. Мы провели детальное астрохимическое моделирование изменения структуры протопланетных дисков в ходе вспышки светимости, характерной для звезд типа FU Ori. Обнаружен ряд молекул, полное содержание которых не только увеличивается на 3—5 порядков величины во время вспышки, но также остается завышенным на временах порядка 10—100 лет после ее окончания. Содержание подобных молекул может быть признаком прошлой вспышечной активности звезды.

CHEMICAL MODELING OF PROTOPLANETARY DISKS WITH LUMINOSITY OUTBURSTS

T. S. Molyarova¹, V. V. Akimkin¹, D. S. Wiebe¹, E. I. Vorobyov²

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ²University of Vienna

Luminosity outbursts in young stellar objects can lead to substantial changes in chemical structure of surrounding circumstellar disks. We carry out a thorough astrochemical modeling of protoplanetary disk structure change during the FU Orionis-type luminosity outburst. We find species that both increase their abundance by 3—5 orders of magnitude during the outburst and remain overabundant for tens and hundreds of years after the end of the outburst. High abundances of these species can be a sign of a past luminosity outburst.

Вспышки светимости, подобные вспышкам звезд типа FU Ori (фуоров), считаются решением проблемы светимости молодых

[©] Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З., Воробьев Э. И., 2018

звезд — несоответствия низких наблюдаемых светимостей более высоким теоретическим предсказаниям. Большинство фуоров наблюдаются нами лишь в фазе повышенной аккреции, а продолжительность спокойной фазы может достигать десятков тысяч лет, оставляя малые шансы наблюдать вспышку у известного спокойного объекта. Однако вспышки могут оставлять след в химическом составе диска. Вызванное нагревом испарение распространенных льдов, таких как СО или CO₂, может значительно повысить содержание этих молекул в газовой фазе, приводя к наблюдаемым отличиям [1]. В данной работе моделируется химическая эволюция протопланетных дисков в присутствии и по прошествии вспышки светимости.

Расчеты производятся с помощью астрохимического кода ANDES [2] на модели диска, описанной в работе [3]. Используется модифицированная сетка химических реакций ALCHEMIC [4], включающая поверхностную химию. Структура диска меняется с течением времени под действием фуороподобной вспышки светимостью $200 L_{\odot}$ и продолжительностью около 50 лет. Рассматриваются диски разных масс и радиусов. Проводится анализ содержаний различных химических соединений до, во время и после вспышки. Отбираются соединения, содержание которых в течение продолжительного времени после вспышки значительно превышает довспышечное содержание. Анализируется применимость таких соединений в качестве признаков пережитой диском вспышки светимости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00644.

Библиографические ссылки

- Rab C., Elbakyan V., Vorobyov E. et al. The chemistry of episodic accretion in embedded objects. 2D radiation thermo-chemical models of the postburst phase // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 604. — P. A15. 1705. 03946.
- 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.
- Molyarova T., Akimkin V., Semenov D. et al. Gas Mass Tracers in Protoplanetary Disks: CO is Still the Best // Astrophys. J. 2017. Vol. 849. P. 130. 1710.02993.
- Semenov D., Wiebe D. Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2011. – Vol. 196. – P. 25. 1104.4358.

РОЛЬ ЗАРЯДА В ЭВОЛЮЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

М. С. Мурга

Институт астрономии Российской академии наук

В работе рассматривается влияние заряда космических пылинок на их фоторазрушение, эрозию и фрагментацию. На основе численного моделирования эволюции ансамбля пылинок сделан вывод о важности учета заряда для исследования пыли. Исследовано влияние заряда на оптические свойства мелкой пыли, проведено моделирование спектров инфракрасного излучения нейтральных и заряженных пылинок.

THE CHARGE ROLE IN THE COSMIC DUST EVOLUTION

M. S. Murga

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

In this work we consider the role of cosmic dust grain charge on the dust photodestruction, erosion, and fragmentation. A numerical simulation of dust ensemble evolution is used as a base for the conclusion on the necessity of taking the grain charge into account in dust studies. An influence of charge on optical properties of small grains is studied, and infrared emission spectra of neutral and charged grains are modelled.

Пыль в межзведной среде может быть заряжена, и степень заряда может быть очень высокой. Особенно это касается областей звездообразования. Физические процессы с заряженными пылинками протекают иначе, чем с нейтральными: отличаются скорости процессов и вероятности их протекания.

В данной работе основные эволюционные процессы — фоторазрушение, эрозия и фрагментация пылинок — рассматриваются с учетом заряда. На основе численного моделирования делаются выводы о важности учета заряда для исследования пыли, так как в некоторых процессах заряд играет определяющую роль. Он также значительно влияет на оптические свойства мелкой пыли, что отражается

[©] Mypra M. C., 2018

²¹²

на наблюдаемых спектрах. В работе промоделированы инфракрасные спектры нейтральных и заряженных пылинок и проведено сравнение с наблюдаемыми спектрами, на основе чего сделаны выводы о доли заряженной пыли в межзвездной среде.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00521.

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОЙ ГАЛАКТИКИ 3С 390.3

С. В. Назаров

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Представлены исследования долговременной переменности потоков эмиссионных линий и континуума в ядре галактики 3С 390.3 за более чем 20-летний период наблюдений в КрАО на 2.6-м телескопе ЗТШ (спектры) и на 70-см телескопе АЗТ-8 (фотометрия). Работа, продолжающая систематические исследования 3С 390.3, уникальна беспрецедентно длинными и однородными рядами данных.

SPECTRAL STUDY OF THE ACTIVE GALAXY 3C 390.3

S. V. Nazarov Crimean Astrophysical Observatory

We have presented a study of the long-term variability of the fluxes of emission lines and the continuum in the nucleus of the galaxy 3C 390.3 over more than 20-year period of observations at the CrAO with the 2.6-m Shain telescope (spectra) and with the 70-cm telescope AZT-8 (photometry). This work, which continues the systematic research of 3C 390.3, is unique with unprecedented long and homogeneous data series.

Объект 3С 390.3 является прототипом интересного типа активных ядер галактик (АЯГ) с очень широкими (до 20000 км/с) и двугорбыми профилями эмиссионных линий малого потенциала ионизации. Два пика в профилях широких бальмеровских линий (BLR), смещенные в синюю и красную сторону, были обнаружены еще в 1966 г. [1]. Двугорбость профилей линий может означать, что они формируются во внешних частях аккреционного диска. Однако существуют альтернативные гипотезы образования таких форм.

Нами представлены исследования долговременной переменности потоков эмиссионных линий и континуума в ядре этой галактики за более чем 20-летний период наблюдений в КрАО на 2.6-м телескопе ЗТШ (спектры) и на 70-см телескопе АЗТ-8 (фотометрия). Данная работа, продолжающая систематические исследования

[©] Назаров С. В., 2018

²¹⁴

3C 390.3 [2, 3], уникальна беспрецедентно длинными и однородными рядами данных [4].

Результаты:

- подтверждена переменность потока узкой линии [OIII] λ5007.
 Впервые обнаружена переменность узких бальмеровских линий и линии [OI] λ6300;
- оценен размер BLR-области: 88.6 \pm 8.4, 161 \pm 15 и 113 \pm 14 св. дней для линий Н β , Н α и Н γ соответственно;
- по измерениям в линиях $H\beta$ и $H\alpha$ найдена масса центральной черной дыры $(1.87\pm0.26)\times10^9$ и $(2.81\pm0.38)\times10^9$ масс Солнца соответственно;
- показано, что метод эхо-картирования может распространяться на весь период наблюдений только после удаления долговременного тренда;
- отклики широких эмиссионных линий $H\alpha$, $H\beta$ и $H\gamma$ на изменения в оптическом континууме являются нелинейными. В соответствии с рассмотренной моделью кеплеровского диска показатель степени *a* степенного закона равен 0.77 и 0.54 для линий $H\beta$ и $H\alpha$ соответственно;
- определено, что ядро 3С 390.3 значительно выделяется своим положением в фундаментальной зависимости «масса светимость». Его эддингтоновское отношение светимостей наименьшее среди всех известных: E_{bol}/E_{Edd} = 0.0037.

Библиографические ссылки

- 1. Sandage // The Astrophysical Journal. 1966. Vol. 145. P. 1.
- 2. Sergeev S. G. // The Astrophysical Journal. 2002. Vol. 576. P. 660.
- 3. Sergeev S. G. // MNRAS. 2011. Vol. 410. P. 1877.
- Sergeev S. G., Nazarov S. V., Borman G. A. Spectral variability of the 3C 390.3 nucleus for more than 20 yr - I. Variability of the broad and narrow emission line fluxes // MNRAS. – 2017. – Vol. 465. – P. 1898–1909.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСТРОКЛИМАТА В КрАО ПО СНИМКАМ ТЕЛЕСКОПА АЗТ-8

С. В. Назаров¹, О. Е. Кутков¹, В. В. Крушинский² ¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, ²Астрономическая обсерватория УрФУ

Мы представляем описание калибровки, анализа данных, программное обеспечение и первые результаты мониторинга избранного ряда активных галактик на телескопе АЗТ-8 КрАО.

ASTROCLIMATIC RESEARCH AT THE CRAO USING AZT-8 TELESCOPE IMAGES

S. V. Nazarov¹, O. E. Kutkov¹, V. V. Krushinskiy¹ ¹Crimean Astrophysical Observatory, ²Astronomical observatory UrFU

We present a description of the calibration, data analysis, software and the first results of permanent monitoring of a selected number of active galaxies at the AZT-8 telescope.

Выбор новой площадки для Крымской астрофизической обсерватории в 1930-е и 1940-е гг. был обусловлен прежде всего поиском хорошего астроклимата, пригодного для установки новых телескопов метрового класса [1]. В целом найденное место характеризуется удачным компромиссом между количеством ясных ночей, турбулентностью, темнотой неба благодаря удаленности от городов и близости заповедника, а также удобством доставки и размещения крупногабаритных инструментов.

Однако дальнейшие исследования астроклимата в КрАО проводились редко и бессистемно, что не дает возможности оценить долговременное изменение погодных условий. А значит, невозможно оценить справедливость оценок, повлиявших на выбор места для строительства обсерватории, что, в свою очередь, влияет на надежность используемых методов оценки астроклимата.

В 2001 г. в КрАО на телескопе АЗТ-8 стартовал проект постоянного мониторинга избранного ряда активных галактик [2]. На сегодняшний день база данных проекта содержит 480 000 снимков в пяти фильтрах примерно полутора сотен площадок размером 15 × 15′. Нами было проведено исследование яркости фона неба и дисков дрожания звезд за 16 лет наблюдений.

[©] Назаров С. В., Кутков О. Е., Крушинский В. В., 2018
Библиографические ссылки

- 1. Газе Ф. В. Выбор места для Крымской астрофизической обсерватории // Изв. КрАО. 1948. Т. 3. С. 99.
- Sergeev S. G. Lag-Luminosity Relationship for Interband Lags between Variations in B, V, R, and I Bands in Active Galactic Nuclei // The Astrophysical Journal. Vol. 622. P. 129—135.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМПАКТНЫХ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

А. С. Перминов, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Построена осредненная численно-аналитическая теория движения планетных систем с точностью до второго порядка по массам планет. В рамках данной теории изучается орбитальная эволюция двух компактных внесолнечных трехпланетных систем HD20794 и GJ3138 на длительных интервалах времени. Определяются устойчивость планетных орбит и резонансные свойства движения. Поскольку массы и элементы орбит планет известны из наблюдений с ошибками, даются различные варианты орбитальной эволюции в зависимости от конкретных значений этих параметров.

DYNAMICAL EVOLUTION OF PACKED EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

A. S. Perminov, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

Averaged semi-analytical motion theory of planetary systems is constructed up to the second degree of planetary masses. Within this theory the orbital evolution of packed extrasolar three-planetary systems HD20794 and GJ3138 is described on long-time scales. The stability of planetary orbits and resonant properties of the motion are considered. For the reason that masses and orbital elements are defined from observations with some errors, some variants of orbital evolution are given depending on specific values of these parameters.

Авторами построена осредненная численно-аналитическая теория движения второго порядка по массам планет. Разложение гамильтониана четырехпланетной задачи получено в виде ряда по элементам второй системы Пуанкаре с использованием координат Якоби. Осреднение гамильтониана и построение уравнений движения выполнено методом Хори—Депри. При этом эксцентрические и облические элементы Пуанкаре учитываются в разложениях до 4 степени. Построенная теория может быть применена для исследования

[©] Перминов А. С., Кузнецов Э. Д., 2018

²¹⁸

динамических характеристик планетных систем с умеренными значениями эксцентриситетов, наклонов и отношений больших полуосей орбит.

В работе рассматривается орбитальная эволюция внесолнечных планетных систем HD20794 и GJ3138. Обе системы являются компактными. Большие полуоси орбит планет в этих системах меньше 1 а. е., а их эксцентриситеты не превышают 0.3.

Осредненные уравнения движения численно интегрируются методом Эверхарта. Изучаются динамические свойства выбранных внесолнечных планетных систем. Устойчивость и резонансные характеристики систем определяются по результатам интегрирования уравнений движения и анализа функций замены переменных, которые определяют зависимость между средними и оскулирующими элементами.

Для выбранных планетных систем известны нижние границы значений масс планет, а элементы орбит определены из наблюдений с некоторыми ошибками. По этой причине приводятся различные варианты орбитальной эволюции в зависимости от конкретных значений варьируемых масс и элементов орбит.

Для выборки из прочих трех- и четырехпланетных систем, обладающих умеренными значениями эксцентриситетов орбит, резонансные характеристики определяются простым анализом уравнений движения без их интегрирования. Дается распределение наблюдаемых планетных систем по динамическим и резонансным свойствам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть государственного задания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

SEEDS OF LIFE IN SPACE: МЕТАНОЛ В ДОЗВЕЗДНОМ ЯДРЕ L1544

А. Ф. Пунанова¹, П. Каселли²,

¹ Уральский федеральный университет, ² Институт внеземной физики общества Макса Планка

В докладе представлены результаты интерферометрических наблюдений метанола на частоте 96.7 ГГц в направлении метанольного пика дозвездного ядра L1544. Профиль содержания метанола в L1544, полученный с помощью не-ЛТР моделирования спектральных линий, сравнивается с результатами химической модели.

SEEDS OF LIFE IN SPACE: METHANOL TOWARDS THE PRE-STELLAR CORE L1544

A. F. Punanova¹, P. Caselli²

¹Ural Federal University, ²Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

We present the results of the interferometric observations of methanol at 96.7 GHz towards the methanol peak near the pre-stellar core L1544. The methanol abundance profile derived with the non-LTE modelling of the methanol spectral lines is compared with the results of chemical modelling.

Метанол (CH₃OH) образуется на поверхности ледяных мантий межзвездных пылинок путем последовательного присоединения атомов водорода H к молекулам CO и является важным прекурсором кислородсодержащих сложных органических молекул. В дозвездном ядре L1544 излучение метанола образует асимметричное кольцо вокруг центра ядра (где метанол существует в основном в форме льда) с заметным пиком излучения в 4000 а. е. к северо-востоку от пика излучения пыли (который считается центром ядра). В рамках большого наблюдательного проекта на интерферометре NOEMA «Seeds of Life in Space» (SOLIS) метанольный пик в L1544 был пространственно разрешен, чтобы изучить его кинематическую и физическую структуру и исследовать причину локального усиления излучения. Было найдено, что в направлении плотной центральной части дозвездного ядра центральная скорость увеличивается на 0.2 км/си

[©] Пунанова А. Ф., Каселли П., 2018

²²⁰

дисперсия скорости увеличивается от дозвуковой до умеренно сверхзвуковой, а поле скоростей также имеет сложную структуру. Это может быть признаком слабой аккреции вещества на дозвездное ядро, вызывающей медленную ударную волну. Была измерена вращательная температура; показано, что метанол находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР) только вблизи пика излучения пыли, где содержание метанола в газе сильно снижено (метанол присутствует в ледяных мантиях пылинок). С помощью моделирования лучевого переноса без предположения ЛТР был получен профиль лучевой концентрации метанола (N_{tot}) и сравнен с профилем метанола в статическом ядре, полученным из химической модели. Профиль N_{tot} (CH₃OH), смоделированный по наблюдениям, согласуется с предсказанием модели, но абсолютное значение наблюдаемой линейной концентрации на один порядок величины ниже, чем N_{tot} (CH₃OH), предсказанное моделью.

Работа выполнена при поддержке грантов ERC-PALs 320620, ERC-DOC 741002; STFC ST/L004801, ST/M004139; CITA National Fellowship.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СР-ЗВЕЗД МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ: СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Т. А. Рябчикова¹, А. М. Романовская¹, Д. В. Шуляк² ¹Институт астрономии Российской академии наук, ²Гёттингенский университет им. Георга-Августа

В работе представлены результаты определения эффективных температур, ускорения свободного падения, химического состава, радиусов и светимостей двух СР-звезд (HD 188041 и HD 111133). Собраны параметры еще для восьми СР-звезд. Сравнение определенных нами радиусов по спектральным и спектрофотометрическим наблюдениям с прямыми измерениями радиусов методами интерферометрии для пяти звезд программы показало, что, за исключением одной звезды, 10 Aql, радиусы согласуются в пределах ошибок измерений, что позволяет использовать спектроскопические наблюдения для получения точных величин фундаментальных параметров.

THE DETERMINATION OF FUNDAMENTAL PARAMETERS OF CP-STARS BY SPECTROSCOPIC METHODS: COMPARISON WITH INTERFEROMETRY DATA

T. A. Ryabchikova¹, A. M. Romanovskaya¹, D. V. Shulyak² ¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ²Institute of Astrophysics, Georg-August University

In this paper we present the results of determining the effective temperatures, the surface gravities, the chemical composition, radii and the luminosity of two CP stars (HD 188041 and HD 111133). Spectroscopically derived parameters are collected for other 8 CP stars and for 5 stars they are compared to those determined by direct interferometric measurements. This comparison showed that for all but one star, 10 Aql, the radii agree within the errors of measurements, which makes it possible to use spectroscopic observations to obtain accurate values of the fundamental parameters.

[©] Рябчикова Т. А., Романовская А. М., Шуляк Д. В., 2018

²²²

Определение фундаментальных параметров звезд является одной из основных задач астрофизики. Для химически-пекулярных (СР) звезд эта задача усложняется аномальным химическим составом их атмосфер, требующим специальных методов анализа наблюдаемых спектров. Это необходимо для точного определения эволюционного статуса звезды и положения на диаграмме Герцппрунга—Рассела, а также для проверки теоретических моделей пульсирующих магнитных звезд, поскольку модели пульсаций предсказывают сильную зависимость от радиуса звезды (Cunha et al. NMRAS 436, 1639, 2013).

Исследуемые объекты HD 188041 (V1291 Орла) и HD 111133 (ЕР Девы) — переменные звезды спектральных классов A6p SrCrEu и A1p SrCrEu соответственно. Они входят в программу интерферометрических наблюдений. Определения фундаментальных параметров звезд исследования основаны на самосогласованном анализе спектральных (спектры высокого разрешения) и спектрофотометрических наблюдений в широком диапазоне длин волн с учетом аномального химического состава атмосфер и неоднородного распределения по глубине атмосферы химических элементов (Ca, Cr, Fe), линии которых дают основной вклад в поглощение.

Фундаментальные параметры СР-звезд, полученные путем детального спектроскопического анализа, с достаточной точностью сравнимы с интерферометрическими измерениями (см. рисунок).



Сравнение параметров пяти СР-звезд (из восьми), полученных по спектроскопическому и интерферометрическому методам

БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ ЛИНИЙ МЕТАНОЛА

С. В. Салий¹, С. Ю. Парфёнов¹, М. С. Кирсанова^{2,1} ¹Астрономическая обсерватория УрФУ, ²Институт астрономии Российской академии наук

Показано, что использование Байесовского подхода позволяет оценить температуру газа и удельную лучевую концентрацию метанола в областях звездообразования по двум радиолиниям метанола, плотность газа — по четырем. Полученные значения физических параметров хорошо согласуются с независимыми оценками.

BAYESIAN APPROACH TO ESTIMATIONS OF STAR-FORMATION REGIONS PHYSICAL PARAMETERS BY FEW METHANOL LINES

S. V. Salii¹, S. Yu. Parfenov¹, M. S. Kirsanova^{2,1} ¹Astronomical observatory UrFU, ² Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We show that Bayesian approach is useful for estimating kinetic temperatures and methanol specific column densities of starformation regions by only two methanol lines and hydrogen number densities by four lines. Calculated physical parameters' values are in good agreement with values that were estimated in other ways.

Для молекулярных ядер из массивного волокна WB673 по квартету линий метанола (CH₃OH, 96.7 ГГц), наблюдавшемуся на 20-м телескопе Онсала [1], оценены физические параметры: кинетическая температура газа (T_k), плотность молекулярного водорода (n_{H_2} , см⁻³), удельная лучевая концентрация метанола ($N_{CH_3OH}/\Delta V$, см⁻³·с), обилие метанола (N_{CH_3OH}/N_{H_2}) и фактор заполнения диаграммы направленности (Ff). Оценки параметров получены приближением наблюдаемых интенсивностей линий модельными значениями по методу Байеса [2]. Выбор метода Байеса обусловлен малым количеством анализируемых линий (меньше числа параметров модели). Модельные интенсивности линий вычислены

[©] Салий С. В., Парфёнов С. Ю., Кирсанова М. С., 2018

²²⁴

на основе базы данных населенностей уровней метанола [3] в приближении большого градиента скорости. Оценки согласуются со значениями, полученными методом хи-квадрат с ограничениями на значения параметров [1]. Оценки температур сравнимы со значениями, полученными по излучению в линиях СО [4].

Получено, что N_{CH_3OH}/N_{H_2} по квартету линий CH₃OH на частоте 96.7 ГГц ограничивается плохо; Ff по двум линиям ограничить невозможно, по четырем линиям — только с достоверностью 68 %; при этом для достоверных (95 %) оценок $N_{CH_3OH}/\Delta V$, T_k и n_{H_2} достаточно даже двух зарегистрированных линий (см. рисунок).



Спектры CH₃OH на частоте 96.7 ГГц (слева). Распределение функции вероятности по параметрам. Пунктир — вероятность 95 и 68 %

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть государственного задания, РК №АААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

- Kirsanova M. S., Salii S. V., Sobolev A. M. et al. Molecular gas in highmass filament WB673 // ArXiv e-prints. — 2017. 1711.01428.
- 2. Ward J. S., Zmuidzinas J., Harris A. I., Isaak K. G. A $^{12}\rm{CO}$ J=6-5 Map of M82: The Significance of Warm Molecular Gas // Astrophys. J. 2003. Vol. 587. P. 171–185.
- 3. Salii S. V. The database for estimation of physical parameters of molecular clouds by methanol radiolines intensities // Star Formation in the Galaxy and Beyond / ed. by D. S. Wiebe, M. S. Kirsanova. 2006.
- 4. Bieging J. H., Patel S., Peters W. L. et al. The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ¹³CO J=2-1, and CO J = 3-2 // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2016. Vol. 226. P. 13.



ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, ПОПАВШИХ В ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Г. Е. Самбаров, О. М. Сюсина

Томский государственный университет

В работе рассматривается исследование движения астероидов и особенности их динамики, такие как тесные сближения, орбитальные и вековые резонансы с планетами и др.

INVESTIGATION AND IDENTIFICATION OF THE PECULIARITIES IN THE MOTION OF SMALL BODIES OF THE SOLAR SYSTEM THAT HAVE FALLEN INTO THE NEAR-EARTH SPACE

G. E. Sambarov, O. M. Syusina

Tomsk State University

In this work we study the motion of asteroids and the features of their dynamics, such as close approaches, orbital and secular resonances with planets, etc.

Гравитационные взаимодействия между планетами порождают так называемые вековые возмущения. Не только планетные орбиты испытывают вековые возмущения, но они также могут оказывать вековое возмущение на любое тело, обращающееся вокруг Солнца. Такое сильное воздействие может быть в случае так называемых вековых резонансов. Характерной особенностью влияния ряда вековых резонансов является возрастание эксцентриситета орбиты объекта, что существенным образом меняет положение орбиты в пространстве. В результате этого орбита астероида становится отличной от номинальной, что может приводить к столкновениям и/или перевести объект в группу потенциально опасных астероидов. Кроме того, вековые резонансы позволяют предсказывать возможность хаотического поведения в движении объектов. Поэтому для малых тел Солнечной системы, попавших в околоземное пространство, нужно проводить подробное исследование динамических свойств исследуемых объектов [1, 2].

© Самбаров Г. Е., Сюсина О. М., 2018

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-32-00447 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.
- Galushina T. Yu., Sambarov G. E. The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // Planetary and Space Science. – 2017. – Vol. 142. – P. 38–477.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

В. С. Сафронова, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

На основе данных Международного центра малых планет получены оценки расстояний между орбитами астероидов с использованием метрик пространства кеплеровых орбит. Для пар астероидов, движущихся по близким орбитам, выполнено моделирование динамической эволюции с использованием программы Orbit9 с целью выявления тесных сближений астероидов. Получены оценки взаимных расстояний между астероидами в парах. Для повышения точности оценки взаимных расстояний между астероидами с учетом эффекта Ярковского предложена программа позиционных и фотометрических наблюдений астероидов на близких орбитах с целью уточнения их физических и динамических параметров.

DYNAMIC EVOLUTION OF ASTEROIDS ON CLOSE ORBITS

V. S. Safronova, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

Estimates of the distances between the orbits of asteroids are obtained using the metrics of the space of Keplerian orbits. MPC data base was used. For pairs of asteroids moving in close orbits modelling of dynamic evolution was carried out using the Orbit9 program in order to identify close approaches of asteroids. Estimates of the mutual distances between asteroids in pairs are obtained. To improve the accuracy of estimating the mutual distances between asteroids with taking into account the Yarkovsky effect, we propose a program of astrometric and photometric observations of asteroids in close orbits with the aim of improvement of their physical and dynamic parameters.

Получены оценки расстояний между орбитами астероидов, включенных в базу данных Международного центра малых планет по состоянию на 7 октября 2017 г. (735 085 астероидов, среди которых 495 827 нумерованных). Использовались метрики ρ_2 и ρ_5 , предложенные в работе [1]. Метрика ρ_2 определяет расстояние в пятимерном пространстве кеплеровых элементов, метрика ρ_5 — в трехмерном

[©] Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д., 2018

фактор-пространстве, учитывая все возможные ориентации пары орбит по долготам восходящих узлов и аргументам перицентров.

Для 55 пар астероидов значения метрики $\rho_2 < 0.001$ (а. е.)^{1/2} ($\rho_2^2 < 150$ км). Исследование орбитальной эволюции астероидов на близких орбитах представляет интерес при решении широкого круга задач: отождествление астероидов, выделение семейств астероидов, поиск астероидов, испытавших соударение или распад двойной системы, включая астероиды под влиянием YORP-эффекта, и т. д. [2].

Близость орбит астероидов не является достаточным условием сближения астероидов в пространстве в текущую эпоху. Для астероидов, входящих в близкие пары, с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit [3] выполнено моделирование движения в прошлое и будущее с целью выявления тесных сближений.

При моделировании орбитальной эволюции астероидов с диаметрами менее 30—40 км требуется учитывать эффект Ярковского [2], особенностью которого является то, что знак вековых возмущений большой полуоси орбиты зависит от направления осевого вращения астероида. В Коуровской астрономической обсерватории УрФУ начата программа фотометрических наблюдений астероидов, движущихся по близким орбитам. Данные о параметрах вращения астероидов, получаемые из фотометрических наблюдений, позволят выполнить высокоточное моделирование орбитальной эволюции.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и гранта РФФИ № 18-02-00015.

Библиографические ссылки

- Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2016. - P. 2275-2283.
- Vokrouhlický D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al. The Yarkovsky and YORP Effects / D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, S. R. Chesley et al. // Asteroids IV / ed. by P. Michel, F. E. DeMeo, W. F. Bottke. — 2015. — P. 509—531.
- 3. *Orbfit Consortium*. OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. Astrophysics Source Code Library. 2011. **1106.015**.

ЭВОЛЮЦИЯ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ПЫЛИ В ЗОНАХ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА И ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ

Е. Э. Сивкова, Д. З. Вибе, М. С. Мурга

Институт астрономии Российской академии наук

Проведено исследование микрофизики разрушения и ароматизации пылевых частиц для условий, соответствующих зонам ионизованного водорода (HII) и остаткам сверхновых.

EVOLUTION OF HYDROCARBON DUST IN REGIONS OF IONIZED HYDROGEN AND SUPERNOVA REMNANTS

E. E. Sivkova, D. S. Wiebe, M. S. Murga

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Study of microphysics of dust grain destruction and aromatization is carried out for conditions typical for ionized hydrogen regions and supernova remnants.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) являются одними из основных компонентов пыли в межзвездной среде. Поглощая ультрафиолетовое излучение, ПАУ переизлучают его в инфракрасном (ИК) диапазоне. Интерес к изучению эволюции углеводородной пыли связан в первую очередь с тем, что она является составной частью эволюции органического вещества во Вселенной. Кроме того, ИК-излучение ПАУ используется в качестве индикатора темпа звездообразования. Наблюдательные данные указывают, что в областях звездообразования (ОЗО) углеводородные частицы эволюционируют: меняются их распределение по размерам и структурные свойства. Их сложная эволюция в ОЗО может стать причиной неверной интерпретации наблюдений в ИК-диапазоне.

Эволюция пылинок в областях звездообразования определяется балансом нескольких процессов. В объектах с экстремальными физическими условиями (зоны НІІ, оболочки сверхновых) происходит эффективное разрушение пыли [1]. Результаты наблюдений указывают на эволюцию мелких пылинок, которая отличается от эволюции крупной пыли и чувствительна к параметрам среды (температура, скорость и т. д.).

[©] Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С., 2018

²³⁰

В работе представлены распределения пылинок по размерам и степеням ароматизации для различных значений скорости столкновений с частицами газа, температуры и начальной концентрации пыли. Рассмотрен вклад в эволюцию пылевого ансамбля различных процессов, конкурирующих между собой в межзвездной среде. Оценены временные шкалы разрушения пыли для различных начальных условий в результате столкновений с частицами газа (ионами и электронами) и дробления при столкновениях пылинок друг с другом. Показано, что для условий, соответствующих зонам HII, основная масса пыли разрушается за время ~ 200 тыс. лет при небольших скоростях движения газа ($\sim 1{-}10~{
m km/c}$) и за несколько лет при больших скоростях (~ 100 км/с). Для условий, соответствующих остаткам сверхновых, разрушение происходит за несколько тысяч лет при небольших скоростях и за несколько сотен лет при высоких скоростях движения газа. Результаты показывают качественное согласие с наблюдениями разрушения пылинок в остатках сверхновых [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00521.

Библиографические ссылки

- 1. Slavin J. D., Dwek E., Jones A. P. Destruction of Interstellar Dust in Evolving Supernova Remnant Shock Waves // Astrophys. J. 2015. Vol. 803. P. 7.
- Sankrit R., Williams B. J., Borkowski K. J. et al. Dust Destruction in a Non-radiative Shock in the Cygnus Loop Supernova Remnant // Astrophys. J. - 2010. - Vol. 712. - P. 1092–1099.

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ СО СМЕЩЕННЫМИ БАРАМИ

К. И. Смирнова¹, Д. З. Вибе²

¹ Уральский федеральный университет, ² Институт астрономии Российской академии наук

В галактиках со смещенными барами NGC 4618 и NGC 4631 выделены области звездообразования (O3O) по данным наблюдений в инфракрасном (ИК) диапазоне: ближнем (3.6, 4.5, 5.8, 8.0 мкм) и среднем (24 мкм), а также в ультрафиолетовом диапазоне: ближнем (GALEX NUV) и дальнем (GALEX FUV). Для выделенных ОЗО оценены потоки излучения. Полученные результаты сопоставлены с данными для галактики с полярным кольцом NGC 660.

SELECTION OF STAR-FORMING REGIONS IN GALAXIES WITH OFF-CENTRE BARS

K. I. Smirnova¹, D. S. Wiebe²

¹Ural Federal University, ²Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Star-forming regions (SFR) are selected in offcentre-bar galaxies NGC 4618 and NGC 4631 based on observations in the infrared (IR) range: near-IR (3.6, 4.5, 5.8, 8.0 μ m) and mid-IR (24 μ m), and also in the ultraviolet range: (GALEX NUV) and the far (GALEX FUV). Radiation fluxes are estimated for the selected SFRs. Obtained results are related to the data for the polar ring galaxy NGC 660.

Ранее мы исследовали галактику с полярным кольцом NGC 660, в которой выделялись области звездообразования (O3O) в кольце и диске. Полученные результаты в некоторых диапазонах отличались от аналогичных результатов для галактик, представленных в [1]. Например, сопоставление излучения на 8 и 24 мкм (22 мкм для NGC 660) показало, что отношение потоков $F_8/F_{22,24}$ в O3O кольца следует той же тенденции, что и в высокометалличных внегалактических O3O [1], но сами потоки как на 8, так и на 24 мкм в кольце NGC 660 существенно более низкие. В этом исследовании мы искали галактики, которые бы демонстрировали подобные низкие эмиссионные потоки, так как одного объекта недостаточно для формулирования

[©] Смирнова К. И., Вибе Д. З., 2018

²³²

выводов. Нам нужны были объекты, в которых присутствуют ОЗО различных возрастов. Для этой цели хорошо подходят галактики со смещенными барами, т. е. галактики, в которых наблюдается смещение бара относительно фотометрического и/или кинематического центров диска. Это может быть вызвано сильным приливным воздействием или столкновением двух галактик с последующим слиянием, что привело к новой волне ЗО и соответственно появлению зарождающихся областей, которые, как мы считаем, могут быть тусклы в ИК-диапазоне, но богаты нейтральным водородом (как ОЗО в кольце NGC 660). Из списка галактик со смещенными барами [2] необходимые нам данные наблюдений доступны для двух галактик — NGC 4618 и NGC 4631.

В данной работе показано, что галактика NGC 4631 близка к результатам, характерным для высокометалличных галатик из работы [1], тогда как в ОЗО галактики NGC 4618 встречаются потоки на 8 и 24 мкм, характерные как для высокометалличных галактик, так и для областей кольца галактики NGC 660.

Библиографические ссылки

- Smirnova K. I., Murga M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. Relation between the parameters of dust and of molecular and atomic gas in extragalactic star-forming regions // Astronomy Reports. — 2017. — Vol. 61. — P. 646— 662.
- Kruk S. J., Lintott C. J., Simmons B. D. et al. Galaxy Zoo: finding offset discs and bars in SDSS galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2017. --Vol. 469. - P. 3363-3373. 1705.00007.

РАДИОПУЛЬСАРЫ С ОЖИДАЕМЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ И ГАММА-ПУЛЬСАРЫ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

М. А. Тимиркеева

Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН

Мы показали, что радиопульсары, обнаруженные в виде источников импульсного гамма-излучения на Ферми/ЛАТ, имеют очень высокие значения магнитного поля вблизи светового цилиндра и скорости потери энергии вращения. Обнаружена корреляция между гамма-светимостью и радиосветимостью. Каталог гаммапульсаров содержит некоторые источники, которые до сих пор неизвестны как радиопульсары. Некоторые из них имеют большое значение гамма-светимости, и, согласно полученной корреляции, от них можно ожидать заметного радиоизлучения. Мы приводим список таких объектов и их ожидаемые плотности потока на частотах 1 400 и 111 МГц.

RADIO PULSARS WITH EXPECTED GAMMA RADIATION AND GAMMA PULSARS AS PULSATING RADIO EMITTERS

M. A. Timirkeeva

Pushchino radioastronomical observatory

We have shown that the radio pulsars detected as the pulsing gamma sources by the Fermi/LAT have very high values of magnetic field near the light cylinder and losses of the rotation energy. The correlation between gamma-ray luminosities and radio luminosities is found. The catalogue of gamma pulsars contains some sources which are not known as radio pulsars at this moment. Some of them have the large value of gamma luminosities and according to the obtained correlation, we can expect marked radio emission from these objects. We give the list of such pulsars and expected flux densities to search for radiation at frequencies 1 400 and 111 MHz.

Среди известных гамма-пульсаров из Второго каталога Ферми/ЛАТ есть объекты, которые уверенно наблюдаются в гаммадиапазоне, но от которых нет зарегистрированного радиоизлучения.

[©] Тимиркеева М. А., 2018

²³⁴

Гамма-пульсары с ожидаемым радиоизлучением

	PSRJ	\mathbf{P} (s)	$R_{lum1400}$ mJy $ imes$ kpc ²	L_{γ} (kpc)	d	$\begin{array}{c}S_{1400}\\(\mathrm{mJy})\end{array}$	$\begin{array}{c}S_{111}\\(\mathrm{mJy})\end{array}$
$ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} $	$\begin{array}{c} J0007{+}7303\\ J0633{+}1746\\ J1418{-}6058\\ J1732{-}3131\\ J1809{-}2332\\ J2043{+}2740 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.316 \\ 0.237 \\ 0.111 \\ 0.197 \\ 0.147 \\ 0.096 \end{array}$	8.90 5.35 8.81 2.91 11.55 1.98	$94 \\ 31.7 \\ 92 \\ 8.6 \\ 164 \\ 3.8$	$1.4 \\ 0.25 \\ 1.6 \\ 0.64 \\ 1.7 \\ 1.25$	$ \begin{array}{r} 4.5 \\ 85.6 \\ 3.4 \\ 7.1 \\ 4.0 \\ 1.3 \\ \end{array} $	$\begin{array}{c} 203.4\\ 3835.7\\ 154.2\\ 317.9\\ 179.0\\ 56.9\end{array}$

Эти источники приводятся в таблице с указанием ожидаемой радиосветимости. Уравнение для радиосветимости записано в виде

$$\lg R_{lum1400} = (0.47 \pm 0.15) \lg L_{\gamma} + (0.03 \pm 0.26). \tag{1}$$

С использованием значений расстояния оценены плотности потока на частотах 1400 ($S_{1400} = R_{lum1400}/d^2$) и 111 МГц. Оценки расстояний приведены в каталогах 2FGL и ATNF каталога радиопульсаров. При вычислениях S_{111} считалось, что спектр излучения описывается степенной зависимостью

$$S_{\nu} = S_0 \times \nu^{-\alpha},\tag{2}$$

и принималась средняя величина спектрального индекса $\alpha = 1.5$. При этих предположениях $S_{111} = 44.8 \times S_{1400}$. Мы приводим оценки плотностей потока на частоте 111 МГц по двум причинам. Первая связана с фактом, что спектр пульсара, как правило, имеет максимум на частотах около 100 МГц. Вторая причина: наша обсерватория имеет свой радиотелескоп БСА ФИАН, один из чувствительнейших телескопов в мире, работающих на частоте 111 МГц.

В таблице плотности потоков приводятся в миллиянских. Полученные для низких частот плотности потока показывают, что эти пульсары вполне могут быть обнаружены в радиодиалазоне.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00954, а также при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (П-41).

ГЛОБАЛЬНЫЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

А. П. Топчиева

Институт астрономии Российской академии наук

Проанализированы данные о потоках излучения в различных инфракрасных фотометрических полосах для 99 зон HII, включенных в каталог Топчиевой и др. (2017). Получены оценки массовой доли ПАУ (*q*_{PAH}) и интенсивности излучения в ультрафиолетовом диапазоне по сетке моделей, предложенной в статье Дрейна и Ли (2007).

GLOBAL PHOTOMETRIC ANALYSIS OF GALACTIC REGIONS OF IONIZED HYDROGEN

A. P. Topchieva

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We analyze data on emission fluxes in different infrared photometric bands for 99 HII regions, included in the catalog by Topchieva et al. (2017). A mass fraction of PAH ($q_{\rm PAH}$) and the ultraviolet radiation intensity are estimated using the grid of models, presented in Draine and Li (2007).

Космический телескоп «Spitzer» предоставил ученым возможность подробно изучить инфракрасные кольцевые туманности, или, как их еще называют, ИК-пузыри, образование которых, предположительно связано с воздействием массивных горячих звезд на межзвездную среду. В отношении этих объектов есть много вопросов, которые до сих пор остаются без ответа. Общая цель ученых, занимающихся зонами HII, — прояснить, на каком этапе их эволюции возникает излучение тех или иных компонентов, как химических, так и пылевых; выявить характерные черты излучения, рождающегося в различных структурах, сопровождающих образование звезд, — оболочках, дисках и истечениях. Для ответа на эти вопросы необходимы самосогласованная модель эволюции областей и анализ набюдательных данных.

⑦ Топчиева А. П., 2018

В работе представлены результаты оценки потоков в различных фотометрических полосах. Анализ производился на следующих длинах волн: 8 и 24 мкм — данные с космического телескопа «Spitzer», полученные на фотометрических камерах IRAC и MIPS соответственно; 70 и 160 мкм — данные камеры PACS космического телескопа «Herschel»; 250, 350 и 500 мкм — данные камеры SPIRE космического телескопа «Herschel». Для объектов в данной работе также построены спектральные распределения энергии. Полученные показатели цвета [F_{24}/F_8], [F_{70}/F_{24}], [F_{160}/F_{24}], [F_{160}/F_{70}] сопоставлены с критериями [1] и результатами [2] для внегалактических комплексов НП. При помощи сетки моделей [3] для рассмотренных объектов оценены массовая доля ПАУ ($q_{\rm PAH}$) и интенсивность излучения в ультрафиолетовом диапазоне. Показано, что практически во всех объектах массовая доля ПАУ составляет менее 0.5 %, что согласуется с предположением об их эффективном разрушении.

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН.

Библиографические ссылки

- Anderson L. D., Zavagno A., Deharveng L. et al. The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel // Astron. Astrophys. — 2012. — Vol. 542. — P. A10. 1203.5721.
- Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Y. N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Vol. 431. — P. 2006— 2016. 1302.4837.
- 3. Draine B. T., Li A. Infrared Emission from Interstellar Dust. IV. The Silicate-Graphite-PAH Model in the Post-Spitzer Era // Astrophys. J. 2007. Vol. 657. P. 810–837. astro-ph/0608003.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

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

¹ Уральский федеральный университет, ² Челябинский государственный университет

С помощью численного МГД-моделирования исследуются образование и эволюция протозвездных дисков с остаточным магнитным полем. Расчеты проводятся с помощью двумерного кода Enlil, предназначенного для моделирования осесимметричных самогравитирующих МГД-течений. Рассматриваются образование и эволюция дисков вокруг звезд с массами 5—10 M_{\odot} при различных значениях начальной угловой скорости и интенсивности полоидального магнитного поля. Изучается влияние омической диффузии и магнитной амбиполярной диффузии на эволюцию магнитного потока протозвездных дисков. Результаты расчетов используются для интерпретации наблюдаемых свойств протозвездных дисков в областях образования массивных звезд.

EVOLUTION OF PROTOSTELLAR DISKS AROUND MASSIVE STARS

S. A. Khaibrakhmanov^{1,2}, A. E. Dudorov² ¹Ural Federal University,

 $^{2}\,Chelyabinsk\ state\ university$

We investigate formation and evolution of protostellar disks with fossil magnetic field using numerical MHD simulations. The simulations are carried out with the help of two-dimensional code Enlil developed for modelling of the axysymmetric self-graviting MHD flows. We consider the formation and evolution of the disks around stars with masses 5—10 M_{\odot} for various initial angular velocities and magnetic field strengths. The influence of Ohmic diffusion and magnetic ambipolar diffusion on the evolution of the magnetic flux of the protostellar disks is studied. The results of the simulations are applied to interpret the observational properties of the protostellar disks in the regions of high mass star formation.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 15-12-10017.

[©] Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е., 2018

Стендовые доклады



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАВОДКОВОЙ СИТУАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

А. С. Брускова¹, Т. И. Левитская¹, Д. М. Хайдукова² ¹ Уральский федеральный университет, ² АО «Уралгеоинформ»

Разработана методика определения площадей и объемов территорий затопления и оценен риск и ущерб в периоды половодий. Также составлена прогнозная модель разлива реки Тавда на 2017 г. Полученные данные показывают, что космический мониторинг паводковых вод с созданием базы данных в геоинформационной системе облегчает расчеты и сокращает затраты на организацию противопаводковых мероприятий.

FORECASTING THE FLOOD SITUATION USING SPACE IMAGES

A. S. Bruskova¹, T. I. Levitskaya², D. M. Haydukova³ ^{1,2} Ural Federal University, ³ Uralgeoinform JSC

The methodology for determining the areas and volumes of flooded areas was developed and the risk and damage were estimated during periods of flooding, and a forecast model of the Tavda river flood for 2017 was compiled. The obtained data show that the space monitoring of flood waters with the creation of a database in the geographic information system facilitates calculations and reduces the costs of organizing antiflood measures.

Среднегодовой ущерб от наводнений в России оценивается в 40 млрд руб. в год. Эффективным методом решения этой проблемы является метод дистанционного зондирования Земли с интеграцией в геоинформационные системы. На основании геопривязанных космических снимков, полученных со спутников WorldView-3 и Pleiades-1 А, создается векторная карта в ГИС Панорама Мини.

Для прогнозирования площадей и объема территорий затопления используется точечный метод — определение значений уровней воды на гидрологических постах. Данная методика универсальна и используется даже в случае недостаточности данных для анализа территорий, подверженных затоплению. В этом случае рассчитывается вероятность превышения уровня воды текущего года по сравнению с предыдущими на одну и ту же дату наблюдений (расчетная

[©] Брускова А. С., Левитская Т. И., Хайдукова Д. М., 2018

обеспеченность). Чем ниже расчетная обеспеченность, тем выше вероятность затопления территорий. На основании расчета обеспеченности уровней воды создается база данных, в которой определяется соответствующая площадь затопления на каждый год. При определении площадей затопления учитываются прибрежные озера, длина рек, приведенная ширина разлива на участке для левобережной и правобережной части реки.

Методика оценки риска основывается на показателях опасности, расчете вероятностей их возникновения, определении зон поражения, возможных ущербов. Для того чтобы оценить риск территорий затопления, необходимо знать уязвимость и опасность затопления. Опасность определяется моделированием территории затопления по космическим снимкам, а для определения уязвимости нужно классифицировать объекты. Степень уязвимости территории для затопления определяется на основе классификации объектов по публичной кадастровой карте. Используя космические снимки, можно определить территории затопления при различных уровнях воды, в том числе максимальном.

Недостатком базы данных, полученной при помощи космических снимков, является ограниченность моделей затопления, которая зависит от наличия космических снимков на территорию при различных уровнях воды. Эта проблема решается применением методов интерполяции между имеющимися урезами воды с использованием цифровой модели рельефа. Результатом работы является цифровая прогнозная модель с возможностью визуализации и оценки площадей подтопляемых территорий при прохождении половодий.

По прогнозам комиссии Тавдинского городского округа в 2016 г. подъем уровня воды должен был составлять 10 м, но благодаря космическому мониторингу удалось точнее определить эту цифру — 9.38 м. Это позволило на 5 млн руб. сократить затраты на превентивные противопаводковые мероприятия. Мониторинг половодий в геоинформационной системе на данный момент актуален, его целесообразно проводить на базе региональных центров мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций при главных управлениях МЧС Свердловской области.

Таким образом, при помощи данных дистанционного зондирования можно смоделировать территории затопления с высокой точностью, своевременно спрогнозировать вероятность затопления, определить наиболее опасные места и оценить уровень нанесенного ущерба.

ПОЛЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ДОЗВЕЗДНЫХ ЯДЕР

Д. З. Вибе, Б. М. Шустов

Институт астрономии Российской академии наук

С помощью самосогласованной динамической, тепловой и химической модели рассмотрена роль поля УФ-излучения $\lambda > 912$ Å в эволюции дозвездных ядер (сгустков) молекулярных облаков.

UV RADIATION FIELD AND EVOLUTION OF PRESTELLAR CORES

D. S. Wiebe, B. M. Shustov

Institute of Astronomy of the RAS

A self-consistent dynamical, thermal, and chemical model is used to investigate the role of UV radiation field with $\lambda > 912$ Å in the evolution of prestellar cores (clumps) of molecular clouds.

Можно считать общепринятым, что звезды образуются из плотных (дозвездных) ядер молекулярных облаков (МО), однако связь между функцией масс ядер и начальной функцией масс звезд до сих пор неясна. Возможно, что существенную роль в переходе от массы ядра к массе звезды играет облучение ядра внешним полем ультрафиолетового (УФ) излучения. В работе при помощи самосогласованной динамической, тепловой и химической модели исследуется роль поля УФ-излучения $\lambda > 912$ Å в эволюции дозвездных ядер (сгустков), погруженных в недра МО. Таких погруженных ядер большинство, особенно в зонах образования скоплений звезд малых и умеренных масс. Основные параметры модели — масса и плотность ядра и интенсивность поля излучения. Рассмотрены модели ядер с массами 3 M_{\odot} и 10 M_{\odot} и размером ~ 0.2 пк. Интенсивность поля излучения варьировалась от 0 (в недрах МО) до 1000 (в окрестности массивной молодой звезды) в единицах среднего диффузного поля излучения в солнечной окрестности. Полученные результаты подтверждают, что нагрев внешних слоев ядра УФ-фотонами (т. н. фотодиссоциационная область, ФДО) приводит, с одной стороны, к оттоку газа и потере массы ядром, а с другой стороны, к появлению

[©] Вибе Д. З., Шустов Б. М., 2018

²⁴³

дополнительного давления, стимулирующего сжатие ядра. Результирующая масса звезды определяется конкуренцией этих процессов. Полученные конкретные зависимости от параметров могут быть использованы для изучения процессов, определяющих вид начальной функции масс в зонах образования маломассивных звезд. Также рассмотрены общие закономерности сложной химической эволюции ФДО в подобных объектах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00834.

НОВАЯ СВЕТОВАЯ КРИВАЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА ЗАТМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ АМ LEO

С. Ю. Горда¹, Е. А. Матвеева²

¹Астрономическая обсерватория УрФУ, ²Уральский федеральный университет

На основе значений моментов минимумов AM Leo, полученных различными авторами в период с $JD_{\odot} = 2\,435\,570$ по $JD_{\odot} = 2\,457\,835$, построена световая кривая и найдены новые параметры орбиты третьего тела.

THE NEW LIGHT-TIME CURVE OF ECLIPSING BINARY AM LEO

S. Yu. Gorda¹, E. A. Matveeva²

¹Astronomical Observatory of Ural Federal University, ²Ural Federal University

On the basis of values of the moments of minima AM Leo obtained by various authors during the period with $JD_{\odot} = 2\,435\,570$ on $JD_{\odot} = 2\,457\,835$ the light-time curve is constructed. The new parameters of an orbit of the third body are found.

Изменение периода затменной переменной звезды AM Leo типа W UMa было обнаружено давно. Однако окончательно причина этого феномена, связанного с наличием третьего тела в системе, была установлена в начале 2000-х гг. В 2005 г. Альбайраком и др. [1] на основе имевшихся на тот момент значений моментов минимумов AM Leo были найдены параметры световой кривой, определены некоторые элементы орбиты третьего тела. К настоящему времени построенная Альбайраком и др. [1] световая кривая уже плохо соответствовала значениям разностей O - C, вычисленных на основе вновь полученных значений моментов минимумов блеска AM Leo.

Мы нашли параметры новой световой кривой, используя данные о минимумах блеска, приведенные в работе [1], 72 значения моментов минимумов, полученные в Коуровской астрономической обсерватории, а также новые значения, приведенные в литературе с 2005 г. На рисунке показана полученная нами световая кривая. Значимые изменения по сравнению с результатами [1] получились для трех параметров, а именно: значение периода взаимной орбиты третьего тела

[©] Горда С. Ю., Матвеева Е. А., 2018

²⁴⁵

и AM Leo изменилось с 44.8 на 50.5 года; значение эксцентриситета — с 0.73 на 0.28 и момент прохождения периастрия — с JD 2 436 343 на JD 2 435 320. Значения остальных параметров существенно не изменились. Учитывая, что мы использовали вдвое больше данных, чем в работе [1], распределенных на интервале времени, в полтора раза превышающем период взаимной орбиты, наш результат на данный момент следует считать более приоритетным.



Световая кривая AM Leo (сплошная линия); ○ — данные из работы Альбайрака; ▽ — новые данные из литературы; □ — наши данные

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

1. Albayrak B., Selam S. O., Ak T. et al. Light-time effect in the eclipsing binary system AM Leonis // Astronomische Nachrichten. — 2005. — Vol. 326. — P. 122—126.

СПЕКТРЫ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА С БОЛЬШОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. А. Калинин

Астрономическая обсерватория $У p \Phi Y$

С целью интерпретации спектров пятна с напряженностью магнитного поля 3600 Гс, полученных автором 13.07.17, построены модельные спектры пятна с большой напряженностью магнитного поля. С помощью программы COSSAM (версия от 18.01.2017) рассчитаны спектры пятен с $\Delta \Theta = 0.3$, 0.4, 0.5 ($\Delta \Theta$ — разность обратных температур пятна и окружающей фотосферы) с полем 3 600 Гс и без поля. Обсуждается различие спектров с полем и без поля.

SPECTRA OF THE SUN SPOT WITH LARGE MAGNETIC FIELD

A. A. Kalinin

Astronomical observatory UrFU

In order to interpret spectra of a sunspot with a magnetic field intensity of 3900 Gs, obtained by the author on 13.07.17, model spectra of a spot with a large magnetic field strength were constructed. With the help of the COSSAM program (version of 01/18/2017) spectra of spots with $\Delta\Theta = 0.3, 0.4, 0.5$, where $\Delta\Theta$ is the difference of inverse temperatures of the spot and the surrounding photosphere, are calculated with a field of 3 600 Gs and without a field. A difference of the spectra with and without the field is discussed.

В июле 2017 г. по диску Солнца проходило большое солнечное пятно с напряженностью магнитного поля в максимуме 3 900 Гс. Автором были получены спектры пятна в области линии Н δ водорода и линий Н и К ионизованного кальция. В данном сообщении изложен начальный этап работы по теоретической интерпретации полученных спектров: построение модельного спектра пятна с большой напряженностью магнитного поля. В качестве основного модельного параметра взята разность обратных температур пятна и окружающей фотосферы $\Delta \Theta$ [1]. С помощью программы COSSAM (версия от 18.01.2017) [2] рассчитаны спектры пятен спокойного Солнца (модель Куруча—Кастелли 2004) и пятна с $\Delta \Theta$ =0.3, 0.4, 0.5, расположенного вблизи центра солнечного диска с полем 3 600 Гс (измерено

[©] Калинин А. А., 2018

²⁴⁷

по программе Службы Солнца) и без поля. Программа COSSAM моделирует спектр в предположении ЛТР, поэтому для расчетов взята область вблизи наблюдавшейся линии Н δ . Показано, что спектры с полем и без поля существенно различаются. В дальнейшем предполагается построить термодинамическую модель пятна как в фотосфере по спектру окрестности линии Н δ и крыльев линий Н и К, так и в хромосфере (по ядрам Н и К).

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

- 1. *Обридко В. Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. М. : Наука, 1985.
- Wade G. A., Bagnulo S., Kochukhov O. et al. LTE spectrum synthesis in magnetic stellar atmospheres. The interagreement of three independent polarised radiative transfer codes // Astron. Astrophys. — 2001. — Vol. 374. — P. 265—279.

АСТРОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ НІІ S235A и S235C

М. С. Кирсанова

Институт астрономии Российской академии наук

Представлены результаты астрохимического моделирования распиряющихся областей НІІ, окруженных родительским молекулярным облаком. Рассмотрено излучение в линиях [OI] на 63 мкм, [CII] на 158 мкм, в линиях молекул НСО⁺ и СО. Показано, что в условиях высокого углового и спектрального разрешения удается увидеть расширяющуюся оболочку области НІІ.

ASTROCHEMICAL MODELLING OF HII REGIONS S235A AND S235C

M. S. Kirsanova

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Results of astrochemical modelling of expanding HII regions surrounded by a parent molecular cloud are presented. We consider emission in lines [OI] at 63 μ m, [CII] at 158 μ m and in molecular lines of HCO⁺ and CO. It is shown that observations with high angular and spectral resolution may allow distinguishing an expanding shell of an HII region.

Области ионизованного водорода (HII) S235A и S235C принадлежат OB-ассоциации в Возничем и находятся в одном молекулярном облаке на расстоянии 1.6 кпк от Солнца. Их размер составляет примерно 0.2–0.3 пк. Спектральный класс ионизующих звезд в обеих туманностях B1.5, что соответствует эффективной температуре этих звезд 25 000–30 000 К.

Сравнение изображений, полученных оптическими и инфракрасными телескопами, говорит о том, что S235C глубже погружена в газ родительского молекулярного облака и, возможно, является примером более ранней стадией развития области HII, чем S235A.

Представлены результаты астрохимического моделирования расширяющихся областей HII, окруженных родительским молекулярным облаком. Цель работы — найти основные линии-индикаторы

[©] Кирсанова М. С., 2018

²⁴⁹

ударной волны, которая распространяется вглубь молекулярного облака и предшествует фронту ионизации водорода. Основное внимание уделяется т. н. области фотодиссоциации, которая находится между фронтом ионизации атомарного водорода и фронтом диссоциации молекул СО. Рассмотрено излучение в линиях [OI] на 63 мкм, [CII] на 158 мкм, а также в линиях молекул HCO⁺ и CO. Показано, что в условиях высокого углового и спектрального разрешения удается увидеть расширяющуюся оболочку областей HII.

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

РАСШИРЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ РЕАКЦИЙ КОДА MONACO В ОБЛАСТИ ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ

А. В. Квашнина, А. И. Васюнин

Уральский федеральный университет

В ходе сравнения баз данных химических реакций MONACO и Р. Гэррода были выявлены значительные отличия этих двух баз. Единовременное расширение базы данных кода MONACO на основе данных Р. Гэррода не представляется возможным. Поэтому процесс осуществлялся поэтапно:

- разделение молекул CH₂OH и CH₃O и реакций для них;
- добавление гликольальдегида, формамида и этиленгликоля и реакций для них.

После расширения базы данных химических реакций были проведены тестовые расчеты сложной органической химии для условий коллапсирующей протозвезды и горячего ядра.

MODIFICATION THE DATABASE OF CHEMICAL REACTIONS OF THE MONACO IN THE AREA OF ORGANIC MOLECULES

A. V. Kvashnina, A. I. Vasyunin

Ural Federal University

We compared the database of chemical reactions of MONACO and the database of R. Garrod and detected several significant differences. It proved to be impossible to perform a one-time extension of MONACO database using R. Garrod's data. So we were forced to extend the database of MONACO in the following steps:

— separate isotopes CH₂OH and CH₃O and their reactions;

add glycolaldehyde, formamide and ethylene glycol and their reactions.

After that we performed test simulations for collapsed protostar and hot core stages.

MONACO — код, предназначенный для моделирования химической эволюции объектов межзвездной среды с учетом химических процессов в газе и на частицах пыли [1].

В коде MONACO используется база данных, которая включает более 600 молекул и реакции с ними, но она неполна в области органической химии. После расширения [2] базы данных на основе сетки

[©] Квашнина А. В., Васюнин А. И., 2018

²⁵¹

химических реакций Р. Гэррода (http://www.astro.cornell.edu/ \~rgarrod/wp-content/uploads/reactions_Science_paper.txt) результаты моделирования сильно отличались от наблюдательных данных. Исходя из этого, было принято решение о поэтапном расширении базы данных химических реакций кода MONACO.

На сегодняшний день разделены изомеры CH₂OH и CH₃O (до этого в базе данных присутствовала лишь молекула CH₃O). Кроме того, были добавлены молекулы гликольальдегида, формамида и этиленгликоля.

Суммарно база данных была расширена на четыре органические молекулы и более чем на 100 реакций с ними. На всех этапах для проверки согласования с наблюдательными данными проводилось численное моделирование для условий коллапсирующей протозвезды и стадии нагрева горячего ядра.

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

Библиографические ссылки

- Vasyunin A. I., Herbst E. Reactive Desorption and Radiative Association as Possible Drivers of Complex Molecule Formation in the Cold Interstellar Medium // Astron. J. - 2013. - Vol. 796. - P. 34.
- Квашнина А. В., Васюнин А. И. Расширение базы данных химических реакций кода МОNACO для моделирования пребиотических молекул // Физика космоса : тр. 46-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2017 г. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. С. 236.
ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОЛЯРА V1033 Cas

В. П. Кожевников

Уральский федеральный университет

Мы провели фотометрические наблюдения промежуточного поляра V1033 Саз в течение 19 ночей в январе — мае 2017 г. Из этих продолжительных наблюдений мы получили период вращения белого карлика с высокой точностью, $P_{\rm spin} = 563.11676 \pm 0.00065$ с.

PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF THE INTERMEDIATE POLAR V1033 CAS

V. P. Kozhevnikov

Ural Federal University

We performed photometric observations of the intermediate polar V1033 Cas during 19 nights in 2017 January — May. From these extensive observations we obtained the spin period of the white dwarf with high precision, $P_{\rm spin} = 563.11676 \pm 0.00065$ s.

Промежуточные поляры являются двойными звездами, в которых магнитный белый карлик аккрецирует вещество от звездыкомпаньона. Белый карлик вращается несинхронно и поэтому производит быстрые когерентные колебания с периодом вращения. Точные измерения периода или фазы колебаний позволяют проверить, находится ли промежуточный поляр в состоянии равновесного вращения.

Хотя промежуточный поляр V1033 Cas открыт более десяти лет назад, период вращения белого карлика в нем был измерен с низкой точностью (563.5 c, https://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/ iphome/iphome.html). Чтобы измерить период вращения с высокой точностью, в январе — мае 2017 г. на 70-см телескопе Коуровской обсерватории и многоканальном фотометре мы провели продолжительные фотометрические наблюдения V1033 Cas в течение 19 ночей. На рис. 1 представлена одна из наших кривых блеска, в которой видны колебания с периодом вращения белого карлика.

Точное значение периода колебаний можно получить с помощью спектра мощности, в котором все наблюдения объединены в общий

[©] Кожевников В. П., 2018

²⁵³



Рис. 1. Кривая блеска V1033 Cas, полученная 19 марта 2017 г.

временной ряд. Участок такого спектра мощности для наших данных V1033 Сая показан на рис. 2. Из него мы получили период колебаний $P_{\rm spin} = 563.11676 \pm 0.00065$ с. Такая точность позволяет получить эфемериду колебаний с формальным временем годности 15 лет. Хотя ошибка кажется малой, этого все еще недостаточно для того, чтобы исследовать изменения периода вращения. В настоящее время мы проводим дополнительные фотометрические наблюдения. Включение этих наблюдений в общий временной ряд позволит в несколько раз уменьшить ошибку измерения периода.



Рис. 2. Участок спектра мощности данных V1033 Cas

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

ВТОРИЧНЫЕ РЕЗОНАНСЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СВЕТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ, В ОКРЕСТНОСТИ ОРБИТ СПУТНИКОВ СИСТЕМ ГЛОНАСС И GPS

Э. Д. Кузнецов, В. Д. Гусев, И. А. Малютин

Уральский федеральный университет

Исследованы области вторичных резонансов в окрестности орбит спутников глобальных навигационных систем Глонасс (основной резонанс 8:17) и GPS (основной резонанс 1:2). Оценки больших полуосей орбит, соответствующих вторичным резонансам, получены аналитически. Положение вторичных резонансов в зависимости от отношения миделева сечения к массе уточнялось численным методом. Орбитальная эволюция объектов моделировалась с помощью «Численной модели движения искусственных спутников Земли». Вторичные резонансы оказывают существенное влияние на динамическую эволюцию объектов, имеющих отношение миделева сечения к массе 10 м²/кг и более. Полученные результаты представляют интерес при описании орбитальной эволюции космического мусора.

SECONDARY RESONANCES DUE TO SOLAR RADIATION PRESSURE IN VICINITY ORBITS OF SATELLITES OF THE GLONASS AND GPS SYSTEMS

E. D. Kuznetsov, V. D. Gusev, I. A. Malyutin Ural Federal University

The secondary resonances are investigated in vicinity of orbits of satellites of the global navigation systems GLONASS (main resonance is 8:17) and GPS (main resonance is 1:2). Estimations of semi-major axes corresponding to secondary resonances were obtained analytically. The secondary resonances locations were improved numerically in dependence on the area-to-mass ratio. The orbital evolution of objects was modeled in the "Numerical Model of Motion of Artificial Satellites". The secondary resonances have a significant effect on dynamical evolution of objects with area-to-mass ratio of 10 m²/kg and more. The results will be useful to describe orbital evolution of space debris.

ⓒ Кузнецов Э. Д., Гусев В. Д., Малютин И. А., 2018

В работе [1] описаны вторичные резонансы в окрестности геостационарной орбиты (основной резонанс 1:1) для объектов с отношением миделева сечения к массе 10 м²/кг. Математическое описание обнаруженного эффекта дано в статье [2]. Вторичный резонанс возникает вследствие рациональной соизмеримости между критическим аргументом основного резонанса и долготой Солнца.

В настоящей работе исследуются области вторичных резонансов в окрестности орбит спутников глобальных навигационных систем Глонасс (резонанс 8:17) и GPS (резонанс 1:2). Оценки больших полуосей орбит, соответствующих вторичным резонансам, получены аналитически. Положение вторичных резонансов в зависимости от долготы восходящего узла и отношения миделева сечения к массе уточнялось численным методом.

Орбитальная эволюция объектов моделировалась с помощью «Численной модели движения искусственных спутников Земли», разработанной в Томском государственном университете, на интервале времени 24 года. 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. Использовался интегратор Эверхарта 19-го порядка.

Вторичные резонансы оказывают существенное влияние на динамическую эволюцию объектов, имеющих отношение миделева сечения к массе 10 м²/кг и более. Полученные результаты необходимо учитывать при выборе орбит для хранения космического мусора.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть государственного задания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

- Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T. Global dynamics of high areato-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Adv. Space Res. - 2009. - Vol. 43. - P. 1509-1526. 0810.1859.
- Lemaître A., Delsate N., Valk S. A web of secondary resonances for large A/m geostationary debris // Celest. Mech. Dyn. Astr. — 2009. — Vol. 104. — P. 383—402.

СОЗДАНИЕ ИНТЕРНЕТ-ВЕРСИИ БАЗЫ ДАННЫХ МАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Д. А. Ладейщиков, Д. Накасима, А. М. Соболев, С. А. Ногин

Уральский федеральный университет

Для решения проблемы поиска и систематизации данных по астрономическим мазерным источникам был создан программный код, работающий в режиме онлайн, предназначенный для хранения, анализа и визуализации данных о мазерных источниках. Система предназначена для хранения больших объемов данных по мазерному излучению в различных линиях межзвездной среды, в том числе с учетом отрицательных регистраций. Имеется возможность отождествления мазерных источников с данными из популярных астрономических каталогов. В настоящий момент система успешно применена для проекта eDAMS — extensive Database of Astrophysical Maser Sources, целью которого является сбор наиболее полных сведений об околозвездных мазерных источниках в линиях H₂O, OH и SiO. Для этой цели уже собрано более 25 тыс. наблюдений из различных источников в 10 тыс. объектах. Адрес сайта для ознакомления с возможностями системы http://maserdb.ins.urfu.ru.

CREATION OF THE WEB-BASED DATABASE OF MASER SOURCES

D. A. Ladeyschikov, J. Nakashima, A. M. Sobolev, S. A. Nogin Ural Federal University

© Ладейщиков Д. А., Накасима Д., Соболев А. М., Ногин С. А., 2018

To solve the problem of searching and collecting the data of astronomical maser sources, the Web-based code was developed in order to store, analyze and visualize the data of astronomical masers. The system is designed to store large amounts of data on maser emission in various lines of the interstellar medium, including negative results. Cross-checking of maser sources with popular astronomical catalogs is implemented. At the moment, the system has been successfully applied for the eDAMS project — the Extensive Database of Astrophysical Maser Sources, whose goal is to collect the complete information about circumstellar maser sources in the H₂O, OH and SiO lines. For this purpose, more than 25 000 observations from various sources in 10 thousand objects have already been collected. Current internet-address of the system is http://maserdb.ins.urfu.ru.

Наиболее востребованная функция, необходимая для исследователей мазерых источников, — это поиск по мазерным данным. В представленной системе реализован поиск по названию источника из каталога Simbad, по координатам источника и по списку координат. Реализованы интерактивный просмотр источников в различных лиапазонах длин волн, а также отождествление результатов поиска с популярными астрономическими каталогами с помощью функции х-match. Для каждого наблюдения в базе данных получена ассоциация с каталогами 2MASS, UKIDSS, WISE, GCVS и Akari в тех источниках, для которых эту ассоциацию возможно установить. Для поиска ассоциаций используются различные критерии, в том числе цветовые характеристики источников и их близость к мазерным источникам. Реализована группировка наблюдений. Наблюдения сгруппированы по «объектам», которые представляют собой отдельные группы мазерных источников, объединенные по пространственной близости. Из всех объектов возможно выделение таких, где были зарегистрированы определенные линии молекул. К примеру, число объектов, в которых зарегистрированы излучения одновременно в линиях H₂O, ОН и SiO, составляет 286.

Для всех классов объектов реализован статистический анализ распределение цветовых характеристик мазеров по ассоциациям из данных IRAS, распределение мазеров на диаграмме галактическая долгота—скорость и др. В результате данная система может быть использована для получения новых научных выводов из уже опубликованных, а также неопубликованных данных, которые ранее не были систематизированы.

ИНДИКАТОРЫ МАССЫ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

Т. С. Молярова, В. В. Акимкин, Д. З. Вибе

Институт астрономии Российской академии наук

Излучение молекулы CO используется в качестве индикатора массы газа в протопланетных дисках. В работе рассматривается применимость CO и других химических соединений в качестве индикаторов массы дисков. Показано, что CO является лучшим индикатором полной массы газа, если используются подходящие предположения о его относительном содержании в диске. Содержание CO_2 , H_2O и H_2CO также коррелирует с массой диска.

GAS MASS TRACERS IN PROTOPLANETARY DISKS

T. S. Molyarova, V. V. Akimkin, D. S. Wiebe

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

CO molecular emission is often used as a tracer of gas mass in protoplanetary disks. In this study, we consider the ability of CO and other species to trace the gas mass in the disk. We find that CO is the best molecular tracer for total gas mass, provided reasonable assumptions about CO abundance in the disk are used. CO₂, H₂O, and H₂CO can potentially serve as alternative mass tracers.

Излучение молекулы СО позволяет определять массы протопланетных дисков в предположении, что известно содержание СО относительно водорода. Однако в большинстве работ при определении содержания СО в газе учитываются вымерзание и фотодиссоциация, и не учитываются важные химические реакции на поверхности пылинок [1].

В данной работе проводится химическое моделирование ансамбля моделей протоплатнетных дисков с помощью кода ANDES [2] и сетки химических реакций ALCHEMIC [3], включающей поверхностную химию. Анализируется зависимость содержания различных соединений от модели диска.

Показано, что молекула CO лучше других подходит для определения массы дисков, однако ее содержание в диске отличается от стандартных предположений. На рисунке видно, что содержание CO в газовой фазе существенно зависит от параметров модели и заметно ниже межзвездного.

© Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З., 2018



Относительное содержание СО в газовой фазе на ядро атома водорода в дисках с различными радиусами $R_{\rm c}$ и различными массами центральной звезды M_{star}

Молекулы CO_2 , H_2O и H_2CO также могут служить индикаторами массы, но последние два применимы только при известных параметрах диска.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01441.

Библиографические ссылки

- 1. Ansdell M., Williams J. P., Manara C. F. et al. An ALMA Survey of Protoplanetary Disks in the σ Orionis Cluster // Astron. J. 2017. Vol. 153. P. 240. 1703.08546.
- 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.
- 3. Semenov D., Wiebe D. Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2011. Vol. 196. P. 25. 1104.4358.

ИНФРАКРАСНЫЙ ДАТЧИК ОБЛАЧНОСТИ В КрАО

C. B. Haзapo B^1 , O. E. Kytko B^1

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Разнообразная инструментальная база и компромиссное расположение с точки зрения астроклимата позволяют Крымской обсерватории решать широкий спектр наблюдательных задач. Однако зимой, когда ночи самые длинные, погода часто неустойчивая и быстро меняется. В то же время для выполнения многих астрофизических исследований необходимо иметь статистику по большому количеству объектов за длительный период, что предъявляет повышенные требования к эффективности использования наблюдательного времени. Одним из современных средств, позволяющих быстрее реагировать на изменение погоды, является инфракрасный датчик облачности. В этой работе мы представляем опыт работы с датчиком MLX90614, который установлен в КрАО: характеристики устройства, особенности подключения к микрокомпьютеру Raspberry Pi, примеры программ и первые астроклиматические данные.

INFRARED CLOUD SENSOR AT CRAO

S. V. Nazarov¹, O. E. Kutkov¹

¹Crimean Astrophysical Observatory

A diverse instrument base and compromise location from the point of view of the astroclimate allows the Crimean Observatory to solve a wide range of observational problems. However, in winter, when the nights are the longest, the weather is often unstable and changes rapidly. At the same time, in order to carry out many astrophysical researches, it is necessary to have statistics on a large number of objects over a long period, which imposes higher demands on the effectiveness of using observational time. One of the modern ways to respond faster to weather changes is the infrared cloud sensor. In this work we present our experience with the MLX90614 sensor, which is installed at the CrAO, including characteristics of the device, connection to the Raspberry Pi microcomputer, sample programs and the first astroclimatic data.

© Назаров С. В., Кутков О. Е., 2018 261

20-см ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР ЛЮБИТЕЛЬСКОГО КЛАССА КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ФОТОМЕТРИИ КОМЕТ

А. О. Новичонок 1 , С. В. Назаров 2

¹ Петрозаводский государственный университет, ² Крымская астрофизическая обсерватория РАН

В докладе представлены результаты наблюдений комет с телескопом любительского класса (20-см рефлектор системы Ньютона), оснащенного ПЗС-камерой SBIG ST-8300 с фотометрическими фильтрами. Показано, что с этим инструментом можно успешно решать ряд мониторинговых задач. Обсуждаются точность фотометрии, пределы измерения диаметров кометных ком с малыми апертурами и выявление кометной активности. Сделан вывод о пригодности небольших телескопов для фотометрических исследований.

20-CM AMATEUR REFLECTOR TELESCOPE AS INSTRUMENT FOR WIDEBAND COMET PHOTOMETRY

A. O. Novichonok¹, S. V. Nazarov²

¹Crimean Astrophysical Observatory, ²Petrozavodsk state university

We presents results of comet observations with the amateur-class telescope (20-cm Newton reflector), equipped with the SBIG ST-8300 CCD and photometric filters. It is shown that using this instrument a number of observational tasks can be successfully solved. The accuracy of photometry, as well as subtasks, are discussed. Based on the results of the work carried out, a conclusion was made regarding the suitability of small telescopes for the photometric studies.

Несмотря на постепенно увеличивающиеся размеры астрономических инструментов Земли, малые телескопы до сих пор остаются не просто актуальными и полезными, но и необходимыми для выполнения некоторых научных задач, в частности, для изучения наблюдательных проявлений физических характеристик малых тел Солнечной системы.

[©] Новичонок А. О., Назаров С. В., 2018

²⁶²

В докладе представлены результаты наблюдений комет с телескопом любительского класса (20-см рефлектор системы Ньютона), оснащенного ПЗС-камерой SBIG ST-8300 с фотометрическими фильтрами. Показано, что с этим инструментом можно успешно решать такие мониторинговые задачи, как 1) фотометрия околоядерной области комы и комы в целом с использованием фотометрических фильтров. Обсуждаются точность фотометрии, а также подзадачи: определение пылепроизводительности Afp; расчет массы пыли в коме и интенсивности сублимации; определение показателей цвета комет и их изменений по профилю комы и с течением времени; 2) псевдоядерная и интегральная фотометрия без использования фотометрических фильтров. Обсуждается подзадача: определение характера кривой блеска кометы для выявления природы активности кометного ядра на данном гелиоцентрическом расстоянии; 3) анализ морфологических характеристик кометных ком и хвостов в динамике. Обсуждается подзадача: пределы измерения диаметров кометных ком с малыми апертурами, выявление кометной активности.

По результатам работы сделан вывод о пригодности небольших телескопов для фотометрических исследований.

ПРИЗНАКИ НЕТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНИЗОВАННОГО КАЛЬЦИЯ В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 11515

Т. П. Никифорова, А. И. Шагабутдинов, С. Ю. Парфёнов, А. В. Кожевникова Уральский федеральный университет

Проведены спектральные наблюдения корональных петель активной области NOAA 11515 на лимбе Солнца. В линии К CaII обнаружены «дорожки» слабой однородной эмиссии протяженностью до 1.2 Å вдоль дисперсии между двумя движущимися петлями. Выявлен нетепловой характер излучения ионов кальция в «дорожках». Мы полагаем, что наблюдавшиеся «дорожки эмиссии» являются оптическим проявлением потока ионов кальция, излучающих линию К CaII, ускоренных до скоростей не менее 70 км/с, что свидетельствует о присутствии электрических полей между петлями. Выявлена многокомпонентная структура участков петель, между которыми наблюдались дорожки.

SIGNS OF NON-THERMAL RADIATION OF THE IONISED CALCIUM LINES IN CORONAL LOOPS OF ACTIVE REGION NOAA 11515

T. P. Nikiforova, A. I. Shagabutdinov, S. Yu. Parfenov, A. V. Kozhevnikova Ural Federal University

We obtained observations of coronal loops in active region NOAA 11515 on the solar limb. In K CaII line, "paths" of weak homogeneous emission, with an extent along a dispersion up to 1.2 Å, between two moving loops are found out. Non-thermal character of radiation of calcium ions in "paths" is revealed. We assume that observed "paths" are display of a stream of radiating calcium ions accelerated up to speeds not less than 70 km/s that testifies to presence of electric fields between loops. The multicomponent structure of loop segments between which paths were observed is found out.

Наблюдения петель активной области 11515 на лимбе Солнца в линиях Н и К СаII были проведены в Коуровской АО УрФУ

[©] Никифорова Т. П., Шагабутдинов А. И., Парфёнов С. Ю., Кожевникова А. В., 2018

²⁶⁴

09.07.2012 с помощью телескопа АЦУ-5, спектрографа АСП-20 и ПЗС-камеры SXV-H9 Starlight Xpress. На нескольких последовательных кадрах в линии К CaII были обнаружены «дорожки эмиссии» эмиссионные структуры (7.5", поперек дисперсии) малой интенсивности, соединяющие две движущиеся петли. Распределение излучающих частиц по скоростям не является максвелловским. Протяженность «дорожек» вдоль дисперсии до 1.2 Å соответствует диапазону скоростей излучающих частиц вдоль «дорожки» от 0 до 70 км/с. Мы предполагаем, что наблюдавшиеся «дорожки эмиссии» являются оптическим проявлением ускоренного электрическим полем потока ионов однократно ионизованного кальция. Участки петель, между которыми наблюдался поток ионов, имеют сложную и неоднородную структуру (см. рисунок).



Структура эмиссионной линии К CaII в ПЗС-кадре 28

Работа проведена при фининсовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ МЕТЕОРИТОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Б. В. Оводов¹, А. Б. Островский², А. И. Васюнин³, Э. Д. Кузнецов²

¹Проектно-изыскательский институт ГЕО, Екатеринбург, ²Уральский федеральный университет, ³Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany

В работе выполнено моделирование процесса нагрева космического тела при прохождении атмосферы Земли. Разработана программа, позволяющая провести расчет скорости падения метеорита в атмосфере, теплового потока, приходящегося на нагрев объекта и получение температурных разрезов по глубине и по времени. Получены и проанализированы графики температурных разрезов по времени для падения метеоритов различных типов и составов при нахождении на различных траекториях падения.

TEMPERATURE REGIMES OF METEORITES IN THE ATMOSPHERE OF THE EARTH

B. V. Ovodov¹, A. B. Ostrovskii², A. I. Vasyunin³, E. D. Kuznetsov² ¹Institute GEO, Yekaterinburg, Russia, ²Ural Federal University, ³Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany

We present a simulation of the process of a cosmic body heating during the passage through the Earth's atmosphere. A program code is developed for calculation the rate of incidence of a meteorite in the atmosphere and temperature field in a meteorite body. Temperature sections on time for falling meteorites of various types and compositions on different fall trajectories are found and analyzed.

Химическая эволюция в условиях межзвездной среды может приводить к образованию сложных органических молекул [1, 2]. В работе решается частный вопрос о возможности «выживания» органических молекул на поверхности и в толще тел малых космических

[©] Оводов Б. В., Островский А. Б., Васюнин А. И., Кузнецов Э. Д., 2018

объектов при прохождении атмосферы Земли. Основным разрушительным фактором может быть нагрев тела при торможении в атмосфере. Цель работы — получение оценок температурных полей в теле метеороидов различного состава и массы.

Задача решалась в простейшем приближении сферического однородного тела с заданными физическими свойствами. Расчет теплового потока при торможении в атмосфере велся методами, используемыми при анализе поведения спускаемых аппаратов в атмосфере планеты (см. например, [3]). Учитываются абляционное охлаждение и радиативное остывание метеороида. Скоростной режим тела в атмосфере Земли рассчитывается с помощью программы «soyuz prognoz», разработанной Э. Д. Кузнецовым. На основе данных о скорости движения решается задача о нагреве сферически симметричного тела. Расчеты показывают, что для скоростей входа в атмосферу в диапазоне 10-50 км/с для всех известных типов химического состава метеоритов и для тел размерами от нескольких сантиметров и более нагрев наружных слоев не превышает 1000-1500 К для каменных и железных метеоритов и 90-100 К для ледяных метеоритов. Внутренние слои практически не испытывают нагрева и сохраняют температуру, близкую к начальной, а область повышенных температур занимает несколько процентов от радиуса тела в его внешних частях. Результаты подтверждают возможность сохранения сложных органических молекул в метеорите при его падении на поверхность Земли, причем для тел малых размеров (до метров) скорость удара о поверхность планеты не превысит десятков-сотен метров в секунду.

Библиографические ссылки

- 1. Fray N., Bardyn A., Cottin H. et al. High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov—Gerasimenko // Nature. 2016. Vol. 538, № 7623. P. 72—74.
- Chyba C. F., Sagan C. Comets as a Source of Prebiotic Organic Molecules for the Early Earth // Comets and the Origin and Evolution of Life / ed. by P. J. Thomas, C. F. Chyba, C. P. McKay. — Springer, New York, 1997. — P. 147—173.
- Allen H. J. The Aerodynamic Heating of Atmosphere Entry Vehicles A Review. — NASA, Ames Research Center, Moffett Field, California, 1964.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ НА НЕОДНОРОДНОЙ ПО СВОЙСТВАМ ПОВЕРХНОСТИ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ

А. Б. Островский¹, А. И. Васюнин², Е. С. Корень¹

¹ Уральский федеральный университет, ² Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics. Garching. Germany

В работе представлена модель химической эволюции на неоднородной по свойствам поверхности пылевой частицы межзвездной среды. На поверхности пылинки заданы области с различными энергиями десорбции. Влияние поверхности с низкой энергией десорбции на содержание частиц в газе и на поверхности пылинки существенно даже при доле такой поверхности менее 10 %.

MODEL OF CHEMICAL EVOLUTION ON DUST PARTICLE WITH INHOMOGENEOUS SURFACE

A. B. Ostrovskii¹, A. I. Vasyunin², E. S. Koren¹ ¹Ural Federal University,

²Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany

The model of chemical evolution on inhomogeneous surface of dust grain is developed. We suggest that there are areas with different desorption energies on the surface of grain. Model results show effects on species abundances in gas and on grain even in case of small fraction (less then 10 %) of surface with "rapid" desorption.

Изучение формирования сложного молекулярного состава межзвездной среды требует моделирования химических процессов как в газе, так и на поверхности и в толще пылевых частиц. Наблюдения и моделирование показывают, что в холодных плотных областях среды на поверхности пыли вымерзает большое количество молекул, формируя ледяные мантии. При этом значительную долю объема мантии могут занимать такие обильные молекулы, как CO, CO₂. В процессах химической эволюции большую роль играет десорбция частиц с поверхности пыли. Обычно энергия десорбции приводится для частицы, находящейся на силикатной или графитовой поверхности пылинки. При развитых мантиях пылинок атомы и молекулы могут располагаться на ледяной мантии, состоящей в основном из

[©] Островский А. Б., Васюнин А. И., Корень Е. С., 2018

частиц со своей энергией десорбции ($E_{des}(CO) = 1\,150$ K). В случае если энергия десорбции частицы превышает значение таковой для обильной компоненты мантии, эта частица может начать эффективно десорбировать при более низких температурах, чем в случае, когда она находится непосредственно на силикатной или графитовой поверхности.

Нами разработана модель в рамках метода балансных уравнений, которая позволяет моделировать химическую эволюцию на пылевой частице с учетом возможного влияния наиболее распространенных и легко десорбирующих частиц мантии на процессы десорбции других атомов и молекул. Модель позволяет произвольно изменять долю поверхности пылевой частицы, занятой легко десорбирующими молекулами. Расчеты показывают, что даже при доле «активной» поверхности, не превышающей 1—10 %, возникают значимые изменения содержаний некоторых молекул в газовой фазе и на поверхности пылевой частицы (см. рисунок).



Модель химической эволюции для числовой плотности 10^5 см⁻³. Температура линейно растет со временем от 10 до 100 К. Время эволюции модели 10^6 лет. Доля поверхности, занятой льдом СО, равна 5 %. Пики обилий вблизи 10^5 лет обусловлены десорбцией с поверхности льда СО

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЫЛИ НА ХИМИЧЕСКУЮ ЭВОЛЮЦИЮ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ДИФФУЗНОЙ СРЕДЫ

В. А. Соколова^{1,2}, А. И. Васюнин^{1,3}, А. Б. Островский¹

¹ Уральский федеральный университет, ² Ventspils University College, VIRAC, Ventspils, Latvia, ³ Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany

В работе проводится анализ возможного влияния газо-пылевых клампов, сформированных с помощью неустойчивости, предложенной в модели Цитовича с соавторами (2014), на химическую эволюцию диффузной межзвездной среды. Проведено моделирование диффузной среды в направлениях на объекты W49N, W31C и W51. Показано, что в модели с клампами молекулярный водород образуется на порядок быстрее и достигает максимального содержания раньше, чем в стандартной модели.

IMPACT OF THE SMALL-SCALE SPATIAL DISTRIBUTION OF DUST PARTICLES ON THE CHEMICAL EVOLUTION OF THE DIFFUSE INTERSTELLAR MEDIUM

V. A. Sokolova^{1,2}, A. I. Vasyunin^{1,3}, A. B. Ostrovskii¹ ¹Ural Federal University, ²Ventspils University College, VIRAC, Ventspils, Latvia, ³Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany

In this work we perform the analysis of the effect of gas-dust clumps, possibly formed in the interstellar medium due to instability, proposed in Tsytovich et al. (2014) on the chemical evolution of the diffuse interstellar medium. We model diffuse medium along the well studied lines-of-sights in directions on W49N, W31C and W51. We found that in the model with clumps, the conversion timescale of atomic hydrogen into molecular is an order of magnitude smaller than in standard model.

Одной из важных проблем в изучении диффузной среды является задача формирования молекулярного водорода и объяснения

[©] Соколова В. А., Васюнин А. И., Островский А. Б., 2018

²⁷⁰

его наблюдаемых концентраций. В диффузных облаках присутствует ряд молекул, содержания которых превышают модельные значения, и они более характерны для холодной плотной среды. Известные физико-химические модели диффузных облаков сталкиваются с затруднениями при объяснении наблюдаемых концентраций молекул и скорости конверсии $H \rightarrow H_2$ [1]. В работе [2] предложена модель, предполагающая существование в диффузной среде неустойчивости (ионная экранировка или «ion shadowing force»), приводящей к неоднородному на малых пространственных масштабах (< 30 a. e.) распределению пыли по объему облаков. В работе анализируются особенности химической эволюции в модели, включающей в себя «клампы» — малые холодные газо-пылевые облака, плотность среды в которых выше окружающей и температура газа равна температуре пыли. Проведено моделирование диффузной среды в направлениях на объекты W49N, W31C и W51. Молекулярный водород в модели образуется на порядок быстрее и достигает максимального содержания раньше, чем в стандартной модели. Модель с клампами лучше согласуется с предположением о быстром по времени (1-2 млн лет) переходе от диффузного облака к молекулярному в стационарном состоянии [3]. Модель с клампами показывает большие содержания некоторых молекул (CS, H₂S), чем модель без клампов, лучше объясняет содержания CH, NH и NH₂ и не влияет на содержания H_2O^+ , OH^+ и H_3O^+ . Молекул, содержания которых стали хуже согласовываться с данными наблюдений, нет.

Библиографические ссылки

- Cazaux S., Tielens A. G. G. M. H₂ Formation on Grain Surfaces // Astrophys. J. 2004. Vol. 604. P. 222-237.
- Tsytovich V. N., Ivlev A. V., Burkert A., Morfill G. E. Compact Dusty Clouds in a Cosmic Environment // Astrophys. J. - 2014. - Vol. 780. -P. 131. 1310.5958.
- Hartmann L., Ballesteros-Paredes J., Bergin E. A. Rapid Formation of Molecular Clouds and Stars in the Solar Neighborhood // Astrophys. J. – 2001. – Vol. 562. – P. 852–868. astro-ph/0108023.

ОРБИТЫ ТЕЛ В РОТАЦИОННО-СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ ГАЛАКТИКИ

А. Н. Тараскина

Санкт-Петербургский государственный университет

В докладе представлен графический анализ движения тел в ротационно-симметричной модели гравитационного поля галактики. Выделены различные типы орбит в зависимости от начальных условий и значений параметров модели.

ORBITS IN AXISYMMETRICAL GALAXY MODEL

A. N. Taraskina Saint-Petersburg State University

The work presents a visual study of motion in the gravitational field of axisymmetric potential and considers different types of orbits for various initial conditions and parameters.

В работе исследуются траектории тел в модели гравитационного поля галактики. Предполагаются стационарность и ротационная симметричность. В качестве исходной функции описания принимается потенциал из работы [1]

$$\Phi(\xi) = \frac{\alpha}{\alpha - 1 + \omega(\xi)}, \ \omega(\xi) = (1 + \kappa \xi^p)^{\frac{1}{p}}, \ \kappa = O(\alpha^p), \tag{1}$$

где $\alpha > 0, \ p > 0$ — структурные параметры; ξ задает семейство эквипотенциалей в цилиндрических координатах. Рассматриваются два таких семейства [2]:

$$\xi^2 = R^2 + z^2 + 2(1 - \varepsilon)(\sqrt{z^2 + \varepsilon^2} - \varepsilon), \qquad (2)$$

$$\xi^2 = -\Lambda + \sqrt{(R^2 + \Lambda)^2 + (z^2 + 1) - 1 + 2R^2 z^2},$$
(3)

где $\varepsilon, \ \Lambda$ — дополнительные структурные параметры каждого из семейств.

Зафиксировано несколько наборов значений параметров, определяющих физически корректную модель (с положительной плотностью масс). Мы ограничиваемся случаем p < 2, при котором возникает пик плотности в центре системы.

 $[\]bigodot$ Тараскина А. Н., 2018

²⁷²

Для построения орбит решается задача Коши классическим методом Рунге—Кутты четвертого порядка. Выбор начальных точек осуществляется с помощью диаграммы Линдблада.

В случае ротационной симметрии модели орбит изображаются в меридиональной плоскости, сопутствующей звезде. Было вычислено множество траекторий, соответствующих различным значениям интегралов движения. По морфологическим признакам были выявлены несколько типов орбит. Также рассмотрены тенденции изменения вида орбит при варьировании значений параметров и интеграла энергии. Для каждого случая было построено сечение Пуанкаре [3], которое также учитывалось при классификации.

Библиографические ссылки

- Raspopova N. V., Ossipenko L. P., Jiang Z. A new model for dark matter of spherical galaxies // Astronomical Astrophysical Transactactions. – 2012. – Vol. 27. – P. 433–436.
- Davydenko A. A., Raspopova N. V., Ustimenko S. S. On mass simulations of dynamical models of galaxy // Conference on "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov, SCP. – 2015.
- Binney J., Tremaine S. Galactic dynamics. Princeton : Princeton University Press, 2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ В ГЛАВНОМ ПОЯСЕ АСТЕРОИДОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

И. М. Шмелева

Уральский федеральный университет

В данном исследовании для определения вероятности столкновения астероидов друг с другом используется метрика пространства кеплеровых орбит.

RESEARCH OF COLLISION PROBABILITY FOR SMALL BODIES IN THE ASTEROID BELT OF THE SOLAR SYSTEM BY NUMERICAL METHODS

I. M. Shmeleva

Ural Federal University

In this research the metric in the space of Keplerian orbits is used to determine the collision probability for asteroids with each other.

Для определения вероятности столкновения двух объектов в данной работе будет использоваться метрика пространства кеплеровых орбит. Метрика — это функция, определяющая расстояние в метрическом пространстве и удовлетворяющая трем аксиомам метрического пространства.

Для того чтобы получить более точные результаты, будет проводиться процедура улучшения элементов орбит на момент наилучшей обусловленности с учетом определенных возмущающих ускорений, воздействующих на объект. При помощи ковариационной матрицы будет построена начальная доверительная область линейным методом. Далее, из области возможных движений будет выбрано случайно n точек и попарно произведено сравнение их по метрике, каждую с каждой. Таким образом, будет получено $n \times n$ значений метрики для анализа.

© Шмелева И. М., 2018

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХТЕЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ (ЦЕРЕРА—ВЕСТА—АСТЕРОИД) МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

К. А. Яговитина

Уральский федеральный университет

Проведено отождествление резонансов. Построен график зависимости резонансного аргумента и его производной от времени. Подобные графики предназначены для определения критерия нахождения астероида в резонансе с Церерой и Вестой.

STUDIES OF THREE-BODY RESONANCES (CERES—VESTA—ASTEROID) OF SMALL BODIES OF THE SOLAR SYSTEM

K. A. Yagovitina

Ural Federal University

In this work the identification of resonances is carried out. A resonant argument and its derivative are plotted as functions of time. Such plots are intended to define the criteria for identification of an asteroid in resonance with Ceres and Vesta.

Резонансы средних движений проявляются при наличии рациональной соизмеримости средних частот орбитальных движений. В настоящей работе рассматриваются двухтельные и трехтельные резонансы малых тел Солнечной системы с карликовой планетой Церера и крупным астероидом главного пояса Вестой. Отождествление резонансов происходит в два этапа. На первом этапе определяются порядок резонанса и значение его большой полуоси. На втором координаты астероида и компоненты скорости: x, y, z, V_x, V_y, V_z на интервале времени 400 лет с шагом 0.5 года. Входным файлом является каталог элементов орбит астероидов Bowell'а. Для каждого резонанса вычисляется резонансный аргумент, по значениям которого строится график зависимости самого аргумента и его производной от времени. По анализу таких графиков в дальнейшем планируется определить критерий нахождения астероида в резонансе с Церерой и Вестой.

⑦ Яговитина К. А., 2018

Современные исследования переменных звезд

Совмещенный научный семинар, посвященный 85-летию со дня рождения Мария Анатольевича Свечникова



СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

Совмещенный научный семинар, посвященный 85-летию со дня рождения Мария Анатольевича Свечникова

Организаторы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

> 2 февраля 2018 г. Екатеринбург, Россия

Организационный комитет

А. М. Соболев (Уральский федеральный университет),
Т. С. Полушина (Уральский федеральный университет),
С. Ю. Горда (Уральский федеральный университет), Г. Н. Дремова (Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ)

Программный комитет

А. М. Соболев (Уральский федеральный университет),
Н. Н. Самусь (Институт астрономии РАН), Г. Н. Дремова (Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ),
Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований,

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

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ АКТИВНОЙ ЗВЕЗДЫ VY ARIETIS

И. Ю. Алексеев¹, О. В. Козлова¹, С. Ю. Горда²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, ²Уральский федеральный университет

Представлены квазиодновременные UBVRI фотометрические и H_{α} спектральные наблюдения хромосферно-активной двойной VY Ari. Ее фотометрическая переменность описывается зональной моделью запятненности, где пятна занимают до 32 % полной поверхности звезды. Пятна локализованы в низких и средних широтах, они холоднее спокойной фотосферы на 1 300 К. Спектральные наблюдения показывают в некоторые эпохи наличие в хромосфере звезды активных областей повышенной электронной плотности (факелов), сконцентрированных вблизи наиболее запятненных (активных) долгот. Отмечается цикличность в долговременных изменениях площади пятен и основных параметров чистой эмиссии H_{α} с характерным временем 9—10 лет.

PHOTOMETRIC AND SPECTRAL VARIABILITY OF ACTIVE STAR VY ARI

I. Yu. Alekseev¹, O. V. Kozlova¹, S. Yu. Gorda² ¹Crimean Astrophysical Observatory, ²Ural Federal University

Quasi-simultaneous UBVRI photometric, and H_{α} spectroscopic observations of the chromospherically active binary star VY Ari are presented. The photometric variability of the star can be described by a zonal spottedness model. Spotted regions occupy up to 32 % of the total stellar surface. The temperature difference between the unspotted photosphere and starspots is about 1 300 K. Starspots are localized at middle-low latitudes. The spectroscopic observations show in some epochs the presence of chromospherically active regions with a higher electron density (plages), which concentrated near the mostly spotted stellar longitudes. There are the cyclic variations of the spot area and the H_{α} pure emission parameters with a typical time is about 9–10 years.

Работа выполнена при частричной поддержке гранта РФФИ 16-02-00689, а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт 02.А03.21.0006).

[©] Алексеев И. Ю., Козлова О. В., Горда С. Ю., 2018

²⁸¹

ПЕРЕМЕННОСТЬ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ Ве ХЕРБИГА HD 200775

А. П. Бисярина, А. М. Соболев, С. Ю. Горда Астрономическая обсерватория УрФУ

Исследованы переменность широких эмиссионных линий в спектре двойной звезды Ве Хербига HD 200775 и ее связь с двойственностью системы. Эти линии (включая линии атомов H I, [O I], Si II, Fe II и др.) предположительно образованы в аккреционном диске или дисковом ветре. Использованы данные высокого спектрального разрешения, полученные на 1.2 метровом телескопе КАО УрФУ и на других инструментах, включая данные из электронных архивов. Исследуемый временной интервал составляет 23 года. Период обращения двойной системы хорошо известен и составляет около 3.7 года. В результате показано, что изменение профилей эмиссионных линий согласовано с орбитальной фазой.

VARIATION OF EMISSION LINES IN THE SPECTRA OF Be HERBIG STAR HD 200775

A. P. Bisyarina, A. M. Sobolev, S. Yu. Gorda

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

We study variation of broad emission lines in the spectra of Herbig Be binary star and its relation with binarity. These lines (including lines of H I, [O I], Si II, Fe II and other atoms) probably originate from the accretion disk or the disk wind. Observational data were obtained using high resolution spectrograph at 1.2 meter telescope of KAO UrFU or using other instruments, including archive data. Overall time interval of these data is 23 years. The binary star has well-known period of about 3.7 years. As a result, we found that the emission lines variation is correlated with orbital phases.

Звезда HD200775 — двойная звезда Ве Хербига с периодом около 3.7 года. Период обращения и параметры орбиты системы были определены разными авторами по ряду спектральных наблюдений, а также по интерферометрическому наблюдению орбиты в среднем ИК. Вокруг главной компоненты системы существует аккреционный диск. Система также окружена общим газо-пылевым диском.

[©] Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю., 2018

²⁸²

Для звезды характерно периодическое наступление фаз максимума активности, вероятно, связанное с влиянием прохождения менее массивной компоненты на аккреционный диск вокруг главной звезды. Во время фаз максима активности изменяется профиль и растет эквивалентная ширина линии Н α . Цель данной работы — рассмотреть переменность этой и других эмиссионных линий, образованных в аккреционном диске или дисковом ветре звезды, и исследовать связь этой переменности с орбитальным движением в двойной системе.

Наблюдения звезды проводились в Коуровской астрономической обсерватории (АО УрФУ) на 1.2 метровом телескопе с 2012 по 2017 г. с использованием спектрографа высокого разрешения. В 2013 г. был получен спектр на спектрографе НЭС в САО РАН. В работу включены данные, полученные с 2014 по 2016 г. в обсерватории TCO. Использованы доступные данные из электронных архивов, полученные с 1994 по 2011 г. на спектрографах ELODIE и SOPHIE (OHP), EsPADONS (CFHT), НЭС (САО РАН). Исследуемый временной интервал составляет более двух десятков лет.

Для анализа в спектре звезды были выбраны эмиссионные линии с шириной более 150 км/с и остаточной интенсивностью более 1.015. Были исследованы линии Бальмеровской серии водорода, линии Fe II 5018, 5169, 5184, 5317 Å, линии Si II 5041, 5056, 5980, 6347, 6371 Å, запрещенные линии кислорода O I 6300 и 6363 Å. В части спектров исследованы линии более длинноволновой области линии Ph11-17, триплет O I 7772 Å, O I 8446 Å, линии Ca II 8498, 8542, 8662 Å, Mg I 8807 Å. Было замечено, что основные изменения интенсивностей линий происходят лишь на определены участках их профилей. Для каждой линии были определены границы лучевых скоростей таких участков. Исследована корреляция изменения интенсивности внутри каждого такого участка для разных линий и связь этой переменности с орбитальной фазой. Показано, что переменность эмиссионных линий в спектре звезды HD 200775 согласована с орбитальной фазой двойной системы.

Работа А. П. Бисяриной и А. М. Соболева выполнялась при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-10017). Работа С. Ю. Горды проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

СВЕТОВОЕ УРАВНЕНИЕ В ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ CV ВОО

А. И. Богомазов¹, В. С. Козырева¹, Б. Л. Сатовский², В. Н. Крушевская³, Ю. Г. Кузнецова³,
Ш. А. Эгамбердиев⁴, Р. Г. Каримов⁴, А. В. Халикова⁴,
М. А. Ибрагимов⁵, Т. Р. Ирсмамбетова¹, А. В. Тутуков⁵

 $^{1}M\Gamma Y$ им. М. В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт

им. П. К. Штернберга, ²Компания «Астротел», ³Главная

астрономическая обсерватория Национальной академии наук

Украины, 4 Астрономический институт им. М. Улугбека академии

наук Узбекистана,⁵Институт астрономии Российской

академии наук

Короткопериодическая затменная двойная звезда CV Воо изучена методом светового уравнения. Были использованы данные о моментах минимумов из литературы и из наших наблюдений в мае—июле 2014 г. Была найдена периодическая вариация орбитального периода системы с периодом ≈ 75 дней. Эта вариация может быть объяснена гравитационным воздействием третьего тела с массой $\approx 0.4~M_{\odot}$ на вытянутой орбите с эксцентриситетом $e \approx 0.9$. Также обсуждается возможность изменения орбитального периода на больших шкалах времени. Предлагаемое третье тело находится близко к хаотической зоне вокруг центральной двойной, поэтому оно может быть интересно для изучения его динамической эволюции.

LIGHT EQUATION IN ECLIPSING BINARY CV BOO

A. I. Bogomazov¹, V. S. Kozyreva¹, B. L. Satovskii², V. N. Krushevska³, Yu. G. Kuznyetsova³,

Sh. A. Ehgamberdiev⁴, R. G. Karimov⁴, A. V. Khalikova⁴, M. A. Ibrahimov⁵, T. R. Irsmambetova¹, A. V. Tutukov⁵

¹M. V. Lomonosov Moscow State University, P. K. Sternberg Astronomical Institute,²AstroTel Ltd., ³Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, ⁴Ulugh Beg

© Богомазов А. И., Козырева В. С., Сатовский Б. Л., Крушевская В. Н., Кузнецова Ю. Г., Эгамбердиев Ш. А., Каримов Р. Г., Халикова А. В., Ибрагимов М. А., Ирсмамбетова Т. Р., Тутуков А. В., 2018

Astronomical Institute, Uzbek Academy of Sciences, ⁵Institute of astronomy, Russian Academy of Sciences

A short period eclipsing binary star CV Boo is tested for the possible existence of new bodies in the system with a help of the light equation method. We use data about moments of minima from the literature and our observations during May—July 2014. A periodical variation of CV Boo's orbital period is found, the variation's period is ≈ 75 days. This variation can be explained by the gravitational influence of a third star with a mass $\approx 0.4 M_{\odot}$ in an eccentric orbit with $e \approx 0.9$. A possibility for orbital period changes in long time scales is discussed. The suggested tertiary companion is near the chaotic zone around the central binary, so it is an interesting example to test its dynamical evolution.

Современная астрономия уделяет большое внимание тройственности и кратности звезд: стабильность орбит в таких системах, влияние дополнительных тел на центральную двойную, их динамическая эволюция особенно интересны. СV Воо — затменная двойная звезда с периодом P = 0.8469938 дней, спектральный класс главной звезды пары G0. Мы наблюдали эту звезду на 50 см телескопе AMT-1 на Майданакской обсерватории. Наблюдения проводились непрерывно в течение ночи по 5—7 ч с экспозицией 8—20 с. Полученные данные были обработаны при помощи программы C-Munipack[!]. Ошибки отдельных наблюдательных точек составили $0.0024^m - 0.004^m$ в разные ночи. На основе этих данных были построены кривые блеска системы, в свободном поиске моделированием кривых блеска при фиксированных геометрических параметрах системы было найдено 14 моментов минимумов блеска.

Далее система изучалась методом светового уравнения (тайминга затмений). Если вокруг центральной двойной обращается одно (или несколько) дополнительных тел, то гравитационное воздействие этого тела (тел) смещает центр масс центральной пары относительно наблюдателя. Смещение вызывает вариации моментов затмений (минимумов), меняя видимый для нас орбитальный период системы (также изменять орбитальный период могут перенос вещества в тесных двойных и пульсации одной или обеих звезд пары).

Для анализа отклонений моментов минимумов как функции времени мы использовали метод наименьших квадратов с весами измерений, так как различные наблюдательные точки имеют разную

[!]http://c-munipack.sourceforge.net

²⁸⁵



Рис. 1. $(O-C)_1$ -диаграмма векового изменения орбитального периода CV Воо. Величины $(O-C)_1$ вычислены с использованием наблюдательных моментов минимумов и эфемерид. Точками показаны наблюдаемые значения для фороэлектрических (ПЗС и ФЭУ), визуальных и фотографических наблюдений. Непрерывная кривая показывает теоретическую модель

точность. Наблюдения были разделены на три группы: фотографические, визуальные и фотоэлектрические (при помощи ПЗС или ФЭУ). При помощи статистических критериев (распределение Стьюдента, гипотеза нулевого среднего, критерий χ^2) было установлено, что на больших промежутках времени отклонения (O - C) (наблюдаемые минус вычисленные по эфемеридам) моментов минимумов носят квадратичный характер (рис. 1). Количественно это выражается так:

$$Min \ I = T_0 + P_0 \times E + \frac{\Delta P}{2} \times E^2, \tag{1}$$

где T_0 = HJD 2452321.84548; P_0 = 0.846993520 дней; ΔP = $= 8.14 \pm 4.07 \times 10^{-11}$ дней; E — количество орбитальных циклов от начальной эпохи T_0 . Физическая природа векового изменения не может быть указана при помощи существующих данных. Возможно, она объясняется одним из следующих механизмов: (i) ресинхрони-

зацией орбитального вращения одной или обеих звезд пары с орбитальным вращением системы (ранее синхронизация была нарушена воздействием третьего тела); (ii) гравитационным воздействием дополнительного тела, орбитальный период которого составляет несколько десятков лет; (iii) магнитным механизмом, изменяющим квадрупольный момент одной из звезд (или обеих); (iv) медленным перетеканием вещества в системе.



Рис. 2. $(O - C)_2$ -диаграмма вариаций орбитального периода CV Воо, период вариаций 74.4 ± 0.5 дня. Кружками показаны наблюдательные значения. Кривой показана модель вариаций под гравитационным воздействием третьего тела (амплитуда 48.4 ± 21 с, эксцентриситет $e = 0.90 \pm 0.04$). Начальная эпоха третьего тела $E_0 = \text{HJD } 2456772.2 \pm 3.5$

Анализ 14 напих моментов минимумов, полученных в 2014 г., а также всех фотоэлектрических наблюдений, взятых из литературы (так как визуальные и фотографические наблюдения обладают гораздо меньшей точностью), показал, что в системе есть не только вековые, но и периодические вариации орбитального периода, которые могут быть объяснены наличием третьего тела. Параметры светового уравнения следующие: орбитальный период третьего тела $P_3 = 74.4 \pm 0.5$ дня, амплитуда вариаций периода $A = 48.4 \pm 21.0$ с, эксцентриситет орбиты третьего тела $e_3 = 0.90 \pm 0.04$, проекция боль-

шой полуоси орбиты центра масс двойной CV Воо вокруг центра масс тройной системы на луч зрения $a \cdot \sin i = 0.10 \pm 0.04$ а. е., начальная эпоха $E_0 =$ HJD 2456772.2 \pm 3.5, долгота восходящего узла $\omega_3 = 156^\circ \pm 26^\circ$. Результат показан на рис. 2. Функция масс предлагаемого тела $f(M) \approx 0.02 - 0.03 M_{\odot}$, что дает нижний предел на массу третьего тела $M_3 \approx 0.4 - 0.5 M_{\odot}$. Такой набор орбитальных параметров третьего тела означает, что предложенное тело может находиться вблизи зоны хаотического движения, поэтому его динамическая эволюция представляет особый интерес.

Подробно результаты нашей работы изложены в статье [1].

Библиографические ссылки

 Bogomazov A. I., Kozyreva V. S., Satovskii B. L. et al. Light equation in eclipsing binary CV Boo: third body candidate in elliptical orbit // Astrophys. Space. Sci. - 2016. - Vol. 361. - P. 390. 1611.04627.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

С. Ю. Горда

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

В докладе приводятся результаты фотометрического, спектрального и теоретического исследования переменных звезд различных типов, первоначально инициированные Марием Анатольевичем Свечниковым и выполненные в период с момента образования Коуровской астрономической обсерватории до настоящего времени.

INVESTIGATION OF VARIABLE STARS AT THE KOUROVKA ASTRONOMICAL OBSERVATORY

S. Yu. Gorda

Astronomical observatory of Ural Federal University

The results of the photometric, spectral and theoretical studies of the variable stars executed at Kourovka astronomical observatory and originally initiated by Svechnikov Mariy Anatolyevich are presented.

Почти с момента образования в Коуровской обсерватории начались наблюдения переменных звезд. Инициатором исследований был Марий Анатольевич Свечников.

Первоначально это были фотографические, а затем электрофотометрические наблюдения на телескопе-рефракторе ABP-2 (D = 0.2 м, F = 3 м) и впоследствии на телескопе-рефлекторе A3T-3 ($D = 0.453 \text{ м}, F_{cas} = 11 \text{ м}$), надолго ставшем основным звездным телескопом обсерватории. С вводом в строй в 1974 г. астрогеодезической камеры SBG (камера Шмидта D = 0.4 м, F = 0.8 м), некоторое время на ней проводились фотографические наблюдения по поиску вспыхивающих звезд. С середины 90-х гг. начались фотометрические наблюдения катаклизмических переменных на созданном в обсерватории телескопе-рефлекторе системы Кассегрена ($D = 0.70 \text{ м}, F_{cas} = 10 \text{ м}$), оснащенном четырехканальным электрофотометром. Примерно в это же время на телескопе АЗТ-3 был введен в строй

[©] Горда С. Ю., 2018

²⁸⁹

сканирующий фотометр, что позволило продолжить на новом уровне исследование переменных звезд, являющихся компонентами тесных визуально-двойных систем. На этом телескопе впервые на обсерватории была задействована ПЗС-камера. И наконец, в конце 2000-х гг. обсерваторию оснастили 1.2 м телескопом (D = 1.22 м, $F_{cas} = 11$ м) и эшелле-спектрографом высокого разрешения, а также спаренным телескопом-роботом «МАСТЕР-II-УРАЛ» (D = 0.4 м, F = 1 м). Таким образом, с конца 2011 г., наряду с фотометрическими исследования переменных звезд и других объектов еще два телескопа. Это телескоп «АСТРОСИБ» (D = 0.5 м, $F_{cas} = 4.5$ м), вместо устаревшего АЗТ-3, и робот-телескоп «РОБОФОТ» (D = 0.6 м, $F_{cas} = 4.2$ м), оснащенный панорамным трехканальным ПЗС-фотометром.

В настоящее время на обсерватории проводятся фотометрические, спектральные и теоретические исследования переменных звезд различных типов. Методами фото- и спектрометрии исследуются массивные звезды, находящиеся на ранних этапах эволюции. Это объекты Ве Хербига, затменные системы с массивными компонентами ранних спектральных классов, контактные системы типа W UMa, запятненные звезды и катаклизмические переменные. Предпринимаются попытки поиска и наблюдений экзопланет. В процессе наблюдений было открыто несколько сотен новых переменных звезд. На основе численных расчетов исследовано влияние перемешивания вещества в недрах вращающихся звезд ранних спектральных классов на их эволюцию.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

РОЛЬ ЭФФЕКТА РОССИТЕРА—МАКЛАФЛИНА В ИЗУЧЕНИИ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Г. Н. Дремова

Российский федеральный ядерный центр

Большинство звезд для нас являются точечными источниками излучения. Это ставит проблему исследования звездных поверхностей, что подталкивает к развитию методов доплеровского картирования, поляриметрии, томографии, интерферометрии. Для их тестирования подходят только самые близкие звезды, тогда как затменные переменные звезды весьма благоприятны для достижения высокого пространственного разрешения при условии, что их орбита лежит на луче зрения. Фотометрический и спектроскопический анализ затмений позволяет определить геометрические и физические параметры звезд, а также наклоны звездных экваторов компонентов к плоскости орбиты. Оценку наклонения дает измерение эффекта Росситера—Маклафлина, о котором рассказывается в лекции.

THE ROLE OF ROSSITER—MCLAUGHLIN EFFECT IN STUDY OF THE CLOSE BINARIES

G. N. Dryomova

Russian Federal Nuclear Centre

Most of the stars are point sources for us. This raises the problem of studying stellar surfaces, which pushes us to ward the development of Doppler mapping, polarimetry, tomography, optical and infrared interferometry. To test these methods, only nearby stars are suitable, while eclipsing binaries are useful to obtain high spatial resolution. Photometric and spectroscopic analysis of eclipses allows determining geometric and physical parameters of stars, as well as inclinations of stellar equators to orbital plane. Estimations of inclinations can be obtained from the measurement of Rossiter—McLaughlin effect, which will be discussed in the lecture.

⑦ Дремова Г. Н., 2018

ТДЗ: самые перспективные объекты в астрофизике

История изучения двойных звезд доказывает, что это самые перспективные объекты с момента изобретения телескопа. Первый замечательный фактор в их пользу — распространенность двойных звезд, составляющих более половины от всех звезд Галактики. Второй фактор — двойственность компонентов. В сочетании с благоприятной для наблюдения затмений их пространственной конфигурацией двойственность оказалась той «обратной связью», которая необходима для успешного построения теоретических моделей и их тестирования.

Периодический характер изменения блеска вследствие затмений компонентов друг другом, впервые правильно проинтерпретированный в 1783 г. английским астрономом Джоном Гудрайком для β Per, впоследствии позволил «геометризовать» фотометрические наблюдения и определить относительные радиусы компонентов в долях большой полуоси орбиты, а также определить орбитальный период двойной системы. Но уже через сто лет, в конце XIX в., когда началось массовое спектральное изучение звезд, благодаря эффекту Доплера свершилась настоящая революция: по квантам «спрятанного» света можно было «взвесить» звездные компоненты двойной системы, а также определить их абсолютные радиусы и абсолютный размер орбиты.

Такое дистанцированное изучение возможно при условии, что двойная система является одновременно и спектрально-двойной, и затменно-переменной, что характерно для класса тесных двойных звезд (ТДЗ), в которых расстояние между компонентами соразмерно с их радиусами. В ТДЗ с ненулевым эксцентриситетом звездные компоненты постоянно испытывают взаимную приливно-вращательную деформацию, вследствие чего большая полуось орбиты начинает вращаться относительно центра масс в том же направлении, что и компоненты по орбите. Это явление известно как «классический» апсидальный эффект, обеспечивающий наблюдательный тест теории внутреннего строения звезд, поскольку скорость вращения большой полуоси (линии апсид) оказывается пропорциональной распределению плотности звезды по радиусу. Но в отсутствие приливновращательной деформации компонентов двойной системы их большая полуось все равно испытывала бы вращение вследствие искривления пространства, обнаруживая, таким образом, «pensmusucm-

ский» апсидальный эффект. Возможность регистрации апсидального эффекта позволяет провести качественные тесты теории внутреннего строения, включая аспекты согласования возрастов и химического состава компонентов, а также корректировки темпов химических реакций для согласованного описания химической эволюции звезд и Галактики.

Задача определения возраста представляет собой фундаментальную проблему в астрофизике, отражающей ряд космологических аспектов. Во-первых, знание возраста позволяет перейти к начальным распределениям, например, построить начальную функцию масс (HФМ), в которой чередование максимумов и минимумов коррелирует с эпохами звездообразования. Во-вторых, знание возраста дает возможность искать эволюционные связи между ТДЗ разных классов, что в подходе популяционного синтеза (объединение звезд разных классов в одну эволюционную последовательность) обеспечивает тест разнообразию конечных стадий эволюции, успевающих реализоваться за Хаббловское время.

Разнообразие конечных эволюционных стадий в ТДЗ обусловлено тривиальным обстоятельством — изменением массы компонентов в ходе их эволюции. Хорошо известный *парадокс Алголя*, который был разрешен американским астрофизиком Кроуфордом введением процесса «перемены ролей компонентов» вследствие обмена массой между ними, стал серьезным тестом теории звездной эволюции в 60-е гг. XX в.

ТДЗ оказались настолько уникальными физическими лабораториями, что позволили тестировать космологические теории, включая релятивистские эффекты ОТО. Настоящим триумфом изучения ТДЗ стало прямое детектирование гравитационных волн [1], сгенерированных в результате слияния двух черных дыр звездной массы. Если в начале истории своего открытия ТДЗ приоткрыли завесу тайны звездных размеров, то сейчас они почти «подобрались» к космологической сингулярности, многократно «копируемой» в процессах слияния двойных черных дыр.

Базовые каталоги ТДС: проблема апсидального движения

Если вернуться к статистике, число затменно-переменных звезд, для которых известны приближенные значения их физических и абсолютных параметров орбиты, в нашей Галактике не превышает

5000. Речь идет о ТДЗ из каталога «Приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд», составленного М. А. Свечниковым и Э. Ф. Кузнецовой [2] по результатам простых классификационных критериев [3], примененных к данным ОКПЗ III [4].

Эти простые критерии, отражающие степень заполнения полостей Роша и положение компонент на эволюционной диаграмме Герцшпрунга—Рессела, были найдены в результате долгого рутинного труда по сбору и систематизации данных наблюдений затменных переменных звезд, составивших базу карточного каталога Свечникова. Идея простоты классификационных критериев состояла в их применении к общедоступным данным наблюдений, содержащихся в каталогах с большими объемами данных. Эти критерии составлены из комбинации базовых наблюдательных данных транзитной фотометрии: орбитального периода P ТДЗ, глубины главного затмения A_1 , разности глубин минимумов ΔA и спектрального класса главного компонента Sp_1 .

Чуть более 2 % от данных каталога М. А. Свечникова и Э. Ф. Кузнецовой составляет класс спектрально-двойных звезд с хорошо изученными абсолютными элементами орбиты (112 систем). Речь идет о другом известном каталоге М. А. Свечникова и Е. Л. Перевозкиной [5] — «Каталоге орбитальных элементов, масс и светимостей звезд главной последовательности с разделенными компонентами», отражающем уровень астрометрических измерений XX в., когда подавляющее большинство систем открывались массовым фотографическим способом.

Каталог М. А. Свечникова и Е. Л. Перевозкиной позволяет комплексно тестировать теоретические эволюционные модельные треки звезд, а также проверить надежность своих вычислений по результатам сравнения с данными нового каталога ТДЗ. Это каталог «Точные массы и радиусы нормальных звезд: современные результаты и применения», составленный в 2010 г. Торресом, Андерсеном и Гименецом [6] по данным современных космических миссий. Продолжая выстраивать статистику хорошо изученных звезд, нужно сказать, что только треть от ТДЗ с известными фотометрическими и спектроскопическими данными наблюдений демонстрирует апсидальное движение, количественная оценка которого может быть воспроизведена в рамках динамической теории апсидального движения, объединенной с анализом неадиабатических приливных осцилляций, а также механизмов затухания ответных осцилляций звезды.

Уникальное свойство апсидального движения — одновременно характеризовать темп поворота эллиптической орбиты ТДЗ и распределение плотности внутри каждого компонента — позволяет использовать константы внутреннего строения $k_{2,1}$ и $k_{2,2}$, рассчитываемых для компонентов ТДЗ по модельным эволюционным звездным трекам Кларэ [7] в качестве параметров разложения апсидального движения.

Вычислительная процедура оперирует набором констант, характеризующих распределение плотности $\rho(r)$. Этими константами для каждой компоненты ТДС являются глубина конвективной оболочки x_{bf} , радиус гирации β , характеристика политропной структуры конвективной оболочки E, константы второго порядка, характеризующие тормозные моменты вследствие лучистого затухания E_2 и вследствие турбулентной вязкости в конвективных средах, λ_2 , соответственно, а также параметры апсидального движения второго порядка $k_{2,1}$ и $k_{2,2}$ для главного и вторичного компонентов соответственно.

Именно второй порядок указанных констант дает максимальный вклад в апсидальное движение и создание тормозных моментов. Это обстоятельство позволяет упростить теоретические выкладки динамической теории апсидального движения [8–13]. Например, соотношение для оценки периода апсидального движения приобретает простой вид:

$$\frac{P}{U_{cl}} = c_1 \cdot k_{2,1} + c_2 \cdot k_{2,2},\tag{1}$$

где P — аномалистический орбитальный период; U_{cl} — период вращения линии апсид из-за вращательно-приливной деформации. Коэффициенты c_1 и c_2 — константы известных из спектроскопических и фотометрических наблюдений физических характеристик и элементов орбиты:

$$c_i = \left(\frac{R_i}{A}\right)^5 \cdot \left\{15f(e)\frac{M_{3-i}}{M_i} + \left(\frac{w_{ax,i}}{w_{orb}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{M_{3-i}}{M_i}\right)g(e)\right\},\tag{2}$$

$$f(e) = \left(1 + \frac{3}{2} \cdot e^2 + \frac{1}{8} \cdot e^4\right) \cdot (1 - e^2)^{-5},\tag{3}$$

$$g(e) = (1 - e^2)^{-2},$$
 (4)

где i — номер компонента; M — масса; R — радиус; $w_{ax,i}$ — угловые скорости осевого вращения компонентов; w_{orb} — средняя угловая скорость орбитального обращения; e — эксцентриситет; A — 295

большая полуось орбиты. M, R, A даны в солнечных единицах, угловые скорости — в градусах за секунду. Эти формулы справедливы в предположении, что векторы осевого и орбитального вращения звезд параллельны.

Известно, что апсидальное движение в эксцентричных ТДЗ происходит не только вследствие вращения компонентов и взаимного влияния неоднородного гравитационного поля компаньона. Также имеет место релятивистский эффект апсидального движения, порождаемый искривлением пространства и не связанный с конечными размерами звезд. В рамках ОТО релятивистский эффект апсидального движения определяется согласно [14]:

$$\frac{P}{U_{rel}} = 6.37 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{M_1 + M_2}{A \cdot (1 - e^2)} \tag{5}$$

и суммируется к классическому эффекту в случае ТДЗ (тройственность системы усложняет характер учета релятивистской поправки):

$$U_A^{-1} = U_{cl}^{-1} + U_{rel}^{-1}.$$
 (6)

Сравнение теоретически оцененного U_A и полученного из наблюдений U_{obs} периода апсидального движения для эксцентричной ТДЗ является важным тестом для теоретических эволюционных моделей в вопросе о правильности выбранного распределения плотности компонентов $\rho(r)$. О правомерности такого подхода могут сказать результаты сравнения наблюдаемого U_{obs} и теоретического U_A значений апсидального периода [15], которые в большинстве случаев показывают хорошее согласие, что подтверждает надежность используемых эволюционных моделей Кларэ.

Для нескольких систем (AS Cam, NY Cep, V1765 Cyg, AI Hya, DI Her, EW Ori) отмечалось все же заметное рассогласование наблюдаемого и теоретического значений апсидального периода, которое стало известным как «релятивистский парадокс», поскольку замечен он был в ТДЗ с большим релятивистским вкладом (~ 80 %) в апсидальное движение. Проблема рассогласования подтолкнула к поиску альтернативных ОТО теорий (несимметричная теория гравитации), обеспечивающих «нужное» изменение темпа поворота орбиты для каждой из ТДЗ в отдельности. Таких страниц можно найти немало в истории ОТО — теории, которая уже сто лет выдерживает испытания временем и космическими экспериментами.

Сегодня не стоит больше проблема рассогласования наблюдаемого и теоретического значений периода апсидального движения.

Во-первых, найдено несколько систем с почти 100 % вкладом релятивистского эффекта в апсидальное движение (GG Ori, V541 Cas, V1143 Cyg, V1147 Cyg), которые не показывают рассогласования данных наблюдений и теории. Значит, дело не в ОТО. Во-вторых, благодаря другому важному эффекту, позволяющему в затменных переменных системах измерять аномалию кривой лучевой скорости, были получены доказательства о неколлинеарности осевого и орбитального моментов компонентов двойной системы, тогда как базовый формализм теории апсидального движения применялся в предположении о параллельности осей в ТДЗ. Рассмотрим этот эффект подробнее в следующем разделе.

Эффект Росситера-Маклафлина

Как известно, линии поглощения в спектре вращающейся звезды уширяются из-за доплеровского сдвига, когда свет, излучаемый приближающейся к нам полусферой звездной поверхности, сдвигается в синюю часть спектра, а свет, излучаемый удаляющейся от нас звездной поверхности, — в красную часть спектра. Во время затмений и прохождений компонентов ТДЗ сегменты их полусфер постепенно экранируются, ослабляя попеременно соответствующую компоненту скорости линии поглощения. В результате профили линий спектра искажаются (рис. 1), что позволяет выявить проекцию скорости вращения звезды и оценить угол между орбитальной плоскостью и экватором затмеваемой звезды.

Идея использовать спектроскопические наблюдения затмений в ТДЗ для расшифровки звездного вращения принадлежит Хольцу [16], который еще в 1893 г. понял, что для анализа скорости собственного вращения звезды важна аномалия спектральной линии, а не ее уширение. Ведь уширение линий в спектре может быть вызвано и рядом других причин: давлением, вариацией фотосферной конвекции от центра диска к краю, поверхностными полями скоростей и т. д. Первые уверенные измерения были получены в 1924 г. независимо двумя астрономами — Росситером для β Лиры и Маклафлином для Алголя, которые сообщили об изменении первого момента линии поглощения [17, 18]. Вот это изменение формы линии поглощения и получило название эффекта Росситера—Маклафлина. Дальнейшие аспекты этой теории были наработаны Хосокавой [19], Копалом [11] и др. Возможность моделирования спектрального искажения линий выявляет не только проекции скорости вращения звезды, но и угол



Рис. 1. Диаграмма лучевой скорости, иллюстрирующая искажение линии поглощения для WASP-78

между плоскостью орбиты и экваториальной плоскостью затмеваемой звезды.

За более чем 90-летнюю историю с момента открытия эффекта Росситера—Маклафлина всего несколько затменно-переменных звезд «удостоились» количественно выполненного анализа этого эффекта ввиду очевидной сложности измерений. Возможно, ситуация такой бы и оставалась, если бы не массовые открытия экзопланет, которые бурно начались в 90-е гг. ХХ в. и бросили вызов теории образования планет. Современные теории, учитывающие миграционные процессы планет-гигантов, могли быть проверены с помощью эффекта Росситера—Маклафлина на предмет сохранения или нарушения коллинеарности осей собственного вращения планет и их орбитального обращения вокруг родительской звезды.

Резонанс вокруг этой темы заставил задуматься о «релятивистском парадоксе» в апсидальном движении эксцентричных ТДЗ. Почему для некоторых систем наблюдаемый апсидальный период мо-

жет в несколько раз отличаться от его теоретического значения? Наиболее очевидная причина заключалась как раз в том, что теоретические оценки классического апсидального периода выводятся в молчаливом предположении о параллельности орбитальной оси и осей вращения компонентов. Вот отсюда и надо начать все сначала — по измеренному эффекту Росситера—Маклафлина оценить реальную пространственную конфигурацию затменно-переменной системы.

Затменные переменные с проблемным апсидальным периодом

Первой ТДЗ с наблюдаемым апсидальным периодом, в пять раз превышающим свою теоретическую оценку, для которой был измерен эффект Росситера-Маклафлина, стала DI Her. Заметим, что в этой системе вклад релятивистского эффекта в апсидальное движение составляет 56 %. Анализ формы искажения спектральных линий поглощения позволил установить, что в системе DI Her оси вращения звездных компонентов высоко наклонены к орбитальной оси [20]. Еще в 1985 г. Шакура [21] численно показал, что приведение в согласованность наблюдаемого темпа апсидального движения с теоретическим потребует почти перпендикулярной ориентации осей вращения компонентов орбитальной оси (87°). Эта система, которая в течение нескольких десятилетий подталкивала к проверке теории внутреннего строения и ОТО, так как наблюдательный темп апсидального периода (~ 34600 лет) в пять раз отставал от теоретически предсказанного (~ 8630 лет), сегодня показывает различие теории и наблюдения в пределах 10 % ошибки: $U_A \sim 22\,620$ лет и $U_{obs} \sim 24\,775$ лет [22].

Орбитальные и физические параметры ТДЗ из [15]

тдз	$\begin{array}{c} M_1, \ M_{\odot} \\ M_2, \ M_{\odot} \end{array}$	$\begin{array}{c} R_1, \ R_{\odot} \\ R_2, \ R_{\odot} \end{array}$	P^d A, R_{\odot}	е	$\lg k_{2,1} \\ \lg k_{2,2}$	U_{obs} лет	U_A лет
AS Cam	3.3 2.5	2.55	3.4309714	0.164	-2.3215 -2.3148	2 400	870
DI Her	$5.16 \\ 4.53$	2.72 2.47	10.550185 43.14	0.489	-2.1063 -2.1063	34 600	8 630

Другая хорошо известная система с проблемным апсидальным периодом — AS Cam [23]. Как и в случае с DI Her, ее наблюдае-299

мый апсидальный период заметно превышает теоретически предсказанный: $U_A \sim 870$ лет и $U_{obs} \sim 2\,250$ лет. Спектроскопическое изучение этой системы позволило найти проекции вращательных скоростей звездных компонентов, которые оказались очень малы (14.5 и 4.6 км/с [24]), что уже можно рассматривать как косвенное свидетельство неколлинеарности экваториальных и орбитальной осей.

Чтобы убедиться в этом, мы провели расчеты для затменнопеременных систем *DI Her* и *AS Cam* (см. таблицу) с учетом разориентированности всех осей: угол наклона оси вращения спутника к орбитальной плоскости менялся с шагом 1° (кружки вдоль расчетной кривой) при фиксированном угле наклона оси вращения главного компонента к орбитальной плоскости. Угол наклона главного компонента пробегал значения от 0 до 90° с шагом 10° (семейство кривых).



Рис. 2. Зависимость апсидального периода от угла наклона оси вращения звезды к орбитальной оси обращения для *DI Her*. По оси ординат — теоретическая оценка апсидального периода с учетом классического и релятивистского вкладов, а по оси абсцисс — угол λ, который измеряется в эффекте Росситера—Маклафлина

Результаты расчетов для системы *DI Her* приведены на рис. 2, который показывает, что согласование наблюдаемого и теоретически предсказанного апсидального периода достигается при любом наклонении экваторов звездных компонентов по отношению к орбитальной плоскости, включая и коллинеарный случай, но при условии ретроградного движения от вклада вращательной компоненты.

Для AS Cam (рис. 3) ситуация аналогичная, с той лишь разницей, что решение для DI Her найдено для проекционных углов осей собственного вращения звездных компонентов к картинной плоскости $i_1 = i_2 = 15^\circ$, а для AS Cam решение получено для $i_1 = i_2 = 8^\circ$. Безусловно, необходимо прямое измерение эффекта Росситера—Маклафлина для этой системы, а также продолжение наблюдений с целью уточнения элементов орбиты и физических параметров.



Рис. 3. Зависимость апсидального периода от угла наклона оси вращения звезды к орбитальной оси обращения для AS Cam

Заключение

В обозримом будущем измерение эффекта Росситера— Маклафлина станет массовым для затменно-переменных звезд, но уже сейчас, преодолевая трудности новых технологий «распутывания спектров», на свет появляются альтернативные методы измерения наклонений, которые не уступают по точности, не требуя при этом условии транзитных событий. Речь идет о возможности использования звездных пятен медленно вращающихся звезд как трассеров звездного наклонения, а также применения высокоточной фотометрии для быстровращающихся звезд с большим коэффициентом гравитационного потемнения, позволяющей оценить спроецированное наклонение.

Библиографические ссылки

- Abbott B. P., 966 coauthors. The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914 // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2016. – Vol. 227. – P. 11.
- Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф. Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд. — Свердловск : Изд-во Урал. ун-та, 1990.
- Свечников М. А., Истомин Л. Ф., Грехова О. А. Разработка и применение простых критериев для массовой классификации затменных переменных звезд // Переменные звезды. — 1980. — Т. 21. — С. 413— 443.
- 4. *Холопов П. Н.* Общий каталог переменных звезд.— 4-е изд.— М. : Наука, 1985.
- Свечников М. А., Перевозкина Е. Л. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей звезд типа РГП. — Екатеринбург : Издво Урал. ун-та, 1999. — С. 1—5.
- Torres G., Andersen J., Gimenez A. Accurate masses and radii of normal stars: Modern results and applications // Astron. Astrophys. Rev. – 2010. – Vol. 18. – P. 56.
- 7. Claret A. New grids of stellar models including tidal-evolution constants up to carbon burning. I. From 0.8 to 125 M at Z = 0.02 // Astron. Astrophys. 2004. Vol. 919. P. 919–925.
- Russell H. N. On the advance of periastron in eclipsing binaries // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1928. - Vol. 88. - P. 641-643.

- Sterne T. E. Apsidal motion in binary stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1939. - Vol. 99. - P. 451-462.
- Cowling T. G. On the motion of the apsidal line in close binary systems // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1938. - Vol. 98. - P. 734-743.
- 11. Kopal Z. Close binary systems. L. : Chapman and Hall, 1959. P. 497.
- Kopal Z. Dynamics of Close binary systems. Dordrecht, Holland, Reidel, 1978. — P. 524.
- Martynov D. Y., Khaliullin Kh. F. On the relativistic motion of the periastron in the eclipsing binary system DI Herculis // Astrophys. Space. Sci. - 1980. - Vol. 71. - P. 147-170.
- Moffat J. W. The orbital motion of DI Herculis as a test of a theory of gravitation // Astrophys. J.— Pt. 2.— Letters to the Editor. — 1984. — Vol. 287. — P. 77—79.
- Dryomova G. N., Svechnikov M. A. Calculation of Tidal Evolution Constants for Close Binary Systems // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. - 2011. - Vol. 27. - P. 62-78.
- Holt J. R. Spectroscopic Determination of Stellar Rotation // Astronomy and Astro-Physics (The Sidereal Messenger). - 1893. - Vol. 12. - P. 646.
- 17. Rossitter R. A. On the detection of an effect of rotation during eclipse in the velocity of the brigher component of beta Lyrae, and on the constancy of velocity of this system // Astrophys. J. 1924. Vol. 60. P. 15-21.
- McLaughlin D. B. Some results of a spectrographic study of the Algol system // Astrophys. J. - 1924. - Vol. 60. - P. 22-31.
- Hosokawa Y. On the Rotation Effect of Velocity Curves in Eclipsing Binary Systems // Publication of Astronomical Society Japan. — 1953. — Vol. 5. — P. 89—95.
- Albrecht S., Reffert S., Snellen I. A. G., Winn J. N. Misaligned spin and orbital axes cause the anomalous precession of DI Herculis // Nature. – 2009. – Vol. 461. – P. 373–376.
- 21. Shakura N. I. On the Apsidal Motion in Binary Stars // Письма в Астрон. журн. — 1985. — Vol. 11. — Р. 536—541.
- Claret A., Torres G., Wolf M. DI Herculis as a test of internal stellar structure and general relativity. New apsidal motion rate and evolutionary models // Astron. Astrophys. - 2010. - Vol. 515. - P. 1-6.
- 23. Khaliullin Kh. F., Kozyreva V. S. Apsidal motion in the eclipsing binary AS Cam // Astrophys. Space. Sci. 1984. Vol. 94. P. 115-122.
- Pavlovski K., Southworth J., Kolbas V. Apsidal motion of the eclipsing binary AS Camelopardalis: discrepancy resolved // Astrophys. J. Lett. – 2011. – Vol. 734. – P. 29–34.

КАТАЛОГИ ДВОЙНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В БАЗЕ ДАННЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД ВDB

Д. А. Ковалева, О. Ю. Малков, П. В. Кайгородов

Институт астрономии Российской академии наук

База данных двойных звезд BDB, http://bdb.inasan.ru, объединяет данные каталогов двойных звезд всех наблюдательных типов. Мы описываем включение каталогов двойных переменных звезд в структуру базы данных.

CATALOGUES OF VARIABLE BINARIES IN THE BDB, BINARY STAR DATABASE

D. A. Kovaleva, O. Y. Malkov, P. V. Kaygorodov

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

The BDB, Binary star DataBase http://bdb.inasan.ru combines data of the catalogues of binary stars of all observational types. We describe the implementation of catalogues of binary variable stars into the database structure.

Введение

Большинство звезд, доступных для исследования, оказываются двойными. Доля двойных звезд зависит от спектрального класса/массы главного компонента, возрастая с ≈ 20 % для маломассивных М-карликов до $\approx 60 - 70$ % для звезд спектрального класса А и моложе [1]. Заметная часть двойных звезд (возможно, около 1/4, по оценке Токовинина [2]) при подробном исследовании обнаруживают более высокую кратность.

Двойственность звезд может проявляться для наблюдателя различными способами и соответственно существует целый ряд методов обнаружения и наблюдения двойных звезд. Именно этому факту обязано своим существованием понятие *наблюдательного типа* двойной. Исследователи, каталоги, идентификаторы, набор определяемых параметров — все это различается для звезд различных наблюдательных типов. При этом одни и те же двойные нередко могут наблюдаться различными способами, принадлежа, таким образом, к двум и более наблюдательным типам одновременно.

[©] Ковалева Д. А., Малков О. Ю., Кайгородов П. В., 2018

База данных двойных звезд BDB была создана для того, чтобы объединить данные каталогов двойных и кратных звезд различных наблюдательных типов для обеспечения возможности анализа этих данных в совокупности [3]. В силу высокой степени неоднородности данных, относящихся к объектам в двойных и кратных звездах, а также сложной структуры кратных звезд организация базы данных потребовала тщательной кросс-идентификации и обеспечения привязки данных к объектам [4]. Эта задача была решена путем введения трехуровневой структуры сущностей (система, пара, компонент) и создания на ее основе мастер-каталога Identification List of Binaries (ILB) [5].

В структуру BDB входит целый ряд каталогов, включающих данные о таких двойных звездах, двойственность которых обнаруживается по их переменности (затменно-двойных, катаклизмических двойных, рентгеновских двойных и др.). Далее мы обсудим особенности таких каталогов и их интеграции в BDB.

Общий каталог переменных звезд

ВDВ интегрирует, как правило, только данные каталогов, посвященных двойным звездам. Однако существует исключение, касающееся Общего каталога переменных звезд. Выделяется понятие т. н. базовых каталогов [6] для определенных наблюдательных типов, это каталоги, охватывающие большую часть звезд определенных типов, выделяющиеся по объему включенных параметров и пр. Для каждого наблюдательного типа двойных существует в среднем от одного до трех базовых каталогов, данные которых были интегрированы в BDB в первую очередь. Для всех типов двойных переменных звезд одним из базовых каталогов является Общий каталог переменных звезд, ОКПЗ [7].

Затменно-двойные звезды и их основные каталоги в BDB

Вероятно, затменно-двойные — самый представительный наблюдательный тип переменных двойных звезд, число таких звезд, обнаруженных в нашей Галактике и в Магеллановых Облаках, измеряется к настоящему времени сотнями тысяч. Основной вклад в быстрое увеличение числа известных затменно-двойных в течение последних

25 лет вносят в первую очередь проекты, ориентированные на поиск событий микролинзирования или переменности блеска (например, OGLE [8]; ASAS [9]; Kepler [10] и др.). Однако открытые такими методами затменные двойные чаще всего остаются в массе своей недоисследованными и неклассифицированными. В то же время в ОКПЗ количество каталогизированных затменно-переменных в основном каталоге лишь недавно (в версии 2017 г.) превысило 10 000, однако данные, доступные для этих звезд, обладают достаточной полнотой. В силу того что ОКПЗ ориентирован на предоставление информации о характеристиках переменности, а не двойственности звезд, много ценной информации содержится в комментариях к этому каталогу.

Из-за разнообразия морфологических и физических типов затменных переменных звезд достаточно большое число каталогов представляют собой в BDB для этих объектов не пересекающиеся источники информации. Не будем описывать их все, однако упомянем, что в каталогах затменно-двойных содержится относительно много (в сравнении с иными наблюдательными типами звезд) данных о физических характеристиках объектов. В частности, большим объемом таких данных мы обязаны трудам М. А. Свечникова с коллегами, которые на протяжении десятков лет работали над извлечением информации из кривых блеска затменных переменных звезд: каталоги Перевозкиной и Свечникова (1999) [11], Сурковой и Свечникова (2005) [12], Дремовой, Перевозкиной и Свечникова (2005) [13], Свечникова и Бессоновой (1984) [14], Бондаренко и Перевозкиной (1996) [15], Полушиной (2004) [16], Свечникова и Кузнецовой (1990) [17].

Наконец, упомянем каталог CEV (Catalogue of Eclipsing Variables) [18, 19], содержащий наиболее полный объем информации о затменных двойных с известными морфологическими типами (7 200 пар), для которых доступны данные, полученные путем объединения информации каталога и примечаний ОКПЗ с данными из других источников и публикаций, при применении разработанной авторами схемы определения физического типа и характеристик двойной по кривой блеска.

Проблема несоответствия количества открываемых затменнодвойных и возможностей исследователей изучать их наблюдательные характеристики для определения физической природы систем заставляет искать подходы к автоматизации процедуры классификации кривых блеска (см., например, [20–22]). Задачу делает ост-

роактуальной тот факт, что, как ожидается, несколько миллионов затменных двойных будут зарегистрированы по итогам миссии Gaia [23].

Другие наблюдательные типы переменных двойных звезд

Катаклизмические переменные звезды и их основные каталоги

Переменные звезды, демонстрирующие вспышки, — катаклизмические переменные, так же, как и затменные переменные, обнаруживаются фотометрическим путем. Известно около 2000 таких пар. Помимо ОКПЗ основными каталогами для этого наблюдательного типа двойных (пересекающимися, но не перекрывающими данные друг друга) являются каталоги Ritter & Kolb [24] (регулярно обновлявшийся до 2016 г.) и Downes et al. [25]. Данные для этих двойных отличаются высокой степенью неоднородности, но, как правило, включают сведения о характеристиках орбиты (период, ограничения на угол наклонения), морфологическом типе переменной, относительные характеристики компонентов.

Существуют и иные двойные с переменностью блеска (запятненные, эллипсоидальные, отражающие...), для всех этих наблюдательных типов основным каталогом остается ОКПЗ.

Переменные двойные звезды, обнаруживаемые вне оптического диапазона

Некоторые двойные звезды обнаруживают себя как переменные вне оптического диапазона. Среди них упомянем рентгеновские двойные (частично информация о них включена в уже упомянутый каталог Ritter & Kolb, RK). Таких объектов известно около 300, и в BDB они представлены, помимо RK, базовыми каталогами Liu et al.: Catalog of Galactic Low-Mass X-Ray Binaries LMXB [26], Catalog of Galactic High-Mass X-Ray Binaries HMXB [27]. Кроме того, известны более 200 двойных, обнаруженных в радиодиапазоне благодаря вариациям потока излучения пульсара, являющегося одним из компонентов. Основным каталогом для этих объектов является ATNF Pulsar Catalog [28]. Работа по отождествлению переменных двойных, обнаруженных вне оптического диапазона, с оптическими источни-

ками, благодаря чему стало возможно включить их в индекс-каталог ILB и, таким образом, в базу данных BDB, была проделана Малковым и др. [29].

Наконец, уже известен, хотя по понятным причинам еще не каталогизирован, новый наблюдательный тип двойных — гравитационноволновые.

Переменные двойные звезды в пространстве параметров двойных



Возможные пересечения между наблюдательными типами двойных звезд: Vis — визуальные, Orb — орбитальные, Int — интерферометрические, Occ — обнаруживаемые при затмении Луной, Ast — астрометрические, CPM — с общим собственным движением, EB — затменные, SB — спектрально-двойные, CV — катаклизмические, XRB — рентгеновские, Rad — радио (один из компонентов пульсар), GW — гравитационноволновые

При каталогизировании двойных звезд по наблюдательным типам создается впечатление, что они представляют собой отдельные популяции. Разумеется, на самом деле все наблюдательные типы

двойных — это подмножества одной и той же популяции, разделенные в отношении наблюдаемых проявлений, но физически зачастую пересекающиеся.

На рисунке символически изображены пересечения между основными наблюдательными типами двойных. Размеры областей не соответствуют населенностям наблюдательных типов, но выбраны для того, чтобы адекватно отображать возможные пересечения между ними.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-07-01162 и программы Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Библиографические ссылки

- Duchêne G., Kraus A. Stellar Multiplicity // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2013. Vol. 51. P. 269-310.
- Tokovinin A. From Binaries to Multiples. II. Hierarchical Multiplicity of F and G Dwarfs // Astron. J. - 2014. - Vol. 147. - P. 87. 1401.6827.
- Kaygorodov P., Debray B., Kolesnikov N. et al. The New Version of the Binary Star Database (bdb) // Baltic Astronomy. — 2012. — Vol. 21. — P. 309—318.
- Kovaleva D., Kaygorodov P., Malkov O. et al. Binary star DataBase BDB development: Structure, algorithms, and VO standards implementation // Astronomy and Computing. – 2015. – Vol. 11. – P. 119–125.
- Malkov O., Karchevsky A., Kaygorodov P., Kovaleva D. Identification list of binaries // Baltic Astronomy. - 2016. - Vol. 25. - P. 49-52.
- Kovaleva D. Astronomical data resources for binary and multiple stars // Baltic Astronomy. – 2015. – Vol. 24. – P. 446–452.
- Samus' N. N., Kazarovets E. V., Durlevich O. V. et al. General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1 // Astronomy Reports. - 2017. --Vol. 61. - P. 80-88.
- Soszyński I., Pawlak M., Pietrukowicz P. et al. The OGLE Collection of Variable Stars. Over 450 000 Eclipsing and Ellipsoidal Binary Systems Toward the Galactic Bulge // Acta Astronomica. — 2016. — Vol. 66. — P. 405—420. 1701.03105.
- Paczyński B., Szczygiel D. M., Pilecki B., Pojmański G. Eclipsing binaries in the All Sky Automated Survey catalogue // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2006. - Vol. 368. - P. 1311-1318. astro-ph/0601026.

- Kirk B., Conroy K., Prša A. et al. Kepler Eclipsing Binary Stars. VII. The Catalog of Eclipsing Binaries Found in the Entire Kepler Data Set // Astron. J. – 2016. – Vol. 151. – P. 68. 1512.08830.
- Perevozkina E. L., Svechnikov M. A. VizieR Online Data Catalog: Catalog of eclipsing binaries parameters (Perevozkina+, 1999) // VizieR Online Data Catalog. - 2004. - Vol. 5118.
- 12. Surkova L. P., Svechnikov M. A. Vizie
R Online Data Catalog: Semi-detached eclipsing binaries (Surkova+, 2004) // Vizie
R Online Data Catalog.- 2004.- Vol. 5115.
- Dryomova G., Perevozkina E., Svechnikov M. Catalogue of the orbital elements, masses, and luminosities for short-periodic RS CVn-type eclipsing systems // Astron. Astrophys. 2005. Vol. 437. P. 375–381.
- Svechnikov M. A., Bessonova L. A. A Catalogue of Orbital Elements Masses and Luminosities of Close Double Stars // Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires. — 1984. — Vol. 26. — P. 99.
- Bondarenko I. I., Perevozkina E. L. The Catalogue of Photometric, Geometrical and Absolute Elements of Contact Binary Stars of the Early Spectral Type // Odessa Astronomical Publications. — 1996. — Vol. 9. — P. 20.
- 16. Polushina T. S. Vizie
R Online Data Catalog: Catalog of massive close binaries (Polushina, 2004)
 // Vizie R Online Data Catalog (other).- 2011.
 - Vol. 440.
- 17. Svechnikov M. A., Kuznetsova E. F. VizieR Online Data Catalog: Approximate elements of eclipsing binaries (Svechnikov+, 1990) // VizieR Online Data Catalog. 2004. Vol. 5124.
- Avvakumova E. A., Malkov O. Y., Kniazev A. Y. Eclipsing variables: Catalogue and classification // Astronomische Nachrichten. — 2013. — Vol. 334. — P. 860.
- Malkov O. Y., Oblak E., Snegireva E. A., Torra J. A catalogue of eclipsing variables // Astron. Astrophys. - 2006. - Vol. 446. - P. 785-789.
- Armstrong D. J., Kirk J., Lam K. W. F. et al. K2 variable catalogue II. Machine learning classification of variable stars and eclipsing binaries in K2 fields 0-4 // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2016. - Vol. 456. - P. 2260-2272. 1512.01246.
- Avvakumova E. A., Malkov O. Y. Assessment of evolutionary status of eclipsing binaries using light-curve parameters and spectral classification // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 444. — P. 1982—1992. 1408.0870.
- Malkov O., Kalinichenko L., Kazanov M. D., Oblak E. Data Mining in Astronomy: Classification of Eclipsing Binaries // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII / ed. by R. W. Argyle, P. S. Bunclark,

J. R. Lewis : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - 2008. - Vol. 394. - P. 381.

- Kochoska A., Mowlavi N., Prša A. et al. Gaia eclipsing binary and multiple systems. A study of detectability and classification of eclipsing binaries with Gaia // Astron. Astrophys. 2017. Vol. 602. P. A110. 1703.09362.
- 24. Ritter H., Kolb U. VizieR Online Data Catalog: Cataclysmic Binaries, LMXBs, and related objects (Ritter+, 2004) // VizieR Online Data Catalog. 2011. Vol. 1.
- Downes R. A., Webbink R. F., Shara M. M. et al. VizieR Online Data Catalog: Catalog of Cataclysmic Variables (Downes+ 2001-2006) // VizieR Online Data Catalog. - 2006. - Vol. 5123.
- Liu Q. Z., Paradijs J. van, Heuvel E. P. J. van den. A catalogue of lowmass X-ray binaries in the Galaxy, LMC, and SMC (Fourth edition) // Astron. Astrophys. – 2007. – Vol. 469. – P. 807–810. 0707.0544.
- Liu Q. Z., Paradijs J. van, Heuvel E. P. J. van den. Catalogue of highmass X-ray binaries in the Galaxy (4th edition) // Astron. Astrophys. – 2006. – Vol. 455. – P. 1165–1168. 0707.0549.
- Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M. VizieR Online Data Catalog: ATNF Pulsar Catalogue (Manchester+, 2005) // VizieR Online Data Catalog. - 2016. - Vol. 1.
- Malkov O. Y., Tessema S. B., Kniazev A. Y. Binary star database: binaries discovered in non-optical bands // Baltic Astronomy. — 2015. — Vol. 24. — P. 395—402.

ОТКРЫТИЕ ГЛУБОКИХ ЗАТМЕНИЙ В КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ IPHAS J051814.33+294113.0

В. П. Кожевников

Уральский федеральный университет

Мы открыли глубокие затмения в катаклизмической переменной IPHAS J051814.33+294113.0. Средняя глубина затмений равна $(2.3\pm0.1)^m$. Из анализа времен затмений мы определили орбитальный период с высокой точностью, $P_{\rm orb} = 0.20603117(54)$ суток.

DISCOVERY OF DEEP ECLIPSES IN THE CATACLYSMIC VARIABLE IPHAS J051814.33+294113.0

V. P. Kozhevnikov Ural Federal University

We discovered deep eclipses in the cataclysmic variable IP-HAS J051814.33+294113.0. The average eclipse depth is equal to $(2.3\pm0.1)^m$. From the analysis of eclipse times we obtained the orbital period with high precision, $P_{\rm orb} = 0.20603117(54)$ days.

Катаклизмические переменные являются взаимодействующими двойными звездами, в которых белый карлик аккрецирует вещество от звезды-компаньона – красного карлика. Значительный интерес представляют катаклизмические переменные, в которых наблюдаются затмения. Затмения позволяют надежно определить параметры двойной системы и исследовать структуру аккреционного диска.

О звезде IPHAS J051814.33+294113.0 (в дальнейшем J0518) известно, что она показывает в спектрах эмиссионные линии, типичные для катаклизмических переменных. Эти линии имеют двухпиковую форму, что может означать большое наклонение орбиты. В феврале 2016 г. на 70-см телескопе и многоканальном фотометре мы провели пробные наблюдения J0518 и отчетливо обнаружили глубокие затмения, достигающие 2.2^m . Дальнейшие наблюдения были проведены в декабре 2016 – январе 2017 г. На рис. 1 приведена одна из кривых блеска. Всего мы пронаблюдали 10 затмений. Средняя глубина затмений равна $(2.3\pm0.1)^m$. Из анализа времен затмений орбитальный период определен с высокой точностью, $P_{\rm orb} = 0.20603117(54)$ суток.

[©] Кожевников В. П., 2018

³¹²



Рис. 1. Кривая блеска J0518, показывающая последовательные затмения

Во время наблюдений внезатменный блеск J0518 показывал изменения от 15.6^m до 17.9^m . Долговременная кривая блеска J0518 в обзоре транзиентов Каталины (http://nesssi.cacr.caltech. edu/catalina/20010514/105141290254100026p.html), полученная в течение 12 лет, говорит о том, что J0518 может принадлежать к антикарликовым новым (подтип VY Scl). С этим согласуется параболическая форма затмения (рис. 2).



Рис. 2. Форма затмения, полученная в максимуме блеска (15.6^m)

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

313

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ КАРЛИКОВЫХ ЗВЕЗД FR Cnc и V 772 Her

А. В. Кожевникова¹, И. Ю. Алексеев², В. П. Кожевников¹

¹ Уральский федеральный университет, ² Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Представлены новые многоцветные фотометрические наблюдения двух карликовых активных звезд FR Cnc и V772 Her, проведенные в астрономической обсерватории УрФУ и Крымской астрофизической обсерватории. Получены параметры запятненности фотосфер звезд в рамках зональной модели и выполнен анализ эволюционных изменений пятен на протяжении нескольких лет. Также приводится анализ оптической вспышки, зарегистрированной на FR Cnc в 2010 г.

SPOT ACTIVITY OF DWARF STARS FR Cnc AND V 772 Her

A. V. Kozhevnikova¹, I. Yu. Alekseev², V. P. Kozhevnikov¹ ¹Ural Federal University, ²Crimean astrophysical observatory

We present new multicolor photometric observations of two active dwarf stars FR Cnc and V772 Her. Observations were carried out at the observatory of Ural Federal University and at Crimean astrophysical observatory. We obtained star's spot parameters according to the zonal model and analyzed evolutionary changes of spots with time. And we present an analysis of an optical flare, detected on FR Cnc in 2010.

Многие звезды поздних спектральных классов с внешними конвективными оболочками обладают сильными магнитными полями и проявляют активность, аналогичную активности Солнца, но выраженную в большем масштабе. В данной работе проводится анализ новых многоцветных фотометрических наблюдений двух активных звезд FR Cnc и V772 Her (спектральные классы K7V и G0V+G5V соответственно), полученных в 2010–2012 гг. в астрономической обсерватории УрФУ и Крымской астрофизической обсерватории. На кривых блеска обеих звезд наблюдается вращательная модуляция,

[ⓒ] Кожевникова А. В., Алексеев И. Ю., Кожевников В. П., 2018

³¹⁴

вызванная темными фотосферными пятнами с амплитудой переменности в полосе V от 0.05^m у V772 Her до 0.14^m у FR Cnc. Приведены результаты моделирования запятненности в рамках обновленной зональной модели. С помощью новой версии зональной модели запятненности звездных фотосфер можно теперь рассматривать одновременное присутствие на звезде двух активных долгот. Для анализа запятненности использовались как наши собственные наблюдения, так и опубликованные в литературе фотометрические данные. Таким образом, временной интервал, на котором анализировалась запятненность фотосфер, составил 9 лет для FR Cnc и 5 лет для V772 Her соответственно. Такая длинная база позволила выполнить анализ изменения характеристик пятенной активности с течением времени и сделать оценки эволюционных изменений пятен. Также был выполнен поиск возможной цикличности как по полученным параметрам пятен, так и по долговременному изменению фотометрического блеска. Показано, что во все эпохи пятна занимали низкои среднеширотные области, от 3 до 57°, максимальная площадь запятненности составляла, как правило, несколько десятков процентов поверхности звезды, меняясь в зависимости от наблюдательного сезона. Разности температур между спокойной фотосферой и пятнами составляли 1650 К (FR Cnc) и 1890 К (V772 Her). 3 февраля 2010 г. в момент, соответствующий HJD = 2455231.3136, на FR Спс была зарегистрирована вспышка. Максимальная амплитуда 0.11^m наблюдалась в полосе B, амплитуды в полосах V, R, I составили 0.04, 0.03 и 0.02^m соответственно, длительность вспышки — 32.5 мин. Отмечается, что вспышка произошла вблизи фазы максимальной запятненности звезды. Вычислена полная энергия вспышки 2.4×10^{33} и 1.3×10^{33} эрг в полосах В и V соответственно. Обнаружено послесвечение вспышки — общее увеличение блеска звезды после вспышки по сравнению с предвспышечным уровнем на 0.02^m в полосе В.

Работа А. В. Кожевниковой и В. П. Кожевникова была проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006). Работа И. Ю. Алексеева была выполнена в рамках тематического проекта КРАО РАН «Магнитная активность на звездах».

ШИРОКИЕ ДВОЙНЫЕ СРЕДИ БЛИЗКИХ КАРЛИКОВ: ОТ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДО СТАТИСТИКИ

А. М. Куликова

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Необходимость верификации моделей звездообразования и релизов миссии Gaia делает актуальным поиск двойных систем среди маломассивных карликов. Прогресс пулковской программы изучения звезд с большими собственными движениями идет в направлениях поиска звезд с вариациями собственного движения и звезд, имеющих значимые эллиптичность и/или асимметрию изображений. В результате выявлено 120 $\Delta \mu$ -двойных и 138 объектов, отличающихся деформациями изображений. Двойственность звезд J0259+3636 и J1158+4239 подтверждена в ходе спекл-наблюдений. Предварительная оценка доли двойных систем, построенная на основе полученного материала, значимо больше общепринятых значений.

WIDE BINARIES AMONG NEARBY DWARFS: FROM DETECTION TO STATISTICS

A. M. Kulikova

Pulkovo Observatory

Searching for binaries among nearby low-mass dwarfs is significant for verification of scenarios of star formation and data of Gaia mission releases. A progress of Pulkovo program of investigation of stars with large proper motions is focused in searching of stars with variations of proper motion and stars with significant ellipticity and/or asymmetry of images. As a result, 120 $\Delta\mu$ -stars and 138 stars with deformed images were detected. Binarity of J0259+3636 and J1158+4239 have been confirmed with speckle observations. Preliminary estimation of binary fraction based on obtained data is significantly bigger then conventionally adopted.

Существует две фундаментальные причины, мотивирующие к поиску новых двойных систем среди маломассивных карликов. Доля

[©] Куликова А. М., 2018



двойных для данной популяции известна из наблюдений очень приблизительно и в то же время является одним из результатов численных моделей процесса звездообразования. Вторая причина — проблемы детектирования двойных звезд в Gaia.

В рамках пулковской программы изучения звезд с большими собственными движениями для поиска двойных систем применялись два подхода: выявление признаков нелинейности в движении фотоцентра ($\Delta \mu$ -двойные); анализ снимков для выявления тесных изображений (SDSS + данные телескопа «Сатурн»). Из почти 2 000 объектов ($\mu > 300 \ mas/yr$, $12^m < mag < 18^m$) отобрано 120 $\Delta \mu$ -звезд и 138 звезд [1], изображения которых имеют заметную деформацию относительно звезд фона.

Наиболее яркие (mag < 13^m) из этих звезд были включены в программы спекл-наблюдений БТА САО РАН и 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ. Была подтверждена двойственность звезд J0259+3636 и J1158+4239 [2].

Оба метода детектирования, упомянутые выше, обременены эффектами селекции. Поэтому для достижения полноты обзора двойных систем среди маломассивных звезд ($M < 0.5 M_{\odot}$) ведется работа по созданию базы данных, в которую войдут по-возможности все известные системы.

На основании проделанной работы можно говорить о том, что среди близких карликов с массами от 0.2 до 0.5 M_{\odot} порядка 20 % объектов оказываются сравнительно широкими двойными системами с пространственными разделениями от нескольких десятков до сотен а. е. Полученная предварительная оценка доли двойных систем контрастирует с общепринятыми оценками (порядка 20 % для всех типов двойных).

Библиографические ссылки

- 1. Ховричев М. Ю., Апетян А. А., Рощина Е. А. и др. Поиск двойных систем среди близких карликов на основе пулковских наблюдений и данных обзора SDSS // Письма в Астрон. журн. 2018. Т. 44. С. (В печати.).
- Ховричев М. Ю., Куликова А. М., Соков Е. Н. и др. Детектирование двойственности звезды J1158+4239 // Письма в Астрон. журн. 2016. Т. 42. С. 754—761.

ЗАТМЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В МОСКОВСКОЙ ПРОГРАММЕ СКАНИРОВАНИЯ ФОТОТЕКИ

Н. Н. Самусь^{1,2}, С. В. Антипин², А. М. Зубарева^{1,2}, Д. М. Колесникова¹

¹Институт астрономии Российской академии наук, ²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ

Рассматриваются результаты полуавтоматического поиска затменных переменных звезд по сканам московской коллекции астронегативов и особенности распределения обнаруженных затменных переменных по периодам.

ECLIPSING VARIABLE STARS IN THE MOSCOW PROGRAM FOR SCANNING THE ASTRONOMICAL PLATE STACKS

N. N. Samus^{1,2}, S. V. Antipin², A. M. Zubareva^{1,2}, D. M. Kolesnikova¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy os Sciences, ²Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow University

We consider the results of our semi-automated search for eclipsing variables using scans of the Moscow astronomical plate stacks and characteristics of the eclipsing variables' distribution over periods.

Фототека ГАИШ — самое богатое собрание прямых фотографий звездного неба в Российской Федерации. Эта старейшая астрономическая фототека была основана С. Н. Блажко в 1895 г. Фотографирование звездного неба продолжалось на разных телескопах до середины 1990-х гг. Всего в фототеке около 60 000 пластинок и пленок (преимущественно пластинок). Фотографирование проводилось для разных научных задач, но особенно планомерно и систематически — для целей исследования переменных звезд. Наибольшую важность для этих задач имеют фотопластинки 40-см астрографа (f = 160 см, поле $10 \times 10^{\circ}$, фотометрическая система близка к *В* Джонсона, предельная величина лучших снимков с экспозицией 45 минут — около 17—18^m), перевезенного в СССР из Зоннебергской обсерватории

[©] Самусь Н. Н., Антипин С. В., Зубарева А. М., Колесникова Д. М., 2018

³¹⁸

(Германия) в счет репараций. Всего на этом инструменте получено около 22 300 негативов. С мая 1958 г. телескоп расположен в Крымской лаборатории ГАИШ МГУ (пос. Научный), где он стал первым введенным в строй инструментом.

Астрономические фототеки до сих пор хранят ценный для науки материал, полное использование которого на основе современных технологий требует перехода от аналоговой к цифровой форме хранения информации. Помимо удобства использования оцифровка фототек позволит застраховаться от их гибели в авариях, подобных случившейся на Гарвардской обсерватории (США). Она хранит крупнейшую в мире фототеку — около 500 000 прямых снимков неба. 18 января 2016 г. точно под фототекой произошел прорыв водопроводной трубы высокого давления, под водой оказалось несколько стеллажей с фотопластинками. Благодаря удивительно эффективной работе служб спасения пластинки в основном удалось сохранить, но будущие происшествия могут завершиться менее удачно. С 2006 г. ведется сканирование московской фототеки, с 2013 г. работы переведены на сканер Epson Expression 11000XL (с разрешением 2400 dpi), что позволило избежать ухудшения предельной звездной величины сканов по сравнению с оригиналами. Работа организована таким образом, чтобы сразу после завершения сканирования всех пластинок одного звездного поля проводился поиск новых переменных звезд. Открываемые по программе переменные звезды получают обозначения в системе MDV (Moscow Digital Variable). К ноябрю 2017 г. были присвоены обозначения MDV 1 — MDV 595. Ко времени проведения нашей конференции обозначения получат еще около 300 звезд этой серии в поле в созвездии Геркулеса: результаты их исследования сейчас проходят завершающую подготовку к печати.

Среди обнаруживаемых новых переменных звезд заметную долю составляют затменные двойные. Уже в первых работах по изучению MDV-звезд мы обнаружили отличие их распределения по периодам от распределения для затменных из ОКПЗ. Распределение для звезд MDV заметно смещено в сторону коротких периодов. Предположительно это связано с неудачами при определении коротких периодов в прошлом, при использовании традиционных методов, не опиравшихся на высокопроизводительные компьютеры. В нашем докладе будут представлены кривые блеска избранных затменных переменных звезд, открытых по московской программе сканирования, и рассмотрено распределение по периодам для выборки затменных переменных звезд серии MDV, расширенной с учетом новых открытий.

ВОЗМОЖНО ЛИ ЧАСТИЧНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В КОМПОНЕНТАХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ?

Е. И. Старицин

Уральский федеральный университет

Данные об абсолютных элементах компонент двойных систем, находящихся на стадии горения водорода и относящихся к ранним спектральным подклассам В, проанализированы с привлечением моделей звезд, построенных с учетом частичного перемешивания вещества лучистой оболочки и конвективного ядра. Имеющиеся данные о массах, размерах и светимостях компонент двойных систем допускают возможность частичного перемешивания в их недрах аналогично перемешиванию в одиночных В-звездах главной последовательности таких же спектральных подклассов. Имеющихся данных недостаточно для того, чтобы наложить строгие ограничения на величину частичного перемешивания и выявить количественные различия в перемешивании у компонент двойных систем и одиночных звезд, если таковые имеются.

IS THERE PARTIAL MIXING IN THE BINARY SYSTEM COMPONENTS?

E. I. Staritsin Ural Federal University

The absolute elements of binary system components which are main sequence early type B-stars are analysed on the base of stellar models taking into account partial mixing of material in the radiative envelope and convective core. The data on masses, radii and luminosities of components, we have got by now, confirm the presence of partial mixing in the interiors of components. That data are not sufficient to put a restriction on the power of partial mixing and to find out a difference of partial mixing in the binary components and the single stars.

Одиночные В-звезды ранних спектральных подклассов показывают увеличение поверхностного содержания гелия к концу эволюции на главной последовательности [1, 2]. Причина такого увеличения может заключаться в частичном перемешивании вещества лучи-

[©] Старицин Е. И., 2018

³²⁰

стой оболочки и конвективного ядра при умеренном вращении звезды вследствие действия гидродинамических явлений переноса: сдвиговой турбулентности, полуконвекции и дополнительного перемешивания вещества в центральной части звезды (overshooting) [3, 4]. Перемешивание сопровождается дополнительным увеличением массы синтезированного гелия и светимости звезды на главной последовательности по сравнению со стандартным случаем эволюции.

Для анализа возможного влияния частичного перемешивания вещества на соотношение масса—светимость привлечены надежные данные о массах и светимостях компонент двойных систем с массами $7 \leq M/M_{\odot} \leq 23$, собранные в работе [5]. Линейные регрессии средних значений lg R и lg L по lg M определены методом наименьших квадратов:

 $lg R = (0.08 \pm 0.10) + (0.64 \pm 0.09) lg M,$ $lg L = (0.94 \pm 0.18) + (3.01 \pm 0.17) lg M.$

Стандартная ошибка оценки среднего значения $\lg R$ составляет 0.07, для $\lg L = 0.11.$

Теоретическое соотношение масса-светимость построено на основе моделей звезд с массами 6, 8, 12, 16, 20 и 24 M_{\odot} , рассчитанных с учетом модельного частичного перемешивания вещества лучистой оболочки и конвективного ядра. В качестве свободного параметра принято увеличение поверхностного отношения числа ядер гелия и водорода $\Delta (N_{He}/N_H)$ к концу эволюции на главной последовательности. Рассчитано три системы эволюционных треков: при $\triangle(N_{He}/N_{H}) = \{0, 40, 80\%\}$. Увеличение массы гелия, синтезированного за время эволюции на главной последовательности, при таких значениях параметра $\triangle(N_{He}/N_H)$ соответствует значениям, полученным в [3, 4]. В каждой системе эволюционных треков определен относительный возраст t/t_{MS} каждого компонента по значениям его массы и радиуса, t — возраст компонента, t_{MS} — время жизни компонента на главной последовательности. Средний относительный возраст наблюдаемой выборки компонент составляет 0.40, 0.43 и 0.47 при $\Delta(N_{He}/N_H)$, равном соответственно 0, 40 и 80 %. Теоретические соотношения масса-светимость и масса-радиус определены в каждой системе эволюционных треков для соответствующего среднего относительного возраста выборки компонент.

Вследствие примененной методики теоретические соотношения масса—радиус удовлетворяют статистической зависимости при всех



Соотношения масса—радиус (а) и масса—светимость (b). Показаны массивные компоненты (заполненные значки) и спутники (открытые значки) двойных систем. Показаны отклонения вверх и вниз на величину одной стандартной ошибки от статистической оценки зависимости средних значений радиуса (а) и светимости (b) компонент от массы (пунктир), а также теоретические соотношения масса—радиус (a) и масса—светимость (b) для среднего относительного возраста выборки компонент двойных систем для вариантов эволюции без частичного перемешивания (сплошная линия) и когда увеличение поверхностного отношения числа ядер гелия и водорода к концу эволюции на главной последовательности $\Delta(N_H e/N_H)$ составляет 40 % (штрих) и 80 % (штрих-пунктир)

значениях $\Delta(N_{He}/N_H)$ и практически совпадают друг с другом (см. рисунок). Теоретические соотношения масса—светимость зависят от величины массы гелия, дополнительно синтезированного на главной последовательности по сравнению со стандартным случаем эволюции. Однако отклонение теоретических соотношений от статистической оценки среднего значения светимости в зависимости от массы для наблюдаемой выборки компонент не превышает стандартной ошибки.

Таким образом, дополнительное увеличение светимости на главной последовательности, сопровождающее частичное перемешивание вещества лучистой оболочки и конвективного ядра, необходимое для объяснения наблюдаемого увеличения поверхностного содержания гелия у одиночных В-звезд к концу их эволюции на главной последовательности, не приводит к противоречиям с надежными данными о массах и светимостях звезд.

Имеющихся данных недостаточно, чтобы сделать выбор между вариантами эволюции компонент двойных систем с частичным перемешиванием вещества лучистой оболочки и конвективного ядра и стандартным на основе анализа соотношения масса—светимость.

Часть работ проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Библиографические ссылки

- Lyubimkov L. S., Rostopchin S. I., Lambert D. L. Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars. III. An analysis of helium lines in spectra of 102 stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2004. — Vol. 375. — P. 745.
- 2. Huang W., Gies D. R. Stellar rotation in young clusters. II. Evolution of stellar rotation and surface helium abundance // Astrophys. J. 2006. Vol. 648. P. 591.
- Staritsin E. I. Enhancement of surface helium abundance in intermediatemass main-sequence stars // Astron. Rep. – 2014. – Vol. 58. – P. 808.
- Staritsin E. I. Partial mixing in early-type main-sequence B stars // Astron. Rep. 2017. Vol. 61. P. 450.
- Malkov O. Yu. Mass-luminosity relation of intermediate-mass stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2007. – Vol. 382. – P. 1073.
Из истории науки



М. А. СВЕЧНИКОВ — НАШ УЧИТЕЛЬ

Т. С. Полушина

Астрономическая обсерватория Ур Φ У

Свечников Марий Анатольевич родился 28 января 1933 г. в Одессе. В 1941 г. с последним катером он покидает город. Окончил школу в Махачкале в 1949 г., затем Ленинградский университет в 1954 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Спектрофотометрическое исследование затменных переменных звезд U Sge и λTau » в 1959 г. Доктор физико-математических наук (1987), профессор (1988). Был главным научным сотрудником Коуровской астрономической обсерватории Уральского университета (1993—2009).

Свою трудовую деятельность Марий Анатольевич начинает в 1954 г. в Ленинграде сначала в пединституте, затем в Ленинградском государственном университете. В 1957 г. его посылают в Бюракан в качестве руководителя экспедиции для создания наблюдательной станции Ленинградского университета на территории Бюраканской обсерватории. В 1964 г. по приглашению Клавдии Александровны Бархатовой приезжает на работу в Свердловск, в Уральский университет. Исследовательская деятельность Мария Анатольевича началась раньше. Первые публикации его относятся к 1951 г., когда он являлся студентом второго курса. Первые научные интересы связаны с изучением поверхности Луны с помощью затмений, контуров земной тени, распределения яркости по диску спутника и с наблюдениями Персеид.

Интерес к переменным звездам появляется еще в ленинградский период: «EpsAur, U Sge и λTau , спектрофотометрические исследования и изучение изменений периода». И это становится темой его кандидатской диссертации в 1959 г. После защиты диссертации он едет в Бюракан, там создается учебная обсерватория Ленинградского университета на площадке Бюраканской обсерватории. Под руководством В. А. Домбровского, совместно с В. Г. Гаген-Торном, готовит к наблюдениям зеркальный 20" телескоп с астрофотометром для фотографических, колориметрических и поляриметрических исследований. Там же создает свою семью с Эльвирой Федоровной Кузнецовой, которая станет его соратником и активным соавтором в будущем.

[©] Полушина Т. С., 2018

В 1964 г. по приглашению Клавдии Александровны Бархатовой Свечников становится преподавателем кафедры астрономии и геодезии Уральского университета. Марий Анатольевич был одним из лучших лекторов на физическом факультете. Он подготовил и много лет читал лекционные курсы «Теоретическая астрофизика», «Дополнительные главы теоретической астрофизики», «Переменные звезды», «Общая астрофизика», «Общая астрономия» (для физиков), «Методы размерностей и подобия», «Курс физики и эволюции звезд» для студентов математической специальности, «Курс физики Космоса» для студентов физического факультета, «Курс основ естествознания» для гуманитарных и общественных факультетов, курсы «Проблемы современной астрофизики», «Физическая география и геофизика в естествознании» для студентов педагогических вузов.

Диапазон его интересов необычайно широк. Он занимается подводным плаванием, он знал флору и фауну Черного моря лучше, чем местные рыбаки. Жить на Урале и не увлекаться минералогией это не про Мария Анатольевича. Этим он заражает всех сотрудников и студентов кафедры. А до чего горячи были его политинформации! Но самая большая страсть — наука. Он продолжает тему своей кандидатской работы «Затменные переменные звезды». Это основная тема всей его последующей научной деятельности. К 60-м гг. начинает накапливаться материал по ТДС, появляются первые каталоги с данными по двойным звездам, в том числе и содержащие абсолютные элементы: (Лавров, 1955) для 67, (Kopal, Shepley, 1956) для 83. Появляются работы (Wood, 1963; Hack, 1963), которые используют эти каталоги для сравнительного анализа, выполняются статистические и на их основе теоретические исследования. Однако в этих работах приведены данные о небольшом количестве звезд и только массы, радиусы и спектральные классы.

С 1962 г. с целью увеличения базы данных М. А. Свечников начинает создавать карточный каталог со сведениями об относительных и абсолютных элементах ТДС. Каталог содержит 197 систем; он ложится в основу опубликованного в 1969 г. Каталога орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Согласно классификации (Kopal, 1955, 1959) все системы были разделены на группы по степени близости их внутренним критическим эквипотенциальным поверхностям. И, кроме того, проведено разделение на группы по положению компонентов на диаграмме Г—Р. Это разделение было сделано для удобства дальнейшего статистического исследования их характеристик и позволило судить об изменении послед-

них с изменением q (отношением масс компонент). Эта величина для систем, находящихся в ранней стадии эволюции, весьма существенно влияет на дальнейшую их судьбу, а для систем, в значительной мере проэволюционировавших, может свидетельствовать об их начальных характеристиках. Таким образом, была создана новая классификационная схема ТДС. Каталог содержит богатейшую библиографию источников данных. В него вошли 43 разделенные системы главной последовательности, 64 полуразделенные системы, 16 разделенных субгигантов, 10 систем типа AR Lac, 18 контактных типа W UMa и 8 контактных систем ранних спектральных классов, 15 гигантских и сверхгигантских систем и 10 систем, имеющих одной из компонент горячий субкарлик или белый карлик. Это позволило оценить основные характеристики каждого из представленных типов затменных переменных, а для наиболее многочисленных из них найти некоторые статистические закономерности. Сравнение с теорией позволило интерпретировать эти типы и многие их особенности как различные эволюционные фазы ТДС с различными начальными массами компонент и расстояниями между ними и сделать некоторые выводы об определенных этапах эволюции систем и их эволюционной истории.

В 1970—1972 гг. выходит серия работ М. А. Свечникова в соавторстве с Л. П. Сурковой, в которых он продолжает диссертационную тематику исследования изменения периодов у двойных звезд и потерю вещества в процессе их эволюции. В результате сделана оценка массы, теряемой во внешнее пространство тесными двойными системами в процессе их эволюции. Показано, что тесные двойные звезды играют значительную роль в пополнении межзвездной среды газовой материи, служащей для дальнейшего звездообразования в нашей Галактике. Грубая оценка составляет $\delta m \geq m_{\odot}$ в год.

С декабря 1972 по март 1976 г. М. А. Свечников находится в командировке в Алжирской Народной Республике, где читает два лекционных курса на французском языке: «Практическая астрофизика» и «Теоретическая астрофизика», а также факультативы и обзорные лекции для физического и других естественных факультетов университета, готовит методические пособия. В Алжире он все свободное время отдавал восстановлению алжирской обсерватории и подготовке ее персонала, проводил фотографические наблюдательные работы на нормальном астрографе 0.32.

После возвращения продолжается работа по накоплению статистического материала по ТДС. Совместно с Л. Ф. Истоминым и О. А. Грековой по материалам карточного каталога фотометриче-

ских элементов тесных двойных звезд М. А. Свечникова построены гистограммы распределения затменных переменных различных типов по глубинам минимумов, периодам и спектрам главных компонентов. На основании полученных распределений разработаны критерии для массовой классификации затменных систем. Авторами показано, что по приведенным выше простым параметрам можно определить тип затменной переменной с надежностью более 90 %. Полученные критерии в данной работе использованы для массовой классификации всех затменных переменных из ОКПЗ и III дополнений к нему. Всего — данные о типах 4704 затменных переменных.

С 1969 по 1981 г. публикации многочисленных новых результатов, относящихся как к фотометрическим, так и к спектроскопическим данным о затменных двойных скомпилированы Свечниковым в карточном каталоге и потребовали ревизии данных в каталоге Свечникова (1969). Были обновлены результаты вплоть до 1981 г. и представлены в новом каталоге орбитальных элементов масс и светимостей тесных двойных звезд, который был издан в 1986 г. Новый каталог содержал 246 затменных двойных звездных систем. Однако представленные в этом каталоге затменные системы составляют лишь небольшую долю (около 5 %) от всех открытых к 1990 г. затменных переменных звезд отмеченных 10 типов (в Общем каталоге переменных звезд (4-е изд.) содержатся сведения примерно о 5 000 затменно-двойных звезд различных типов).

Для статистических исследований представляет интерес приближенная оценка относительных и абсолютных элементов тех затменных систем, для которых элементы спектроскопической орбиты неизвестны и прямое вычисление абсолютных характеристик не представляется возможным. Для такой оценки были использованы полученные ранее статистические соотношения (масса — светимость, масса — радиус, масса — спектр и др.) для компонент различных типов, а также ряд других статистических зависимостей, найденных по указанным 246 затменным системам (например, зависимость угла орбитального наклона от глубины главного минимума, зависимость спектральных классов главных компонент для систем типов КР и КW от периода и т. д.). Для определения приближенных элементов использовались данные ОКПЗ IV о морфологии систем, периоде, спектральных классах компонент, амплитудах, продолжительности затмения и продолжительности фазы полного затмения и др. С помощью простых критериев проведена классификация затменных переменных звезд. Статистические зависимости использовались для

получения приближенных фотометрических и абсолютных элементов систем. Найденные элементы были применены в качестве исходных приближений при вычислении фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд более точными методами.

В более позднее время из-за обилия информации совместно с учениками создаются каталоги по отдельным типам двойных звезд разделенным системам главной последовательности, полуразделенным системам, KW-системам. Исследуются поведение некоторых параметров систем и возможные эволюционные связи между конкретными типами звезд: например, DMS с малыми периодами и KW, SD и R CMa. Были рассмотрены возможности дальнейшей эволюции различных типов звезд. В современном электронном издании ОКПЗ выделено 16 типов звезд.

В 1984 г. выходит серия статей М. А. Свечникова и Э. Ф. Кузнецовой по спектрофотометрическим исследованиям фотоэлектрических сканов интегральных спектров затменной переменной RZ Cas, полученных в октябре 1977 г. В работах показано, что абсолютное распределение энергии имеет избытки излучения в континууме в активных незатменных фазах (в моменты, когда наблюдались сильные эмиссионные линии) по сравненению со спокойным состоянием. Сделано предположение, что скоротечная вспышка с температурой (2.5–3) × $\times 10^4$ K обусловлена дополнительным источником энергии.

В серии работ М. А. Свечникова и П. Е. Захаровой 1972—1973 гг. впервые отмечена непрерывность процесса звездообразования в рассеянных звездных скоплениях.

Марий Анатольевич Свечников был создателем и руководителем научного направления в Уральском государственном университете им. А. М. Горького по статистическим исследованиям тесных двойных систем. Им опубликовано 5 методических пособий, 170 научных работ в отечественной и зарубежной печати, среди публикаций — 7 монографий. Каталоги Свечникова и его учеников переданы в Страсбургский центр научной информации.

Марий Анатольевич участвовал в обсуждении результатов многих своих учеников: Т. А. Карташевой по обширным исследованиям звезды типа Вольфа—Райе CQ Сер; А. В. Кожевниковой по исследованиям маломассивных двойных запятненных звезд типа CM Dra; Г. Н. Дремовой по статистическим исследованиям двойных звезд и их эволюции; Л. Ф. Истомина по исследованию двойных звезд типа W Uma. Под руководством Мария Анатольевича защищены 10 кандидатских диссертаций.

Марий Анатольевич активно сотрудничал с кафедрой теоретической физики Челябинского госуниверситета, Астрономическим институтом им. Штернберга, С.-Петербургским университетом, Пулковской обсерваторией РАН, САО РАН, Читинским педуниверситетом, Эстонской академией наук, Узбекской академией наук, Крымской астрофизической обсерваторией, Национальной академией наук Украины, Карагандинским педагогическим университетом.

Монографии М. А. Свечникова:

- Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Свердловск, 1969;
- Свечников М. А., Снежко Л. И. Характеристики и эволюция тесных двойных систем. Явления нестационарности и звездная эволюция. М. : Наука, 1974;
- Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. Иркутск, 1986;
- Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф. Каталог приближенных относительных и абсолютных элементов затменных переменных звезд : в 2 т. Свердловск, 1990;
- Свечников М. А. Статистические исследования тесных двойных звезд / публ. Тартус. астрофиз. обсерватории. 1990. № 106;
- Свечников М. А., Горда С. Ю., Дремова Г. Н., Перевозкина Е. Л., Еретнова О. Б. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменных переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки. Екатеринбург, 1999.
- Учебно-методические пособия М. А. Свечникова:
- *Свечников М. А.* Distribution de la densite stellaire dans unama satellaire ouvert : метод. разработка. Алжир : Алжирский ун-т, 1974;
- Свечников М. А. Astrophysique t heorique. Theorie des photospheres stellaires : метод. разработка. Алжир : Алжирский ун-т, 1975;
- Свечников М. А., Дудоров А. Е. Современная астрофизика. Теория эволюции звезд и ее приложения : метод. пособие. Челябинск, 1981;
- Кузнецова Э. Ф., Свечников М. А. Переменные звезды І» : метод. разработка. Свердловск : УрГУ, 1988;
- Кузнецова Э. Ф., Свечников М. А. Способы наблюдения переменных звезд II : метод. разработка. Свердловск : УрГУ, 1989.

Литературные страницы



А. О. Новичонок

Астрономические стихи для самых маленьких

Малыши-детсадовцы очень любят слушать стихи, смотреть на красивые цветные картинки, их сопровождающие. Стихи помогают им учиться, узнавать, как устроен наш огромный замечательный мир. На этом фоне в дошкольное образование можно включать и стихотворные мотивы, открывающие ребенку путь к основам астрономических знаний. Космос таинственный, далекий, но очень увлекательный, поэтому способен понастоящему завлечь уже в столь раннем возрасте. Пытаюсь работать над стихами для самых маленьких и я.

Когда негаданно проснёшься, Бывает страшно снова спать. Под одеяло заберёшься, Стараясь спрятаться в кровать.

С Луной — совсем другое дело, Когда впотьмах освещены Её сияньем жёлто-белым Край одеяла, часть стены.

Луна и далеко, и близко, Её рукою не достать. Но иногда в окне так низко, Как будто с нами хочет спать.

© Новичонок А. О., 2018

Все испугались, все дрожат, Зайчиха спрятала зайчат. Сегодня здесь никто не спит: В лесу упал метеорит.

Пронёсся он, горя огнём, И ночью стало словно днём. Упал под крики воронья За тем холмом, что у ручья.

Не зная, что произопло, Совунья спряталась в дупло. Но нас не смог он напугать, С утра пойдём куски искать.

А. А. Соловьев

Стихи, написанные на 45-й Зимней Школе

На открытии

Как изменилась Вселенная за́год? А что ей, Вселенной, меняться за го́д?! У ней — ни забот, ни финансовых тягот, — Она по законам Эйнштейна живёт!

Где надо — сгребает до кучи частицы, И звёзды в спиральный идут хоровод, А где-то пылинки сметёт до крупицы И скрытую массу введёт в оборот.

Здесь всё протекает согласно законам, Шаг влево, шаг вправо — похож на побег. Расставлены — все! — по углам и загонам — Надёжно устроен Небесный Ковчег!..

Но только Вселенной...

Ей так одиноко! Быть в мире единственной — тяжкий удел! Ни смысла, ни цели, ни явного прока — Нет счастья в таком положении дел!

Никто не звонит, не зовёт и не просит И в дверь не стучится в назначенный час, И кофе в постель по утрам не приносит... (И нету соседок — судачить о НАС!)

© Соловьев А. А., 2018

Ах, Ей бы, как Особи женского пола, Любимого ждать и детишек растить... Следить, чтоб Вселенская Зимняя Школа Могла б непрерывно Традицию длить!

...Вот так через годы всё мчаться и мчаться, Сквозь миллиарды парсеков лететь, И — не стареть, не слабеть, не меняться, И только с последней звездой отгореть!

Нам всем:

не стареть, не слабеть, не сдаваться, Лишь с самой последней звездой отгореть!

1 февраля 2016

На КВАСе (Клубе Веселых АСтрономов) (Была задана тема «Как изменилась Вселенная за год?»)

Вопль о Вселенной На Школе Зимней ли Летней — сколько на свете их... Что Ей, миллиарднолетней, мой двухминутный стих? Что Ей, такой необъятной — на миллиардах парсек! — Мой комплимент невнятный?.. Что для Неё — Человек?!

Как изменилась наша Ойкумена Под свист и щёлк межзвездных снегирей? Какая в ней случилась перемена За год, прошедший с прежних февралей?

Всё так же нам пульсары посылают Сигналы SOS, надеясь на ответ... (В Энергосбыте с них за трафик вычитают, Чтоб зря не возбуждали белый свет!)

Всё так же те же звёздочки мерцают Нам с вечера до самого утра, И снова про Нибиру вспоминают Учёные мужи из-за бугра.

Мол, где-то есть 9-я планета, За ней следит обиженный Плутон, Но от неё — ни света, ни привета, Она в глубокий погрузилась сон!

Пусть, Дальняя, в покое пребывает, Пока Харон не взял с неё обол, — Он, как и с греков, с каждого взимает За перевоз монету... произвол!

Кричит, что волю Зевса исполняет Или Аида (кто там это ввёл?!)... Про курс валют он ни черта не знает: «Обол, он и в Галактике — обол!»

... А вот у нас — завяла вся малина, Наш рубль упал слезинкой за Кавказ... Но здесь хранят нас ЭДИК и ПОЛИНА! И значит — всё получится у нас!

Здесь Молодость со Зрелостью в союзе Зажгла свечу среди упавшей тьмы, Змея Сомнений здесь ползёт на пузе — Ей не смутить бесстрашные умы!

Вселенная — поток струящихся мерцаний Сквозь шок и трепет мазерных слоёв... И Чапи Бытия — вместилища желаний! — Исполнены мечтами — до краёв!! З февраля 2016

Прощальное

Ну, вот...Уже и сорок пятая Уходит, грустная, в историю, На фотографиях заснятая, Навечно вбитая в меморию!

В разнообразных проявлениях (Их невозможно подсчитать!): В докладах, постерах и прениях, В дискуссионных обсуждениях (Позвольте, Сэр, Вам указать!..), И в критиканских обвинениях, И в завиральных заявлениях (Легко с налёту их кидать!), В оргкомитетных объявлениях, И в песнях, и в стихотворениях, И в КаВээНовых борениях... (Здесь невозможно проиграть!)

В терзаньях, муках и сомнениях (А вдруг да с горки свистнет рак? Но председатель не дурак — Топорщит пальцы — не кулак!)

И вот — в прощальных извинениях: Простите, если что не так!!

...Да нет, все было так, как надо: Как то случалось много лет: Была и радость, и отрада С печалью горестных примет...

И был призыв:

так мчаться, мчаться, Через года лететь, лететь И не стареть, и не сдаваться, И все невзгоды претерпеть!

Чтоб не засушенно-келейной — Когда всё тишь да благодать — Пятидесятой Юбилейной Такой же Тёплой Школой стать! 4 февраля 2016

Нибиру

А что если мы не одни на планете? А что если Солнце не нам только светит?! А вдруг оно светит туды и сюды: И с нашей, и с той, с тыловой стороны?

А что если вдруг, наглотавшись эфиру, Оно освещает планету Нибиру? А что если там всё вот так, как у нас: Толпа астрономов, играющих в KBAC?

Такая же звездная в небе картина, И та же Коуровка, та же ПОЛИНА, И КОСТЯ такой же, и шутки его И там не смущают давно никого. Дурацкая шуточка, юмора для, Нибиру, Нибиру, Нибиру моя.

И те же доклады, и тот же костёр, И также язык ЛИПУНОВА остёр. И те же там речки, и те же моря, Ах, как ты прекрасна, Нибиру моя!

И так же средь синего звездного поля Играет в галактики СИЛЬЧЕНКО ОЛЯ. И там, головою степенно качая, Проходит подобие ЮРЫ ХАЧАЯ. Другая планета, другие поля, Нибиру, Нибиру, Нибиру моя...

И так же с добавкою перца и соли Звучат наставления САМУСЯ КОЛИ. Там так же, наверно, ракета взлетает И ЕСИПОВ ВАЛЯ медаль обмывает.

И так же, должно быть, строга и сурова, Заведует мусором ЛИДА РЫХЛОВА.

Там СОБОЛЕВ в фазе со СВЕТОЙ САЛИЙ Мерцает, как мазер, во мраке стихий.

Там ЭДИК спокойно стоит на отшибе, Парадом, конечно, командует ВИБЕ. Ему что Нибиру, что Марс, что Уран — Он всюду бессменный КВАСной капитан.

Он с детства сумел отточить глазомер, Поскольку имеет значенье размер. С тех пор ДИМА каждому служит примером, Поскольку весьма озабочен размером: Небесные звёзды — не звёзды Кремля! И ты — лишь планета, Нибиру моя...

Студенты и там беспощадно умны — Ученых мужей загоняют в углы. Но ШУСТОВ (опять он в жюри заседает!) Совсем по-другому очки назначает.

Там жизнь не подсудна отцу-командиру, Ах, всё же другая планета Нибиру. Не в моде у них скипидар для клистиру, Другая, другая планета Нибиру!

Хоть в целом, конечно, похожи на нас, И общей победой кончается КВАС... На камеру сняты в позиции гордой, Мы все Селезнёвым и Стасиком Гордой, Но всё ж мы — другие!.. другие, друзья. Вовек недоступна Нибиру моя!

В. С. Усанин

Мини-МегаТОРТОРА

Сие произведение состоит из макаронизмов чуть менее, чем полностью.

Еженочно отворяя Девять электронных глаз, Из удела Карачая В небо зрит седой Кавказ.

Те глаза стремленья полны Множество Вселенной тайн, Что скрывали света волны, Сделать явными онлайн.

Гамма-всплеска и Сверхновой Встретить им дано сигнал, На пути в среде суровой Тот лишь чудом не пропал.

Каждый спутник рукотворный Должен строго быть учтён: Сохраняя путь свой торный, Доказать, что не шпион.

Метеоров возгораний Каждый час штук тридцать пять. Где же столько взять желаний, Чтобы с каждым загадать?

А кометы, как жар-птицы, Пролетают в вышине, Разрешали книг страницы Их поймать нам лишь во сне.

© Усанин В. С., 2018

Красный, синий и зелёный И в секунду десять раз Звёздный мир запечатлённый Стал доступен всем сейчас.

Горной горлице-ТОРТОРе* И коллегам в сём лице Должен выразить я море Благодарностей в конце.

*В данном случае используется казанское диалектное произношение слова «TOPTOPA», в литературном языке ударение должно быть на первом слоге.

Список участников конференции



ФИО	Организация	E-mail
Аввакумова Екатерина Анатольевна	УрФУ	e.snegireva@gmail.com
Акимкин Виталий Викторович	ИНАСАН	akimkin@inasan.ru
Акимов Артем Вячеславович	УрФУ	$tema_{753}$ @mail.ru
Алексеев Илья Юрьевич	KpAO PAH	ilya-alekseev@mail.ru
Антипин Сергей Витальевич	ГАИШ МГУ	$serge_ant@inbox.ru$
Архипов Андрей Владимирович	УрФУ	hemae2468@gmail.com
Бисярина Анастасия Павловна	АО УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Блинова Вера Сергеевна	ТГУ	vera.blinova.1996@gmail.com
Бородина Ольга Игоревна	УрФУ	olga.o-bor@yandex.ru
Ботин Дмитрий Владимирович	УрФУ	de-botin@yandex.ru
Бражко Варвара Валерьевна	УрФУ	bragko12@mail.ru
Брускова Анна Сергеевна	УрФУ	anna.bruskova.94@mail.ru
Брылякова Елена Андреевна	СибГУ	elinxt@bk.ru
Бурсов Николай Николаевич	CAO PAH	nikolaj.bursov@ya.ru
Валеева Азалия Салаватовна	УрФУ	ihateadelheid@gmail.com
Васильев Вячеслав Антонович	УрФУ	megbegbonok@gmail.com
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa1907@icloud.com
Васюнин Антон Иванович	УрФУ	anton.vasyunin@urfu.ru
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Войтко Дарья Игоревна	УрФУ	gornosty@outlook.com
Воробьев Эдуард Игоревич	Венский ун-т	$eduard_vorobev@mail.ru$
Галенковский Михаил Евгеньевич	УрФУ	fentoru@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	tanastra@nxt.ru
Гильдебрант Екатерина Александровна	СПбГУ	gildebrant_katerina@mail.ru
Глушков Максим Вадимович	КФУ	sh345sqrt@gmail.com
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	stanislav.gorda@urfu.ru
Гусев Владислав Денисович	УрФУ	Vlad06gusev@gmail.com
Данилов Владимир Михайлович	УрФУ	vladimir.danilov@urfu.ru
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Ермаков Максим Юрьевич	УрФУ	myriad2006@ya.ru
Ефремова Екатерина Викторовна	ИНАСАН	manulka9@gmail.com
Жуклевич Глеб Сергеевич	УрФУ	spacemarine09@gmail.com
Землянуха Петр Михайлович	ИПФ РАН	g.pzemlyan@gmail.com
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Зубарева Александра Михайловна	ИНАСАН	zubareva.alex@gmail.com
Иванов Павел Борисович	АКЦ ФИАН	pbi20@cam.ac.uk
Ильина Екатерина Ильинична	ЧелГУ	ilinaek@list.ru
Казанцев Максим Борисович	МАОУ «Лицей № 6»	kazantzev.maxim2018@yandex.ru
Кайгородов Павел Вячеславович	ИНАСАН	pasha@inasan.ru
Калачёв Дмитрий Васильевич	УрФУ	m4rk dev1l@icloud.com
Калинин Александр Александрович	УрФУ	alexander.kalinin@urfu.ru
Калинина Наталия Дмитриевна	УрФУ	natalia.kalinina@urfu.ru
Кантор Ксения Владимировна	Школа астрономии	ksenia.kantor@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Knowwa Aw pupe Doorwa opyo	$N_{\rm D} \Phi N$	alvina kwachning@gmail.com
Кирсанова Мария Соргоориа	урФУ ИНАСАН	kirsanova@inasan ru
Кирсанова Мария Сергеевна	Vn dV	arsonykishkin@gmail.com
Кишкин Арсении Бладимирович	урФ3 ИНАСАН	dana@inasan ru
Ковалева Дана Александровна	ωνηΓν	ualia@inasan.ru walek_kovalekuk@vandov_ru
Ковальчук Балентин Константинович	VpdV	valer, kozhovnikov@urfu ru
Кожовников Далерии Петрович	$3 p \Phi 3$ A O V $n \Phi V$	kozhownikova a@vandov ru
Кознора Дария Валимориа	$N_{\rm D}\Phi V$	KozlevaDaria@list_ru
Козлова Дарья Бадимовна Козлова Олосд Влалимировна	S p Φ S K p Λ O	olog kozlova@mail.ru
Колова Олеся Бладимировна Коловичково Дорга Михойлорио	ИНАСАН	poocha@yanday_ru
Конесникова Дарья Михаиловна	ИНАСАН	dlenonex@inegen m
Кононов Дмитрии Алексеевич	MIAUAII VrođV	akononov@masan.ru
Корень Екатерина Сергеевна	$y p \Psi y$ $V = \Phi V$	house house it a see
Крушинскии Вадим Владимирович	$y p \Psi y$	krussn@gman.com
Крюкова Екатерина Андреевна	Сиогу ИФУ	kate-13-kr@yandex.ru
Кудряшова Анастасия Алексеевна	$K\Psi y$	akudryasova@yandex.ru
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	урФу	eduard.kuznetsov@urfu.ru
Кулеш Максим Вячеславович	УрФУ	MV.Kulesh@yandex.ru
Кутков Олег Евгеньевич	KpAO	kutkov.o@yandex.ru
Ладейщиков Дмитрий Антонович	УрФУ	dmitry.ladeyschikov@urfu.ru
Лапухин Евгений Геннадьевич	СибГУ	slovoktk@mail.ru
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	t.i.levitskaya@urfu.ru
Летнер Оксана Никитична	ТГУ	oksana.letner@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Максимова Ломара Аслановна	СПбГУ	murasuper@mail.ru
Малков Олег Юрьевич	ИНАСАН	malkov@inasan.ru
Малютин Иван Александрович	УрФУ	smoke074@yandex.ru
Манжосина Анастасия Юрьевна	УрФУ	manzhosinan@gmail.com
Маслова Анна Юрьевна	УрФУ	kiri-do@yandex.ru
Матвеева Екатерина Алексеевна	УрФУ	avelon@e1.ru
Машонкина Людмила Ивановна	ИНАСАН	lima@inasan.ru
Микрюков Денис Викторович	СПбГУ	DenAstron@yandex.ru
Миланов Данила Владимирович	СПбГУ	danila.milanov@gmail.com
Мингалиев Марат Габдуллович	CAO PAH	mingaliev@gmail.com
Михайлов Евгений Александрович	МГУ	ea.mikhajlov@physics.msu.ru
Михайлова Ксения Алексеевна	УрФУ	kk17mm@mail.ru
Михневич Варвара Олеговна	УрФУ	roza9999999999@gmail.com
Молярова Тамара Сергеевна	ИНАСАН	stripe.tea@gmail.com
Мурга Мария Сергеевна	ИНАСАН	murga@inasan.ru
Назаров Сергей Валентинович	KpAO	astrotourist@gmail.com
Накасима Дзюнъити	УрФУ	nakashima.junichi@gmail.com
Никитенко Андрей Андреевич	ЧелГУ	zzzzz94.me@gmail.com
Никифорова Виктория Вячеславовна	УрФУ	vikkitenni@gmail.com
Никифорова Татьяна Петровна	УрФУ	tatyana.nikiforova@urfu.ru
Никринец Ярослав Васильевич	ЧелГУ	nikrinets@yandex.ru
Новичонок Артём Олегович	ИПМ РАН	artnovich@inbox.ru

ФИО	Организация	E-mail
Ногин Святослав Александрович	$y_p \Phi y$	nsa1101@mail.ru
Оводов Борис Викторович	HAO «l'EO»	b.ovodov@gmail.com
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrey.Ostrovsky@urfu.ru
Парфёнов Сергей Юрьевич	АО УрФУ	sergey.parfenov@urfu.ru
Переворочаева Екатерина Андреевна	ТГУ	katya.perevorochaeva@mail.ru
Перминов Александр Сергеевич	$y_p \Phi y$	perminov12@yandex.ru
Петрашкевич Игорь Вячеславович	УрФУ	petra444@mail.ru
Пилипенко Сергей Владимирович	АКЦ ФИАН	spilipenko@asc.rssi.ru
Плавин Александр Викторович	АКЦ ФИАН	alexander@plav.in
Плотникова Анастасия Николаевна	УрФУ	tyww@yandex.ru
Подюкова Анастасия Андреевна	УрФУ	nastya.podyukova@mail.ru
Полушина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	tatyana.polushina@urfu.ru
Попова Елена Андреевна	УрФУ	elenapopovalastikfantik@yandex.ru
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.popova@urfu.ru
Потоскуев Александр Эдуардович	УрФУ	aleksander.potoskuev@gmail.com
Пунанова Анна Фёдоровна	УрФУ	anna.punanova@urfu.ru
Реннер Анна Витальевна	ЮУрГУ НИУ	renner.anyutka@gmail.com
Романовская Анна Михайловна	ИНАСАН	annarom@inasan.ru
Рябухина Ольга Леонидовна	ИПФ РАН	ryabukhina@ipfran.ru
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	Svetlana.Salii@urfu.ru
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli@vtomske.ru
Самигуллин Эдуард Робертович	УрФУ	edik.samigullin.99@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Самусь Николай Николаевич	ИНАСАН	samus@sai.msu.ru
Сафронова Виктория Сергеевна	УрФУ	vika483@bk.ru
Селезнев Антон Федорович	АО УрФУ	anton.seleznev@urfu.ru
Семёнова Екатерина Сергеевна	КФУ	ektrsemenova@gmail.com
Серебрякова Надежда Андреевна	КФУ	deomlette@gmail.com
Сивкова Евгения Эдуардовна	ИНАСАН	sivkovae@gmail.com
Скрипниченко Павел Вадимович	УрФУ	savl.silverheart@gmail.com
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	УрФУ	Andrej.Sobolev@urfu.ru
Соколова Валерия Алексеевна	УрФУ	sokolova.valeriie@gmail.com
Соловьев Александр Анатольевич	ΓΑΟ ΡΑΗ	solov@gaoran.ru
Сытов Алексей Юрьевич	ИНАСАН	sytov@inasan.ru
Сюсина Ольга Михайловна	ТГУ	kleo77@sibmail.com
Тараскина Анастасия Николаевна	СПбГУ	st050009@spbu.student.ru
Тимиркеева Мария Андреевна	ПРАО АКЦ ФИАН	marika-ko@yandex.ru
Топчиева Анастасия Павловна	ИНАСАН	stasyat@inasan.ru
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Угольников Олег Станиславович	ИКИ РАН	ougolnikov@gmail.com
Филина Юлия Игоревна	УрФУ	drugoi.mir2011@yandex.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	АО УрФУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Хайдукова Диана Маратовна	АО Уралгеоинформ	ocf@ugi.ru
Холтыгин Александр Федорович	СПбГУ	afkholtygin@gmail.com

ФИО	Организация	E-mail
Холшевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Хохрякова Алёна Дмитриевна	МГУ	a lenahohry a kova @yandex.ru
Цивилев Александр Прокопьевич	АКЦ ФИАН	tsivilev@prao.ru
Чулков Дмитрий Александрович	ИНАСАН	chulkovd@gmail.com
Шагабутдинов Альфат Исмагилович	УрФУ	alfat.shagabutdinov@urfu.ru
Шагабутдинов Андрей Альфатович	АО УрФУ	andreyshagabutdinov@urfu.ru
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шарапов Константин Владиславович	УрФУ	shkval1993@ya.ru
Шмелева Ирина Михайловна	УрФУ	alinka irinka@mail.ru
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@mail.ru
Юнгельсон Лев Рафаилович	ИНАСАН	lry@inasan.ru
Яговитина Ксения Александровна	УрФУ	yashaksenia@gmail.com

Содержание

Обзорные лекции	5
Алексеев И. Ю., Кожевникова А. В., Козлова О. В. Цик-	
лы активности у звезд поздних спектральных классов Вибе Д. З., Мурга М. С., Сивкова Е. Э. Микрофизика раз-	7
рушения пыли: маленькие катастрофы вселенских масштабо	в 15
Зинченко И. И. Миллиметровая и субмиллиметровая астроно-	
мия сегодня и завтра	23
Кирсанова М. С. Астрохимические исследования молекулрных	-
облаков в Орионе	33
Ковалева Д. А., Малков О. Ю., Сытов А. Ю., Туту-	
ков А. В., Чулков Д. А., Юнгельсон Л. Р. Функция	
звездообразования двойных звезд	34
Кононов Д. А. Внутренняя структура аккреционных дисков в	
катаклизмических переменных звездах: теория и наблюдения	а 49
Кузнецов Э. Д. Эффект Ярковского и динамическая эволюция	
астероидов	60
Машонкина Л. И. Спектроскопия высокого разрешения для	
изучения химической эволюции галактик	80
Пилипенко С. В. Космический инфракрасный фон: как его	
смоделировать и как разобраться в путанице	83
Соловьев А. А. Новая концепция солнечного цикла	95
Угольников О. С. Облака и аэрозоль выше тропосферы: опти-	
ческие наблюдения и новейшая история	105
Холшевников К. В., Миланов Д. В., Шайдулин В. Ш.	
Ряд Лапласа тел эллипсоидальной структуры и уровенного	
эллипсоида	123
Шустов Б. М. Метеориты как свидетели и продукты эволюции	
Солнечной системы, угроза и ресурс на будущее	135
Тезисы стуленческих докладов	153
Блинова В. С. Применение программного комплекса «EROS»	100
для поиска условий наблюдения астероидов на близких ор-	
битах	155
Бородина О. И., Селезнев А. Ф., Данилов В. М. Учет	
неразрешенных двойных систем при оценивании массы	
звездного скопления	157
Брылякова Е. А. Алгоритм выявления малого отклонения	
блеска для поиска кандидатов в переменные звезды	159
Брылякова Е. А., Лапухин Е. Г. Поиск переменных звезд	
с множественной периодичностью по материалам учебной	
обсерватории СибГУ	161

Кудряшова А. А., Бурсов Н. Н. Результаты мониторинга SETI-объектов на РАТАН-600 в 2015—2016 гг	165
 SETI-объектов на РАТАН-600 в 2015—2016 гг. Кулеш М. В., Бородина О. И., Никифорова В. В., Селезнев А. Ф. Сравнение результатов звездных подсчетов в девяти рассеянных звездных скоплениях по данным 2MASS и Gaia DR1 	165
Кулеш М. В., Бородина О. И., Никифорова В. В., Селез- нев А. Ф. Сравнение результатов звездных подсчетов в де- вяти рассеянных звездных скоплениях по данным 2MASS и Gaia DR1	
нев А. Ф. Сравнение результатов звездных подсчетов в де- вяти рассеянных звездных скоплениях по данным 2MASS и Gaia DR1	
вяти рассеянных звездных скоплениях по данным 2MASS и Gaia DR1	
Gaia DR1	
	167
Летнер О. Н., Галушина Т. Ю. Резонанс Лидова-Козаи в	
динамике астероидов, сближающихся с Землей	169
Максимова Л. А., Холтыгин А. Ф. Система галактических	
планетарных туманностей	171
Никитенко А. А. Одномерное моделирование релятивистского	
коллапса облака	173
Никифорова В. В., Бородина О. И., Кулеш М. В., Селез-	
нев А. Ф. Структурные и динамические характеристики	
девяти рассеянных звездных скоплений	175
Переворочаева Е. А. Исследование эффективности использо-	
вания различных параметров метода Эверхарта в задачах	
астероидной динамики	177
Плотникова А. Н., Соболев А. М. О положении звезд, иони-	
зующих туманности, на инфракрасных диаграммах	179
Подюкова А. А., Козлова Д. В. Результаты тестирования	
программы АМ:РМ для автоматизированной астрометрии	
и фотометрии астероидов	181
Попова Е. А., Соболев А. М., Цивилев А. П. Исследова-	
ние быстрой переменности мазерных источников в линии	
водяного пара	182
Рябухина О. Л., Зинченко И. И., Соболев А. М.	
Поиск и исследование нитевидных структур в области	
$G192.76{+}00.10 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	184
Семёнова Е. С. Химически пекулярные звезды: вращение, маг-	
нитное поле, эволюция	186
Серебрякова Н. А. Моделирование циклотронных спектров	
	188
выоорки поляров	
высорки поляров	
высорки поляров	190
высорки поляров	190
выоорки поляров	190
высорки поляров	190 192

Галушина Т. Ю., Быкова Л. Е., Летнер О. Н. Приклад-	
ной программный комплекс «ИДА», предназначенный для	
изучения движения астероидов	197
Ефремова Е. В. О траекториях перелета к ресурсно-	
перспективным околоземным астероидам	199
Землянуха П. М., Зинченко И. И. Анатомия ядра S255N.	201
Кругликов Н. А., Крушинский В. В., Гроховский В. И.	
Современные методики поиска и сбора внеземного вещества	203
Крушинский В. В. АМ:РМ, автоматизированная астрометрия	
и фотометрия астероидов	205
Ладейщиков Д. А., Соболев А. М., Кирсанова М. С.	
Исследование плотного газа в области звездообразования	
S255-S258	206
Микрюков Д. В. Осреднение уравнений планетной задачи в	
гелиоцентрической системе отсчета	208
Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З., Воро-	
бьев Э. И. Химическое моделирование протопланетных	
дисков со вспышками светимости	210
Мурга М. С. Роль заряда в эволюции космической пыли	212
Назаров С. В. Спектральное исследование активной галакти-	
ки 3С 390.3	214
Назаров С. В., Кутков О. Е., Крушинский В. В. Исследо-	
вание астроклимата в КрАО по снимкам телескопа АЗТ-8.	216
Перминов А. С., Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция	
компактных внесолнечных планетных систем	218
Пунанова А. Φ ., Каселли П. Seeds of Life in Space: метанол в	
дозвездном ядре L1544	220
Рябчикова Т. А., Романовская А. М., Шуляк Д. В. Опре-	
деление фундаментальных параметров СР-звезд методами	
спектроскопии: сравнение с данными интерферометрии	222
Салий С. В., Парфёнов С. Ю., Кирсанова М. С. Байе-	
совский подход к оценке физических параметров областей	004
звездоооразования по малому числу линии метанола	224
Самбаров Г. Е., Сюсина О. М. Исследование и выявление	
осооенностеи движения малых тел Солнечнои системы, по-	000
павших в околоземное пространство	226
Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция	000
астероидов на олизких орбитах	228
Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С. Эволюция углево-	
дородной пыли в зонах ионизованного водорода и остатках	0.00
сверхновых	230
Смирнова К. И., Вибе Д. З. Выделение областей звездообра-	0.00
зования в галактиках со смещенными барами	232

Тимиркеева М. А. Радиопульсары с ожидаемым гамма-	
излучением и гамма-пульсары в радиодиапазоне	234
Топчиева А. П. Глобальный фотометрический анализ галакти-	
ческих областей ионизованного водорода	236
Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е. Эволюция протозвезд-	
ных дисков массивных звезд	238
Стендовые доклады	239
Брускова А. С., Левитская Т. И., Хайдукова Д. М. Про-	
гнозирование паводковой ситуации с использованием кос-	
мических снимков	241
Вибе Д. З., Шустов Б. М. Поле УФ-излучения и эволюция	
дозвездных ядер	243
Горда С. Ю., Матвеева Е. А. Новая световая кривая измене-	
ния периода затменной переменной AM Leo	245
Калинин А. А. Спектры солнечного пятна с большой напря-	
женностью магнитного поля	247
Кирсанова М. С. Астрохимическое моделирование областей	
НІІ S235A и S235C	249
Квашнина А. В., Васюнин А. И. Расширение базы данных	
реакций кода MONACO в области органической химии	251
Кожевников В. П. Фотометрические наблюдения промежуточ-	
ного поляра V1033 Cas	253
Кузнецов Э. Д., Гусев В. Д., Малютин И. А. Вторичные	
резонансы, обусловленные световым давлением, в окрест-	
ности орбит спутников систем Глонасс и GPS	255
Ладейщиков Д. А., Накасима Д., Соболев А. М., Но-	
гин С. А. Создание интернет-версии базы данных мазер-	
ных источников	257
Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З. Индикаторы	
массы протопланетных дисков	259
Назаров С. В., Кутков О. Е. Инфракрасный датчик облач-	
ности в КрАО	261
Новичонок А. О., Назаров С. В. 20-см телескоп-рефлектор	
любительского класса как инструмент для широкополосной	
фотометрии комет	262
Никифорова Т. П., Шагабутдинов А. И., Парфё-	
нов С. Ю., Кожевникова А. В. Признаки нетеплового	
излучения ионизованного кальция в корональных петлях	
активной области NOAA 11515	264
Оводов Б. В., Островский А. Б., Васюнин А. И., Кузне-	
цов Э. Д. Исследование температурных режимов метео-	
ритов в атмосфере Земли	266

Островский А. Б., Васюнин А. И., Корень Е. С. Моделиро-	
вание химической эволюции на неоднородной по свойствам	
поверхности пылевой частицы	68
Соколова В. А., Васюнин А. И., Островский А. Б. Вли-	
яние особенностей мелкомасштабного пространственного	
распределения пыли на химическую эволюцию межзвезд-	
ной диффузной среды	70
Тараскина А. Н. Орбиты тел в ротационно-симметричной мо-	
дели галактики	72
Шмелева И. М. Исследование вероятности столкновения ма-	
лых тел в главном поясе астероидов Солнечной системы	
численными методами	74
Яговитина К. А. Исследование трехтельных резонансов	
(Церера—Веста—астероид) малых тел Солнечной системы . 2	75
Современные исследования переменных звезд.	
Совмещенный научный семинар, посвященный	
85-летию со дня рождения Мария Анатольевича	
Свечникова 27	77
Алексеев И. Ю., Козлова О. В., Горда С. Ю. Фотомет-	
рическая и спектральная переменность активной звезды	
VY Arietis	81
Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю. Переменность	
эмиссионных линий в спектре звезды Ве Хербига HD 200775 2	82
Богомазов А. И., Козырева В. С., Сатовский Б. Л.,	
Крушевская В. Н., Кузнецова Ю. Г., Эгамберди-	
ев Ш. А., Каримов Р. Г., Халикова А. В., Ибраги-	
мов М. А., Ирсмамбетова Т. Р., Тутуков А. В. Све-	
товое уравнение в затменной двойной CV Boo 2	84
Горда С. Ю. Исследование переменных звезд в Коуровской аст-	
рономической обсерватории	89
Дремова Г. Н. Роль эффекта Росситера—Маклафлина в изуче-	
нии тесных двойных звезд	91
Ковалева Д. А., Малков О. Ю., Кайгородов П. В. Катало-	
ги двойных переменных звезд в базе данных двойных звезд	
BDB	04
Кожевников В. П. Открытие глубоких затмений в катаклиз-	
мической переменной IPHAS J051814.33+294113.0 3	12
Кожевникова А. В., Алексеев И. Ю., Кожевников В. П.	
Пятенная активность карликовых звезд FR Cnc и V 772 Her 3 $$	14
Куликова А. М. Широкие двойные среди близких карликов:	
от детектирования до статистики	16

Самусь Н. Н., Антипин С. В., Зубарева А. М., Колесни-	
кова Д. М. Затменные переменные звезды в московской	
программе сканирования фототеки	318
Старицин Е. И. Возможно ли частичное перемешивание в ком-	
понентах двойных систем?	320
Из истории науки	325
Полушина Т. С. М. А. Свечников — наш учитель	327
Литературные страницы	333
Новичонок А. О	335
Соловьев А. А	337
Усанин В. С.	343
Список участников конференции	345
Contents

Lectures 5
Alekseev I. Ju., Kozhevnikova A. V., Kozlova O. V. Activity
cycles of late-type stars
Wiebe D. S., Murga M. S., Sivkova E. E. Microphysics of dust
destruction: small catastrophes on the Universe scale $\ldots \ldots 15$
Zinchenko I. I. Millimeter and submillimeter wave astronomy to-
day and tomorrow $\ldots \ldots 23$
Kirsanova M. S. Astrochemical studies of molecular clouds in Orion 33
Kovaleva D. A., Malkov O. Y., Sytov A. Y., Tutukov A. V.,
Chulkov D. A., Yungelson L. R. Star formation function
for binary stars
Kononov D. A. The inner structure of accretion disks in cataclys-
mic variable stars: theory vs observations
Kuznetsov E. D. The Yarkovsky effect and dynamical evolution of
asteroids 60
Mashonkina L. I. High-resolution spectroscopy for a study of ga-
Difference of a set of the set o
Phipenko S. V. Cosmic infrared background: now to model it and
now to beat the confusion
Solovjev A. A. New concept of solar cycle
observations. The newest history 105
Kholshevnikov K V Milanov D V Shaidulin V Sh Lan-
lace series for ellipsoidal structure's bodies and level ellipsoid 123
Shustov B. M. Meteorites as witnesses and products of the evolu-
tion of the solar system, threat and resource for the future 135
Abstracts of students talks 153
Blinova V. S. Application of "EROS" software for searching for
conditions of observations of asteroids on close orbits 155
Borodina O. I., Seleznev A. F., Danilov V. M. Consideration
of unresolved binaries with evaluation of the mass of star clusters 157
Brylyakova E. A. Algorithm for detection of small variations star's
light for the search of candidates for variable stars 159
Brylyakova E. A., Lapukhin E. G. Search of variable stars with
multiple periodicity by materials received from SibSU observatory 161
Gudebrant E. A. About possible approaches and impacts of the
ZUUO EAD asteroid with the Earth
the SETLohierts at RATAN-600 in 2015-2016
the SETI-objects at RATAN-600 in 2015—2016

Kulesh M. V., Borodina O. I., Nikiforova V. V., Selez-	
nev A. F. Comparison of the results of star counts in nine	
open star clusters by the data of 2MASS and Gaia DR1	167
Letner O. N., Galushina T. Yu. Lidov—Kozai resonance in the	
dynamics of Near-Earth asteroids	169
Maksimova L. A., Kholtygin A. F. System of galactic planetary	
nebulae	171
Nikitenko A. A. One-dimensional modeling of relativistic collapse	
of a cloud	173
Nikiforova V. V., Borodina O. I., Kulesh M. V., Selez-	
nev A. F. Structural and dynamical characteristics of nine	
open star clusters	175
Perevorochaeva E. A. The efficiency research of application of	
various parameters in Everhart method in asteroid dynamics	
problems	177
Plotnikova A. N., Sobolev A. M. About location of the stars	
that ionize nebulosities on infrared diagrams	179
Podyukova A. A., Kozlova D. V. Results of testing the program	
package AM:PM for automated astrometry and photometry of	
asteroids	181
Popova E. A., Sobolev A. M., Tsivilev A. P. Study of short-	
term variability of masers in water-vapor line	182
Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I., Sobolev A. M. Search and	
investigation of striations in the field G192.76+00.10 \ldots .	184
Semenova E. Chemically peculiar stars: rotation, magnetic fields,	
evolution 	186
Serebriakova N. A. Modeling cyclotron spectra the for sample of	
polars	188
Filina J. I., Seleznev A. F., Avvakumova E. A.,	
Kvashnina A. V. Online atlas of open star clusters	190
Khokhryakova A. D., Mikhailov E. A. Model of a dynamo in a	
rectangular torus for the study of magnetic fields in the outer	
rings of galaxies	192
Abstracts of brief tells	105
Abstracts of brief talks	195
Galushina T. Yu., Bykova L. E., Letner O. N. Software "IDA"	107
for asteroid motion study \dots \dots \dots \dots	197
Enremova E. v. On the trajectories to the resource-perspective	100
near-Earth ateroids	199
Lemiyanukna P. M., Zinchenko I. I. The Anatomy of S255 core	201
Krugnkov IN. A., Krusninsky V. V., Groknovsky V. I. Mo-	909
Upper approaches for extraterrestrial matter collection	203
Grushinsky v. v. AM: PM, automatic astrometry and photometry	90 5
of asteroids	205

•)	ĸ	•)
о	υ	4

Ladeyschikov D. A., Sobolev A. M., Kirsanova M. S. Stud	ly
of the high-density gas in star-formation region S255-S258	206
Mikryukov D. V. Averaging of the planetary problem equation	ns
in the heliocentric reference frame	208
Molyarova T. S., Akimkin V. V., Wiebe D. S., Voro)-
byov E. I. Chemical modeling of protoplanetary disks wit	h
outbursts	210
Murga M. S. The charge role in the cosmic dust evolution \ldots	212
Nazarov S. V. Spectral study of the active galaxy $3C$ 390.3	214
Nazarov S. V., Kutkov O. E., Krushinskiy V. V. Astroclimat	ic
research at the CrAO using AZT-8 telescope images	216
Perminov A. S., Kuznetsov E. D. Dynamical evolution of packet	ed
extrasolar planetary systems	218
Punanova A. F., Caselli P. Seeds of Life in Space: methane	ol
towards the pre-stellar core L1544 \ldots	220
Ryabchikova T. A., Romanovskaya A. M., Shulyak D. V	7.
The determination of fundamental parameters of CP-stars b	уу
spectroscopic methods: comparison with interferometry data	ı. 222
Salii S. V., Parfenov S. Yu., Kirsanova M. S. Bayesian appro	0 -
ach to estimations of star-formation regions physical parame	e-
ters by few methanol lines	224
Sambarov G. E., Syusina O. M. Investigation and identification	m
of the peculiarities in the motion of small bodies of the Sola	ar a a a
system that have fallen into the near-Earth space.	226
Safronova V. S., Kuznetsov E. D. Dynamic evolution of asteroid	is
on close orbits	228
Sivkova E. E., Wiebe D. S., Murga M. S. Evolution of nyc	1 -
rocarbon dust in regions of ionized hydrogen and supernov	7a 020
remnants	230
simirnova K. I., where D. S. Selection of star-forming regions i	111
Timinkoor M A Padia pulsars with avalated common radiatio	202
and gamma pulsars as pulsating radio omitters	111 934
Topchicy: A P Clobal photometric analysis of galactic regions	204 of
ionized hydrogen	51
Khaibrakhmanov S A Dudorov A E Evolution of protoste	200 d_
lar disks around massive stars	-1-
	200
Abstracts of poster papers	239
Bruskova A. S., Levitskaya T. I., Haydukova D. M. Foreca	s-
ting the flood situation using space images	241
Wiebe D. S., Shustov B. M. UV radiation field and evolution of	of
prestellar cores	243

363

	Gorda S. Yu., Maveeva E. A. The new light-time curve of eclips-	
	ing binary AM Leo	245
	Kalinin A. A. Spectra of the Sun spot with large magnetic field .	247
	Kirsanova M. S. Astrochemical modelling of HII regions S235A	
	and S235C \ldots \ldots \ldots	249
	Kvashnina A. V., Vasyunin A. I. Modification the database	
	of chemical reactions of the MONACO in the area of organic	
	molecules	251
	Kozhevnikov V. P. Photometric observations of the intermediate	
	polar V1033 Cas	253
	Kuznetsov E. D., Gusev V. D., Malyutin I. A. Secondary	
	resonances due to solar radiation pressure in vicinity orbits of	
	satellites of the GLONASS and GPS systems	255
	Ladeyschikov D. A., Nakashima J., Sobolev A. M., No-	
	gin S. A. Creation of the web-based database of maser sources	257
	Molyarova T. S., Akimkin V. V., Wiebe D. S. Gas mass tracers	
	in protoplanetary disks	259
	Nazarov S. V., Kutkov O. E. Infrared cloud sensor at CrAO	261
	Novichonok A. O., Nazarov S. V. 20-cm amateur reflector te-	
	lescope as instrument for wideband comet photometry	262
	Nikiforova T. P., Shagabutdinov A. I., Parfenov S. Yu, Koz-	
	hevnikova A. V. Signs of non-thermal radiation of the ionised	
	calcium in coronal loops of the active region NOAA 11515 $$	264
	Ovodov B. V., Ostrovskii A. B., Vasyunin A. I., Kuznet-	
	sov E. D. Temperature regimes of meteorites in the atmosp-	
	here of the Earth	266
	Ostrovskii A. B., Vasyunin A. I., Koren E. S. Model of che-	
	mical evolution on dust particle with inhomogeneous surface .	268
	Sokolova V. A., Vasyunin A. I., Ostrovskii A. B. Impact of the	
	small-scale spatial distribution of dust particles on the chemical	
	evolution of the diffuse interstellar medium $\ldots \ldots \ldots \ldots$	270
	Taraskina A. N. Orbits in axisymmetrical galaxy model	272
	Shmeleva I. M. Research of collision probability for small bodies	
	in the asteroid belt of the Solar system by numerical methods	274
	Yagovitina K. A. Studies of three-body resonances (Ceres-	
	Vesta—asteroid) of small bodies of the Solar System	275
ъл		
IVI.	odern research of variable stars. Accompanying	
	scientific seminar dedicated to the 85th anniversary	
	since the birth of Marij Anatolievich Svechnikov	277
	Alekseev I. Yu., Kozlova O. V., Gorda S. Yu. Photometric	.
	and spectral variability of active star VY Arietis	281

Bisyarina A. P., Sobolev A. M., Gorda S. Yu. Variation of emission lines in the specta of Be Herbig star HD 200775 . . . 282

Bogomazov A. I., Kozyreva V. S., Satovskii B. L., Krushev-	
ska V. N., Kuznyetsova Yu. G., Ehgamberdiev Sh. A.,	
Karimov R. G., Khalikova A. V., Ibrahimov M. A.,	
Irsmambetova T. R., Tutukov A. V. Light equation on	
eclipsing binary CV Boo	284
Gorda S. Yu. Investigation of variable stars at the Kourovka as-	
tronomical observatory	289
Dryomova G. N. The role of Rossiter—McLaughlin effect in study	
of Close Binaries	291
Kovaleva D. A., Malkov O. Y., Kaygorodov P. V. Catalogues	
of variable binaries in the BDB, Binary star DataBase	304
Kozhevnikov V. P. Discovery of deep eclipses in the cataclysmic	
variable IPHAS J051814.33+294113.0	312
Kozhevnikova A. V., Alekseev I. Yu., Kozhevnikov V. P.	
Spot activity of dwarf stars FR Cnc and V 772 Her	314
Kulikova A. M. Wide binaries among nearby dwarfs: From de-	
tection to statistics	316
Samus N. N., Antipin S. V., Zubareva A. M., Kolesni-	
kova D. M. Eclipsing variable stars in the Moscow program	
for scanning the astronomical plate stacks	318
Staritsin E. I. Is there partial mixing in the binary system compo-	
nents? \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	320
History of Science	
nistory of Science	325
Polushina T. S. Tribute to M. A. Svechnikov	327
Poetry	333
Novichonok A O	335
Soloviev A A	337
Usanin V. S.	343
	010
List of conferee	345

Научное издание

Физика Космоса

Труды 47-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 января— 2 февраля 2018 г.)

Редактор Т. А. Федорова Оригинал-макет — Д. З. Вибе, Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 14.01.2018. Формат 60 \times 84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 22,7. Усл. печ. л. 21,4. Тираж 160 экз. Заказ 2.

Издательство Уральского университета 620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51. Отпечатано в ИПЦ УрФУ

620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4. Тел. (343) 350-56-64

ISBN 978-5-7996-2283-1

