

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

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

# Ф И З И К А   К О С М О С А

Труды 48-й Международной  
студенческой научной конференции

(Екатеринбург,

28 января — 1 февраля 2019 г.)

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2019

УДК 52(063)  
Ф503

Печатается по решению  
организационного  
комитета конференции

**Редколлегия:**

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

**Физика** космоса : тр. 48-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2019 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 250 с.

ISBN 978-5-7996-2517-7

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 978-5-7996-2517-7

© Уральский федеральный  
университет, 2019

**ФИЗИКА КОСМОСА**  
**48-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ**  
**НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**Организаторы**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Международная общественная организация  
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»

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

**28 января — 1 февраля 2019 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), М. Е. Прохоров (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ)

## **Финансовая поддержка**

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

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района  
г. Екатеринбург

## Обзорные лекции



*Septem artes liberales.*  
*Гравюра. XV в.*



## ЦИКЛЫ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ У ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

И. Ю. Алексеев<sup>1</sup>, А. В. Кожевникова<sup>2</sup>, О. В. Козлова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Уральский федеральный университет*

Рассмотрены методы и результаты исследования долговременных изменений холодных пятен у звезд поздних спектральных классов.

### STARSPOT ACTIVITY CYCLES OF COLD STARS

I. J. Alekseev<sup>1</sup>, A. V. Kozhevnikova<sup>2</sup>, O. V. Kozlova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Crimean Astrophysical Observatory,* <sup>2</sup>*Ural Federal University*

We considered methods and results of the observations of long-term variations of starspots on the late-type stars.

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, 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 Глайсберга и Маундеровские минимумы, происходящие раз в два-три столетия. Такие длительные вариации солнечной активности уже исследуются с помощью толщин годовых колец деревьев, содержания в них изотопа <sup>14</sup>C, слоистой структуры гренландских и антарктических льдов и 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.

Исторически запятненность звезд была обнаружена фотометрически, как вращательная модуляция блеска с типичной амплитудой около  $0.10^m$ , достигающей у самых активных звезд типа T Tauri до  $0.5^m$  (V471 Tau). Изменения конфигурации пятен дают медленные

(с характерным временем от месяца до нескольких лет) смены параметров вращательной модуляции, например, уровня среднего блеска в данную эпоху. Из многолетних фотометрических и фотографических наблюдений длительностью более 50 лет найдена общая переменность классических запятненных звезд до  $0.43-0.56^m$  (например, у оранжевых карликов V775 Her, V833 Tau, BY Dra или RS CVn систем IM Peg и HU Vir). Для Солнца, как запятненной звезды, такие эффекты составляют около  $0.001^m$ .

В настоящее время самым прогрессивным методом изучения звездных пятен является доплеровское картирование. Этот метод позволяет прямо определять площади и широты покрывающих звезду пятен. Метод доплеровского картирования налагает довольно сильные ограничения на выбор объектов (помимо яркости необходима большая скорость вращения) и аппаратуру наблюдений. Тем не менее для десятка запятненных звезд, прежде всего активных гигантов типа RS CVn (IM Peg, II Peg, IL Hya, V711 Tau, EI Eri), а также отдельных одиночных быстро вращающихся гигантов (FK Com и HD 199178) и карликов (AB Dor и LQ Hya), уже накоплены ряды спектральных наблюдений продолжительностью более двух десятков лет [1–4] и др.

Также в настоящее время распространено применение аналогичных методов восстановления изображений к высокоточным фотометрическим наблюдениям [5–7]. Эти наблюдения также охватывают длительные промежутки времени и были применены прежде всего к тем же звездам, что и доплеровское картирование.

При этом остаются распространенными методы оценки площадей и температур пятен по фотометрическим наблюдениям, изначально использующие предположения о пятенной конфигурации. Такие методы наиболее свободны от требований к выбору объектов и наблюдательной аппаратуры и позволяют исследовать очень большие массивы звезд [8] и длительные ряды всех имеющихся фотометрических наблюдений. Например, Алексеев и Кожевникова [9–11] рассматривали моделирование запятненности активных звезд различных типов — молодых звезд, прошедших стадию T Tauri (TTTS), оранжевых (спектральных классов GK) и красных (спектральных классов M) карликов, короткопериодических и классических систем типа RS CVn, одиночных быстро вращающихся желтых гигантов асимптотической ветви типа FK Com.

Эти исследования позволяют оценить цикличность изменений полной площади и средней широты покрывающих звезду пятен

примерно для полусотен звезд. Длительность таких колебаний (5—40 лет) хорошо согласуется 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. При этом мы видим как дрейф пятен в направлении экватора (мы считаем это грубым аналогом солнечной диаграммы бабочек), так и обратный эффект — дрейф пятен к полюсам звезды. Скорости широтного дрейфа пятен  $\delta\phi$  довольно сильно варьируются от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем по модулю 0.2—2.9 °/год, в то время как солнечное значение скорости широтного дрейфа составляет 3—4 °/год. Вероятно, что направление дрейфа пятен и его величина по модулю зависят от спектрального класса звезды.

Общеизвестна секторная структура солнечного магнитного поля и солнечного ветра. Подобные структуры существуют и у других, много более активных звезд. Первые сообщения о существовании у звезд двух выделенных активных долгот появились в конце 1980-х гг. для всех типов запятанных звезд, прежде всего для проэволюционировавших звезд типа классических RS CVn систем и звезд типа FK Com. Активные долготы также хорошо видны из длительных серий доплеровских карт [12], хромосферных [13] и поляризационных наблюдений [14]. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной электронной плотности хромосферы [15–19] и наиболее мощные вспышки [20].

В 1991 г. Йэтсу и др. [21] 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 [22]. Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но обычно соотносятся как целые числа:  $P_{\text{cyc}}/P_{\text{flip-flop}} = 3 : 1, 2 : 1, 3 : 2, 5 : 4$  и пр. В частности, у Солнца обнаружен flip-flop эффект с длительностью около 3.7 (3 : 1) года [22].

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 коэффициента дифференциального вращения  $D_r$ , определенного аналогично солнечному из соотношения

$$\Omega(\phi) = \Omega_{\text{eq}} - \Delta\Omega \sin^2 \phi,$$

где  $\Omega(\phi)$  и  $\Omega_{\text{eq}}$  — скорости вращения звезды на данной широте и экваторе;  $\Delta\Omega$  — разница скоростей вращения между полюсом и экватором, а коэффициент дифференциального вращения составляет  $D_r = \Delta\Omega/\Omega_{\text{eq}}$ . 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 НК в течение цикла. Вместе с тем эти результаты тоже не являются окончательными, так как разные авторы дают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

Помимо запятненности циклы активности проявляются в эмиссионных линиях хромосферы CaII НК ([23] и многочисленные последующие работы для звезд солнечного типа), в линии  $H_\alpha$  ([24], как для молодой post T Tauri звезды VY Ari, так и для быстровращающегося желтого АВГ гиганта IN Com), а также в темпах энерговыделения звездных вспышек и изменениях их энергетического спектра (для EV Lac, AD Leo, YZ CMi обнаружены циклы вспышечной активности продолжительностью 7–8 лет, [20]).

Однако эти эффекты могут быть не коррелированы с запятненностью звезд, и вопрос о совпадении между собой циклов, определяемых разными методами, остается открытым. 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 пятнами ( $\kappa$  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, на-

блюдается 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  $H_{\alpha}$  (LQ Hya, EV Lac), хотя для АВГ гиганта IN Com или молодой звезды VY Arg 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  $P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}}$ , которое для выборки звезд НК проекта показывает зависимость от потока в линиях  $\langle R'_{\text{НК}} \rangle$  и числа Россби. Существует и более общая зависимость  $\lg(P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}})$  от  $\lg(1/P_{\text{rot}})$ , в которую хорошо укладываются циклы, определенные всеми методами (пятнообразование, flip-flop, CaII НК, 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 Глайсберга, 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 при финансовой поддержке 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

1. *Berdyugina S. V.* Starspots: A Key to the Stellar Dynamo // Living Reviews in Solar Physics. — 2005. — Vol. 2. — P. 8.
2. *Kővári Z., Kriskovics L., Oláh K. et al.* Surface differential rotation of IL Hya from time-series Doppler images // Magnetic Fields throughout Stellar Evolution / ed. by P. Petit, M. Jardine, H. C. Spruit : IAU Symposium. — 2014. — Vol. 302. — P. 379—380. 1309. 1378.
3. *Strassmeier K. G.* Starspots // Astron. Astrophys. Rev. — 2009. — Vol. 17. — P. 251—308.
4. *Donati J.-F., Brown S. F.* Zeeman-Doppler imaging of active stars. V. Sensitivity of maximum entropy magnetic maps to field orientation // Astron. Astrophys. — 1997. — Vol. 326. — P. 1135—1142.

5. *Berdyugina S. V., Henry G. W.* Butterfly Diagram and Activity Cycles in HR 1099 // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 659. — P. L157–L160. astro-ph/0703530.
6. *Savanov I. S., Dmitrienko E. S.* Starspots and Activity of the Flare Star GJ 1243 // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 62. — P. 273–280.
7. *Kolbin A. I., Shimansky V. V.* Spotted star light curve numerical modeling technique and its application to HII 1883 surface imaging // *Astrophysical Bulletin.* — 2014. — Vol. 69. — P. 179–190.
8. *Savanov I. S.* Spots on the surfaces of late-type stars // *Astronomy Reports.* — 2014. — Vol. 58. — P. 478–487.
9. *Kozhevnikova A. V., Alekseev I. Y.* Long-term spottedness variations of 16 RS CVn stars // *Astronomy Reports.* — 2015. — Vol. 59. — P. 937–951.
10. *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.
11. *Alekseev I. Y., Kozhevnikova A. V.* Long-term Spot-Coverage Variations of 13 BY Dra G-K Dwarfs // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 62. — P. 396–411.
12. *Berdyugina S. V., Tuominen I.* Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 336. — P. L25–L28.
13. *Baliunas S. L., Donahue R. A., Soon W. H. et al.* Chromospheric variations in main-sequence stars // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 438. — P. 269–287.
14. *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.
15. *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.
16. *Alekseev I. Y., Kozlova O. V.* Spots and Active Regions on the Emission-Line Star VY Ari // *Astrophysics.* — 2001. — Vol. 44. — P. 429–439.
17. *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.
18. *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.

19. *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.
20. *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.
21. *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.
22. *Berdyugina S. V., Usoskin I. G.* Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 405. — P. 1121–1128.
23. *Wilson O. C.* Chromospheric variations in main-sequence stars // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 226. — P. 379–396.
24. *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.

# МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ВОЛОКНА

**И. И. Зинченко**

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

В последние годы сильно возрос интерес к изучению межзвездных волокон, поскольку благодаря полученным на новых инструментах наблюдательным данным стало понятно, что они играют ключевую роль в процессах звездообразования. К настоящему времени идентифицированы сотни волокон, проведены детальные исследования ряда из них. В данном обзоре суммируются основные результаты наблюдений межзвездных волокон, описываются теоретические модели, в которых рассматриваются строение волокон, их устойчивость и эволюция, а также механизмы образования.

# INTERSTELLAR FILAMENTS

**I. I. Zinchenko**

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

In recent years, interest in studying interstellar filaments has greatly increased, because, thanks to the observational data obtained with new instruments, it became clear that they play a key role in the star formation processes. To date, hundreds of filaments have been identified, detailed studies have been conducted on a number of them. This review summarizes the main results of observations of interstellar filaments, and also describes theoretical models that consider the structure of filaments, their stability and evolution, as well as the mechanisms of formation.

## Введение

В последние годы взгляды на то, как происходит образование звезд в межзвездных облаках, претерпели существенные изменения. Это произошло благодаря появлению большого массива новых наблюдательных данных, в первую очередь полученных на космической обсерватории “Herschel” [1]. Стало понятно, что огромную роль

в процессе звездообразования играют волокна, которые повсеместно наблюдаются в межзвездных облаках [2]. В результате появилась новая парадигма звездообразования, согласно которой именно межзвездные волокна играют ключевую роль в образовании звезд [2, 3].

В настоящем обзоре суммируются основные наблюдательные данные о межзвездных волокнах, в том числе полученные с участием автора, а также рассматриваются теоретические модели образования и эволюции волокон.

## Наблюдения

Хотя, как отмечено выше, интерес к межзвездным волокнам был сильно подогрев результатами обсерватории “Herschel”, волокнистые структуры наблюдались и исследовались в межзвездной среде много раньше (см, например, обзоры в [2, 4]). Они видны в оптических изображениях темных туманностей, в структуре облаков нейтрального атомарного водорода, наблюдаемых в линии 21 см, в молекулярных облаках разного типа. Волокнистая структура выделяется и в облаках, где нет признаков активного звездообразования (например, [5]), что указывает на ее появление до начала данного процесса. В то же время в местах пересечения волокон часто регистрируются очаги звездообразования.

Наблюдения волокон на обсерватории “Herschel” были сосредоточены на сравнительно близких к нам объектах. В дальнейшем были проведены исследования волокнистых структур на масштабах Галактики, в частности, на основе анализа данных обзора ASTROGAL [6]. В этой работе было идентифицировано около 500 волокнистых структур на расстояниях до  $\sim 12$  кпк.

Характерной особенностью волокон в близких к нам облаках является постоянство их толщины ( $\sim 0.1$  пк) в разных объектах [2]. Однако более далекие волокна, идентифицированные в упомянутом обзоре [6], имеют в среднем существенно большую толщину:  $\sim 0.5$  пк. В то же время в туманности Ориона выделены и значительно более тонкие структуры шириной  $\sim 0.035$  пк [7]. Еще более тонкое волокно, шириной  $\sim 0.01$  пк, зарегистрировано нами в области S255IR [8, 9].

Во многих случаях наблюдаются примыкающие к волокнам нитевидные структуры, ориентированные почти перпендикулярно волокну. Наблюдения показывают, что их ориентация примерно совпадает с направлением магнитного поля [2]. Предполагается, что вдоль этих линий окружающее вещество стекает к волокну.

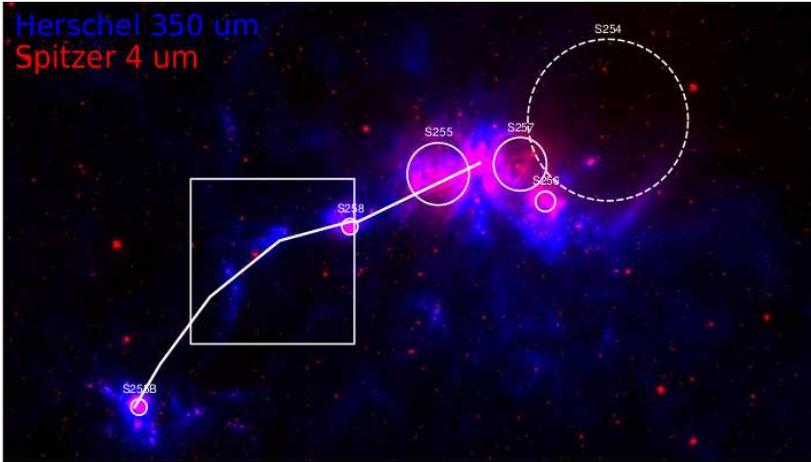


Рис. 1. Общий вид комплекса звездообразования S254–S258 на двух волнах ИК-диапазона. Кругами отмечены зоны H II, белая линия показывает траекторию, вдоль которой строилась диаграмма позиция–скорость на рис. 2, прямоугольником выделена исследованная область. Рисунок взят из работы [13]

Гравитационная устойчивость волокон определяется величиной массы на единицу длины. Критическое значение зависит от скорости звука, которая, в свою очередь, зависит от температуры. На устойчивость волокна влияют также турбулентность и магнитное поле [10]. Среди исследованных волокон есть как те, у которых масса на единицу длины превышает критическое значение, так и объекты с обратным отношением этих величин.

Довольно часто наиболее активное звездообразование наблюдается на концах волокон (например, [11]). По-видимому, это связано с эффектами конечного размера волокна (в отличие от бесконечного цилиндра).

В качестве примера исследований межзвездного волокна можно привести наши работы по изучению такой структуры в комплексе звездообразования S254–S258 [12, 13]. На рис. 1 представлен общий вид данного комплекса в ИК-диапазоне, прямоугольником выделена исследованная область [13].

Данная область была исследована в различных молекулярных линиях, в частности, в линиях CO,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ , CS,  $\text{NH}_3$ . Эти данные свидетельствуют, что волокно представляет собой единую структуру

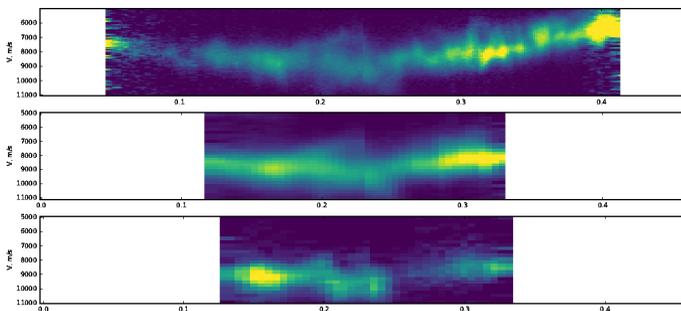


Рис. 2. Диаграммы позиция—скорость в линиях  $^{13}\text{CO}(2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)$  и  $\text{CS}(2-1)$  (сверху вниз) вдоль траектории, показанной на рис. 1. Рисунок взят из работы [13]

с плавным изменением скорости вдоль оси (рис. 2). Подобный вид диаграммы позиция—скорость скорее всего указывает на продольный коллапс волокна к центральному массивному сгустку [14, 15].

Масса волокна на единицу длины превышает критическое значение, что указывает на его гравитационную неустойчивость. Толщина волокна по наблюдениям в линии  $^{13}\text{CO}(2-1)$  оказалась около 1 пк, что заметно больше типичных значений. По наблюдениям в линии  $\text{CS}(2-1)$ , которая является индикатором плотного газа, выделено несколько плотных сгустков с массами 30–160  $M_{\odot}$ . Оценки вириального параметра показывают, что сгустки гравитационно неустойчивы. Наблюдения в ИК-диапазоне показывают, что сгустки ассоциируются с молодыми звездными скоплениями [12].

Детальный анализ ИК-изображений и карт в линии CO позволил также выделить нитевидные структуры (“striations”), расположенные под большими углами к волокну [16]. Дисперсия скоростей газа возрастает в местах их примыкания к волокну, что указывает на вероятный приток вещества к волокну вдоль этих нитей. Профили линий CO имеют характерную асимметрию, свидетельствующую о радиальном падении вещества на волокно. В целом данный объект является хорошим примером межзвездного волокна, находящегося на стадии начала формирования звездных скоплений.

## Модели

Теоретические модели посвящены вопросам равновесной структуры волокон, их устойчивости, фрагментации, а также механизмам образования волокон.

Задача о гидростатическом равновесии бесконечного самогравитирующего изотермического цилиндра была решена много лет назад [17, 18]. Радиальный профиль плотности дается выражением

$$\rho(r) = \frac{\rho_c}{\left[1 + (r/R_0)^2\right]^{p/2}}, \quad (1)$$

где  $\rho_c$  — центральная плотность;  $R_0$  — радиус центральной плоской части. Теоретическое значение  $p$  для изотермического цилиндра равно 4. В то же время наблюдения дают значения, близкие к 2 [2]. Причиной расхождений может быть неизотермичность волокон. Величина  $R_0$  составляет

$$R_0 = \frac{c_s^2}{G\Sigma_0}, \quad (2)$$

где  $c_s$  — скорость звука;  $G$  — гравитационная постоянная;  $\Sigma_0$  — поверхностная плотность [19, 20].

Критическое значение массы на единицу длины равно

$$M_{\text{line,c}} = \frac{2c_s^2}{G}. \quad (3)$$

С учетом нетепловых движений скорость звука надо заменить на  $\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{c_s^2 + \sigma_{\text{NT}}^2}$  [10]. Волокна, у которых масса на единицу длины превышает критическое значение, фрагментируют и коллапсируют по радиусу. Длина Джинса вдоль оси составляет [19, 20]

$$\lambda_c = 3.94 \frac{c_s^2}{G\Sigma_0}. \quad (4)$$

Более реалистичные модели волокон учитывают также внешнее давление [21]. При этом несколько меняется теоретический закон распределения плотности. В некоторых случаях наблюдения хорошо описываются моделью ограниченного внешним давлением волокна, окруженного оболочкой низкой плотности [11].

Что касается механизмов образования волокон, то многочисленные исследования показывают, что они возникают естественным

образом в результате сверхзвуковой турбулентности и воздействия ударных волн (например, [2, 22]). Волокна также возникают в результате фрагментации плоских листообразных структур (например, оболочек вокруг зон Н II, старых остатков сверхновых и т. п.).

Ряд работ посвящен механизмам образования примыкающих к волокнам нитевидных структур, по которым, как представляется, окружающее вещество может стекать на волокно (“striations”). Недавний анализ нескольких возможных механизмов показал, что наиболее вероятным является нелинейное взаимодействие МГД волн [23].

## Заключение

Наблюдательные и теоретические исследования межзвездных волокон продемонстрировали, что они играют очень важную роль в процессе звездообразования. Получен уже довольно большой объем наблюдательных данных о волокнах как в сравнительно близких, так и в весьма удаленных областях. Тем не менее остается еще немало нерешенных вопросов, которые требуют как дальнейших детальных наблюдений межзвездных волокон, так и теоретического анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 17-12-01256 (анализ данных наблюдений), а также гранта РФФИ 18-02-00660 (рассмотрение теоретических моделей).

## Библиографические ссылки

1. *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.
2. *André P., Di Francesco J., Ward-Thompson D. et al.* From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 27–51. 1312.6232.
3. *Соболев А. М.* Современные парадигмы образования звезд в галактике // *Физика космоса* : тр. 46-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2017 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — P. 111.
4. *Myers Philip C.* Filamentary Structure of Star-forming Complexes // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 700. — P. 1609–1625. 0906.2005.

5. *Ward-Thompson D., Kirk J. M., André P. et al.* A Herschel study of the properties of starless cores in the Polaris Flare dark cloud region using PACS and SPIRE // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L92. 1005.2519.
6. *Li G.-X., Urquhart J. S., Leurini S. et al.* ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 591. — P. A5. 1604.00544.
7. *Hacar A., Tafalla M., Forbrich J. et al.* An ALMA study of the Orion Integral Filament. I. Evidence for narrow fibers in a massive cloud // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 610. — P. A77. 1801.01500.
8. *Zinchenko I., Liu Sheng-Yuan, Su Yu-Nung, Zemlyanukha P.* Multiline observations of S255IR with ALMA // *IAU Symposium* / ed. by Maria Cunningham, Tom Millar, Yuri Aikawa. — 2018. — Vol. 332. — P. 270–273.
9. *Zinchenko I., Liu Sh.-Y., Su Yu-N., Wang Yu.* Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2018. — Vol. 18. — P. 093.
10. *Fiege Jason D., Pudritz Ralph E.* Helical fields and filamentary molecular clouds - I // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — Vol. 311. — P. 85–104. astro-ph/9901096.
11. *Kainulainen J., Hacar A., Alves J. et al.* Gravitational fragmentation caught in the act: the filamentary Musca molecular cloud // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A27.
12. *Samal M. R., Ojha D. K., Jose J. et al.* Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 581. — P. A5.
13. *Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I., Samal M. R. et al.* Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2018. — Vol. 18. — P. 095.
14. *Peretto N., Fuller G. A., André P. et al.* SDC13 infrared dark clouds: Longitudinally collapsing filaments? // *Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 561. — P. A83. 1311.0203.
15. *Kirsanova M. S., Salii S. V., Sobolev A. M. et al.* Molecular gas in high-mass filament WB673 // *Open Astronomy.* — 2017. — Vol. 26. — P. 99–105.
16. *Рябухина О. Л., Зинченко И. И., Соболев А. М.* Поиск и исследование нитевидных структур в области G192.76+00.10 // *Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 29 янв.—2 февр. 2018 г.)*. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 184–185.
17. *Stodólkiewicz J. S.* On the Gravitational Instability of Some Magneto-Hydrodynamical Systems of Astrophysical Interest. Pt. 3. // *Acta Astronomica.* — 1963. — Vol. 13. — P. 30–54.

18. *Ostriker J.* The Equilibrium of Polytropic and Isothermal Cylinders // *Astrophys. J.* — 1964. — Vol. 140. — P. 1056.
19. *Larson R. B.* Cloud fragmentation and stellar masses // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 214. — P. 379–398.
20. *Hartmann L.* Flows, Fragmentation, and Star Formation. I. Low-Mass Stars in Taurus // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 578. — P. 914–924. [astro-ph/0207216](#).
21. *Fischera J., Martin P. G.* Physical properties of interstellar filaments // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 542. — P. A77. [1204.3608](#).
22. *Inoue Tsuyoshi, Hennebelle Patrick, Fukui Yasuo et al.* The formation of massive molecular filaments and massive stars triggered by a magnetohydrodynamic shock wave // *Publications of the Astronomical Society of Japan.* — 2018. — Vol. 70. — P. S53.
23. *Tritsis Aris, Tassis Konstantinos.* Striations in molecular clouds: streamers or MHD waves? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 3602–3615.

# ПОИСК РАСШИРЯЮЩИХСЯ ОБЛАСТЕЙ H II ВБЛИЗИ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

**М. С. Кирсанова**

*Институт астрономии РАН*

Молодые массивные звезды образуют вокруг себя области ионизованного водорода (H II) за счет поглощения ультрафиолетовых фотонов в окружающих молекулярных облаках. Согласно теории области H II должны быть расширяющимися объектами, пока массивная звезда находится на главной последовательности, но найти признаки расширения, используя наблюдательные данные о реальных объектах, непросто. В докладе проводится обзор диагностических возможностей спектральных линий молекул на примере области H II RCW 120 вокруг O-звезды.

## SEARCH OF EXPANDING H II REGIONS NEAR MASSIVE STARS

**M. S. Kirsanova**

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

Young massive stars produce H II regions in the surrounding material as their parent molecular clouds absorb ultraviolet photons. While a theory describes the H II regions as objects that expand as long as the central star is on the main sequence, it is not straightforward to find confirmations of the expansion in observational data on real objects. The aim of the talk to review diagnostic capabilities of molecular spectral lines using an H II region RCW 120 around an O type star as an example.

Массивные звезды редки, но они являются своеобразными галактическими маяками, указывая на места с активным звездообразованием благодаря своему мощному ультрафиолетовому (УФ) излучению и различным процессам обратной связи с межзвездной средой.

Рождение молодой массивной звезды сопровождается образованием вокруг нее области ионизованного водорода (H II) из-за мощного потока УФ-фотонов с энергией больше 13.6 эВ. После того как на некотором расстоянии от звезды скорость ионизации становится равной скорости рекомбинации, рост массы ионизованного газа и

объема области Н II не останавливается, поскольку существует разница давлений между горячим ионизованным газом и холодным нейтральным газом того облака, в котором образовалась массивная звезда. Возникающая при этом ударная волна (УВ) уплотняет газ родительского облака, поэтому дальнейший процесс расширения области Н II сопровождается ростом массы плотного слоя, который движется от ионизирующей звезды вглубь облака. Весь процесс хорошо описан в книге [1]. Радиус области Н II увеличивается со временем как  $r_{\text{ioniz}} \sim t^{4/7}$  при идеализированной постановке задачи о расширении в однородное молекулярное облако [2]. Для типичных условий в межзвездной среде время достижения равновесия оказывается на порядок величины больше, чем время жизни массивной звезды на главной последовательности [1]. Поэтому наблюдаемые области Н II должны быть расширяющимися объектами.

Из-за гравитационной неустойчивости в слое, сжатом УВ, начинается процесс фрагментации с последующим образованием молодых массивных звезд в плотных сгустках, на которые распадается слой. Этот механизм образования звезд «сбор и сжатие» был рассмотрен, например, в работе [3]. Кроме индуцирования образования плотных сгустков со звездообразующими объектами в них УВ может обжимать уже существующие плотные сгустки газа, ускоряя наступление условий для гравитационной неустойчивости в них. Недавний обзор литературы по звездообразованию вокруг областей Н II представлен в работе [4].

Плотные слои сжатого УВ газа вокруг областей Н II видны как инфракрасные (ИК) кольцевые туманности на изображениях, полученных при помощи телескопов “Spitzer” и “Herschel” [5]. В работах [6] и [7] указывается на большую долю массивных объектов среди (прото)звезд вокруг областей Н II. В этих работах отмечено, что до 30 % всех массивных звезд в Галактике могут быть образованы из-за воздействия УВ от расширяющихся областей Н II на молекулярные облака. Несмотря на долгую историю исследования индуцированного звездообразования, в том числе процесса «сбора и сжатия», до сих пор не найдена область Н II, вокруг которой в *движущемся плотном слое* находятся молодые (прото)звезды. Для теории звездообразования найти такие объекты было бы очень важно, поскольку это означало бы, что значительная доля массивных звезд образуется при одинаковых и достаточно хорошо определенных начальных условиях. Однако на сегодняшний момент приходится в основном довольствоваться косвенным указанием на то, что область Н II ин-

дуцировала или как-то повлияла на звездообразование — находить молодые (прото)звезды в направлении на ИК-кольцевые туманности (например, [8]).

Скорость расширения области H II достаточно быстро падает по мере ее расширения. На рис. 1 показана скорость газа вблизи области H II для модели RCW 120 (ионизирующая звезда с эффективной температурой 37 000 К, начальная плотность газа  $10^4 \text{ см}^{-3}$  [9]). Возраст RCW 120 около 600 тыс. лет, модель дает скорость расширения не более 1 км/с. Из рисунка видно, что скорость расширения превышает типичную дисперсию скоростей в областях образования массивных звезд 2–3 км/с только на раннем этапе эволюции, продолжительность которого в разы меньше, чем возраст области H II размером в 1 пк. Поэтому ожидать, что на картах излучения в линиях молекул обнаружатся значительные (до нескольких км/с) сдвиги спектральных линий, можно только для меньшинства наблюдаемых областей H II.

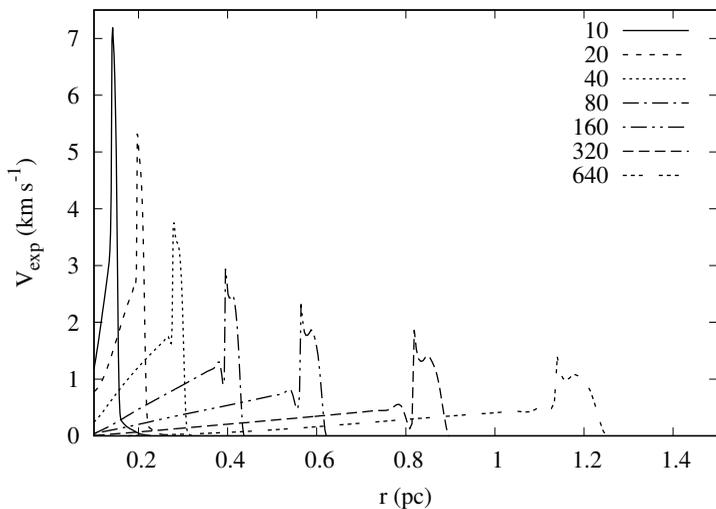


Рис. 1. Скорость газа вблизи области H II. Расстояние до звезды показано по горизонтальной оси (звезда находится в области  $r = 0$ ), значение скорости — по вертикальной. Рисунок для модели области H II RCW 120 — из работы [9]. Показана скорость газа для нескольких возрастов области H II, которые обозначены на легенде (в тыс. лет)

Для областей H II наподобие RCW 120, где скорость расширения невысока, приходится прибегать к более сложному анализу — анализу изменения формы и яркости спектральных линий на картах. Для иллюстрации на рис. 2 показан схематический вид окрестностей области H II, которая окружена так называемой областью фотодиссоциации (ФДО). В ФДО физические и химические процессы определяются в основном поглощением УФ-фотонов с энергией меньше потенциала ионизации водорода 13.6 эВ вплоть до примерно 11 эВ — потенциала ионизации углерода. В зависимости от удаления от звезды углерод может наблюдаться преимущественно либо в виде иона  $C^+$ , либо в виде молекулы CO. В соответствии с этим разделением спектральные линии излучения молекулы CO могут иметь тот или иной вид (см. примеры профилей линий на рисунке).

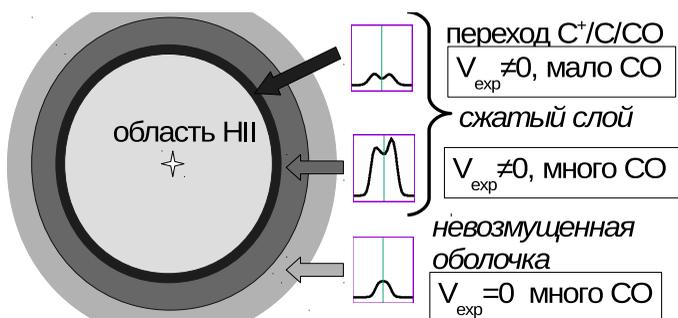


Рис. 2. Схематический вид ФДО — окрестностей области H II. Светло-серый — ионизованный газ; черный — возмущенный слой ФДО, где углерод в основном в виде  $C^+$ ; темно-серый — возмущенный слой, где углерод в основном в виде CO; белый — невозмущенная оболочка, где углерод в основном в виде CO. Также показаны модельные профили спектральных линий. Рисунок взят из работы [10]

Для модели области RCW 120 из работы [9] часть возмущенного UV слоя содержит углерод преимущественно в виде  $C^+$  (черный на рис. 2), в этом слое мало CO, поэтому линии CO будут оптически тонкими, а максимальное расстояние в км/с между пиками на карте профилей линий будет соответствовать удвоенной скорости расширения  $2V_{\text{эxp}}$ , поскольку симметричный двугорбый профиль линии объясняется эффектом проекции расширяющейся оболочки. Далее от звезды, куда фотоны с энергиями 11–13 эВ уже не проникают, находится та часть возмущенного плотного слоя, где углерод присут-

ствуется в виде CO, и за счет значительной оптической толщины линий CO формируется двухпиковый скошенный профиль линии. Еще дальше от звезды находится невозмущенный молекулярный газ, где профили линий CO могут быть либо одnogорбыми, либо двугорбыми в зависимости от энергии перехода и изотопомера молекулы CO. Согласно схеме на рис. 2 анализ профилей линий помогает отделить уплотненный UV движущийся газовый слой от невозмущенной оболочки.

Используя архивные данные телескопа APEX, можно получить карту излучения изотопомеров молекулы CO в различных переходах в направлении области H II RCW 120. Наблюдательные профили линий CO двугорбые, что вызвано совместным действием эффектов проекции движущегося слоя, уплотненного UV, и самопоглощением. Расстояние между пиками на профилях линий сравнимы с теоретическими значениями. Спектральные карты в направлении RCW 120 не противоречат модели расширения области H II и окружающего ее плотного молекулярного слоя со скоростью около 1 км/с.

Кроме сложностей анализа профилей линий излучения молекул, связанных с эффектом оптической толщины, конечное угловое разрешение телескопа также ограничивает возможности исследователя. На рис. 3 показаны радиальные распределения физических параметров вокруг модельной области H II (для параметров RCW 120 из работы [9]) и радиальные распределения интенсивности излучения молекулы CO для нескольких переходов без свертки с диаграммой направленности и с учетом свертки. Из рис. 3 видно, что после свертки двухпиковые теоретические радиальные распределения интенсивности размываются и становятся однопиковыми. Сжатый слой исчезает на радиальных распределениях в линии CO(1–0). Пики излучения в линиях CO(2–1) и CO(3–2) соответствуют внешней части сжатого слоя. Пик излучения в линии CO(4–3) лежит ближе к наиболее плотной части сжатого слоя. Интенсивность излучения в линиях CO(5–4) и CO(6–5) в направлении невозмущенной оболочки меньше 1 К. Видно, что излучение в этих линиях является хорошим индикатором сжатого слоя, а максимальные интенсивности приходятся на наиболее плотную и холодную его часть — не за счет температуры газа, а исключительно за счет высокой плотности газа, сжатого UV.

Таким образом, даже для протяженных областей H II, угловой размер которых составляет несколько минут дуги, только наиболее крупные одиночные телескопы и линии CO, соответствующие тре-

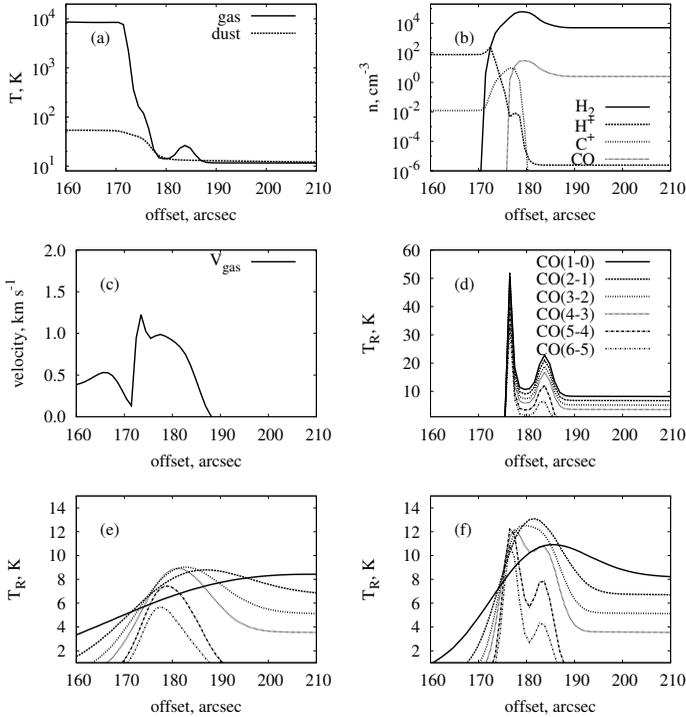


Рис. 3. Результаты моделирования RCW 120 — радиальные распределения физических параметров и химических содержаний, а также модельные яркостные температуры спектральных линий. По горизонтальной оси показано угловое расстояние от звезды в секундах. На панелях: *a* — температура газа и крупной пыли; *b* — содержания химических компонентов; *c* — скорость газа; *d* — интенсивность излучения линий CO без свертки, показывают интенсивности излучения линий CO с учетом свертки с диаграммой направленности: *e* — 12-метрового, *f* — 30-метрового телескопа. Рисунок взят из работы [11]

тьюму и выше уровням возбуждения, позволяют добиться достаточного пространственного разрешения для выделения слоя, сжатого UV, на фоне невозмущенного молекулярного облака. Другая возможность — переход к наблюдениям на интерферометрах, что решает вопрос ограниченного углового разрешения, но создает сложности, связанные с потерей информации о крупномасштабном излу-

чении молекулярного газа. Выбор инструмента и исследуемой линии излучения зависит от объекта исследования и поставленной задачи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-20049.

## Библиографические ссылки

1. *Dyson J. E., Williams D. A.* The physics of the interstellar medium. — 1997.
2. *Spitzer L.* Physical processes in the interstellar medium. — 1978.
3. *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
4. *Кирсанова М. С.* Индуцированное звездообразование // *Физика космоса : тр. 41-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2012 г.)*. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 81–91.
5. *Anderson L. D., Zavagno A., Barlow M. J. et al.* Distinguishing between HII regions and planetary nebulae with Hi-GAL, WISE, MIPSGAL, and GLIMPSE // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 537. — P. A1. 1110.3303.
6. *Thompson M. A., Urquhart J. S., Moore T. J. T., Morgan L. K.* The statistics of triggered star formation: an overdensity of massive young stellar objects around Spitzer bubbles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — P. 408–418. 1111.0972.
7. *Kendrew S., Beuther H., Simpson R. et al.* The Milky Way Project and ATLASGAL: The Distribution and Physical Properties of Cold Clumps Near Infrared Bubbles // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 825. — P. 142. 1602.06982.
8. *Deharveng L., Zavagno A., Schuller F. et al.* Star formation around RCW 120, the perfect bubble // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 496. — P. 177–190. 0902.0903.
9. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions — II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 469. — P. 630–638. 1705.00269.
10. *Кирсанова М. С., Павлюченков Я. Н.* Кинематика молекулярной оболочки вокруг области HII RCW120 и звездообразование в ней // *Астрономия-2018 : Современная звездная астрономия 2018*. — М. : Тривант, 2018. — С. 186–189.
11. *Кирсанова М. С.* Линии молекул вблизи областей ионизованного водорода // *Сб. тр. мемориальной конф. 2018 г., посвящен. памяти акад. А. А. Боярчука : науч. тр. Ин-та астрономии РАН*. — М. : Янус-К, 2018. — С. 284–289.

# ДААННЫЕ GAIA DR2: ОСОБЕННОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ДОСТУПА

**Д. А. Ковалева**

*Институт астрономии Российской академии наук*

25 апреля 2018 г. был обнародован второй релиз данных КА Gaia, включающий пятипараметрические астрометрические решения для 1.3 млрд звезд. Обсуждаются содержание релиза данных Gaia DR 2, характеристики астрометрических и фотометрических решений, а также возможности доступа к данным Gaia с использованием инструментов виртуальной обсерватории.

## GAIA DR2 DATA: CHARACTERISTICS, LIMITATIONS, ACCESS

**D. A. Kovaleva**

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

On April 25, 2018, the second data release of Gaia space mission has been published. It includes, among other data, five parameter astrometric solutions for 1.3 billions of stars. We discuss the content of this data release, specific characteristics of astrometric and photometric solutions, as well as methods of accessing Gaia DR2 data using Virtual observatory tools.

## Введение

25 апреля 2018 г. был опубликован второй релиз данных астрометрической космической миссии Gaia [1]. Это первый, условно говоря, «настоящий» релиз данных Gaia — в отличие от первого (2016), в котором для вычисления астрометрических параметров частично использовались данные каталогов Hipparcos и Tycho-2 [2]. Gaia DR2 содержит основной каталог данных, включающий пятипараметрические астрометрические решения (координаты, собственные движения и параллаксы) для 1 330 млн звезд, только двухпараметрические решения (координаты) для 360 млн звезд, видимые величины в одной фотометрической полосе Gaia G для 1 690 млн звезд, причем для большей части этих звезд (1 380 млн) измерены также величины в

красной и голубой полосах  $G_{BP}$ ,  $G_{RP}$ . Кроме того, для 7.2 млн звезд измерены лучевые скорости и для 77—161 млн звезд сделаны оценки таких астрофизических параметров, как эффективная температура, светимость, радиус, величина межзвездного поглощения.

Массив астрометрических (и, в ряде отношений, фотометрических) данных Gaia является беспрецедентным по объему и по точности. Именно высокая точность определения параметров Gaia выявляет проблемы и систематические эффекты, которые для менее точных данных замывались шумом случайных ошибок. Кроме того, коллектив Gaia предоставляет пользователю не только обработанные данные, но и большое число технических характеристик параметров их обработки, что позволяет, по замыслу авторов, астроному при обращении к этим данным делать сознательный выбор в отношении требуемых параметров своей выборки [3]. Помимо основного каталога Gaia DR2 содержит дополнительные таблицы, посвященные переменным объектам некоторых типов (например, долгопериодическим переменным, цефеидам, звездам типа RR Lyr), объектам Солнечной системы, кросс-идентификации и др. Объем данных в целом превышает 550 терабайт. Объем основного каталога составляет 2 терабайта. В этом случае эффективным способом обращения к данным представляется создание выборок с использованием предоставляемых архивами Gaia инструментов.

## Gaia DR1, DR2 и последующие релизы данных

Важно знать, что релизы данных Gaia DR1, DR2 (и последующие релизы данных) являются полностью независимыми результатами обработки массивов данных, полученных миссией Gaia на протяжении различных промежутков времени ее функционирования. При этом промежуток времени, покрытый каждым последующим релизом данных, включает предыдущие интервалы (DR1 — наблюдения с 25.07.2014 по 16.09.2015, т. е. первые 14 месяцев работы Gaia, DR2 — с 25.07.2014 по 23.05.2016, т. е. первые 22 месяца работы Gaia). Таким образом, из общих соображений, можно ожидать, что данные каждого последующего релиза данных точнее данных предыдущего. Однако, поскольку для получения пятипараметрического астрометрического решения данных первого релиза было недостаточно, в силу небольшого временного интервала, покрытого им, для 2 млн звезд каталога TGAS собственные движения и параллаксы были определены с использованием данных каталогов

Hipparcos и Tycho-2. При этом параллаксы, переопределенные в DR2 для звезд TGAS, как по номинальной, так и по фактической точности лучше параллаксов DR1. О собственных движениях этого сказать пока нельзя, и собственные движения TGAS, в случае расхождений с DR2, следует, по-видимому, предпочесть (см., например, <http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/gaia-workshop-2018/files/Gaia-DR2-warnings-caveats-GaiaUserWorkshop.pptx>). Кроме того, для объектов, имеющих особенности, параметры, определенные в DR1, могут оказываться более точными, чем в DR2 (см., например, ниже о казусе RR Lyr).

Кроме того, координаты релиза данных DR2 относятся к иной эпохе (J2015.5), чем координаты DR1 (J2015.0), что может быть значимо для самых быстродвижущихся объектов. Внутренние многозначные идентификаторы Gaia, присваиваемые каждому объекту в каждом релизе, не наследуются, а изменяются (и будут изменяться) от релиза к релизу данных вплоть до финального, ожидаемого после 2022 г. То же относится и к фотометрической системе: ее калибровки были пересчитаны для релиза данных 2 относительно DR1 и будут уточняться в дальнейшем, поэтому фотометрическая величина  $G_{DR1}$  систематически отличается от фотометрической величины  $G_{DR2}$ . Именно высокая точность данных делает значимыми эти различия между параметрами, определенными в DR2, относительно DR1.

## О полноте Gaia DR2

Степень полноты данных второго релиза существенно выше, чем в DR1, однако все еще несовершенна. В основном DR2 полон для диапазона звездных величин  $13^m \leq G \leq 17^m$ . Однако количество параметров, определенных даже для этого диапазона звездных величин, зависит от расположения звезды на небесной сфере. Распределение звезд DR2 по небу носит видимые следы закона сканирования КА Gaia. Пятипараметрические астрометрические решения вычисляются только для звезд, попавших в поле зрения аппарата не менее определенного числа раз, причем группы наблюдений должны быть разделены достаточными промежутками времени (эти группы наблюдений называются “visibility periods”, каждый из них может содержать до десятков наблюдений; пятипараметрические астрометрические решения опубликованы только для звезд, для которых количество visibility periods не меньше шести). Предполагается,

что к окончанию расчетного срока функционирования проекта Gaia (июль 2019 г.) вся небесная сфера должна быть покрыта наблюдениями с количеством visibility periods не меньше шести. По состоянию на май 2016 г., когда был завершен сбор данных, обработанных в рамках DR2, на небесной сфере есть участки, не покрытые достаточным количеством наблюдательных периодов, и поэтому пятипараметрические астрометрические решения имеют области неполноты по распределению по координатам. Для ярких объектов  $G \leq 3^m$  данные в DR2 отсутствуют, а звезды в диапазоне звездных величин  $3^m \leq G \leq 7^m$  представлены с существенной неполнотой. Предельная звездная величина снижается в плотных звездных полях с  $G \approx 21^m$  до  $G \approx 18^m$ . Имеются потери (порядка 20 %) среди звезд с высоким собственным движением и звезд, расположенных вблизи ярких объектов.

## Систематические эффекты

### Астрометрические данные

Точность определения астрометрических параметров для звезды систематически зависит от ее блеска и цвета. В связи с этим качество астрометрического решения связано с качеством фотометрического решения. Имеются мелкомасштабные корреляции ошибок, связанные с законом сканирования КА. Сравнение с параллаксами квазаров показало наличие систематического сдвига нуля-пункта параллакса порядка  $-0.029 mas$  [3]; однако этот сдвиг зависит от положения объекта на небесной сфере и, по-видимому, от типа объекта (в частности, его фотометрических характеристик). Так, для цефеид значение сдвига нуля-пункта определено равным  $-0.046 mas$  [4], а для звезд ветви красных гигантов  $-0.050 mas$  [5]. Наличие систематических эффектов, не исчезающих при усреднении, приводит к тому, что фактическая ошибка среднего для значений, усредненных по группе объектов, не может быть значимо меньше ошибки для отдельного объекта.

### Фотометрические данные

Значения ошибок определения фотометрических величин систематически зависят от фотометрической величины и цвета звезды, причем эта зависимость, в силу свойств методов усреднения, не является гладкой. Имеется систематическая зависимость определения

фотометрических характеристик от времени, что не влияет значительно на усредненные данные в основном каталоге DR2, но может быть важно для кривых блеска переменных объектов [6, 7].

### Двойные и переменные объекты

В DR2 отсутствует ранее запланированный каталог неодионых (двойных и кратных) звезд, и, в зависимости от углового разделения и блеска, компоненты двойных систем интерпретируются либо как две, либо как одна звезда (см., например, [8]). Возможное орбитальное движение в этом случае систематически ухудшает качество как астрометрического, так и фотометрического решения. Для переменных объектов качество определения астрометрических и фотометрических параметров также может быть сомнительным, вплоть до одиозного (отмеченного самой командой Gaia) случая с RR Lyr (в Gaia DR2  $G = 17.04^m$  и параллакс  $-2.61 \pm 0.61 \text{ mas}$  при действительном максимальном блеске  $V = 7.06^m$  и амплитуде переменности до  $0.6^m$  [9] и параллаксе Gaia DR1 TGAS  $3.64 \pm 0.23 \text{ mas}$ ).

### Флаги и индикаторы качества решения

Помимо определенных в рамках DR2 значений параметров звезд и их ошибок основной каталог содержит также значительное количество параметров, характеризующих качество и различные свойства астрометрического и фотометрического решения для каждого из объектов. При создании собственной выборки с определенными свойствами можно руководствоваться информацией об этих параметрах (см., например, описание модели данных Gaia DR2 [https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/Gaia\\_archive/chap\\_datamodel/](https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/Gaia_archive/chap_datamodel/)) или использовать фильтры, предложенные в работе Линдгрена и др. [3]. При этом следует иметь в виду, что применение любого фильтра по качеству определения того или иного параметра вносит определенного рода систематические искажения в выборку (например, фильтр по величине относительной ошибки параллакса заведомо уменьшает в выборке долю далеких звезд).

## Астрофизические параметры

В отличие от астрометрических и фотометрических параметров звезд, определенных в Gaia DR2 с не достигавшейся ранее точностью и полнотой, к астрофизическим параметрам, опубликованным в основном каталоге, следует относиться не более как к приблизительным оценкам. Отметим, в частности, что оценки эффективной температуры сделаны в предположении отсутствия межзвездного поглощения, что, таким образом, означает их полную неадекватность для объектов, находящихся в зонах с высоким межзвездным поглощением. Межзвездное поглощение оценивается по соотношению величин в предположении стандартного закона поглощения с использованием значения параллакса; затем вычисляется светимость, а по светимости и эффективной температуре оценивается радиус звезды [10].

Отметим, что переход от параллакса к расстоянию в общем случае не является тривиальным. Оценка расстояния до объекта как величины, обратной его параллаксу, строго верна только при условии отсутствия ошибки параллакса. При ненулевой же наблюдательной ошибке параллакса (т. е. в любой ситуации реальных измерений) соответствующая ошибка расстояния до объекта несимметрична. Этой асимметрией можно с достаточным основанием пренебречь при относительных ошибках параллаксов до  $\approx 10\%$ . При относительной ошибке параллакса примерно от 10 до 20 % использование величины, обратной параллаксу, для оценки расстояния ведет к значимому систематическому занижению таких оценок (эффект Лутца—Келкера). Для отрицательных значений параллакса, как и для значений, определенных с большими ошибками, использование в качестве расстояния величины, обратной значению параллакса, некорректно. Подробный обзор этой проблемы см. в [11]. В ряде задач выход может быть найден в использовании байесовских методов для вычисления расстояния по параллаксу с учетом предварительных соображений о распределении звезд в рассматриваемом ансамбле. В частности, для всех объектов Gaia DR2 с известными параллаксами были сделаны такие оценки в работе [12]. Соответствующий каталог [13] является сопроводительным к архиву данных Gaia и в некоторых случаях размещается вместе с ним.

## Возможности доступа к данным Gaia DR2

Данные Gaia DR2 размещены в виде архива и доступны на портале ESA <http://gea.esac.esa.int/archive/>, а также в партнерских центрах данных в Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg (CDS), ASI Space Science Data Center (SSDC), Astronomisches Rechen-Institut (ARI) и Institut fur Astrophysik Potsdam (AIP).

Запросы к архиву Gaia организуются в соответствии со стандартами Виртуальной обсерватории с использованием языка ADQL (Astronomical Data Query Language) <http://www.ivoa.net/documents/REC/ADQL/ADQL-20081030.pdf> и протокола обращения TAP (Table Access Protocol) <http://www.ivoa.net/documents/TAP/20180830/PR-TAP-1.1-20180830.pdf>. Запросы на ADQL могут быть адресованы к архиву Gaia как через специализированные веб-интерфейсы центров данных, так и с помощью клиентов (Topcat <http://www.starlink.ac.uk/topcat/>, STILTS <http://www.starlink.ac.uk/stilts/>, Java и Python TAP-клиенты).

В ходе тьюториала будут продемонстрированы некоторые возможности взаимодействия с архивом данных Gaia, слушатели смогут протестировать типовые варианты запросов.

## Заключение

Качество и объем астрометрических и фотометрических данных Gaia DR2 задают высокие требования к пониманию свойств полученных данных для их эффективного использования. Вплоть до выхода очередного, третьего, релиза в 2021 г. данные DR2 будут основным источником однородной и высокоточной астрометрической, фотометрической информации и информации о лучевых скоростях звезд, широко используемых в мировой астрономии. Кроме того, доступ к данным DR3 и финального релиза данных Gaia будет организован с использованием тех же принципов, что повышает значимость освоения инструментов доступа к архиву Gaia DR2 сегодня.

Все работы, использующие данные Gaia, должны сопровождаться следующей благодарностью: “This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement”.

## Библиографические ссылки

1. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A1. 1804.09365.
2. *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. 1609.04172.
3. *Lindegren L., Hernández J., Bombrun A. et al.* Gaia Data Release 2. The astrometric solution // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A2. 1804.09366.
4. *Riess A. G., Casertano S., Yuan W. et al.* Milky Way Cepheid Standards for Measuring Cosmic Distances and Application to Gaia DR2: Implications for the Hubble Constant // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 861. — P. 126. 1804.10655.
5. *Zinn J. C., Pinsonneault M. H., Huber D., Stello D.* Confirmation of the zero-point offset in Gaia Data Release 2 parallaxes using asteroseismology and APOGEE spectroscopy in the Kepler field // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1805.02650.
6. *Riello M., De Angeli F., Evans D. W. et al.* Gaia Data Release 2. Processing of the photometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A3. 1804.09367.
7. *Evans D. W., Riello M., De Angeli F. et al.* Gaia Data Release 2. Photometric content and validation // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A4. 1804.09368.
8. *Ziegler C., Law N. M., Baranec C. et al.* Measuring the Recoverability of Close Binaries in Gaia DR2 with the Robo-AO Kepler Survey // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1806.10142.
9. *Samus' N. N., Kazarovets E. V., Durlевич O. V. et al.* General catalogue of variable stars: Version GCVS 5.1 // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 80–88.
10. *Andrae R., Fouesneau M., Creevey O. et al.* Gaia Data Release 2. First stellar parameters from Apsis // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A8. 1804.09374.
11. *Bailer-Jones C. A. L.* Estimating Distances from Parallaxes // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2015. — Vol. 127. — P. 994. 1507.02105.
12. *Luri X., Brown A. G. A., Sarro L. M. et al.* Gaia Data Release 2. Using Gaia parallaxes // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A9. 1804.09376.

13. *Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Foesneau M. et al.* Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2 // *Astron. J.* — 2018. — Vol. 156. — P. 58. 1804.10121.

# ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В АСТРОНОМИИ И АСТРОФИЗИКЕ

**Д. А. Кононов**

*Институт астрономии РАН*

Эта лекция ориентирована преимущественно на студентов и имеет своей целью знакомство начинающих астрономов с обратными задачами наблюдательной астрономии и астрофизики. В лекции я расскажу, в чем заключается понятие обратной задачи, каковы особенности решения подобных задач, какие интересные и важные для науки результаты получаются в итоге. Также я приведу ряд иллюстративных примеров из различных областей астрономии и астрофизики.

## INVERSE PROBLEMS IN ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS

**D. A. Kononov**

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

This review is intended to provide students with basic knowledge about inverse problems arising in observational astronomy and astrophysics. I am going to explain what inverse problems are, what difficulties we face when solving these problems, and what outstanding results we can obtain. In addition I am going to present a number of the most illustrative examples from various areas of astronomy and astrophysics.

## Введение

Обратными мы называем задачи, связанные с выяснением свойств объектов или причин явлений по их наблюдаемым следствиям. При этом обратные задачи возникают далеко не только в научно-технической сфере. В качестве иллюстративного примера обратной задачи, так сказать «из жизни», можно вспомнить, как сомелье по вкусу, цвету и запаху вина выясняет регион его происхождения, погодные условия в момент созревания винограда и даже растительное окружение, соседствовавшее с виноградниками.

В качестве примера научно-технической обратной задачи можно привести деконволюцию изображений (очистку изображения от влияния передаточной функции прибора), томографию в медицине, восстановление радиокарт в радиоастрономии, решение кривых блеска в фотометрии двойных звезд, доплеровскую томографию, применяемую для исследования газовых потоков в тесных двойных звездах.

С математической точки зрения обратную задачу можно определить следующим образом. Рассмотрим операторное уравнение вида

$$Ax = y,$$

где  $A$  — линейный оператор, действующий из гильбертова\* пространства  $X$  в гильбертово пространство  $Y$ ;  $x$  — искомое решение («объект»);  $y$  — заданная правая часть уравнения («изображение»). Решение обратной задачи есть отыскание неизвестного  $x$  при известном виде оператора  $A$  и известных (наблюдаемых) значениях  $y$ .

Решение обратных задач сопряжено с определенными трудностями, которые связаны с тем, что большинство таких практических задач являются некорректными. Для прояснения понятия корректности и некорректности задачи обратимся к критерию, предложенному французским математиком Ж. Адамаром. Согласно Адамару корректно поставленной считается задача, для которой выполняются следующие три условия:

- решение существует для любого  $y \in Y$ ;
- решение единственно;
- решение устойчиво, т. е. малым изменениям  $y$  соответствуют малые изменения  $x$ .

В наблюдательной астрономии нарушаются преимущественно второе и третье условия. Так, например, при восстановлении радиокарт мы сталкиваемся с тем, что количество данных (размерность вектора  $y$ ) значительно меньше размерности вектора искомого решения ( $x$ ). Это немедленно нарушает второе условие Адамара: в пределах неизвестных, «отсутствующих» данных итоговое решение можно варьировать как угодно, т. е. оно уже не является единственным. Нарушение третьего условия связано с тем, что в реальных наблюдательных данных практически всегда присутствует шум, который в определенных случаях может сделать решение задачи очень неустойчивым.

---

\* Гильбертовым пространством называется обобщение евклидова пространства на бесконечномерный случай.

Большое разнообразие обратных задач, а также трудности, связанные с их решением, породили развитие не только ряда отдельных математических методов, но и целого направления в математике. Целью данной лекции и является знакомство слушателя с некоторыми самыми иллюстративными примерами астрономических и астрофизических задач и методов их решения. Поскольку автор лекции занимается решением обратных задач, связанных с восстановлением астрономических изображений (доплеровская томография), основной акцент в лекции будет сделан именно на этих задачах. Однако будет уделено внимание и более широкому кругу задач.

## Исторический обзор

Как это ни странно, но с того момента, как люди начали решать первые астрономические обратные задачи, прошло значительно больше времени, чем можно себе представить. В работе [1] приведен иллюстративный пример одной из таких древних обратных задач. Речь идет о том, как древние греки, практически не имея под руками никакой сколь-нибудь серьезной математики, смогли по двумерным изображениям восстановить трехмерную форму объекта, т. е., говоря современным языком, решили томографическую задачу. А именно, наблюдая лунные затмения, они установили, что Земля имеет сферическую форму. Греки подметили, что лунные затмения наступают только в момент полнолуний и когда Солнце и Луна находятся в диаметрально противоположных точках небесной сферы. Из этого они сделали вывод, что затмения наступают, когда Земля заслоняет собой Луну от Солнца. Далее, они подметили, что в какой бы точке небесной сферы ни происходило затмение, земная тень всегда имеет круглую форму. Поскольку такую форму тени при любых углах проецирования может иметь только сфера, греки и сделали вывод, что Земля — это сферический объект.

Значительно позже, наблюдая одномерное движение Марса вдоль эклиптики, Кеплер смог восстановить двумерную форму его орбиты, а заодно, распространив полученные выводы на другие наблюдаемые в то время планеты, построил эмпирическую модель Солнечной системы, в которой планеты двигались по эллипсам, имеющим в одном из своих фокусов Солнце.

Приведенные выше примеры в строгом математическом смысле трудно назвать решением обратной задачи, поскольку они основаны не на обращении какого-либо уравнения, а на проверке заранее из-

вестных гипотез. Однако стоит отметить, что многие современные астрономические обратные задачи, имеющие строгую математическую постановку, основаны на некоторых гипотезах, пусть и значительно более сложных в математическом плане. В этом смысле можно сказать, что и древние греки, и Кеплер занимались обратными задачами, только они искали ответ не путем решения некоего математического уравнения, а путем перебора некоторых заранее известных решений.

Бурное развитие математических основ обратных задач началось в конце XIX — начале XX в. и связано с активными исследованиями в области функционального анализа, Фурье-анализа, теории операторов и интегральных уравнений. Ввиду сложности и обширности общих математических аспектов теории обратных задач, а также контекста лекции далее в этом разделе мы сосредоточим внимание на историческом обзоре наиболее значимых, с точки зрения автора, практических примеров и достижений. Тем более что одними из первых ученых, кто начал решать практические обратные задачи, были именно астрономы.

Так, например, одним из ныне часто используемых в обратных задачах преобразований является преобразование Радона [2] — интегральное преобразование, родственное преобразованию Фурье, которое, в частности, представляет собой основу для томографии. Впервые обращение этого преобразования в рамках решения практической задачи было выполнено именно в астрономии. Выполнил его выдающийся советский и армянский астроном В. А. Амбарцумян [3], решая задачу Эддингтона о восстановлении пространственных компонентов скоростей звезд по наблюдаемым лучевым. Стоит отметить, что при должном внимании упомянутая работа В. А. Амбарцумяна могла сыграть существенную роль не только в фундаментальной науке, но и в сугубо прикладных областях знания. Именно поэтому Алан Кормак, один из двух изобретателей медицинского томографа, получивший за свое изобретение Нобелевскую премию в 1964 г., упоминая работу Амбарцумяна в одной из своих статей, сказал, что если бы на нее обратили должное внимание, томограф мог бы появиться значительно раньше.

Всплеск активности в астрономических обратных задачах произошел в связи с появлением радиоастрономии. Технические особенности радиоастрономических наблюдений породили целый ряд методов восстановления изображений, среди которых многие затем эффективно переключались в другие области астрономии. В частности,

среди радиотелескопов присутствуют инструменты с так называемой веерной диаграммой направленности. Эти инструменты наблюдают не весь объект целиком, а «сканируют» его вдоль определенных направлений, и для получения двумерного изображения объекта необходимо использовать некий метод синтеза отдельных «сканов». Такой метод был предложен в 1967 г. Брэйсуэлом и Риддлом [4]. Их работа, среди прочего, интересна тем, что по сути предложенное решение есть также очередной способ обращения упомянутого выше преобразования Радона.

Следующим толчком к развитию эффективных методов восстановления изображений в радиоастрономии послужила острая проблема повышения пространственного разрешения, которая возникает ввиду значительно больших, в сравнении с оптикой, длин волн. Для иллюстрации всей глубины проблемы достаточно упомянуть, что для получения углового разрешения в  $1''$  на длине волны 21 см потребовалось бы построить телескоп с диаметром зеркала  $\sim 50$  км. В связи с этим для решения проблемы разрешения в радиоастрономии начал широко использоваться апертурный синтез (интерферометрия), который с необходимостью приводит к обратной задаче восстановления изображений по крайне разреженным данным. Здесь можно отметить работы Хегбома и Стира [5, 6], посвященные ныне широко используемому методу чистки (CLEAN), а также работы Нараяна и Нитьянанды [7], посвященные методу максимальной энтропии, который также пользуется большой популярностью в наши дни, и не только в радиоастрономии.

С развитием наблюдательных инструментов и теоретических методов возросла активность в исследовании более тусклых и далеких объектов, в частности, взаимодействующих двойных звезд. Предположения о том, что в этих объектах существуют сложные газодинамические структуры, были высказаны еще в первой половине XX в. (см., например, [8]). Наблюдательное исследование подобных объектов сопряжено с немалыми трудностями, поскольку зачастую приходится анализировать быстропеременные и, если так можно выразиться, одномерные данные — кривые блеска и спектры, чтобы сделать заключение о трехмерной картине течения. В подавляющем большинстве случаев для взаимодействующих двойных звезд никакой речи о прямых наблюдениях картины течения быть не может ввиду малости их размеров или удаленности от Солнца. В контексте обсуждения достижений в решении данного типа задач необходимо отметить работы, выполненные в Московском государственном уни-

верситете (см., например, [9]). Также в наблюдательных исследованиях взаимодействующих двойных звезд начиная с 1985—1988 гг., удалось добиться значительного прогресса в связи с изобретением таких методов исследования, как затменное картирование и доплеровская томография [10, 11]. Оба метода путем решения обратных задач позволяют восстановить двумерную картину течения. Изначально эти методы были созданы для исследования катаклизмических переменных звезд, но в настоящее время находят применение и в отношении других «родственных» им двойных.

До сих пор мы говорили преимущественно об обратных задачах, так или иначе связанных с восстановлением изображений астрономических объектов. Однако спектр астрономических обратных задач, поставленных и решенных к сегодняшнему дню, несравненно шире. К сожалению, уместить их все в формат лекции не представляется возможным. Для ознакомления с некоторыми из неупомянутых задач можно обратиться к уже процитированной работе [1].

## Современные результаты

При обсуждении современных достижений в решении астрономических обратных задач, связанных с восстановлением изображений, картированием астрономических объектов, необходимо отметить, что эти достижения теперь относятся скорее не к разработке новых математических методов, а к введению в строй новых, более совершенных инструментов и более эффективному использованию имеющегося математического аппарата (см., например, [12]).

Ввиду ограниченного объема лекции не представляется возможным перечислить все новые (полученные в последние два десятилетия) результаты. Поэтому в данном разделе я остановлюсь на самых, по моему мнению, иллюстративных достижениях. Без преувеличения, среди результатов, достойных упоминания, можно назвать те, которые получены с помощью инструмента ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array). Введение в строй ALMA, который представляет собой антенную решетку и работает на принципе апертурного синтеза, среди прочего позволило получить беспрецедентные изображения протопланетных дисков вокруг молодых звезд. В частности, одним из наиболее иллюстративных примеров достижений ALMA является картирование протопланетного диска вокруг звезды HL Tau (<https://www.eso.org/public/news/eso1436/\#2>, [13, 14]). Результаты этих работ позволили увидеть не только сам

диск, но и структуры в нем (кольца и пустоты), которые, как предполагают авторы, связаны с рождением планет, а также оценить параметры магнитного поля и его взаимодействие с веществом в системе звезда—диск.

Также среди достижений радиоастрономии я бы отметил запуск космического аппарата «Радиоастрон» и его достижения в качестве плеча интерферометра со сверхдлинной базой. Столь беспрецедентная длина базы позволяет получать беспрецедентное пространственное разрешение (см., например, [15, 16]).

Говоря об инструментах и достижениях в картировании всевозможных астрономических объектов, также можно отметить работы, выполненные с инструментом VLTI, который представляет собой инфракрасный интерферометр. Спектр задач решаемых с помощью этого инструмента, простирается от исследования молодых звезд и экстрасолнечных планет до пространственно разрешенных изображений активных галактических ядер и микролинзированных изображений (см., например, <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti/science.html>, [17, 18]). В контексте обсуждения инструмента VLTI, кстати, интересно отметить, что, ввиду очень слабого заполнения UV-плоскости, при восстановлении структуры некоторых объектов используются нестандартные методы восстановления изображений. А именно, для восстановления применяется комбинация прямого и обратного методов, т. е. наблюдаемые на интерферометре величины (функции видности) моделируются на основании некоторых предположений об объекте исследования и сравниваются с полученными реальными функциями видности.

Конечно, когда речь идет об обратных задачах, связанных с восстановлением изображений, я не могу обойти вниманием доплеровскую томографию. Нужно признать, что в настоящее время исследование объектов, для которых изначально была придумана доплеровская томография, значительно уступает по популярности тем же протопланетным дискам и исследованиям галактик, упомянутым выше. Однако в самой этой области до сих пор остается масса нерешенных интереснейших физических вопросов, а доплеровская томография — даже с использованием инструментов средних размеров — позволяет получить изображения структуры течения в объектах, прямые наблюдения которых не под силу даже самым большим и совершенным инструментам. В частности, в лекции я упомяну последние достижения в исследовании самых внутренних областей ак-

крейционных дисков в катаклизмических переменных звездах, а также представлю результаты совместной с коллегами из УрФУ работы, в которой впервые получено изображение структуры течения в массивной взаимодействующей двойной системе UU Cas.

Помимо самых иллюстративных примеров, каждому из которых мы уделим определенное внимание, в данном разделе я приведу дайджест результатов работ по затменному картированию катаклизмических переменных звезд, пятенному картированию и еще некоторым методам.

## Заключение

Лекция посвящена обратным задачам, которые весьма распространены в наблюдательной астрономии. Представлен исторический обзор развития некоторых методов решения астрономических обратных задач и некоторые современные достижения интерферометрии и картирования. Ввиду личных научных интересов автора основной акцент сделан на задачах, связанных с получением и восстановлением изображений астрономических объектов. Лекция может быть полезна студентам младших и средних курсов для ознакомления с определенными классами задач, решаемыми в современной астрономии.

## Библиографические ссылки

1. *Lucy L. B.* Astronomical Inverse Problems // Reviews in Modern Astronomy / ed. by G. Klare : Reviews in Modern Astronomy. — 1994. — Vol. 7. — P. 31—50.
2. *Radon J.* Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. — 1917. — Vol. 69. — P. 262—277.
3. *Ambarzumian V.* On the derivation of the frequently function, of space velocities of the stars from the observed radial velocities // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1936. — Vol. 96. — P. 172.
4. *Bracewell R. N., Riddle A. C.* Inversion of Fan-Beam Scans in Radio Astronomy // Astrophys. J. — 1967. — Vol. 150. — P. 427.
5. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1974. — Vol. 15. — P. 417.

6. *Steer D. G., Dewdney P. E., Ito M. R.* Enhancements to the deconvolution algorithm 'CLEAN' // *Astron. Astrophys.* — 1984. — Vol. 137. — P. 159–165.
7. *Narayan R., Nityananda R.* Maximum entropy image restoration in astronomy // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1986. — Vol. 24. — P. 127–170.
8. *Struve O.* The Spectrum of  $\beta$  Lyrae. // *Astrophys. J.* — 1941. — Vol. 93. — P. 104.
9. *Goncharskii A. V., Cherepashchuk A. M., Iagola A. G.* Numerical methods of solving inverse problems of astrophysics // *Moscow Izdatel Nauka.* — 1978.
10. *Horne K.* Images of accretion discs. I — The eclipse mapping method // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 213. — P. 129–141.
11. *Marsh T. R., Horne K.* Images of accretion discs. II - Doppler tomography // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1988. — Vol. 235. — P. 269–286.
12. *Cai X., Pratley L., McEwen J. D.* Online radio interferometric imaging: assimilating and discarding visibilities on arrival // *ArXiv e-prints.* — 2017. 1712.04462.
13. *ALMA Partnership, Brogan C. L., Pérez L. M. et al.* The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 808. — P. L3. 1503.02649.
14. *Hasegawa Y., Okuzumi S., Flock M., Turner N. J.* Magnetically Induced Disk Winds and Transport in the HL Tau Disk // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 845. — P. 31. 1706.09565.
15. *Gomez J. L., Lobanov A., Kovalev Y. et al.* RadioAstron Polarization KSP: Probing the innermost regions of blazar jets at tens of microarcseconds resolution // 42nd COSPAR Scientific Assembly : COSPAR Meeting. — 2018. — Vol. 42. — P. E1.8–3–18.
16. *Savolainen T.* RadioAstron imaging of nearby radio galaxies // 42nd COSPAR Scientific Assembly : COSPAR Meeting. — 2018. — Vol. 42. — P. E1.8–4–18.
17. *Gravity Collaboration, Sanchez-Bermudez J., Weigelt G. et al.* GRAVITY chromatic imaging of  $\eta$  Car's core. Milliarcsecond resolution imaging of the wind-wind collision zone (Br $\gamma$ , He I) // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 618. — P. A125.
18. *Dong S., Mérand A., Delplancke-Ströbele F. et al.* First Resolution of Microlensed Images // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1809.08243.

# ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ И СООТНОШЕНИЕ МАССА—СВЕТИМОСТЬ

О. Ю. Малков

*Институт астрономии РАН*

В работе обсуждаются наблюдательные типы двойных звезд, для компонентов которых возможно определение динамических масс. Такие данные являются уникальным источником для построения соотношения «масса—светимость» — фундаментального закона, использующегося, в частности, для получения начальной функции масс, которая, в свою очередь, полностью определяет структуру и эволюцию звездных ансамблей.

## BINARY STARS AND THE MASS—LUMINOSITY RELATION

O. Yu. Malkov

*Institute of Astronomy RAS*

Observational types of binary stars for which components dynamical masses could be determined, are discussed. These data serve as a unique source for construction of the mass-luminosity relation, a fundamental law, which is especially important for getting of the initial mass function, which in turn fully determines structure and evolution of stellar systems.

## Введение

Масса звезды — важнейший параметр, в первом приближении полностью определяющий ее эволюцию. Начальная функция масс (НФМ), т. е. распределение образующихся звезд по массам, — фундаментальное распределение, определяющее строение и эволюцию звездных ансамблей. Масса — параметр, динамически не определяемый для одиночной звезды, поэтому для оценки звездных масс разработаны опосредованные методы. Самый широко распространенный из них — определение из наблюдений распределения исследуемого звездного ансамбля (звезд поля, скопления) по другому параметру, чаще всего — светимости, и последующий переход к массам

звезд с помощью так называемого соотношения «масса—светимость» (СМС).

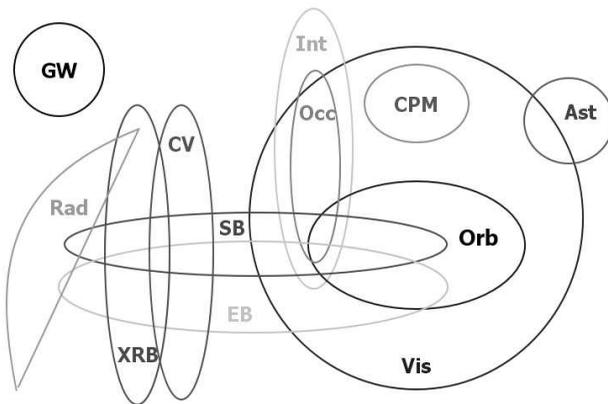
Независимое определение массы звезды и ее светимости возможно только для компонентов двойных систем определенных типов. В работе описываются различные наблюдательные типы двойных и обсуждаются ситуации, в которых становится возможным определять массы компонентов. Представлены результаты построения по этим данным соотношений «масса—светимость» малых и умеренных масс.

Следует отметить, что в последнее время появились оценки масс для ряда звезд, полученные методами астросейсмологии. Однако полученные таким образом массы пульсаторов непригодны для применения к «обычным» звездам с целью получения полезных соотношений и распределений (таких как начальная функция масс и соотношение «масса—светимость»).

## Наблюдательные типы двойных систем

Наблюдательные типы двойных систем продемонстрированы на рисунке. Ниже дается краткое описание типов (детали можно найти в [1] и [2]):

- визуальная двойная (**Vis**) — двойная система, в которой наблюдаются и разрешаются в телескоп оба компонента;
- орбитальная двойная (**Orb**) — визуальная двойная, показывающая достаточно заметное орбитальное движение, чтобы можно было определить орбитальные элементы;
- пара с общим собственным движением (**СРМ**) — две звезды, разделенные на небе несколькими угловыми секундами или минутами и имеющие схожие по направлению и абсолютному значению собственные движения. Предполагается, что эти звезды связаны общим образованием и имеют одинаковые возраст и химсостав;
- астрометрическая двойная (**Ast**), или система с невидимым компонентом. Может быть обнаружена из наблюдений периодических изменений положения звезды (накладывающихся на собственное движение), вызванных ее обращением с невидимым компонентом вокруг общего центра масс;
- интерферометрическая двойная (**Int**) — представляет ситуацию, когда два компонента слишком близки друг к другу чтобы наблюдаться в телескоп по отдельности, но могут быть разделены интерферометрическими методами;



#### Наблюдательные типы двойных систем

- покрывающаяся двойная (**Occ**) — обнаруживается с помощью фотоэлектрического анализа покрытия Луной или астероидом очень тесной пары;
- в спектроскопической двойной (**SB**) изменение лучевых скоростей компонентов двойной звезды можно наблюдать спектроскопически: линии в комбинированном спектре двух компонентов периодически раздваиваются или смещаются (так называемые SB2 и SB1 соответственно);
- затменная двойная (**EB**) — двойная система, в которой один из компонентов периодически затмевается другим, что приводит к изменению видимой яркости системы;
- рентгеновская двойная (**XRB**) — тесная пара звезд, испускающая рентгеновское излучение, которое производится веществом, перетекающим с одной звезды на другую;
- катаклизмическая переменная (**CV**) — тесная двойная, испытывающая перенос вещества между компонентами и демонстрирующая внезапные увеличения блеска, возникающие от термоядерных вспышек;
- радиопульсар в двойной системе (**Rad**) демонстрирует перио-

дические изменения периода радиопульсаций, вызванные орбитальным движением;

- недавно открытые гравитационно-волновые сигналы, испускаемые при слиянии компактных объектов (черных дыр звездных масс, нейтронных звезд), привело к появлению нового наблюдательного типа двойных систем — гравитационно-волновая двойная (**GW**).

Размеры областей на рисунке не соответствуют относительному количеству известных двойных соответствующих наблюдательных типов. Перекрытия областей указывают на тот факт, что некоторые двойные могут быть открыты и исследованы двумя или более наблюдательными методами. Так, на перекрытии областей **Vis** и **SB** находятся хорошо известные разрешенные спектроскопические двойные (**RSB**).

Отметим, что область **GW** в настоящее время изолирована, однако позже, когда вместе с регистрацией гравитационных волн от слияния нейтронных звезд будет зарегистрировано рентгеновское излучение (гамма-излучение уже регистрируется), эта область перекроется с областью **XRB**.

## Определение масс компонентов двойных систем

Орбитальные элементы (большая полуось  $a$ , наклон орбиты  $i$ , позиционный угол  $\Omega$ ) и параметры компонентов (масса  $m$ , радиус  $R$ ), принципиально определяемые для трех наблюдательных типов двойных, перечислены в таблице. Остальные орбитальные элементы (эксцентриситет  $e$ , период обращения  $P$ , момент прохождения  $T$  и долгота  $\omega$  периастра) определяются для всех указанных типов двойных. Тригонометрический параллакс обозначен символом  $\pi$ .

Из таблицы можно видеть, в частности, что массы компонентов можно определить для **Orb+SB2** или **SB2+EB** систем (для последних еще и радиусы). Именно эти данные используются для построения соотношения «масса—светимость».

## Соотношение «масса—светимость»

Один из наблюдательных типов двойных систем, для компонентов которых возможно независимое определение массы звезды и ее светимости, — орбитальные двойные (визуальные двойные звезды с

## Определение орбитальных элементов и параметров компонентов двойных

	Orb	SB	EB
$a$	$a\pi$	$a_1 \sin i$ [SB1], $a \sin i$ [SB2]	no
$i$	yes	no	yes
$\Omega$	$+ 180^\circ ?$	no	no
$m$	$\pi^3 \Sigma m$	$f(m)$ [SB1], $m \sin^3 i$ [SB2]	no
$R$	no	no	$R/a$

известными параметрами орбиты и тригонометрическим параллаксом). Эти звезды, как правило, представляют собой широкие пары, компоненты которых не взаимодействуют друг с другом и в эволюционном смысле аналогичны одиночным звездам. Кроме того, это, как правило, звезды ближайшей солнечной окрестности и, следовательно, преимущественно маломассивные. Проблема определения масс компонентов орбитальных двойных обсуждалась, например, в работах [3–5], а в статьях [6–9] исследовалась задача построения СМС для маломассивных звезд, основанного на данных о таких звездах.

Другим основным источником независимых определений масс служат разделенные затменные двойные звезды с компонентами на главной последовательности, в спектре которых представлены линии обоих компонентов (double-lined eclipsing binaries, DLEB). Это, как правило, сравнительно массивные ( $M/M_\odot > 1.5$ ) звезды с орбитальными периодами от десятков суток, их параметры используются для построения СМС звезд умеренных и больших масс. Точные параметры DLEB-звезд и СМС, построенные на их основе, могут быть найдены, например, в работах [10–14].

При совместном анализе и использовании этих двух СМС (построенных на основе данных об орбитальных двойных и данных о DLEB-звездах с компонентами на главной последовательности), а также для того, чтобы сравнивать теоретические СМС с эмпирическими данными, обычно по умолчанию предполагалось, что компоненты разделенных тесных и широких двойных эволюционируют одинаково. Необходимо, однако, отметить, что DLEB — это тесные пары, вращение компонентов которых синхронизовано приливным взаимодействием, и эволюционируют они, из-за замедления вращения, иначе, чем «изолированные» (т. е. одиночные или входящие в широкие двойные системы) звезды.

При сравнении радиусов DLEB и одиночных звезд в работе [15] было обнаружено заметное различие между наблюдательными пара-

метрами B0V–G0V компонентов DLEB и одиночных звезд аналогичных спектральных классов. Это различие подтвердилось при анализе независимых исследований, опубликованных другими авторами. Такое различие объясняет и несогласие опубликованных шкал болометрических поправок. Большие радиусы и более высокие температуры A–F компонентов DLEB-звезд могут объясняться синхронизацией и связанным с ней замедлением вращения таких компонентов в тесных системах. Другой возможной причиной является эффект наблюдательной селекции: из-за несферичности вращающихся звезд определяемые из наблюдений значения параметры зависят от ориентации их осей вращения. Изолированные звезды ориентированы случайным образом, а компоненты затменных двойных, как правило, наблюдаются со стороны экватора. Систематически меньшие наблюдательные радиусы DLEB звезд спектрального класса В могут объясняться тем, что звезды с большими радиусами не встречаются в разделенных парах с компонентами на главной последовательности: они в основном уже заполнили свои полости Роша (что остановило их дальнейший рост) и стали полуразделенными системами (что исключило их из обсуждаемой статистики).

Затем в работе [16] были собраны данные о фундаментальных параметрах компонентов немногих известных на сегодняшний день долгопериодических DLEB. Эти звезды предположительно не претерпели синхронизации вращения с периодом орбиты и, следовательно, вращаются быстро и эволюционируют аналогично одиночным звездам. По-видимому, только такие данные следует использовать для построения соотношений (в частности, соотношения «масса–светимость») для «изолированных» звезд в диапазоне  $M/M_{\odot} > 2.7$ . Массы компонентов других типов двойных звезд (орбитальных, разнесенных спектрально-двойных) редко превышают этот предел.

Имеющихся наблюдательных данных по долгопериодическим (т. е. не синхронизованным) двойным явно недостаточно для построения надежного СМС в диапазоне умеренных звездных масс. Используемое же в настоящее время в диапазоне  $M/M_{\odot} > 2.7$  СМС базируется на данных, полученных для тесных (т. е. синхронизованных) DLEB, а его применение распространяется затем и на одиночные звезды. По-видимому, такое использование СМС неправомерно и приводит к систематически неправильным результатам как при оценивании с его помощью характеристик звезд обсуждаемого диапазона масс, так и при восстановлении с его помощью начальной функции масс.

В настоящее время ведутся наблюдательные программы по спектральным исследованиям долгопериодических затменных двойных с целью определения масс их компонентов и реконструкции соотношения «масса—светимость» звезд умеренных масс.

## Заключение

Благодаря данным космического проекта Gaia в ближайшее время следует ожидать активного интереса исследователей к проблемам, связанным с эволюцией звездного населения Галактики. В этих исследованиях необходимой составляющей является СМС звезд поля и получаемая с его помощью НФМ. Новые наблюдения и последующий анализ позволят продвинуться в направлении построения истинного соотношения «масса—светимость» и соответственно пересмотреть НФМ для звезд с массами  $M/M_{\odot} > 2.7$ . Этот результат будет востребован для построения НФМ, основанной на огромном количестве объектов из будущих больших обзоров: наземного проекта LSST и космического — Gaia.

Автор благодарит Д. Ковалеву за постоянную помощь в работе.

## Библиографические ссылки

1. *Kovaleva D.* Astronomical data resources for binary and multiple stars // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 446–452.
2. *Malkov O., Kovaleva D., Kaygorodov P.* Observational Types of Binaries in the Binary Star Database // *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. 360.
3. *Docobo J. A., Tamazian V. S., Malkov O. Y. et al.* Improved orbits and parallaxes for eight visual binaries with unrealistic previous masses using the Hipparcos parallax // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 459. — P. 1580–1585. 1609.03392.
4. *Malkov O. Y., Tamazian V. S., Docobo J. A., Chulkov D. A.* Dynamical masses of a selected sample of orbital binaries // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 546. — P. A69.
5. *Fernandes J., Lebreton Y., Baglin A., Morel P.* Fundamental stellar parameters for nearby visual binary stars: eta Cas, XI Boo, 70 OPH and 85 Peg. Helium abundance, age and mixing length parameter for low mass stars // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 338. — P. 455–464.

6. *Henry T. J.* The Mass-Luminosity Relation from End to End // Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Stars / ed. by R. W. Hilditch, H. Hensberge, K. Pavlovski : Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2004. — Vol. 318. — P. 159–165.
7. *Delfosse X., Forveille T., Ségransan D. et al.* Accurate masses of very low mass stars. IV. Improved mass-luminosity relations // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 364. — P. 217–224. [astro-ph/0010586](#).
8. *Henry T. J., Franz O. G., Wasserman L. H. et al.* The Optical Mass-Luminosity Relation at the End of the Main Sequence (0.08-0.20  $M_{\text{solar}}$ ) // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 512. — P. 864–873.
9. *Malkov O. Y., Piskunov A. E., Shpil’Kina D. A.* Mass-luminosity relation of low mass stars. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 320. — P. 79–90.
10. *Torres G., Andersen J., Giménez A.* Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications // *Astron. Astrophys. Rev.* — 2010. — Vol. 18. — P. 67–126. [0908.2624](#).
11. *Kovaleva D. A.* Age and Metallicity Estimates for Moderate-Mass Stars in Eclipsing Binaries // *Astronomy Reports.* — 2001. — Vol. 45. — P. 972–983.
12. *Gorda S. Y., Svechnikov M. A.* Determination of empirical mass-luminosity and mass-radius relations for main-sequence stars that are the components of eclipsing binary systems // *Astronomy Reports.* — 1998. — Vol. 42. — P. 793–798.
13. *Andersen J.* Accurate masses and radii of normal stars // *Astron. Astrophys. Rev.* — 1991. — Vol. 3. — P. 91–126.
14. *Popper D. M.* Stellar masses // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1980. — Vol. 18. — P. 115–164.
15. *Malkov O. Y.* Eclipsing binaries and the mass-luminosity relation // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 402. — P. 1055–1060.
16. *Malkov O. Y.* Mass-luminosity relation of intermediate-mass stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 382. — P. 1073–1086.

**РОССИЙСКИЙ КОСМИЧЕСКИЙ  
ЗВЕЗДНО-АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
«ЛИРА-Б» НА БОРТУ МКС**

**М. Е. Прохоров, А. И. Захаров**

*Государственный астрономический институт  
им. П. К. Штернберга Московского государственного  
университета*

Описываются принципы и цели проведения космического эксперимента «Лира-Б» на борту МКС, разрабатываемого в ГАИШ МГУ. Основной задачей этого эксперимента является высокоточный многоцветный обзор звезд всего неба до  $16^m$ . Подробно рассматриваются структура ожидаемых наблюдательных данных, их возможное научное использование и ряд технических проблем.

**RUSSIAN SPACE ASTRONOMICAL EXPERIMENT  
“LIRA-B” ON BOARD THE ISS**

**M. E. Prokhorov, A. I. Zakharov**

*Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University*

The principles and objectives of the space experiment “Lira-B” on board the ISS, which is being developed at the SAI MSU, are described. The main objective of this experiment is a high-precision multi-color survey of stars on the whole sky up to  $16^m$ . The structure of the expected observational data, their possible scientific use and a number of technical problems are discussed.

В настоящее время в ГАИШ МГУ ведется подготовка к космическому эксперименту «Лира-Б» на борту МКС. В ходе этого эксперимента предполагается провести фотометрический обзор всего неба, для чего на МКС предполагается установить 0.5 м оптический телескоп. В некотором смысле эксперимент «Лира-Б» является продолжением и расширением *WBVR*-обзора ярких звезд северного неба [1], выполненного в 1976–1984 гг. на Алма-Атинской обсерватории ГАИШ МГУ. Расширение многостороннее: объем каталога возрастет на четыре порядка, число фотометрических полос более чем удвоится, в несколько раз возрастет число повторных наблюдений отдельной звезды, появятся ультрафиолетовые наблюдения, обзор станет всенебесным. При этом сохранятся такие качества

*WBVR*-обзора, как высокая точность, однородность и одновременность многоцветной фотометрии. Обзор будет высокоуровневым фотометрическим дополнением астрометрического обзора Gaia [2], поскольку в нем будут наблюдаться те же звезды, для которых Gaia даст астрометрию высокой точности.

Если КЭ «Лири-Б» будет выполнен, то это будет самый большой оптический обзор, выполненный в России, первый российский астрономический эксперимент на МКС и одновременно самый крупный астрономический эксперимент за всю историю пилотируемой космонавтики.

## Цели космического эксперимента «Лири-Б»

Целью эксперимента является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов от  $3^m$  до  $16^m$  на небесной сфере. В ходе эксперимента (длительностью от 3 до 5 лет) предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 9–10 спектральных полосах примерно от 200 до 1 000 нм. По результатам обзора должны быть созданы следующие каталоги:

- каталог непременных звезд ярче  $12^m$  с погрешностью не хуже 0.1–0.2 % (0.001–0.002 $^m$ ) (будут приняты специальные меры, чтобы измерить с высокой точностью наиболее яркие звезды, до  $3^m$  в полосах *B* и *V* включительно);
- каталог (атлас) непременных звезд ярче  $16^m$  в полосах *B* и *V* с погрешностью не хуже 1 % (0.01 $^m$ );
- многоцветный фотометрический каталог астероидов ярче  $14^m$ ;
- каталог переменных звезд ярче  $16^m$ ;
- каталог положений звезд с погрешностью порядка 100–200  $\mu\text{as}$  для ярких звезд и 1 mas для остальных;
- многоцветный каталог протяженных объектов с высокой поверхностной яркостью;
- будет предпринята попытка создания атласа фона неба во всех спектральных полосах обзора. Возможность проведения этих измерений зависит от характеристик приемников излучения, которые будут использованы в телескопе «Лири-Б».

Наибольшее число звезд, которые будут регистрироваться в ходе обзора, являются красными. Максимум их излучения приходится на длинноволновую часть видимого и ближний инфракрасный диапазона спектра. Данные инфракрасного обзора 2MASS [3] говорят, что

в эксперименте «Ли́ра-Б» будет зарегистрировано не менее 100 млн звезд. Обзор Gaia [2] указывает на несколько большее число звезд.

Высокая точность обзора подразумевает, что все *непеременные звезды* ярче  $12^m$ , включая самые яркие, будут измерены с результирующей погрешностью не более  $0.001^m$ , а более слабые объекты — с погрешностью не более  $0.01$ – $0.02^m$ . Будут приняты специальные меры, чтобы с высокой точностью измерить блеск ярких звезд до  $3^m$  включительно.

Важнейшими особенностями обзора «Ли́ра-Б» являются:

- квазисовременное (на интервале 15–20 с) проведение многоцветных фотометрических измерений объектов в широком спектральном диапазоне;
- высокая однородность фотометрических измерений, которая обеспечивается тем, что повторные измерения объектов происходят через интервалы времени много меньшие, чем характерные времена изменения параметров аппаратуры;
- ограниченный динамический диапазон фотоприемника требует применения специальных мер для точного измерения блеска звезд от  $3^m$  до  $16$ – $17^m$  (см. раздел «Наблюдение ярчайших звезд»).

Еще одна существенная особенность космического эксперимента «Ли́ра-Б» состоит в том, что он будет проводиться на борту Международной космической станции (МКС) [4]. Причины, по которым в качестве места размещения комплекса научной аппаратуры эксперимента «Ли́ра-Б» была выбрана МКС, описаны ниже. Ограничения, налагаемые размещением научной аппаратуры на борту МКС, определяют характеристики эксперимента и технические решения, используемые в комплексе научной аппаратуры для его проведения.

## Принципы проведения эксперимента «Ли́ра-Б»

МКС обращается вокруг Земли с сохранением так называемой «орбитальной ориентации» [4]. В этой ориентации МКС всегда одной стороной (условно «нижней») обращена к Земле. На этой стороне устанавливаются приборы для наблюдения Земли. Противоположная сторона, обращенная в местный зенит, предназначена для приборов наблюдения космического пространства.

При орбитальной ориентации продольная ось станции направлена приблизительно вдоль вектора ее орбитальной скорости. Российский сегмент МКС располагается в «хвосте» станции.

## Метод наблюдения небесной сферы

На МКС реализовать сканирующие наблюдения гораздо проще, чем режим прямого наведения. Для этого достаточно зафиксировать положение оптической системы телескопа относительно корпуса станции. При обращении МКС вокруг Земли телескоп будет поворачиваться вместе со станцией, звезды будут пересекать поле зрения инструмента, а их изображения — перемещаться по фокальной плоскости телескопа. Изменять положение телескопа придется примерно раз в месяц.

В качестве приемников излучения для фотометрии в эксперименте будут использоваться матричные ПЗС, работающие в режиме с временной задержкой и накоплением (ВЗН) [5]\*, или новые разработки, так называемые CMOS TDI (КМОП ВЗН).

В режиме ВЗН пакеты электронов, накапливаемые в ходе экспозиции, перемещаются по матрице с той же скоростью и в том же направлении, в котором перемещаются изображения звезд. Это накладывает требования на ориентацию матричных ПЗС в фокальной плоскости и на точность задания скорости перемещения зарядов.

Считывание накопленных зарядов происходит, когда изображение достигает края матричного ПЗС. Получаемый кадр имеет вид полосы, ширина которой равна числу пикселей в строке матричного ПЗС, а длина определяется продолжительностью сеанса наблюдения и скоростью перемещения звезд по фокальной плоскости.

ВЗН-режим имеет целый ряд преимуществ, важных для получения высокоточной фотометрии: усреднение неоднородности чувствительности и термогенерации вдоль столбцов ПЗС; стабильные тепловые и электрические режимы функционирования матрицы.

Для проведения многоцветной фотометрии в фокальной плоскости располагается несколько матричных ПЗС, каждая со своим фильтром. Они реализуют разные спектральные полосы фотометрической системы. В сканирующем режиме изображение объекта последовательно проходит по всем ПЗС и мы получаем квазиодновременные многоцветные измерения его блеска. Похожая конструкция приемника излучения была использована в телескопах проекта SDSS [6].

---

\*Заметим, что этот режим можно реализовать только для матричных ПЗС, в стандартных матрицах КМОП он невозможен.

## Телескоп

Параметры телескопа, используемого в эксперименте «Лира-Б», обусловлены целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС.

Габариты инструмента определяются способом его доставки и монтажа на МКС. Научная аппаратура на МКС доставляется грузовым космическим кораблем «Прогресс», который выводится на околоземную орбиту и стыкуется со станцией. Затем через внутренние люки транспортные секции научной аппаратуры вносятся внутрь российского сегмента МКС. После часть этих блоков выносятся в космическое пространство и монтируются на внешней поверхности станции. Самые сильные ограничения на габариты телескопа накладывают диаметры люков и процесс перемещения транспортных секций из «Прогресса» внутрь МКС. Максимально допустимый диаметр транспортного блока составляет 0.6 м при длине 1.2 м. Таким образом, с учетом толщины корпуса телескопа и транспортной упаковки диаметр главного зеркала не может превышать 0.5 м. За бортом МКС телескоп будет собираться из трех секций: 1) основной секции, содержащей собственно телескоп, фокальную плоскость с приемниками излучения и блоки электроники, 2) бленды с крышкой и 3) устройства позиционирования, с помощью которого телескоп крепится к поверхности МКС и изменяет свою ориентацию. Поскольку сборка и юстировка оптической системы силами экипажа на борту МКС невозможна, то телескоп доставляется на орбиту в собранном виде.

Размер поля зрения телескопа определяется несколькими факторами. Для проведения обзора всего неба нужен инструмент с достаточно широким полем зрения. С другой стороны, по мере увеличения поля зрения становится все труднее удовлетворить требования к абберациям оптической системы телескопа [7, 8]. Одновременно более сложными и дорогими становятся процессы изготовления и юстировки оптики. Поэтому размер исправленного поля зрения был выбран компромиссным:  $2\omega = 2^\circ$ . При этом угловой размер основной фокальной плоскости (по диагонали) составляет  $1.5^\circ$ , а ширина полосы сканирования  $W = 1^\circ$ . Оставшаяся часть исправленного поля зрения используется для размещения фотоприемников устройства стабилизации изображения.

Предельное угловое разрешение телескопа «Лира-Б» должно быть не менее  $1''$ . Это одно из основных требований технического

задания на эксперимент. Тогда при использовании матричных приемников с оптимальным в технологическом смысле размером пикселя  $12 \times 12$  мкм мы приходим к минимальному фокусному расстоянию  $F \approx 3$  м. При этом для успешного перемещения внутри МКС длина телескопа вместе с фокальной плоскостью (без бленды) не должна превышать 1.2 м.

Есть также ряд других требований, которым должен удовлетворять телескоп. Так как в качестве приемника излучения будут использоваться матричные приемники, то инструмент должен обладать плоским полем изображения.

Далее, диаметр изображения точечного источника по половине интенсивности должен быть порядка 1.5–2 пикселей по всей фокальной плоскости. Это требование вытекает из необходимости точного определения положения фотоцентров изображений и блеска.

Наконец, поскольку телескоп работает в сканирующем режиме, к нему предъявляются достаточно жесткие требования по относительной дисторсии ( $< 0.1$  %). В противном случае изображения звезд на фокальной плоскости будут отклоняться от столбцов матриц и смазываться.

Всем этим требованиям удовлетворяет широко используемая сегодня оптическая схема Ричи—Кретьена с афокальным линзовым корректором, которая и была выбрана. Более детально характеристики телескопа «Ли́ра-Б» рассмотрены в [9, 10].

В качестве материала для изготовления зеркал телескопа предполагается использовать карбид кремния. Для такого выбора существуют две причины [11]. Во-первых, карбид кремния обладает высокой жесткостью, что позволяет изготовить из него более тонкие и легкие зеркала и уложиться в конструктивные ограничения по массе. Во-вторых, он обладает очень высокой температуропроводностью, т. е. зеркала из этого материала обладают малыми нелинейными температурными искажениями формы и быстро приходят в состояние теплового равновесия.

## Покрытие небесной сферы наблюдениями

В эксперименте «Ли́ра-Б» ориентация телескопа, при которой его оптическая ось лежит в плоскости орбиты МКС, является базовой. В этой ориентации центр поля зрения инструмента описывает большой круг, плоскость которого совпадает с плоскостью орбиты станции. Орбита МКС наклонена к экватору Земли примерно на  $51.6^\circ$  (накло-

нение изменяется со временем не более чем на  $0.1^\circ$ ). Под действием гравитационного поля Земли орбита МКС прецессирует с периодом около 70 дней [4]. Такая скорость прецессии соответствует смещению поля зрения инструмента вдоль экватора на  $0.3^\circ$  за виток, т. е. каждый объект попадает в полосу сканирования телескопа, имеющую ширину  $1^\circ$ , не менее трех раз подряд на последовательных витках.

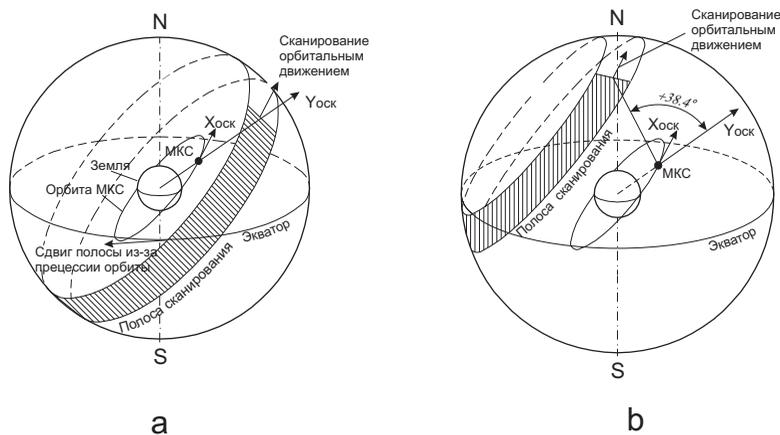


Рис. 1. Сканирование неба в основной ориентации инструмента — ось телескопа лежит в плоскости орбиты (a). Ось телескопа смещена на  $38.4^\circ$  к северу, полоса сканирования проходит через северный полюс мира (b)

Из-за прецессии поле зрения телескопа замечает на небе сферический пояс с координатами  $|\delta| < 52^\circ$ . (Ширина этого пояса равна удвоенному наклонению орбиты МКС ( $2 \times 51.6^\circ$ ) плюс ширина полосы сканирования ( $1.0^\circ$ ).) При этом области вблизи полюсов мира не наблюдаются (рис. 1, a). Чтобы полоса сканирования проходила через северный полюс мира, необходимо отклонить ось телескопа на  $38.4^\circ$  к северу от плоскости орбиты (рис. 1, b). Для сканирования южного полюса мира — на такой же угол к югу.

Для покрытия наблюдениями всего неба достаточно двух полярных режимов. Сочетание трех режимов позволяет выбрать более равномерное покрытие неба наблюдениями. Возможно, для построения более эффективного плана сканирования небесной сферы будет необходимо включать еще и промежуточные ориентации телескопа. Отметим, что не следует использовать ориентации оси телескопа с

большими, чем  $38.4^\circ$ , отклонениями от плоскости орбиты МКС, так как при этом резко возрастают проблемы, связанные с кривизной траекторий, по которым в фокальной плоскости движутся изображения звезд.

Наблюдения возможны только в той части орбиты, где отсутствует или слаба засветка рассеянным солнечным излучением. Наилучшей для наблюдения объектов предельной звездной величины является ситуация, когда наблюдения ведутся во время нахождения МКС в тени Земли. На освещенном Солнцем участке орбиты минимальный угол между оптической осью инструмента и направлением на Солнце определяется эффективностью бленды. В настоящее время можно гарантировать ослабление ею рассеянного излучения в  $10^6$  раз. Это означает, что наблюдения объектов предельной звездной величины можно будет вести в отсутствие прямой засветки входной апертуры телескопа, т. е. когда ось телескопа отстоит от края солнечного диска более чем на  $90^\circ$ . На остальной части витка возможны только наблюдения самых ярких объектов.

### **Фотоприемные устройства и фотометрическая система**

В качестве приемника излучения для фотометрии предполагается использовать сборку десяти-, одиннадцатиматричных ПЗС или КМОП ВЗН обратной засветки. Каждая матрица состоит из двух независимо управляемых частей размером  $2250 \times 300$  пикселей. О возможности создания таких матричных ПЗС специально для космического эксперимента «Лира-Б» ведутся переговоры с рядом зарубежных производителей. Некоторые характеристики этих матриц приведены в табл. 1.

На первую матрицу\* наносится широкополосное просветляющее (панхроматическое) покрытие, на остальные матрицы — интерференционные светофильтры, реализующие фотометрическую систему «Лира-Б». Полосы пропускания фильтров этой фотометрической системы показаны на рис. 2 и в табл. 2. Заметим, если фотометрических полос будет 10 (включая панхроматическую), то полоса 1 000 нм не будет реализована.

Все полосы фотометрической системы «Лира-Б» лежат в области чувствительности обычных кремниевых матриц с обратной засветкой. Три первых ультрафиолетовых фильтра — 195, 218 и 270 нм — позволяют изучать горячие звезды и эффективно определять меж-

---

\*Нумерация ПЗС ведется в направлении перемещения изображений звезд.

Таблица 1. Характеристики фотометрических ПЗС, предложенных e2v. ПЗС состоит из двух независимо управляемых секций размером  $2\,250 \times 300$  пикселей каждая

Размеры матрицы	$4\,500 \times 312$ пикселей
Размеры пикселя	$12 \times 12$ мкм
Емкость пикселя	$200\,000 e^-$
Толщина ПЗС для видимого диапазона	10–14 мкм
Максимальная квантовая эффективность панхроматической ПЗС	96 %
Шум считывания на частоте 1 МГц	$5e^-$ /пиксель
То же для дифференциального считывания	$7e^-$ /пиксель
Шум термогенерации при $T = -30^\circ\text{C}$	$120e^-$ /пиксель/с

звездное поглощение, так как фильтр 218 нм лежит в центре ультрафиолетовой полосы межзвездного поглощения, а два других фильтра — до и после нее. Четыре полосы — 350, 440, 555 и 700 нм — близки к полосам W, B, V и R модифицированной системы Джонсона. Эти полосы были использованы в Алма-Атинском фотометрическом обзоре [12, 13]. Фильтры 785 и 825 нм находятся на локальном максимуме между двумя полосами TiO в спектрах звезд спектрального класса M. Фильтр 930 нм соответствует атмосферной полосе воды и служит для определения параметров атмосферы при последующих наземных наблюдениях звезд каталога. Фильтр 1 000 нм охватывает наиболее длинноволновую область чувствительности кремниевых, может быть исключен из фотометрической системы.

Несмотря на то что предлагаемая фотометрическая система является широкополосной, она позволяет достаточно качественно проводить трехмерную классификацию звезд. Возможно, в характеристики фотометрических полос еще будут внесены изменения. Более подробное обоснование выбора именно этого набора полос для фотометрической системы «Лира-Б» см. в [14–16].

Интерференционные фильтры предполагается наносить непосредственно на поверхность матричных фотоприемников (для этого они обязательно должны быть с *обратной засветкой*). Такая технология была разработана в ФИАН [17] и успешно опробована в экспериментах серии «Коронас». Отметим, что применение такой технологии возможно лишь для матриц с обратной засветкой, обладающих гладкой и однородной передней поверхностью.

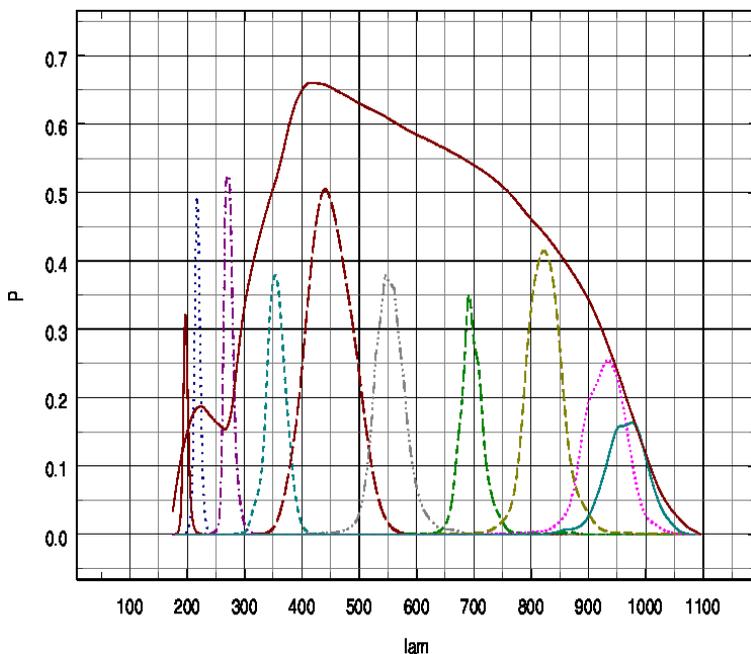


Рис. 2. Полосы пропускания фотометрической системы эксперимента «Ли́ра-Б». Центральные длины волн: 195, 218, 270, 350, 440, 555, 700, 825, 930, 1000 нм и широкополосный панхроматический фильтр. Кривые пропускания учитывают пропускание интерференционного фильтра, нанесенного на кремний, и квантовую эффективность ПЗС

Обычно интерференционный светофильтр представляет собой стеклянную пластину с нанесенным на нее интерференционным покрытием, установленную перед фотоприемником. Отражение света от обеих поверхностей стеклянной пластины и передней поверхности матричного ПЗС порождает многочисленные блики. Вышеописанная технология нанесения фильтров позволяет этого избежать.

### Регистрация объектов

В эксперименте «Ли́ра-Б» не используется входной каталог для фотометрии точечных объектов (звезд и звездоподобных ядер компактных галактик). Существует только входной каталог протяженных объектов (туманностей, скоплений и близких галактик), для ко-

Таблица 2. Предельные звездные величины обзора «Ли́ра-Б» для звезд спектрального класса A0V

$\lambda_0$ (нм)	Предельные величины				Переполнение
	за одно наблюдение		за 5 лет <sup>†,!!</sup>		
$S/N$	$0.01^m$	$0.1^m$	$0.01^m$	$0.1^m$	ПЗС
	(1 %)	(10 %)	(1 %)	(10 %)	
	100	10	100	10	
195	8.5	13.2	13.2	16.3	3.6
218	9.0	13.6	13.6	16.8	4.2
270	9.4	14.1	14.1	17.3	5.4
350	10.6	15.3	15.3	18.4	6.5
440	12.6	17.3	17.3	20.4	8.5
550	11.6	16.3	16.3	19.5	7.4
700	11.1	15.8	15.8	18.9	6.0
825	10.8	15.5	15.5	18.5	7.2
930	10.3	14.9	14.9	18.0	6.8
1 000	9.7	14.3	14.3	17.4	6.3
Панхром	14.0	18.5	18.5	21.4	10.3

<sup>†</sup> Значения в колонках « $0.1^m$  за 1 наблюдение» и « $0.01^m$  за 5 лет» совпадают, поскольку среднее число наблюдений звезды за 5 лет считалось равным 100.

<sup>!!</sup> Значения в колонке « $0.1^m$  за 5 лет» соответствуют 100-кратному усреднению звезд, регистрируемых в отдельном наблюдении с  $S/N > 10$ . Такая ситуация реализуется при наблюдении областей, регистрируемых попиксельно.

торых выполняются поверхностная фотометрия и каталог ярчайших звезд, вызывающих переполнение пикселей матриц.

Измерение точечных объектов производится следующим образом.

- а) Изображение, которое строит первая матрица с панхроматическим покрытием, обладающая наибольшей чувствительностью, считывается полностью. В получаемом изображении производится поиск объектов, которые значимо превышают уровень шумов. Для найденных объектов приближенно определяются координаты, блеск и другие параметры. На их основе предвычисляются места и моменты появления каждого найденного объекта на остальных фотометрических матрицах фокаль-

ной плоскости. Дополнительно в список найденных точечных объектов включаются протяженные объекты из соответствующего входного каталога. Для них также вычисляются моменты появления и положения на остальных матрицах.

- б) Для остальных матриц производится полное считывание предвычисленных фрагментов. Для точечных источников размер фрагмента берется постоянным, равным  $7 \times 7$  пикселей (это значение может быть уточнено). Для очень ярких звезд, вызывающих переполнение пикселей изображения, а также для протяженных объектов фрагменты могут быть большего размера и иметь прямоугольную форму.

Сигналы в промежутках между границами фрагментов, содержащих изображения объектов, суммируются без считывания по частям строк матричных ПЗС длиной до 100–150 пикселей (т. е. по площадкам размерами до  $1 \times 100$ –150 пикселей). Сигнал в интервалах между объектами создается фоном звездного неба и неразрешенными источниками. Его величина составляет единицы квантов на пиксель за время экспозиции. Суммирование без считывания используется для того, чтобы шум считывания вносился в измеряемый сигнал только один раз.

- в) По изображениям в наиболее чувствительных полосах фотометрической системы ( $V$ ,  $B$  и  $R$ ) можно провести определение мгновенных положений фотоцентров объекта и найти для него сдвиг и смаз за время прохождения по фокальной плоскости. Эта процедура, в частности, позволяет в реальном времени выделять объекты Солнечной системы, перемещающиеся по небесной сфере с достаточно высокой скоростью.

### Наблюдение ярчайших звезд

Емкость пикселя матричного фотоприемника ограничена и зависит в первую очередь от его линейного размера [18]. Например, матричные ПЗС производства e2v с пикселем размером  $12 \times 12$  мкм имеют емкость около 200 000 электронов. При более высоком сигнале накопленные электроны начинают перетекать в потенциальные ямы соседних пикселей вперед и назад по столбцу. Поскольку наиболее яркая часть изображения звезды занимает  $2 \times 2$  пикселя, то максимальный накопленный от нее заряд составляет около 800 000 электронов. С учетом шумов приемника значимый сигнал начинается примерно с 200 электронов. Следовательно, одновременно могут из-

меряться объекты, число накопленных электронов от которых составляет от 200 до 800 000. Блеск таких объектов различается не более чем на  $8^m$ .

Корректная фотометрия более ярких звезд, одновременно с наиболее слабыми, становится невозможной.

Фотометрия ярчайших звезд осуществляется в специальном режиме, в котором необходимо распределить накапливаемый сигнал по большому числу пикселей. Наиболее простой способ это сделать – расфокусировать изображение. Расфокусировка смещает динамический диапазон фотоприемных устройств в сторону больших потоков. В этом режиме слабые звезды, близкие к пределу обзора, не будут видны, зато будут наблюдаться яркие и ярчайшие.

При использовании КМОП ВЗН для каждой полосы возможна реализация двух светочувствительных полос – «высокой», размером  $2250 \times 300$  пикселей, и «низкой», размером  $2250 \times 3$  пикселя. Экспозиции на этих матрицах различаются в 100 раз, т. е. на  $5^m$ .

## **Причины проведения эксперимента на МКС и вызываемые этим проблемы**

Выбор МКС в качестве места проведения эксперимента «Лири-Б» имеет свои достоинства и недостатки. Альтернативой этому является создание автономного спутника.

К достоинствам проведения эксперимента на МКС можно отнести следующее:

- наличие технологической и технической инфраструктуры – источников энергии, информационных каналов, возможности получения информации об ориентации станции и пр;
- отработанная технология доставки на борт приборов малого и среднего веса;
- возможность возвращения на Землю грузов (с сильными ограничениями по весу);
- монтаж аппаратуры силами экипажа станции;
- возможность (при крайней необходимости) проведения ремонта аппаратуры силами экипажа.

Однако основной причиной выбора в качестве места проведения эксперимента «Лири-Б» МКС является большой объем научных данных, который требуется передать на Землю. В ходе сеансов наблюдений поток данных составляет около 300 Мбит/с. Полный объем дан-

ных, который будет получен за время проведения эксперимента и который должен быть передан на Землю, составляет около 200 Тбайт.

Стандартные средства космической радиосвязи имеют недостаточную скорость передачи информации — порядка нескольких десятков мегабит в секунду. Помимо этого для непрерывной передачи информации хотя бы во время сеансов наблюдений космический аппарат должен все время передачи находиться в прямой видимости наземного пункта приема информации. При ограниченном числе приемных антенн такое возможно только на геостационарных (геосинхронных) или высокоэллиптических орбитах.

МКС также не обладает каналом связи, позволяющим передать получаемый поток информации. Поэтому для передачи данных на Землю был выбран другой путь: данные с телескопа передаются в блок управления научным экспериментом, установленный внутри гермоотсека МКС. Там они записываются на сменные внешние носители, которые затем доставляются на Землю в составе спускаемого груза (2 раза в год). В качестве носителей информации предполагается использовать сборки флэш-памяти. Эти устройства обладают высокой надежностью и одним из наилучших на сегодня отношением объема записываемой информации к массе порядка 10 Тбайт/кг.

Указанный способ позволяет передать весь объем научной информации, получаемой в эксперименте «Ли́ра-Б», но совершенно не обладает оперативностью. К счастью, обзорный характер эксперимента делает оперативное получение информации несущественным для большинства научных задач эксперимента.

Помимо перечисленных выше достоинств размещение научной аппаратуры на МКС имеет и ряд недостатков. Подробнее этот вопрос рассмотрен в [19]. Одним из наиболее серьезных недостатков для наблюдений в видимом диапазоне с использованием телескопов с разрешением лучше угловой секунды являются вибрации пилотируемой станции, которые вызываются деятельностью экипажа и работой систем поддержания жизнедеятельности. Отметим, что именно по этой причине на пилотируемых станциях не велись астрономические наблюдения, требующие секундных точностей угловой стабилизации инструментов.

Такая проблема существует и для эксперимента «Ли́ра-Б»<sup>\*</sup>; для ее преодоления разработана специальная система стабилиза-

---

<sup>\*</sup>Хотя МКС проектировалась для проведения в том числе и экспериментов при микрогравитации, ее вибрации ниже, чем на всех предыдущих пилотируемых станциях, например, на «Мире».

ции изображения, встроенная в телескоп. Компенсация сдвига будет проводиться путем перемещения фокальной плоскости с помощью высокоточного пьезомеханического гексапода (платформы Гью—Стюарта) [20] — некоторый современный автоматизированный аналог «кассеты Ричи» [21]. Описание этой системы, а также других технических особенностей научной аппаратуры космического эксперимента «Ли́ра-Б» приведено в работе [19].

Более подробную техническую информацию о комплексе научной аппаратуры КЭ «Ли́ра-Б» можно найти в [19].

## Структура данных обзора «Ли́ра-Б»

### Общие характеристики обзора «Ли́ра-Б»

Длительность эксперимента	3—5 лет
Число зарегистрированных объектов	$150\text{—}300 \cdot 10^6$
Точность фотометрии звезд (в полосе V):	
от 3 до $12^m$	не хуже $0.001^m$
от 12 до $16^m$	не хуже $0.01^m$
Точность фотометрии астероидов и переменных звезд (в полосе V):	
ярче $12^m$	не хуже $0.01^m$
ярче $16^m$	не хуже $0.1^m$
Астрометрия (для звезд):	
от 3 до $12^m$	не хуже 0.1 mas
от 12 до $16^m$	не хуже 1 mas

Обзор проводится в сканирующем режиме с использованием ВЗН (TDI) режима накопления и считывания сигнала с ПЗС/КМОП ВЗН-матриц.

Помимо фотометрии звезд, возможно, будут получены данные о фоне неба в тех же фотометрических полосах.

Данные наблюдений записываются на борту МКС на носитель (SSD-диск) и доставляются на землю при возвращении космонавтов. Соответственно никаких алертов от «Ли́ра-Б» не будет. Время, необходимое на изменение программы наблюдений (для наведения на конкретный объект), — не менее 3 суток. Место размещения комплекса научной аппаратуры — Российский сегмент МКС.

## Телескоп

Телескоп «Лира-Б» изготавливается по системе Ричи—Кретьена с линзовым афокальным компенсатором. Диаметр главного зеркала — 0.5 м. Эффективное фокусное расстояние — 3 м. Поле зрения —  $2^\circ$ , исправленное поле зрения —  $1.5^\circ$ , ширина полосы сканирования —  $1^\circ$ .

### Временная структура наблюдений

При наблюдениях звезд в рамках эксперимента «Лира-Б» присутствуют три различные временные шкалы (рис. 3). Самая короткая шкала связана с последовательным прохождением изображения звезды по светочувствительным матрицам в фокальной плоскости. Интервал между прохождениями по соседним матрицам — около 1 с. Полное время прохождения звезды через фокальную плоскость — около 15 с.

Средняя шкала связана с наблюдениями объекта на последовательных витках орбиты. Интервал между наблюдениями — около полутора часов. Объекты наблюдаются три или более раз.

Самая длинная шкала связана с повторным попаданием объекта в полосу сканирования. Она не является строго периодической, так как зависит от графика переключений телескопа. Характерный временной масштаб — порядка месяца.

### Характеристики эксперимента, которые можно и нельзя изменить

#### Характеристики, которые не будут меняться

Сканирующий режим наблюдений:

- надежность конструкции — большую часть времени телескоп неподвижен относительно станции;
- усреднение характеристик ПЗС;
- стабильные режимы функционирования ПЗС и электроники.

Диаметр телескопа (0.5 м):

- доставка конструкций на МКС (через гермоотсек МКС).

Ширина поля зрения (полосы сканирования):

- меньше — ухудшается покрытие небесной сферы;
- больше — снижается качество оптической системы.

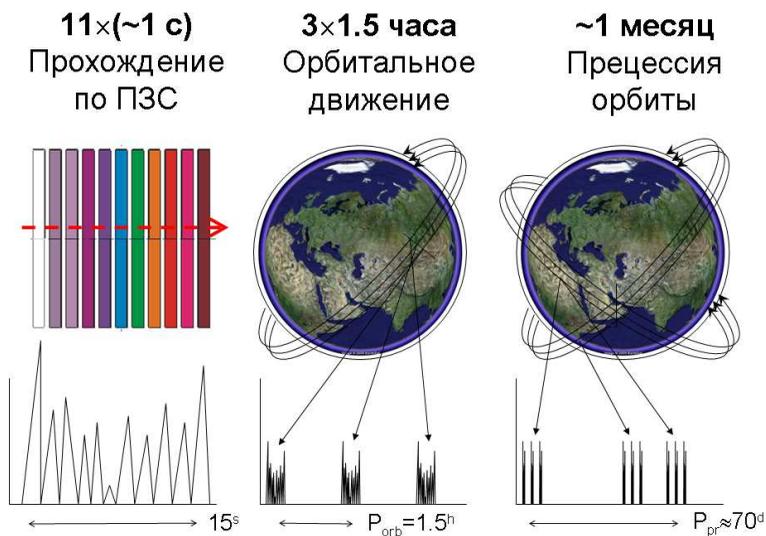


Рис. 3. Временная структура наблюдений объектов в эксперименте «Лира-Б»

### Характеристики, которые трудно, но можно изменить

Размер пикселя (12 мкм):

— емкость пикселя. Технологические ограничения.

Количество фотометрических полос (9–11):

— больше — не позволяют конструкция фокальной плоскости и технологические ограничения;

— меньше — нет выигрыша.

### Характеристики, которые могут быть изменены

Алгоритм сканирования небесной сферы.

Центры, ширины и профили фотометрических полос.

Порог регистрации звезд.

Обработка измерений фона.

## Заключение

Основной задачей КЭ «Ли́ра-Б», которую поставила перед собой группа разработчиков эксперимента, является создание фотометрического каталога звезд всего неба:

- высокоточный каталог звезд — фотометрических стандартов всего неба до  $12^m$ ;
- фотометрический каталог (атлас) звезд всего неба от  $12^m$  до  $16^m$ .

Оба каталога являются многоцветными (9—11 фотометрических полос), однородными (выполненными на одной аппаратуре). Фотометрические измерения для их построения проводятся квазисовременно. Будут предприняты меры, чтобы измерения в каталоге и атласе были максимально точно привязаны друг к другу (минимальные систематические ошибки, зависящие от звездной величины).

В указанные два каталога будут входить только звезды, не являющиеся переменными.

Помимо фотометрии непременных звезд полные данные КЭ «Ли́ра-Б» содержат много другой информации. На их основе можно исследовать переменные звезд и астероиды, межзвездное поглощение и протяженные объекты, обнаруживать неразрешенные двойные системы, проводить статистические исследования звезд и многое другое. Некоторые из этих направлений исследования подробнее рассмотрены в [19]. Но у научного коллектива разработчиков КЭ «Ли́ра-Б» на это просто не хватит сил.

Мы предполагаем, что на основе данных эксперимента будет создан научный архивный центр, в котором можно будет работать со всеми данными эксперимента. Вполне возможно, что он будет построен на основе существующего в ГАИШ сервиса доступа к каталогам SAI CAS [22].

Нам бы хотелось, чтобы сформировалась группа энтузиастов, в которую вошли бы те астрономы, которым интересны будущие данные эксперимента «Ли́ра-Б» и которые готовы предложить свои программы обработки ожидаемых данных. Также мы приветствуем любые предложения по улучшению программы наблюдений КЭ «Ли́ра-Б» или ее научной аппаратуры.

## Библиографические ссылки

1. Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. и др. Каталог WBVR-величин ярких звезд Северного неба. — М. : МГУ, 1991.
2. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616, iss. A1.
3. *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.
4. *Larter N., Gonfalone A.* International space station. A guide for European users. — ESA SP, Paris : European Space Agency (ESA), 1996.
5. *Martinez P., Klotz A.* A practical guide to CCD astronomy. — Cambridge : Cambridge University Press, 1998.
6. *Gunn J. E., Carr M., Rockosi C. et al.* The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera // *Astron. J.* — 1998. — Vol. 116. — P. 3040—3081.
7. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика. — М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988.
8. *Максумов Д. Д.* Астрономическая оптика. — М. : Наука, 1979.
9. *Горбатенко Ю. В., Цуканова Г. И.* Расчет исходных систем для ортоскопических зеркально-линзовых объективов // *Опт. журн.* — 2012. — Т. 79, № 4. — С. 13—17.
10. *Цуканова Г. И., Горбатенко Ю. В.* Исследование исходных систем ортоскопических астрономических объективов в спектральном диапазоне 0.2—1 мкм // *Опт. журн.* — 2012. — Т. 79, № 5. — С. 15—18.
11. *Alekseev V. A., Bokov V. V., Egorov V. N. et al.* Analysis of constructions of silicon carbide mirrors // *Sov. J. Opt. Technol.* — 1991. — Vol. 58, № 7. — P. 390—391.
12. *Johnson H. L.* The absolute calibration of the Arizona photometry // *Comm. Lunar Plan. Lab.* — 1965. — Vol. 3. — P. 73—77.
13. *Khaliullin Kh., Mironov A. V., Moshkalyov V. G.* A new photometric WBVR system // *Astrophys. Space Sci.* — 1985. — Vol. 111. — P. 291—323.
14. *Mironov A., Zakharov A., Prokhorov M.* “Lyra” Space Stellar Survey and Establishing a Large Grid of Photometric Standards // *ASP Conference Series.* — 2016. — Vol. 503. — P. 123—134.
15. *Mironov A. V., Zakharov A. I., Prokhorov M. E. et al.* The Multicolor Lyra Photometric System for Variable Stars and Halo Studies // *Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy Formation.* — Moscow : Sternberg Astron. Inst., 2010. — P. 185—191.

16. *Миронов А. В., Захаров А. И., Прохоров М. Е.* Проблемы современной астрофотометрии // Физика космоса : тр. 37-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 28 янв.— 1 февр. 2008 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 105—117.
17. ТЕСИС: О проекте. — [http://www.thesis.lebedev.ru/about\\_thesis.html](http://www.thesis.lebedev.ru/about_thesis.html).
18. *Howell S. B.* Handbook of CCD Astronomy. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006.
19. *Захаров А. И., Миронов А. В., Прохоров М. Е. и др.* Космический эксперимент «Лири-Б»: цели и принципы реализации // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90. — С. 223—241.
20. *Stewart D.* A Platform with Six Degrees of Freedom // UK Inst. of Mech. Eng. Proc. — 1965—1966. — Vol. 180, № 15.
21. *Мартынов Д. Я.* Курс практической астрофизики. — М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1997. — С. 6.
22. SAI CAS Project. — <http://www.sai.msu.su/~megera/wiki/CAS>.

## ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

**О. К. Сильченко**

*Государственный астрономический институт Московского  
государственного университета им. М. В. Ломоносова*

В лекции будет рассказано об эволюции галактик, как мы ее сейчас себе представляем. Эволюция галактик может изучаться с помощью двух основных подходов — либо подробное исследование близких галактик разных типов и построение моделей, которые дают похожие на наблюдаемые конечные результаты эволюции; либо прямое наблюдение галактик на разных красных смещениях, что из-за конечной скорости света позволяет увидеть последовательные стадии эволюции, начиная с самых ранних. В жизни галактики важны следующие процессы, составляющие разные стороны ее эволюции: динамическая эволюция, определяющая также и структуру галактики; эволюция звездного населения, определяющая интегральное излучение галактики; наконец, химическая эволюция, отражающая изменение химического состава газа и звезд в галактике. Одним из самых главных вкладчиков в эти различные стороны эволюции галактики является ее история звездообразования.

## EVOLUTION OF GALAXIES

**O. K. Silchenko**

*Sternberg Astronomical Institute of the Lomonosov Moscow State  
University*

I would talk about evolution of galaxies as we can only imagine it currently. The evolution of galaxies can be studied through two different approach: we can study in detail some nearby galaxies of various morphological types and try to construct models with the similar final properties; or we can observe distant galaxies at various redshifts which, due to the finite light speed, represent different evolutionary stages, starting from the earliest ones. The most important processes in the life of a galaxy are: dynamical evolution which shapes also its structure; evolution of the stellar population which is simultaneously spectrophotometric evolution; and the chemical evolution which drives the metallicity growth in the gas and stars of the galaxy. The main contributor into many of these evolutionary processes is star formation history of a galaxy.

## Введение

Эра внегалактической астрономии началась менее ста лет назад. В 1926 г. Эдвин Хаббл [1] впервые предложил свою морфологическую классификацию галактик: расположил в строчку (он назвал это «последовательности») эллиптические и спиральные галактики. Окончательный вид схема типов галактик приняла десятью годами позже в его эпохальной книге [2]; ее адаптация с современными фотографиями галактик представлена на рис. 1. Западные коллеги называют эту схему немного грубо — «вилка Хаббла», в русскоязычной астрономии бытует куда более возвышенное описание — «камертон Хаббла».

Проанализируем морфологическую схему типов галактик сперва чисто визуально. Слева располагаются эллиптические галактики. Это однородные на вид сфероидальные системы, состоящие из красных звезд, которые не разрешаются и сливаются в одно туманное облако. Деталей в них не видно, поэтому всю классификацию эллиптических галактик, последовательно заполняющих «ручку» камертона Хаббла, он основал на видимом отношении осей эллипсоида — от абсолютно круглых изображений до вытянутых с отношением осей тройка. Справа располагаются спиральные галактики: вдоль одного из зубцов — диски с барами, вдоль другого — диски без баров. Спиральные галактики, в отличие от простых однокомпонентных эллиптических галактик, куда более сложны на вид. У них, как правило, присутствует как минимум два крупномасштабных структурных компонента: сфероидальные балджи в центре — такая мини-эллиптическая галактика — внутри большого звездного диска. В свою очередь, диски демонстрируют внутри себя кучу более мелких деталей: спиральные ветви, отдельные области звездообразования, перемычки в центре... Вдоль каждого зубца, слева направо, увеличивается раскрытость спиральных ветвей, их неоднородность (клочковатость), а также уменьшается вклад балджа в общую светимость. Хаббл назвал «левые» типы галактик ранними, а «правые» — поздними, и эти названия используются до сих пор. Конечно, практически сразу Хаббла стали спрашивать: название «ранние» означает, что эти галактики появились раньше? И он объяснил, что его схема — чисто морфологическая, создана для работы со статистикой форм многих сотен наблюдавшихся уже тогда галактик, и он совершенно не претендует на «теорию эволюции» галактик. Однако тогда у исследователей галактик все же осталось некое подозрение: ранние

типы куда менее богаты деталями, так, может, эти детали развились в процессе эволюции? И только с набором статистики, когда стало ясно, что галактики поздних типов менее массивны, чем галактики ранних типов, эти подозрения исчезли. А в конце XX в., когда космологи рассчитали эволюцию всей Вселенной сразу в рамках своей космологической модели, они вернули схеме Хаббла эволюционный смысл, только перевернули его: согласно космологическим представлениям первыми во Вселенной появились дисковые галактики самых поздних типов, а уже позже они, сливаясь, породили морфологический тип эллиптических галактик.

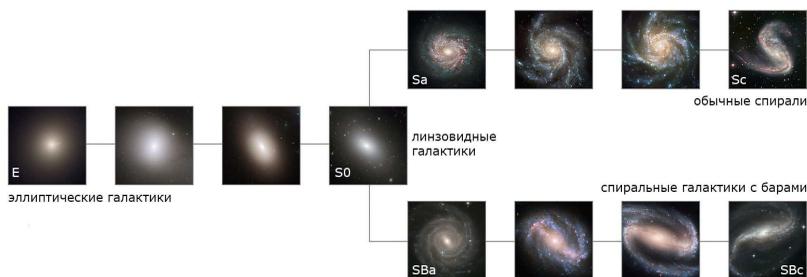


Рис. 1. Морфологическая классификация галактик Хаббла (дизайн картинки А. В. Каспаровой)

Каково же процентное соотношение морфологических типов галактик в нашей локальной Вселенной? Больше всего вокруг нас спиральных галактик: более 70 % галактик ближней Вселенной — спиральные. На втором месте располагаются линзовидные галактики (S0), их 15 %. Линзовидные галактики — это тоже дисковые галактики, как и спиральные. Но Хаббл считал их переходным типом между левой и правой частями схемы: у линзовидных галактик двухкомпонентная структура, состоящая из балджа и диска, как и у спиральных, но однородный красноватый вид, без деталей, который роднит их с эллиптическими галактиками. Из-за этого их часто объединяют в «галактики ранних типов», хотя и структурно, и динамически линзовидные галактики куда более близкие родственники спиральных, чем эллиптических. Эллиптических галактик в ближней Вселенной всего 3–5 %, даже меньше, чем неправильных. Правда, тут нужно оговориться, что пропорция морфологических типов сильно зависит от плотности расположения галактик в данном конкретном месте: в

скоплениях галактик преобладают ранние типы, в самых больших из них до 60 % всех галактик могут быть линзовидными и до 30 % — эллиптическими. Но скоплений мало, в ближней Вселенной только 7 % всех галактик входят в скопления.

## **Каковы основные механизмы эволюции, проявления которых мы наблюдаем в близких галактиках?**

**Динамическая и структурная эволюция.** Механизмы динамической эволюции галактик весьма многообразны. В свое время Корменди и Кенникат в своем знаменитом обзоре [3] привели структурированную схему всех возможных механизмов динамической эволюции. Они разделили все механизмы на быстрые (динамические времена порядка сотен миллионов лет) и медленные (динамические времена порядка нескольких миллиардов лет), а также на внутренние и внешние, требующие воздействия окружающей среды и/или соседних галактик. Получился квадрат. В углу «быстрых внутренних» царит «монолитный коллапс» — формирование звездного тела галактики из протогалактического газового облака в результате сжатия этого облака под действием собственной гравитации. В углу «быстрых внешних» расположились слияния галактик сравнимых масс (так называемый «большой мержинг») и удаление газа из спиральных галактик, влетающих в скопления галактик, лобовым давлением горячей межгалактической среды.

Медленные механизмы называют еще «секулярной» (вековой) эволюцией. В эту категорию входят очень много конкретных воздействий — как внутренние неустойчивости холодных галактических дисков, так и множественное поглощение спутников, и приливные эффекты, связанные с взаимодействием галактик, и плавная аккреция внешнего холодного газа на диск, питающая звездообразование во всех дисковых галактиках.

От того, какие динамические механизмы действуют в галактике (на галактику), зависит и ее структура. Например, известно, что большой мержинг — слияние двух спиральных галактик сравнимых масс — породит в итоге одну большую эллиптическую галактику со вспышкой звездообразования в центре. Или если в холодном звездно-газовом диске развивается внутренняя неустойчивость, то в его центре образуется бар (перемычка), который, в свою очередь, возмуща-



Внутренняя секулярная эволюция из-за влияния

- барной неустойчивости
- гало темной материи
- спиральной структуры
- ядерной черной дыры
- галактического ветра и фонтанов и др.

Секулярная эволюция, связанная

- с продолжительной аккрецией газа
- с взаимодействием между галактиками

Рис. 2. Классификация механизмов динамической эволюции согласно [3]

ет газ и заставляет его стекать в центр галактики. Здесь, в центре галактики, скопившийся газ может либо превратиться в звезды и нарастить балдж, либо запитать центральную сверхмассивную черную дыру и таким образом зажечь активное ядро в галактике. Звездообразование в спиральных галактиках, как правило, происходит довольно равномерно, падая по экспоненте в течение миллиардов лет. Если на тех же характерных временах происходит радиальное перераспределение газа — из внешних областей во внутренние, — то формируются экспоненциальные профили поверхностной яркости звездных дисков галактик, которые реально и наблюдаются в спиральных и линзовидных галактиках практически в универсальном режиме [4].

**Спектрофотометрическая эволюция галактик** — это изменение со временем распределения энергии в интегральном спектре галактики. Наиболее наглядно она проявляется в изменении *цвета* галактики или каких-то частей галактик. Особо выделяют «пассивную эволюцию» спектра галактики: это если одновременно образовалось какое-то поколение звезд и далее все эти звезды мирно эволюционировали сами по себе. В процессе пассивной эволюции первыми, через какие-то 10–30 млн лет, вымирают самые массивные звезды спектрального класса O, и интегральный цвет галактики перестает быть голубым. Через миллиард лет приходит черед умирать для звезд массой  $2 M_{\odot}$ , и галактика становится желтой. Старые звездные системы — а к ним относят шаровые скопления и эллиптические галактики — имеют в своем звездном составе только звезды с массой  $1 M_{\odot}$  и меньше, т. е. в основном карлики и гиганты спектрального класса G и позже. Из-за этого эллиптические галактики красные. А вот шаровые скопления все равно голубые, хоть и старые. Это оттого, что химический состав звезд шаровых скоплений очень беден металлами — на порядок и даже на два беднее, чем Солнце. Понижение металличности звезд повышает прозрачность их атмосфер и приводит к поголубению. Шаровые скопления — звездные системы, пассивно эволюционировавшие в течение последних 11–13 млрд лет, — выглядят такими же голубыми, как массивные Sc-галактики, у которых солнечный химический состав и довольно интенсивное звездообразование все последние 5–8 млрд лет. Это называется «эффект возрождения возраста и металличности».

**Химическая эволюция галактик и Вселенной в целом** — это изменение химического состава газа и звезд в галактиках, которое последние 13.5 млрд лет происходит из-за того, что газ превращается в звезды, проходит через цикл термоядерных реакций в звездах и после смерти звезды выбрасывается в межзвездную среду уже обогащенным вновь синтезированными химическими элементами. То есть химическая эволюция галактик тесно связана с их историей звездообразования (как, впрочем, и спектрофотометрическая эволюция). Надо сказать, что основа химического состава Вселенной — 70 % по массе водорода и 25 % гелия — нам досталась в наследство от Большого взрыва. Именно в первые 20 мин жизни Вселенной, еще в супе из свободно летящих фотонов, а вовсе не в звездах, были синтезированы водород с изотопами дейтерий и тритий, гелий (оба изотопа), литий (оба изотопа) и немного бериллия, который, впрочем, был нестабилен и весь распался в литий. Все эле-

менты тяжелее бора, — это продукты термоядерных реакций в звездах. Много лет спектроскописты охотятся за звездой «нулевой металличности» — той, которая унаследовала бы первичный химический состав от Большого взрыва, звездой из самого первого поколения звезд. Однако эта охота до сих пор безуспешна: удалось найти в гало нашей Галактики лишь несколько звезд с металличностью одна десятитысячная — одна стотысячная от солнечной. Отсюда родилась гипотеза, почти миф, о звездах «населения III», которые насинтезировали начальный уровень металлов и все умерли, потому что все были очень массивными. Теперь в спектрах очень далеких галактических дисков пытаются найти характерный рисунок (соотношение обилия различных элементов таблицы Менделеева), который не похож на все, что мы видим вблизи нас, который можно было бы приписать сверхмассивным звездам «населения III».

### Наблюдения далеких галактик — прямая эволюция?

Скорость света конечна. Это означает, что от далеких объектов свет до нас идет вполне заметное время. От ближайшей звезды свет идет до нас 4 года. От далеких галактик свет идет до нас миллиарды лет. Это означает, что, наблюдая галактику сегодня, мы на самом деле видим ее такой, какой она была миллиарды лет назад. И чем дальше от нас галактика, которую мы сегодня наблюдаем, тем дальше в ее прошлое мы проникаем. На рис. 3 показано, как связаны красное смещение наблюдаемой галактики и то, насколько давно она была такой, какой мы ее сегодня видим. Поскольку время, потраченное светом на то, чтобы дойти до нас, зависит от геометрии пространства, в соотношение рис. 3 входят космологические параметры. Согласно современным представлениям о космологических параметрах, характеризующих всю Вселенную целиком (а они известны космологам очень точно), галактики на красном смещении 0.5 мы наблюдаем 5 млрд лет назад, галактики на красном смещении единица — 8 млрд лет назад. Сейчас на больших телескопах уже успешно наблюдаются большие выборки галактик на красном смещении 5, а это всего 1 млрд лет после Большого взрыва. Можно сказать, что всю эволюцию галактик мы реально наблюдаем «на просвет», прощупывая одну эпоху за другой. Что это, прямое наблюдение эволюции галактик? На самом деле не все так просто. В разные эпохи мы сейчас наблюдаем *разные* галактики, а не одну и ту же. На-

селения галактик на разных красных смещениях могут быть весьма непохожи друг на друга. Чтобы построить эволюционную последовательность, связать разные галактики на разных красных смещениях в единую цепочку эволюционных стадий, все равно нужна модель. Этот подход к эволюции галактик тоже модельно зависим.

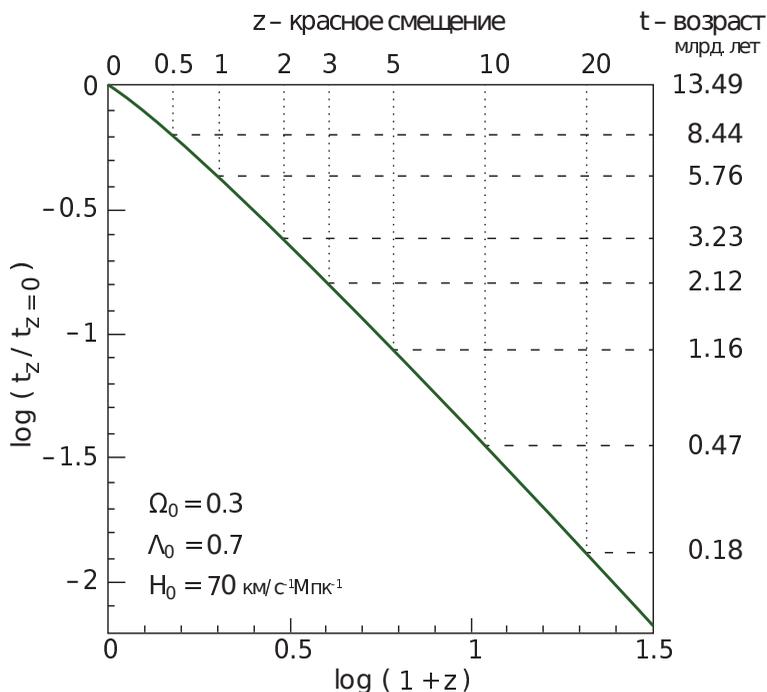


Рис. 3. Связь между красным смещением объекта и моментом в жизни Вселенной, в который мы его наблюдаем — из-за конечной скорости света

Насколько реально велики трудности прямого наблюдательного подхода к исследованию эволюции галактик на больших красных смещениях, показала история с глубокими хаббловскими полями. Тут имя собственное относится не к Эдвину Хабблу, а к космическому телескопу имени Хаббла. Когда в 1994 г. удалось исправить пространственное разрешение изображений, получаемых Хаббловским космическим телескопом, до одной десятой секунды дуги, пришло время замахнуться на далекие слабые объекты. Была выбрана площадка, на взгляд совершенно пустая, в созвездии Большой Мед-

ведицы, и далее Хаббловский космический телескоп, летая по своей орбите, наводясь на эту площадку время от времени, в конце концов накопил чистые две недели экспозиции. Удалось достичь фотометрического предела около 29-й звездной величины. На полученном в нескольких фильтрах изображении площадки со стороны 2 минуты дуги в результате исследователи разглядели 9 слабых звезд нашей Галактики, около 40 белых карликов и более 2 000 галактик. Самая близкая из них — эллиптическая галактика на  $z = 0.09$ . Несколько десятков галактик глубокого Хаббловского поля (северного) находятся на красных смещениях больше 2. Какая галактика самая далекая, оценить трудно: по цвету одна из галактик может быть на красном смещении 12, но она так слаба, что спектра получить не удалось и бесспорного доказательства этого красного смещения не последовало.

Открытие, которое немедленно в 1997 г. огласили исследователи глубокого Хаббловского поля (северного), состояло в том, что до красного смещения 1 удалось классифицировать наблюдаемые галактики в рамках схемы Хаббла. То есть последние 8 млрд лет Вселенная была наполнена в основном спиральными галактиками, а также галактиками линзовидными и эллиптическими. А вот на  $z > 1.5$  привычные Хаббловские морфологические типы исчезают, и галактики становятся странными на вид: это цепочки или кучки небольших сгустков размером каждый до 1 кпк. Космологи торжествовали: они же предсказывали, что сначала образуются карликовые диски, которые потом сливаются в более крупные галактики. Ну вот же, в глубоком Хаббловском поле они сливаются на глазах! Астрономы-наблюдатели были более осторожны: а может быть, мы просто видим самые яркие области звездообразования на фоне больших дисков, области, которые затмевают собой слабый окружающий диск без звездообразования? Разрешить этот спор могла только динамика: лучевые скорости сливающихся сгустков должны различаться куда сильнее, чем скорости областей звездообразования одного и того же диска. Через десять лет подоспели панорамные спектрографы на 8-метровом телескопе VLT, построили карты лучевых скоростей комковатых галактик, и да — это оказались единые большие диски с регулярным круговым вращением, только звездообразование в них происходит в гигантских сгустках, которых в настоящую эпоху уже почти не осталось. Спиралей в таких дисках быть не может, как и баров: они слишком толстые, динамически горячие, устойчивые против внутренних неосесимметричных возмущений. А вот гравитационная

неустойчивость газового компонента дисков, который в этих далеких галактиках 10 млрд лет назад почти равнялся по массе звездному компоненту, работает и приводит к фрагментации газового диска на гигантские плотные сгустки, в которых звездообразование идет на порядок более эффективно, чем в современную эпоху в спиральных ветвях.

## **Наблюдения далеких галактик — критический тест для сценариев эволюции**

Очень показательной в качестве иллюстрации важности и взаимодополняемости двух подходов к исследованию эволюции галактик является история со сценарием эволюции гигантских эллиптических галактик.

Начиная со второй половины 70-х гг. прошлого столетия, когда начались точные спектральные наблюдения галактик, все думали, что эллиптические галактики образуются большим мерджингом — слиянием примерно равных по массе спиральных галактик. Дело в том, что гигантские эллиптические галактики почти не вращаются, а любое протогалактическое облако, будь оно газовое или из темной материи, обязано иметь момент вращения, потому что мимо летают соседи и приливным гравитационным воздействием его обязательно раскручивают. Момент вращения отнять довольно трудно, — это не энергия, которую газ может просто высветить. И в конце концов придумали чуть ли не единственно возможный динамический механизм, благодаря которому звездная система теряет момент: слияние галактик сходных масс. При таком слиянии («большом мерджинге») происходит бурная релаксация, и, как показывают расчеты, конечный «продукт» будет сфероидальным и не будет вращаться. Как раз в точности как эллиптические галактики. Однако в 2000-х гг. с этим сценарием возникли проблемы.

Численное моделирование больших мерджингов с высоким пространственным разрешением показало, что все хорошо, но... исчезают радиальные градиенты металличности, даже если до этого они и были в сливающихся дисках [5]. Потому что релаксация при слияниях такая бурная, что все перемешивается, в том числе и по радиусу, и галактика приобретает абсолютно однородный химический состав звезд во всех своих частях. Между тем в эллиптических галактиках радиальные градиенты металличности есть. Мы в 2007 г. опубликовали результаты глубокой спектроскопии пяти близких гигантских

эллиптических галактик, наблюдавшихся на 6-метровом телескопе САО РАН [6]. Поскольку наша спектроскопия была глубже, чем обычно получали до нас, мы впервые зафиксировали изломы градиентов металличности примерно на половине эффективных радиусов. То есть во внутренних частях эллиптических галактик получались очень крутые градиенты металличности, несовместимые с событием большого мерджинга в жизни галактики, по крайней мере в последние 10 млрд лет. А во внешних частях градиенты металличности получились плоские, т. е. для внешних частей допускалось бурное радиальное перемешивание звездного населения. И тогда в 2007 г. мы предложили сценарий образования и эволюции гигантских эллиптических галактик, в котором было два главных этапа. Сейчас этот сценарий называют «двухфазным».

Первый этап, который должен был состояться раньше, чем  $z = 3$ , подразумевал монолитный коллапс большого газового облака с последующим звездообразованием, — в таком сценарии ожидается компактный размер получившейся звездной системы из-за диссипации энергии газа при коллапсе, и крутой градиент металличности из-за более эффективного звездообразования в самых внутренних частях галактики. А потом, позже, на протяжении многих миллиардов лет на эту компактную «затравку» должны были падать в большом количестве спутники; из-за большого орбитального момента их звезды должны были перемешиваться на периферии галактики, и там градиент металличности должен был пропадать, а во внутренней области — сохраняться. В результате этого, второго этапа эволюции и получались современные эллиптические галактики.

Интересно, что примерно в то же самое время аргументы в пользу такого сценария пришли с другой стороны — из наблюдений далеких эллиптических галактик на красных смещениях 1.5–2. Накопились данные с Хаббловского космического телескопа по изображениям далеких гигантских эллиптических галактик со звездной массой больше ста миллиардов солнечных масс, и оказалось, что тогда, 9–10 млрд лет назад, гигантские эллиптические галактики имели размер в 5–7 раз меньше, чем эллиптические галактики с такой же массой имеют в наши дни ([7], например). Стали искать механизм динамической эволюции, который позволил бы сильно увеличить размер («раздуть» галактику), не сильно изменяя ее массу. Большой мерджинг не подходил: при большом мерджинге размер увеличивается пропорционально массе. Если взять на  $z = 2$  галактику массой 200 млрд солнечных масс и большим мерджингом увеличить ее в пять

раз, то получится масса триллион солнечных масс! Таких огромных эллиптических галактик рядом с нами в большом количестве нет. И в результате исследователи пришли к «двухфазному» сценарию [8]: сначала в быстром слиянии газовых сгустков (что эквивалентно сценарию монолитного коллапса по Ларсону) бурно рождаются звезды, потом звездообразование останавливается зажегшимся в центре галактики квазаром, и впоследствии на компактную, пассивно эволюционирующую затравку падают карликовые галактики без газа, которые наращивают ее радиус до современных размеров. Сейчас этот двухфазный сценарий является общепринятым; на рис. 4 я привожу картинку из галереи NASA, предназначенную для широкой публики. То есть этот сценарий формирования и эволюции эллиптических галактик стал каноническим.

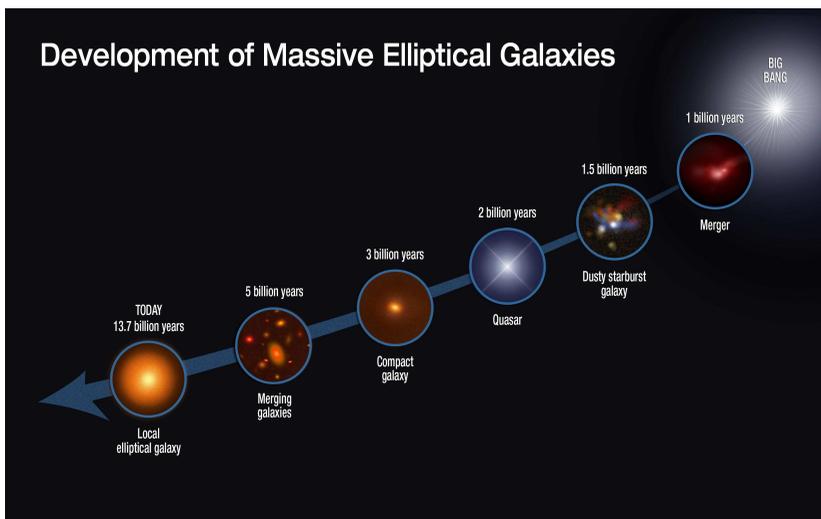


Рис. 4. Современный сценарий эволюции эллиптических галактик — NASA Legacy gallery

## Библиографические ссылки

1. *Hubble E. P.* Extragalactic nebulae. // *Astrophys. J.* — 1926. — Vol. 64.
2. *Hubble E. P.* Realm of the Nebulae. — 1936.
3. *Kormendy J., Kennicutt R. C., Jr.* Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 42. — P. 603–683. [astro-ph/0407343](#).
4. *Freeman K. C.* On the Disks of Spiral and S0 Galaxies // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 160. — P. 811.
5. *Kobayashi C.* GRAPE-SPH chemodynamical simulation of elliptical galaxies - I. Evolution of metallicity gradients // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 347. — P. 740–758. [astro-ph/0310160](#).
6. *Baes M., Sil'chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A.* Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 991–1001. [astro-ph/0702605](#).
7. *Trujillo I., Feulner G., Goranova Y. et al.* Extremely compact massive galaxies at  $z \sim 1.4$  // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 373. — P. L36–L40. [astro-ph/0608657](#).
8. *Huang S., Ho L. C., Peng C. Y. et al.* Fossil Evidence for the Two-phase Formation of Elliptical Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 768. — P. L28. [1304.2299](#).

## СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФАКЕЛОВ

**А. А. Соловьев**

*Главная астрономическая обсерватория РАН*

В лекции дается краткий обзор исследований свойств солнечных факелов. Обсуждаются имеющиеся модели факелов и их трудности. Излагается новая 3-мерная аналитическая модель факельного узла, разработанная автором в 2018 г. в виде магнитного «фонтана» со множеством тонких струек стационарных течений плазмы, отражающих магнитную структуру факела.

## THE STRUCTURE OF THE SOLAR TORCHES

**A. A. Solovjev**

*The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo*

The lecture gives a brief overview of the research of the properties of solar faculae. The available models of faculae and their difficulties are discussed. A new 3D analytical model of the steady facular knot, developed by the author in 2018 in the form of a magnetic “fountain” with numerous thin streams of the plasma mapping the magnetic structure of the facula, is presented.

Солнечные факелы, наряду с солнечными пятнами, являются важным и значимым проявлением солнечной активности в целом. Несмотря на их небольшую яркость, они, благодаря своей многочисленности, дают настолько существенный вклад в общую светимость Солнца, что Total Solar Irradiance (TSI) в моменты максимума пятенной активности оказывается выше (на 0.1 %), чем в минимуме, т. е. повышенная светимость факелов перекрывает понижение общей светимости Солнца, вызываемое появлением темных пятен. Это одна из причин, по которым в солнечной физике исследованию факелов традиционно уделяется большое внимание. Факелы, как и пятна, имеют магнитную природу, хотя их магнитные поля намного слабее, чем в пятнах. Очевидно, по этой причине факельные поля появляются в активной области раньше, чем формируются пятна, и живут дольше пятен. Принято считать, что в факельных областях на Солнце присутствуют три различных класса магнитных структур:

- а) мелкомасштабные магнитные элементы, отдельные тонкие трубки магнитного потока;
- б) факельные узлы;
- в) темные поры.

Первые из перечисленных структур имеют «гранулярные» масштабы: диаметр 0.5–1 угловой секунды и меньше, время жизни 5–10–15 мин, напряженность магнитного поля — близкая к полю равномерного распределения (150–300 Гс). Эти элементы очень динамичны, находятся в постоянном движении, их яркость невелика и связана главным образом с тем, что фотосферные гранулы, взаимодействуя с магнитным полем, давление которого близко к динамическому давлению конвективного поля грануляции, поджимаются этим полем, дополнительно структурируются им и за счет этого увеличивают несколько свою яркость, просвечивая при проворачивании (overturning) своими боковыми поверхностями сквозь окружающие их более прозрачные магнитные силовые трубки. Физическая природа этих элементов хорошо симулируется численно в рамках представлений о магнитоконвекции.

Второй тип факельных элементов — факельные узлы — более яркие, относительно стабильные, долгоживущие (среднее время жизни 10–15 ч, иногда до одного дня и более) образования. Они имеют диаметры от 3 до 7 Мм и тонкую внутреннюю магнитную структуру (менее 1 Мм) — факельные гранулы. Их магнитное поле находится в диапазоне от 250 до 1 200 Гс. Факельные узлы живут, по-видимому, в местах стыков нескольких ячеек супергрануляции, и время их жизни на много порядков превышает время релаксации системы к равновесию (несколько минут). Поэтому данные структуры можно рассматривать как устойчивые образования, способные совершать колебания как целостные объекты около положения равновесия. Хотя в целом узлы имеют повышенную яркость, в них наблюдается центральное понижение температуры (типа Вильсоновской депрессии в солнечных пятнах) и в этом смысле они уже приближаются к порам — малым темным пятнам без полутени.

В факельных структурах наблюдаются квазипериодические колебания магнитного поля и интенсивности излучения. Относительно короткопериодические колебания с периодами от 3–5 до 15 мин естественно объясняются как проявления акустических и МГД-волн, распространяющихся в магнитных трубках, которые формируют эти объекты и служат волноводами и резонаторами. В факельных узлах, как долгоживущих (и, следовательно, достаточно устойчивых)

объектах, наблюдаются, наряду с короткопериодическими, и значительно более длинные периоды — от часа и более. Эти колебания следует уже рассматривать не как следствие пробегающих в них МГД-волн, а как колебания всей магнитной структуры в целом около положения ее устойчивого равновесия; в них вовлекаются значительные массы вещества и потому периоды этих колебаний оказываются достаточно большими. Для солнечного пятна этот колебательный процесс подробно описан нами в рамках модели неглубокого солнечного пятна.

Относительно медленные временные вариации магнитного поля уединенных, долгоживущих, компактных факельных узлов имеют специфические особенности. Они заключаются в том, что за время наблюдения, близкое к времени жизни узла, амплитуда и период колебаний его магнитного поля синхронно изменяются, т. е. вместе с ростом амплитуды увеличивается и период колебаний (первый режим) или с падением амплитуды падает и период колебаний (второй режим). Иногда наблюдается перемежающийся характер колебаний: интервалы роста амплитуды и периода сменяются интервалами падения амплитуды и периода (третий режим). Природа таких колебаний объясняется тем, что за время наблюдений, которое близко к времени жизни узла, его параметры (магнитное поле, площадь, занимаемая на магнитограмме и др.) могут заметно измениться, хотя при этом факел сохраняет свою структурную идентичность, т. е. легко отслеживается как самостоятельный уединенный объект на магнитограммах и интенситограммах активной области. Эти изменения изменяют и эффективную жесткость системы (величину отклика на внешние возмущения), что приводит к изменению характера самих колебаний. Таким образом, наблюдаемые колебания магнитного поля факельных узлов с периодами от 1 до 4 ч представляются нам как собственные малые колебания системы с изменяющейся во времени жесткостью (коэффициентом упругости). Все три специфических режима низкочастотных колебаний, обнаруженных в факельных узлах, хорошо описываются такой моделью. Интересно, что и для солнечных пор удается обнаружить подобный тип колебаний.

Характерной особенностью хромосферных магнитных полей является наблюдаемая в линиях ионизованного кальция на уровне температурного минимума (около 500 км над уровнем фотосферы) очень тонкая пространственная структура, которая представляется совокупностью тонких арочных структур, образующих в хромосфере некоторое подобие «магнитного ковра». Исходя из этих наблюда-

тельных данных мы представляем модель факельного узла в виде магнитного фонтана с многочисленными очень тонкими «струями» плазмы, трассирующими магнитные силовые линии.

Развитая нами аналитическая МГД-теория позволяет рассчитать распределение давления, плотности, температуры газа, а также скорости стационарных течений плазмы в такой конфигурации на любой высоте в хромосфере Солнца. Расчеты температурных профилей показывают, что на уровне фотосферы факельные узлы, будучи в среднем ярче, чем фотосфера, имеют в центре некоторый провал температуры (аналог Вильсоновской депрессии в солнечных пятнах), что сближает их с порами — малыми пятнами без полутени. Факельные узлы на высотах температурного минимума и выше центрального провала в своих температурных профилях не имеют и всегда оказываются более горячими, чем окружающая их хромосфера на тех же высотах.

Одной из сложных проблем физики солнечных факелов является проблема изменения их яркости по мере перемещения от центра солнечного диска к лимбу (Center-Limb-Variation Problem). Широко распространенная модель «горячих стенок» дает нулевую светимость факелов на лимбе, в то время как в реальности наблюдается обратная картина: факелы лучше всего видны именно на краю диска! В нашей модели излучающая поверхность факела имеет как горизонтальную составляющую, которая меняется по закону  $\cos(\theta)$ , так и вертикальную, изменяющуюся по закону  $\sin(\theta)$ . Здесь  $\theta$  — угол между лучом зрения наблюдателя и нормалью к солнечной поверхности. Он равен нулю в центре диска и составляет  $90^\circ$  на лимбе. На лимбе горизонтальная излучающая поверхность дает нулевой вклад, а вертикальная поверхность — максимальный. Получаемая картина хорошо соответствует наблюдениям.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00168.

## КОСМИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

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

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

Лекция посвящена наблюдательным и теоретическим аспектам исследований магнитных полей в космосе. Обсуждаются основные методы определения интенсивности и геометрии магнитного поля. Приводятся данные о магнитных полях астрофизических объектов. Рассматриваются основные теории происхождения магнитного поля космических объектов. Особое внимание уделяется роли магнитного поля в процессе звездообразования.

## COSMIC MAGNETIC FIELD

S. A. Khaibrakhmanov<sup>1,2</sup>, A. E. Dudrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, <sup>2</sup>Chelyabinsk State University

The lecture is dedicated to observational and theoretical aspects of investigations of cosmic magnetic fields. Main methods for determination of the strength and geometry of the magnetic field are discussed. Observational data on the magnetic fields in astrophysical objects are given. We consider main theories of the cosmic magnetic field origin. Special attention is paid to the role of the magnetic field in star formation.

## Введение

Как показывают наблюдения, магнитные поля присутствуют в большинстве космических объектов. Основные компоненты галактик — звезды и межзвездный газ — состоят из полностью или частично ионизованной плазмы, поэтому их динамика управляется электромагнитной силой. Во многих случаях влияние магнитного поля на космическую плазму является определяющим. Крупномасштабные электростатические поля в космосе отсутствуют, что обусловлено квазинейтральностью плазмы.

Данная лекция посвящена обзору основных аспектов исследования космического магнитного поля. Приводятся распространенные

методы измерения магнитного поля, а затем обсуждаются геометрия и характерные значения напряженности магнитного поля Галактики, межзвездной среды, молекулярных облаков, молодых звезд с аккреционными дисками. Рассматриваются основные теории происхождения магнитного поля в космосе. Особенное внимание уделяется теории остаточного магнитного поля и роли магнитного поля в процессе звездообразования.

## Методы определения магнитного поля

### Эффект Зеемана

В отсутствие внешнего магнитного поля энергетические уровни тонкой структуры атомов не зависят от полного момента импульса  $\mathbf{M}$  и являются вырожденными. В магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  вырождение снимается и уровни тонкой структуры расщепляются на  $2j + 1$  эквидистантных уровней, где  $j$  — квантовое число полного углового момента. Разность энергий расщепленных подуровней (см. [1])

$$\Delta\varepsilon = \pm\mu gMB, \quad M = 0, 1, \dots, j, \quad (1)$$

где  $\mu = 7 \times 10^{-21}$  эрг·с<sup>-1</sup> — магнетон Бора;  $g$  — фактор расщепления Ланде, учитывающий спин.

В простейшем случае одинаковых факторов Ланде верхнего и нижнего уровней возникает нормальный эффект Зеемана с расщеплением спектральных линий на три компонента. В более общем случае аномального эффекта число компонентов может значительно возрастать. Несмещенный  $\pi$ -компонент триплета линейно поляризован по полю,  $\sigma$ -компоненты поляризованы эллиптически в плоскости, перпендикулярной полю.

При наблюдении вдоль поля (продольный эффект Зеемана) регистрируется дублет из двух  $\sigma$ -компонентов, поляризованных по кругу во взаимно противоположных направлениях. Величина расщепления

$$\Delta\lambda_B = 0.47g\lambda^2 \frac{B}{10^{-6}} \text{ см.} \quad (2)$$

В направлении, перпендикулярном полю, наблюдатель должен регистрировать линейно-поляризованные  $\pi$ - и  $\sigma$ -компоненты с примерно равными интенсивностями.

С помощью регистрации зеемановского расщепления спектральных линий измеряется магнитное поле межзвездных облаков как ло-

кальных областей с размерами порядка линейного разрешения радиотелескопа. В линиях нейтрального водорода  $\lambda = 21$  см наблюдается нормальный эффект Зеемана, в линиях гидроксила OH — аномальный. В условиях межзвездной среды зеемановское расщепление настолько мало, что его можно исследовать лишь фотоэлектрически с помощью современных многоканальных приемников. Величина расщепления циркулярно-поляризованных  $\sigma$ -компонентов определяется V-параметром Стокса, расщепление линейно поляризованных компонентов — параметрами Стокса Q и U.

### Фарадеевское вращение плоскости поляризации

Эффект Фарадея — поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося в магнитоактивной плазме. Эффект Фарадея объясняется следующим образом. Линейно поляризованная волна, распространяющаяся в плазме во внешнем магнитном поле, распадается на две волны с левой и правой круговыми поляризациями. Лево- и правополяризованные волны имеют различные показатели преломления (т. е. по-разному поглощаются в среде) и поэтому распространяются с разной скоростью. Разность фаз между ними при прохождении некоторого пути  $L$  в веществе изменяется, и плоскость поляризации результирующего линейно поляризованного света поворачивается на угол [1]

$$\psi = \lambda^2 \text{RM}, \quad (3)$$

$$\text{RM} = \frac{e^3}{2\pi (m_e c)^2} \int_0^L n_e B_{\parallel} dl, \quad (4)$$

где  $B_{\parallel}$  — проекция вектора магнитного поля на луч зрения;  $L$  — расстояние между источником излучения и наблюдателем. При типичных параметрах межзвездной среды мера вращения плоскости поляризации

$$\text{RM} = 0.81 \left( \frac{\bar{n}_e}{1 \text{ см}^{-3}} \right) \left( \frac{\bar{B}_{\parallel}}{1 \text{ мкГс}} \right) \text{ рад} \cdot \text{м}^2, \quad (5)$$

где  $\bar{n}_e$  и  $\bar{B}_{\parallel}$  — средние по лучу зрения концентрация электронов и продольный компонент магнитного поля.

Угол поворота может быть большим для радиоволн с длиной волны  $\lambda > 1$  см, исходящих от источников, находящихся на галактических расстояниях. Чтобы определить из (5) среднюю интенсивность

магнитного поля, необходимо знать расстояние  $L$  и электронную концентрацию. Меру вращения можно измерять для внегалактических радиисточников и пульсаров. Наблюдения пульсаров позволяют определить меру дисперсии (см. [2])

$$DM = \int_0^L n_e dl, \quad (6)$$

связывающую относительное запаздывание сигналов различных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\Delta t_{12} = \frac{e^2 (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{2\pi m_e c^2} DM. \quad (7)$$

Одновременное измерение запаздывания и разности углов поворота плоскости поляризации позволяет определить интенсивность продольного компонента магнитного поля,

$$\overline{B_{\parallel}} = 0.2 \frac{\psi_1 - \psi_2}{\Delta t_{12}}. \quad (8)$$

Сложность в применении данного метода обусловлена необходимостью учета неоднородностей электронной концентрации и магнитного поля по лучу зрения, а также вкладов самого источника. Проблемой также является неоднозначность определения углов  $\psi$ .

### Синхротронное излучение

Синхротронное излучение представляет собой излучение релятивистских электронов, движущихся в магнитном поле. Коэффициент излучения электронов с показателем излучения  $\gamma$  определяется лишь частотой и перпендикулярным к лучу зрения компонентом магнитного поля [3]

$$\sigma_1 = A(\gamma) \nu^{-\frac{\gamma+1}{2}} B_{\perp}^{\frac{\gamma+1}{2}}, \quad (9)$$

где  $A$  — константа, зависящая от  $\gamma$ . Непосредственное применение формулы (9) дает грубую оценку  $B_{\perp}$  вследствие неточного определения плотности релятивистских электронов и показателя спектра  $\gamma$ , а также трудностей, связанных с измерением монохроматической интенсивности синхротронного излучения.

Часто для оценки величины магнитного поля в источниках синхротронного излучения используется предположение о равномерном распределении энергии между релятивистскими частицами и магнитным полем.

Более точные оценки интенсивности крупномасштабного магнитного поля можно получить по поляризации синхротронного излучения. Синхротронное излучение ансамбля электронов линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

В идеально однородном магнитном поле степень линейной поляризации,  $p_0 = \frac{\gamma+1}{\gamma+\frac{2}{3}}$ , может достигать  $\approx 70\%$  при  $\gamma = 2.7$ . Наблюдаемая поляризация зависит от угла  $\psi$  между однородным компонентом магнитного поля и лучом зрения, а также от компонента хаотического поля. Приблизительно  $p = \frac{p_0 E_{mr}}{E_m}$ , где  $E_{mr}$  — энергия регулярного магнитного поля с произвольно направленными силовыми линиями;  $E_m$  — полная энергия магнитного поля,  $E_m = E_{mr} + E_{mt}$ ;  $E_{mt}$  — энергия хаотического поля. В случае  $\psi = 0$  обычно наблюдается степень поляризации  $p \approx 10\text{--}30\%$ .

Максимальная степень поляризации,  $p_0$ , уменьшается фарадеевским вращением плоскости поляризации внутри источника вследствие того, что излучение, возникающее в различных глубинах, испытывает поворот плоскости поляризации на разные углы.

Кроме того, при анизотропном распределении электронов по скоростям возникает небольшая круговая поляризация синхротронного излучения с  $p \approx 0.5\%$ .

## Поляризационное картирование

Звездный свет, рассеиваемый несферическими пылинками, ориентированными магнитным полем, является линейно поляризованным. Ориентация электрического вектора поляризации света дает представление о проекциях магнитных силовых линий на картинную плоскость.

Механизмы ориентации пылинок зависят от их свойств. Ферромагнитные пылинки выстраиваются по полю большой осью подобно железным опилкам. У парамагнитных пылинок в столкновительном газе по полю ориентируется наименьшая ось. Космическая пыль считается парамагнетиком, несмотря на то что имеет кристаллическую структуру.

Механизм парамагнитной релаксации Дэвиса–Гринштейна ориентирует основную ось вращения пылинок по полю за время (см. [4])

$$\tau_r = \frac{I}{VB_{\perp}^2 \kappa}, \quad (10)$$

где  $I$  — угловой момент относительно основной оси вращения пылинки;  $V$  — ее объем;  $B_{\perp}$  — поперечный компонент магнитного поля;  $\kappa$  — величина мнимой части магнитной восприимчивости пылинок. В условиях равномерного распределения энергии при столкновениях основной осью пылинки оказывается короткая ось с максимальным моментом инерции.

Столкновения пылинок с частицами окружающего газа приводят к нарушению параллелизма основной оси вращения и направления магнитного поля с характерным временем столкновений

$$\tau_{\text{col}} = \frac{I}{v_t \rho V^{4/3}}, \quad (11)$$

где  $v_t$  и  $\rho$  — тепловая скорость и плотность газа.

Механизм Дэвиса–Гринштейна работает, если температура пыли  $T_d$  не равна температуре газа  $T$ . Если  $T_d < T$ , то векторы поляризации излучения параллельны  $\vec{B}_{\perp}$ , иначе — антипараллельны.

Распределения векторов поляризации света звезд, затмеваемых газопылевыми облаками, позволяет построить карту проекций магнитных линий на картинную плоскость, что дает некоторое представление о геометрии магнитного поля локальных образований. Можно получить грубую оценку нижнего предела  $B_{\perp}$ , поскольку равенство  $\tau_r = \tau_{\text{col}}$  определяет поле насыщения  $B_s$ , при достижении которого дальнейшее возрастание  $B_{\perp}$  не приводит к росту степени поляризации,

$$B_s = 6n^{1/2} \left( \frac{a}{0.15 \text{ мкм}} \right) \left( \frac{T}{10 \text{ К}} \right)^{1/4} \left( \frac{T_d}{10 \text{ К}} \right)^{1/2} \text{ мкГс}. \quad (12)$$

### Остаточная намагниченность метеоритов

Метеориты состоят из первичного вещества протосолнечной туманности. Хондриты содержат силикатные включения миллиметровых размеров (хондры), которые сформировались в результате кратковременных тепловых событий в протосолнечной туманности. Если в процессе охлаждения хондры находились во внешнем постоянном

магнитном поле, то они должны были приобрести термоостаточную намагниченность. Исследования остаточной намагниченности метеоритов дают косвенную оценку магнитного поля протосолнечной туманности.

### Эффект Голдрейха—Килафиса

Магнитное поле вызывает расщепление вращательных уровней молекул. Различие в населенностях расщепленных уровней приводит к частичной линейной поляризации излучения [5, 6]. В этой модели степень поляризации зависит от степени анизотропии, отношения скорости столкновительного возбуждения к скорости радиационного распада (т. е. отношения плотности газа к критической плотности), оптической толщины линии и угла между лучом зрения, направлением магнитного поля и предполагаемой осью симметрии поля скоростей.

### Магнитные поля космических объектов

В таблице приведены характерные значения напряженности магнитного поля некоторых космических объектов.

Интенсивность магнитного поля  $B$  некоторых космических объектов

Объект	$B$ , Гс
Межгалактическая среда	$< 10^{-9}$
Галактика	$2 \times 10^{-6}$
Молекулярные облака	$10^{-5}$
Ядра молекулярных облаков	$10^{-4}$
Протосолнечная туманность	0.01—1
Звезды типа Т Тельца	1 000—3 000
Земля	1
Белые карлики	$10^5$ — $10^8$
Нейтронные звезды	$10^{12}$ — $10^{14}$

Таблица показывает, что магнитное поле повсеместно присутствует в космосе — от внегалактической среды до звезд различных типов и планет.

Крупномасштабное магнитное поле Галактики исследуется с помощью определения мер вращения, построение поляризационных карт и карт радиояркости синхротронного излучения. По данным о мерах вращения внегалактических радиоисточников магнитное поле Галактики параллельно диску и в окрестности Солнца направлено в точку с координатами  $l_0 \approx 90^\circ$  и  $b_0 = 0^\circ$ . Глобальное магнитное поле состоит из азимутального регулярного поля и хаотического компонента примерно равных интенсивностей, близких к значению 2—3 мкГс. Распределение крупномасштабного компонента почти полностью повторяет распределение космических лучей. Оценки шкалы хаотического поля колеблются между значениями 50 и 250 пк.

Интенсивность продольного компонента магнитного поля молекулярных облаков определяется с помощью измерения зеемановского расщепления линий ОН. Поляризационное картирование теплового излучения Галактики с помощью обсерватории Planck показало, что в разреженных молекулярных волокнах магнитное поле направлено вдоль их оси, в плотных — поперек [7].

Отдельные ядра молекулярных облаков (протозвездные облака) имеют крупномасштабное магнитное поле с геометрией типа «песочные часы» [8]. Как показывают измерения эффекта Зеемана в линиях 21 см и молекул ОН, интенсивность магнитного поля ядер молекулярных облаков порядка  $10^{-4}$  Гс соответствует отношению масса—поток в два раза больше критического [9].

Магнитное поле молодых звезд типа Т Тельца определяется по эффекту Зеемана в оптических линиях. Оно является преимущественно дипольным и уменьшается с возрастом [10].

Работы по поляризационному картированию аккреционных дисков звезд типа Т Тельца и Ae/Be Хербига с пространственным разрешением порядка 50 а. е. показали, что в протопланетных дисках молодых звезд магнитное поле может иметь сложную геометрию [11]. Одной из проблем в данном направлении является разделение вкладов рассеяния на пылинках и излучения пылинок, ориентированных магнитным полем диска, в поляризацию излучения молодых звездных объектов (см. обсуждение в работе Стефенса и др. [12]).

Открытым остается вопрос об интенсивности магнитного поля аккреционных и протопланетных дисков. На данный момент имеется единственная оценка  $B \sim 1$  кГс по измерению зеемановского расщепления линий в объекте FU Ori [13]. Косвенные данные, полу-

ченные из измерения остаточной намагниченности метеоритов, указывают на то, что интенсивность магнитного поля в протосолнечной туманности составляет 0.01—1 Гс на расстоянии 3 а. е. [14, 15].

Высокоскоростные коллимированные струи (джеты) и медленные молекулярные истечения из аккреционных дисков молодых звезд обычно интерпретируются в рамках моделей дисков с крупномасштабным магнитным полем (см. обзор [16]). Как предполагается, истечения образуются за счет механизма Блэндфорда и Пэйна (1982) при условии, что в диске присутствует крупномасштабное магнитное поле, линии которого наклонены под углом более тридцати градусов к оси вращения диска. Джеты, вероятно, образуются во внутренних частях аккреционных дисков при взаимодействии магнитного поля звезды и диска.

## Происхождение космического магнитного поля

### Батарея Бирмана

Градиент давления электронов в плазме приводит к возникновению электрического поля

$$\mathbf{E} = -\frac{\nabla p_e}{n_e e}. \quad (13)$$

Если концентрация электронов  $n_e$  неоднородна, то поле  $\mathbf{E}$  не будет потенциальным ( $\text{rot } \mathbf{E} \neq 0$ ), возникнет замкнутый ток, который приведет к появлению магнитного поля. Таким образом, разделение зарядов в плазме в случае, когда градиенты плотности и давления (температуры) не коллинеарны, приводит к генерации магнитного поля. Это так называемая «батарея Бирмана» [17, 18]. Уравнение индукции с учетом батарейного эффекта

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot} [\mathbf{v}, \mathbf{B}] - \frac{c}{en_e^2} [\nabla n_e, \nabla p_e]. \quad (14)$$

Батарея Бирмана является основным и единственным механизмом генерации первичного магнитного поля при нулевых начальных условиях.

### Теория динамо

Механизм динамогенерации магнитного поля основан на явлении электромагнитной индукции [1, 19]. В космической среде в качестве

движущихся проводников выступает космическая плазма, поэтому динамо называется гидромагнитным. Гидромагнитное динамо описывает генерацию (самовозбуждение) магнитного поля из некоторого начального (затравочного) поля и длительное поддержание поля за счет энергии движения. Динамо привлекается не только для объяснения происхождения полей, но и их переменности.

Согласно теореме Каулинга магнитное поле не может генерироваться симметричным установившимся процессом. В основе теории динамо лежит рассмотрение несимметричных стационарных процессов.

Теория динамо должна включать решение полной системы МГД-уравнений, учитывающей обратное влияние магнитного поля на движение проводящей среды. Решение данной задачи связано с большими трудностями, поэтому к настоящему моменту хорошо разработана только теория кинематического динамо. В этом подходе ищется такое распределение скоростей, которое приводит к поддержанию магнитного поля за счет механизма динамо.

Можно выделить две фазы генерации магнитного поля. Первая фаза состоит в генерации тороидального магнитного потока из изначального полоидального магнитного поля. Вторая фаза — обратная связь, приводящая к поддержанию полоидального магнитного поля за счет тороидального.

К генерации тороидального поля приводит дифференциальное вращение космического тела. Это так называемый  $\Omega$ -эффект. Процесс генерации полоидального поля из тороидального связан с циклоничностью конвекции (или турбулентности) во вращающемся теле. Благодаря отсутствию симметрии возникает компонент электрического тока, направленный не перпендикулярно, а параллельно магнитному полю. Это явление называется  $\alpha$ -эффектом. В процессе эволюции происходит уменьшение масштаба поля до состояния, когда генерация поля уравнивается омической диссипацией.

### Остаточное магнитное поле

Гипотеза остаточного магнитного поля была высказана Каулингом [20], который показал, что время омической диссипации магнитного поля звезд превышает время их эволюции. Исходя из этой оценки, Каулинг предположил, что магнитное поле звезд может быть остатком магнитного поля родительских протозвездных облаков. При условии сохранения магнитного потока интенсивность маг-

нитного поля растет в процессе гравитационного коллапса протозвездного облака. В этом случае остаточные магнитные потоки звезд превышают наблюдаемые в  $10^3$ – $10^4$  раз [21, 22]. Решением данной проблемы магнитного потока является учет диссипации магнитного потока за счет омической и амбиполярной диффузии, что впервые обсуждалось в работах [23, 24].

Дальнейшие исследования превратили гипотезу остаточного магнитного поля в теорию, доказывающую, что по крайней мере магнитное поле молодых звезд имеет остаточную природу. Теория остаточного магнитного поля основана на анализе данных наблюдений и численных расчетах звездообразования в протозвездных облаках с магнитным полем [25–28]. Базовые идеи изложены в [29–31].

Основной целью теории остаточного магнитного поля является исследование эволюции магнитного потока протозвездных облаков за счет индукционного усиления в процессе коллапса и диссипации из-за омической и амбиполярной диффузии. Для этого используется система МГД-уравнений в двухжидкостном приближении с учетом омической и амбиполярной диффузии. Рассматриваются ионизация космическими лучами, рентгеновским излучением, радиоактивными элементами, лучистые рекомбинации и рекомбинации на пылинках, тепловая ионизация.

Расчеты показывают, что на изотермической стадии коллапса магнитное поле заморожено в газ и, как следствие, приобретает квазирадиальную геометрию. Омическая и амбиполярная диффузия развиваются после образования непрозрачного ядра. В интервале плотностей  $[10^5, 10^9]n_0$ , где  $n_0$  — начальная плотность, происходит эффективная диссипация магнитного поля. Адиабатический нагрев ядра восстанавливает замороженность магнитного поля после того, как температура достигает 4 000–5 000 К. Интенсивность магнитного поля на поверхности образующихся звезд зависит от эффективности поглощения космических лучей («оптической» толщины  $\tau_{CR}$ ), содержания радиоактивных элементов ( $Z_{RE}$ ), содержания ( $X_d$ ), размеров ( $a_d$ ) и химического состава пылевых частиц,

$$B_s = B_{s0} \left( \frac{M}{1 M_\odot} \right)^{0.25-0.35} f(\tau_{CR}, Z_{RE}, X_d, a_d). \quad (15)$$

При параметрах, типичных для областей звездообразования,  $B_{s0} = 10$ – $100$  Гс для нормальных звезд и  $B_{s0} \leq 2\,000$ – $3\,000$  Гс для магнитных звезд, формирующихся в облаках с сильным магнитным полем, вблизи источников интенсивного ионизирующего излучения.

## Магнитное поле и звездообразование

Анализ наблюдательных данных показывает, что существует корреляция между напряженностью магнитного поля и плотностью газа в межзвездной среде:

$$B = B_0 \left( \frac{n}{n_0} \right)^{k_B}, \quad (16)$$

где параметры  $B_0$  и  $n_0$  связываются с начальными условиями звездообразования. Данные наблюдений для областей с  $n = 1 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$  описываются формулой (16) при следующих параметрах [29]:

$$B_0 = 5 \text{ мкГс}, \quad n_0 = 50 - 200 \text{ см}^{-3}, \quad k_B = 1/2 - 2/3. \quad (17)$$

Анализ корреляции «магнитное поле—плотность» показывает, что магнитное поле играет определяющую роль в эволюции межзвездных облаков. В межзвездной среде с  $n \leq 100 \text{ см}^{-3}$  магнитное поле полностью управляет течением газа ( $k_B = 0$ , сжатие вдоль линий магнитного поля). Облака с  $n = 50 - 10^4 \text{ см}^{-3}$  могут являться результатом магнитостатического сжатия ( $k_B = 1/2$ ). В более плотных облаках действие магнитного поля ослабляется. Амбиполярная диффузия замедляет рост интенсивности поля ( $k_B = 2/5$ ), а после ослабления роли магнитного поля, при  $\beta > 1$ , переводит облако в режим изотропного сжатия с  $k_B = 2/3$ .

Численные расчеты коллапса показывают, что при интенсивности начального магнитного поля облаков, соответствующей наблюдениям, магнитное торможение — отвод углового момента торсионными альвеновскими волнами — препятствует образованию протозвездных дисков, находящихся в центробежном равновесии [32]. К настоящему моменту предложено несколько механизмов, которые могут ослаблять магнитное торможение: омическая диффузия, амбиполярная диффузия, турбулентность в облаке и др. (см. обзор [33]). В силу того что разные коллективы авторов используют различные постановки задачи и численные коды, выяснить, какой из механизмов является доминирующим, пока не удалось.

## Магнитные поля аккреционных дисков молодых звезд

Эволюция магнитного поля аккреционных дисков определяется индукционным усилением поля в процессе аккреции, диссипацией

поля из-за конечной проводимости плазмы и действием различных неустойчивостей.

На основе кинематического подхода с предписанным однородным коэффициентом диффузии Лубов и др. [34] обнаружили, что турбулентная диффузия ограничивает усиление слабого полоидального магнитного поля и, как следствие, образование истечений в вязких аккреционных дисках. Гуилет и Огильви [35] рассмотрели зависимость скорости адвекции поля от начальной интенсивности поля и пришли к выводу, что слабое магнитное поле с плазменным параметром  $\beta \gg 1$  будет адвектировать более эффективно, чем сильное поле ( $\beta < 1$ ), даже в случае, когда коэффициент турбулентной диффузии сравним по величине с турбулентной вязкостью. Лавлейс и др. [36] исследовали вертикальную структуру турбулентных аккреционных дисков и обнаружили, что усиление магнитного поля и образование истечений возможны при условии, что поверхностные слои диска ламинарны и имеют высокую проводимость. Окудзуми и др. [37] получили стационарное решение для радиального профиля полоидального магнитного поля,  $B \propto r^{-2}$  в диске с однородной предписанной проводимостью. Рейес-Руиз и Степински [38] показали, что дифференциальное вращение в диске приводит к генерации тороидального магнитного поля, интенсивность которого превышает интенсивность полоидального магнитного поля в случае, когда магнитное поле вмерозено в газ.

Аккреционные диски молодых звезд имеют неоднородную ионизационную структуру. Основным источником ионизации являются космические лучи и рентгеновское излучение. Они эффективно ионизируют только поверхностные слои дисков [39, 40]. Вблизи экваториальной плоскости образуется область низкой степени ионизации, которая называется «мертвой» зоной. Степень ионизации может опускаться до минимального значения  $\sim 10^{-15}$ , которое поддерживается ионизацией за счет распада радиоактивных элементов. В аккреционных дисках звезд типа Т Тельца «мертвая» зона расположена в области от 1 до 10–20 а. е. Размер «мертвой» зоны зависит от параметров пылинок и интенсивности ионизирующего излучения [41, 42].

В «мертвых» зонах рост магнитного поля ограничивается омической и амбиполярной диффузией. Дудоров и Хайбрахманов [42–44] разработали МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем с учетом основных ионизационных и рекомбинационных процессов, омической и

амбиоплярной диффузии. Модель основана на приближениях Шакуры и Сюняева [45, 46]. В дальнейшем модель была развита для учета магнитной плавучести [47] и эффекта Холла [48].

Расчеты показывают, что магнитное поле в аккреционных дисках молодых звезд имеет сложную геометрию. Оно является квазиазимутальным,  $B_\varphi \geq (B_z, B_r)$ , вблизи внутренней границы диска, где магнитное поле заморожено в газ из-за эффективной тепловой ионизации. В этой области рост поля ограничивается магнитной плавучестью [47]. В «мертвых» зонах омическая диффузия ограничивает усиление поля, и оно сохраняет свою начальную квазиполоидальную геометрию,  $B_z \gg (B_r, B_\varphi)$ . Во внешних областях диска магнитная ambiopлярная диффузия ограничивает усиление радиального компонента поля и образование истечений. Магнитное поле является или квазиазимутальным, или квазирадialьным в зависимости от параметров пыли и интенсивности ионизационных процессов. Эффект Холла проявляется на границах «мертвых» зон и приводит к преобразованию тороидального магнитного поля в квазирадialьное.

Интенсивность магнитного поля вблизи внутренней границы диска, которая определяется магнитосферой звезды ( $r = 0.01$ – $0.05$  а. е.), составляет  $\sim (10$ – $300)$  Гс. Взаимодействие противоположно направленных полей диска и звезды вблизи границы магнитосферы может приводить к образованию токового слоя, который может обуславливать истечения из молодых звездных объектов и их рентгеновскую светимость [49]. На расстоянии  $r = 3$  а. е. интенсивность магнитного поля изменяется в диапазоне от  $0.01$  до  $0.1$  Гс, что согласуется с измерениями остаточной намагниченности метеоритов. Вблизи внешней границы диска ( $150$ – $700$  а. е.) интенсивность магнитного поля стремится к магнитному полю межзвездной среды  $\sim 10^{-3}$  Гс. Плазменный параметр не является постоянным в диске.

Геометрия магнитного поля в аккреционных дисках молодых звезд может качественно меняться в течение их эволюции [50]. Усиление начального однородного магнитного поля в диске происходит медленно. За время жизни аккреционных дисков молодых звезд ( $\sim 10$  млн лет) интенсивность увеличивается в пять раз по сравнению с начальным значением во внутренней части диска,  $r \sim 1$  а. е. Во внешней части диска,  $r \sim 100$  а. е. усиления вертикального магнитного поля практически не происходит. Генерация тороидального магнитного поля в диске происходит со скоростью порядка кеплеровской  $v_\varphi$ , а полоидальное поле усиливается с характерной ско-

ростью аккреции  $v_r$ . В аккреционных дисках  $v_r \ll v_\varphi$ , поэтому со временем магнитное поле приобретает квазиазимутальную геометрию. «Вытягивание» линий магнитного поля и происходит сначала во внутренней части диска, а затем на его периферии. Например, изначально однородное магнитное поле становится квазиазимутальным за  $\sim 1$  год на расстоянии 1 а. е. и за  $\sim 2000$  лет на 100 а. е.

Быстрый рост тороидального магнитного поля в областях высокой степени ионизации может быть ограничен магнитной плавучестью [47, 51]. Сильное тороидальное магнитное поле разбивается на отдельные магнитные силовые трубки, которые всплывают из диска под действием силы Архимеда и уносят избыток магнитного потока. Всплывающие магнитные силовые трубки могут обуславливать переменные истечения из аккреционных дисков со скоростями до 50 км/с и быть причиной инфракрасной переменности молодых звезд.

Вне «мертвых» зон давление магнитного поля препятствует развитию гравитационной неустойчивости [52]. Наиболее благоприятными с точки зрения образования протопланет являются внешние части «мертвых» зон, в которых влияние магнитного поля на гравитационную неустойчивость ослаблено диффузией, кроме того, ослаблена МГД-турбулентность и происходит испарение ледяных мантий пылинок, что способствует накоплению вещества.

## Заключение

Анализ наблюдательных данных показывает, что магнитное поле прослеживается практически во всех космических объектах и играет определяющую роль в образовании и эволюции структур в межзвездной среде. Круг вопросов, связанных с магнитными полями, касается всей астрофизики. В данной лекции основное внимание уделено роли магнитного поля в звездообразовании.

Первичное магнитное поле галактик, вероятно, появилось за счет батарейного эффекта Бирмана. Данное поле стало затравочным для работы гидромагнитного динамо в галактиках. Наблюдения показывают, что межзвездная среда в Галактике имеет волокнистую структуру. В разреженных молекулярных волокнах магнитное поле направлено вдоль их оси, в плотных — поперек. Волокна с перпендикулярным полем, вероятно, представляют собой диски (листы), видимые с ребра. Они являются результатом сжатия облака преимущественно вдоль линий магнитного поля [53].

Магнитный поток ядер молекулярных облаков частично сохраняется в процессе их коллапса и образования звезд, так что магнитное поле молодых звезд с аккреционными дисками является остаточным. Согласно теории остаточного поля все молодые звезды, до стадии развития конвективной неустойчивости, обладают остаточным магнитным полем. Остаточное поле может быть затравочным для механизма гидромагнитного динамо на последующих стадиях эволюции звезд.

Остаточное магнитное поле аккреционных дисков молодых звезд имеет сложную геометрию. Оно является квазиазимутальным во внутренних областях тепловой ионизации, квазиполоидальным внутри «мертвых» зон и квазирадиальным либо квазиазимутальным во внешних областях в зависимости от параметров пылевых гранул и интенсивности ионизирующего излучения. Данные предсказания могут быть проверены с помощью поляризационного картирования аккреционных дисков молодых звезд [48]. Однако интерпретация поляризации излучения пыли дисков неоднозначна. Поляризация может быть вызвана излучением пылинок, ориентированных магнитным полем диска, и/или рассеянием на пылинках. Во втором случае поляризация не связана с магнитным полем диска.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 18-12-00193), Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-01067) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

## Библиографические ссылки

1. *Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д.* Магнитные поля в астрофизике. — М.; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.
2. *Засов А. В., Постнов К. А.* Общая астрофизика. — 3 изд. — Фрязино : Век 2, 2016.
3. *Гинзбург В. Д., Сыроватский С. И.* Происхождение космических лучей. — М. : Изд.-во Академии наук СССР, 1963.
4. *Каплан С. А., Пикельнер С. Б.* Физика межзвездной среды. — М. : Наука, 1979.
5. *Goldreich P., Kylafis N. D.* On mapping the magnetic field direction in molecular clouds by polarization measurements // *Astrophys. J.* — 1981. — Vol. 243. — P. L75—L78.

6. *Crutcher R. M.* Polarization measurements of molecular lines // *Astrophys. Space. Sci.* — 2008. — Vol. 313. — P. 141–144.
7. *Planck Collaboration, Adam R., Ade P. A. R. et al.* Planck intermediate results. XXXII. The relative orientation between the magnetic field and structures traced by interstellar dust // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 586. — P. A135. 1409.6728.
8. *Girart J. M., Rao R., Marrone D. P.* Magnetic Fields in the Formation of Sun-Like Stars // *Science.* — 2006. — Vol. 313. — P. 812–814. astro-ph/0609177.
9. *Troland T. H., Crutcher R. M.* Magnetic Fields in Dark Cloud Cores: Arecibo OH Zeeman Observations // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 680. — P. 457–465. 0802.2253.
10. *Yang H., Johns-Krull C. M.* Magnetic Field Measurements of T Tauri Stars in the Orion Nebula Cluster // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 729. — P. 83. 1102.3662.
11. *Li D., Telesco C. M., Zhang H. et al.* Mid-infrared polarization of Herbig Ae/Be discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 473. — P. 1427–1437. 1708.08026.
12. *Stephens I. W., Yang H., Li Z.-Y. et al.* ALMA Reveals Transition of Polarization Pattern with Wavelength in HL Tau’s Disk // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 851. — P. 55. 1710.04670.
13. *Donati J.-F., Paletou F., Bouvier J., Ferreira J.* Direct detection of a magnetic field in the innermost regions of an accretion disk // *Nature.* — 2005. — Vol. 438. — P. 466–469. astro-ph/0511695.
14. *Levy E. H.* Magnetic field in the primitive solar nebula // *Nature.* — 1978. — Vol. 276. — P. 481.
15. *Fu R. R., Weiss B. P., Lima E. A. et al.* Solar nebula magnetic fields recorded in the Semarkona meteorite // *Science.* — 2014. — Vol. 346. — P. 1089–1092.
16. *Frank A., Ray T. P., Cabrit S. et al.* Jets and Outflows from Star to Cloud: Observations Confront Theory // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 451–474. 1402.3553.
17. *Biermann L.* Über den Ursprung der Magnetfelder auf Sternen und im interstellaren Raum (miteinem Anhang von A. Schluter) // *Zeitschrift Naturforschung. T. A.* — 1950. — Vol. 5. — P. 65.
18. *Kulsrud R. M., Zweibel E. G.* On the origin of cosmic magnetic fields // *Reports on Progress in Physics.* — 2008. — Vol. 71, № 4. — P. 046901. 0707.2783.
19. *Вайнштейн С. И.* Магнитные поля в космосе. — М. : Наука, 1983.

20. *Cowling T. G.* On the Sun's General Magnetic Field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1945. — Vol. 105, № 3. — P. 166—174.
21. *Spitzer Lyman.* 20. Theoretical problems of stellar magnetism // Symposium — International Astronomical Union. — 1958. — Vol. 6. — P. 169—181.
22. *Mestel L.* “Fossil” Magnetic Fields and the Oblique-Rotator Model // Magnetic and Related Stars / ed. by R. C. Cameron. — 1967. — P. 101.
23. *Mestel L., Spitzer L., Jr.* Star Formation in Magnetic Dust Clouds // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1956. — Vol. 116, № 5. — P. 503—514.
24. *Spitzer L.* Diffuse matter in space. — 1968.
25. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. 1. Численный метод расчета // Научные информации. — 1981. — Т. 49. — С. 114.
26. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. 2. Роль магнитного поля // Научные информации. — 1982. — Т. 50. — С. 98—112.
27. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. 3. Проблема углового момента // Научные информации. — 1983. — Т. 52. — С. 29.
28. *Дудоров А. Е., Сазонов Ю. В.* Гидродинамика коллапса межзвездных облаков. 4. Степень ионизации и амбиполярная диффузия // Научные информации. — 1987. — Т. 63. — С. 68.
29. *Дудоров А. Е.* Свойства иерархии межзвездных магнитных облаков // Астрон. журн. — 1991. — Т. 68. — С. 695—713.
30. *Дудоров А. Е.* Остаточное магнитное поле в звездах типа Т Тельца // Астрон. журн. — 1995. — Т. 72, № 6. — С. 884.
31. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Theory of fossil magnetic field // Advances in Space Research. — 2015. — Vol. 55. — P. 843—850. 1406.4663.
32. *Allen A., Li Z.-Y., Shu F. H.* Collapse of Magnetized Singular Isothermal Toroids. II. Rotation and Magnetic Braking // Astrophys. J. — 2003. — Vol. 599. — P. 363—379. astro-ph/0311377.
33. *Li Z.-Y., Banerjee R., Pudritz R. E. et al.* The Earliest Stages of Star and Planet Formation: Core Collapse, and the Formation of Disks and Outflows // Protostars and Planets VI. — 2014. — P. 173—194. 1401.2219.
34. *Lubow S. H., Papaloizou J. C. B., Pringle J. E.* Magnetic field dragging in accretion discs // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1994. — Vol. 267. — P. 235—240.
35. *Guilet J., Ogilvie G. I.* Global evolution of the magnetic field in a thin disc and its consequences for protoplanetary systems // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 441. — P. 852—868. 1403.3732.

36. *Lovelace R. V. E., Rothstein D. M., Bisnovatyi-Kogan G. S.* Advection/Diffusion of Large-Scale B Field in Accretion Disks // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 701. — P. 885–890. 0906.0345.
37. *Okuzumi S., Takeuchi T., Muto T.* Radial Transport of Large-scale Magnetic Fields in Accretion Disks. I. Steady Solutions and an Upper Limit on the Vertical Field Strength // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 785. — P. 127. 1310.7446.
38. *Reyes-Ruiz M., Stepinski T. F.* Axisymmetric two-dimensional computation of magnetic field dragging in accretion disks // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 459. — P. 653–665.
39. *Gammie C. F.* Layered accretion in T Tauri disks // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 457. — P. 355–362.
40. *Igea J., Glassgold A. E.* X-ray ionization of protoplanetary disks // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 480. — P. 344–350.
41. *Sano T., Miyama S. M., Umebayashi T., Nakano T.* Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks. II. Ionization State and Unstable Regions // *Astrophys. J.* — 2000. — Vol. 543. — P. 486–501. astro-ph/0005464.
42. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Ap&SS.* — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121. 1403.5513.
43. *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение // *Вестн. Челяб. гос. ун-та. Физика.* — 2013. — № 9 (300). — С. 27–39.
44. *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд. Численные расчеты // *Вестн. Челяб. гос. ун-та. Физика.* — 2013. — № 9 (300). — С. 40–52.
45. *Shakura N. I.* Disk Model of Gas Accretion on a Relativistic Star in a Close Binary System // *Астрон. журн.* — 1972. — Vol. 49. — P. 921.
46. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* — 1973. — Vol. 24. — P. 337–355.
47. *Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E.* Magnetic field buoyancy in accretion disks of young stars // *PEPAN Letters.* — 2017. — Vol. 14, № 6. — P. 882–885.
48. *Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E., Parfenov S. Y., Sobolev A. M.* Large-scale magnetic field in the accretion discs of young stars: the influence of magnetic diffusion, buoyancy and Hall effect // *MNRAS.* — 2017. — Vol. 464. — P. 586–598. 1609.03969.
49. *Khaibrakhmanov S., Dudorov A.* Outflows and particle acceleration in the accretion disks of young stars // *European Physical Journal Web of Conferences.* — 2018. — Accepted.

50. *Хайбрахманов С. А.* Эволюция остаточного магнитного поля в аккреционных дисках молодых звезд // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулковке. — 2016. — № 224. — С. 97–106.
51. *Khaibrakhmanov S., Dudorov A., Sobolev A.* Dynamics of magnetic flux tubes and IR-variability of young stellar objects // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 18. — P. 090. 1712.09094.
52. *Дудоров А. Е., Сунатов Д. И., Хайбрахманов С. А.* О формировании протопланет в аккреционных дисках молодых звезд с остаточным магнитным полем // Вестн. Челяб. гос. ун-та. Физика. — 2015. — № 7 (362). — С. 11–20.
53. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Hierarchical structure of the interstellar molecular clouds and star formation // Open Astronomy. — 2017. — Vol. 26. — P. 285–292.

## О ФИГУРАХ ПЛУТОНА И ХАРОНА

К. В. Холшевников<sup>1,2</sup>, М. А. Боруха<sup>1</sup>, Б. Б. Эскин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт прикладной астрономии РАН

С борта космического аппарата NASA “New Horizons” получено много ценной информации о физических характеристиках системы Плутона. В частности, уточнены размеры главных тел. Возлагались надежды на определение полярного и экваториального сжатия фигур Плутона и Харона и второй гармоники их гравитационного потенциала. Однако точности приборов не хватило для определения этих величин: погрешности измерений их превосходили. Здесь мы даем теоретические оценки сжатия, второй и четвертой зональной гармоники в предположении, что фигуры Плутона и Харона находятся в гидростатическом равновесии и не подвержены действию внешних сил. Оказалось, что при всех правдоподобных предположениях о внутреннем строении тел указанные величины имеют порядок  $10^{-4}$ . Для успешного определения сжатия и несферичности гравитационного поля тел приборы должны иметь соответствующую точность. В дальнейшем мы предполагаем учесть взаимодействие Плутона и Харона и действие Солнца и других небесных тел. Скорее всего, порядок рассмотренных величин не изменится.

## ON THE FIGURES OF PLUTO AND CHARON

K. V. Kholshchevnikov<sup>1,2</sup>, M. A. Borukha<sup>1</sup>, B. B. Eskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University*, <sup>2</sup>*Institute of Applied Astronomy  
Russian Academy of Science*

Using NASA's spacecraft *New Horizons*, a lot of valuable information on the physical characteristics of the Pluto system was received. In particular: the sizes of the main bodies. There were hopes for determining the polar and equatorial oblateness of the figures of Pluto and Charon, and the second harmonic of their gravitational potential. However, the accuracy of the devices was not sufficient to determine these values: the errors of the measurements exceeded them. In this paper we show theoretical estimates of the oblateness, and the second and the fourth zonal harmonics under the assumption that the figures of Pluto and Charon are in hydrostatic equilibrium and are not subject to the action of external forces. It turned out that with all plausible assumptions about the internal structure of bodies, these quantities are of the order of  $10^{-4}$ . For the successful assignment of oblateness and nonsphericity of the gravitational field of bodies the devices must have the appropriate accuracy. In the future, we will take into account the interaction of Pluto and Charon, and the influence of the Sun and other celestial bodies. Most likely, the order of the quantities considered will not change.

### Введение

Всплеск интереса к системе Плутона вызван результатами, полученными в 2015 г. космическим аппаратом NASA "New Horizons". Предлагаемая статья посвящена геометрическим и динамическим характеристикам системы и ее гравитационного поля. Проведенные из космоса измерения уточнили наши знания о размерах тел системы, но не выявили несферичности ни их фигур, ни их гравитационных полей. Мы дадим теоретические оценки этих величин, предполагая Плутона и Харона фигурами гидростатического равновесия, синхронно и твердотельно вращающимися с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг полярной оси.

Мы пока пренебрегаем взаимовлиянием Плутона и Харона, а также действием других небесных тел. Учитываются только силы гравитации, давления и центробежные. Скорость вращения мала, поэтому по теории Ляпунова оба тела являются телами вращения [1, 2, §5.3].

В дальнейшем предполагается учесть приливное взаимодействие Плутона и Харона и влияние других небесных тел, прежде всего Солнца.

## Характеристики Плутона и Харона

Приборы аппарата “New Horizons” получили огромный массив данных о Плутоне, Хароне и мелких спутниках планеты [3–5]. В результате, в частности, удалось уточнить их размеры и форму. Однако при попытке описать фигуры Плутона и Харона эллипсоидами оказалось, что ошибки разностей полуосей превосходят их значения. Таким образом, ни полярного сжатия, ни вытянутости фигур Плутона и Харона друг к другу из наблюдений не выявлено. Определены лишь радиусы  $a$  сфер, аппроксимирующих поверхности тел [3]. С высокой точностью определен общий период вращения и обращения тел [6]. Что касается масс главных тел системы, то пока наиболее точными являются оценки, полученные по длительным наблюдениям космического телескопа Хаббл [6].

В табл. 1 мы приводим  $a$ ,  $\mathcal{G}m$  (произведение постоянной тяготения на массу) вместе с их относительными погрешностями  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ . Значения  $a$ ,  $\mathcal{G}m$  взяты из [3]. Там же указаны абсолютные погрешности этих величин, пересчитанные нами в относительные. Все значения на протяжении статьи даны в системе СИ.

Таблица 1. Параметры фигур равновесия системы Плутон—Харон

Параметр	Плутон	Харон
$10^{-6}a$	$1.1883(1 \pm 0.00135)$	$0.6060(1 \pm 0.00165)$
$10^{-11}\mathcal{G}m$	$8.696(1 \pm 0.00207)$	$1.059(1 \pm 0.00944)$
$10^5\omega$	$1.1385592$	
$10^4q$	$2.5013(1 \pm 0.00262)$	$2.7247(1 \pm 0.00616)$

Для простоты считаем, что размер (обозначенный в таблице как  $a$ ) является случайной величиной  $\xi_1$ , равномерно распределенной в промежутке  $a(1 - \delta_1) \leq \xi_1 \leq a(1 + \delta_1)$ . Аналогично взвешенная масса равномерно распределена в промежутке  $\mathcal{G}m(1 - \delta_2) \leq \xi_2 \leq \mathcal{G}m(1 + \delta_2)$ . Общий период вращения тел известен с точностью, на 3–4 порядка превышающей точность определения размеров и масс. Определяемую периодом угловую скорость  $\omega$  считаем поэтому безошибочной.

Нам понадобятся математические ожидания  $\mu_s$  случайных величин  $\eta_1 = \xi_1^3$ ,  $\eta_2 = \xi_1^6$ ,  $\eta_3 = \xi_2^{-1}$ ,  $\eta_4 = \xi_2^{-2}$ . Поскольку плотности вероятности величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$  постоянны, соответствующие интегралы элементарны:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \frac{1}{8a\delta_1} [(a + a\delta_1)^4 - (a - a\delta_1)^4] = a^3(1 + \delta_1^2), \\ \mu_2 &= \frac{1}{14a\delta_1} [(a + a\delta_1)^7 - (a - a\delta_1)^7] = a^6 \left( 1 + 5\delta_1^2 + 3\delta_1^4 + \frac{1}{7}\delta_1^6 \right), \\ \mu_3 &= \frac{1}{2\mathcal{G}m\delta_2} \ln \frac{1 + \delta_2}{1 - \delta_2} = \frac{1}{\mathcal{G}m} \left( 1 + \frac{\delta_2^2}{3} + \frac{\delta_2^4}{5} + \dots \right), \\ \mu_4 &= \frac{1}{(\mathcal{G}m)^2(1 - \delta_2^2)} = \frac{1}{(\mathcal{G}m)^2} (1 + \delta_2^2 + \delta_2^4 + \dots).\end{aligned}\quad (1)$$

Определяющую роль в теории фигур равновесия играет параметр Клеро

$$q = \frac{\omega^2 \bar{a}^3}{\mathcal{G}m} = \frac{3\omega^2}{4\pi\mathcal{G}\bar{\rho}}.\quad (2)$$

Здесь  $\bar{a}$  — радиус равновеликой сферы,  $\bar{\rho}$  — средняя плотность (отношение массы к объему). Согласно вышесказанному можно считать пока  $\bar{a} = a$ . Погрешности случайной величины  $\eta = \omega^2\eta_1\eta_3$ , описывающей распределение параметра Клеро, определяются погрешностями величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$ . Последние считаем независимыми, так что математическое ожидание  $q$  и взвешенная дисперсия  $\delta^2$  величины  $\eta$  даются формулами

$$q = \omega^2\mu_1\mu_3, \quad \delta^2 = \frac{\mu_2\mu_4 - \mu_1^2\mu_3^2}{\mu_1^2\mu_3^2}.\quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), найдем

$$q = \frac{\omega^2 a^3}{\mathcal{G}m} \left( 1 + \delta_1^2 + \frac{1}{3}\delta_2^2 + \frac{1}{3}\delta_1^2\delta_2^2 + \frac{1}{5}\delta_2^4 + \dots \right),\quad (4)$$

$$\delta^2 = \left( 3\delta_1^2 + \frac{1}{3}\delta_2^2 \right) + \left( -4\delta_1^4 + \delta_1^2\delta_2^2 + \frac{4}{15}\delta_2^4 \right) + \dots\quad (5)$$

Значения  $q$  согласно (4) и  $\delta$  согласно (5) приведены в последней строке табл. 1.

*Замечание 1.* Величины  $\delta_s$  определяют относительные границы  $\xi_s$ ; их относительные среднеквадратичные отклонения равны  $\delta_s/\sqrt{3}$ .

Величина же  $\delta$  представляет собой относительное среднеквадратичное уклонение  $\eta$ .

*Замечание 2.* Величины  $\delta_s$  и  $\delta$  имеет смысл приводить максимум с двумя значащими цифрами. Мы привели в этой и следующих таблицах три цифры только для того, чтобы не потерять точность при дальнейших вычислениях.

В следующих параграфах мы получим теоретические двусторонние оценки сжатия Плутона и Харона, а также коэффициентов второй и четвертой зональных гармоник ряда Лапласа для их гравитационного потенциала.

## Уровенный эллипсоид

Основное принятое в этом разделе допущение: каждое из рассматриваемых тел  $\mathcal{T}$  ограничено слабо сжатым уровенным эллипсоидом вращения  $\mathcal{S}$ .

Обозначим через  $a$ ,  $c$ ,  $\varepsilon = \sqrt{a^2 - c^2}/a$ ,  $\alpha = (a - c)/a$  экваториальную и полярную полуоси, эксцентриситет меридионального сечения и сжатие  $\mathcal{S}$  соответственно. Последние величины связаны соотношениями

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2} = \frac{\varepsilon^2}{1 + \sqrt{1 - \varepsilon^2}} = \frac{\varepsilon^2}{2} \left( 1 + \frac{1}{4}\varepsilon^2 + \dots \right),$$

$$\varepsilon^2 = 2\alpha \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (6)$$

Гравитационный потенциал  $V$  тела  $\mathcal{T}$  содержит лишь зональные гармоники четного порядка [7, 8]:

$$V = \frac{\mathcal{G}m}{r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n I_{2n} \left( \frac{a}{r} \right)^{2n} P_{2n}(\cos \theta). \quad (7)$$

Здесь и ниже  $(r, \theta, \lambda)$  — сферические координаты с началом в центре  $O$  тела  $\mathcal{T}$ ,  $P_k$  — многочлены Лежандра со стандартной нормировкой  $P_k(1) = 1$ ,  $I_k$  — коэффициенты Стокса (гармонические коэффициенты).

Для эллипсоида радиус равновеликой сферы определяется условием

$$\bar{a}^3 = a^2 c = a^3 \sqrt{1 - \varepsilon^2},$$

так что (2) принимает вид

$$q = \frac{\omega^2 a^3}{\mathcal{G}m} \sqrt{1 - \varepsilon^2} = \frac{\omega^2 a^3}{\mathcal{G}m} (1 - \alpha). \quad (8)$$

Согласно [8] постоянные Стокса уровневого эллипсоида однозначно определяются двумя независимыми параметрами  $\varepsilon$  и  $q$ :

$$I_{2n} = \frac{3 + 2An}{(2n + 1)(2n + 3)} \varepsilon^{2n}. \quad (9)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A(q, \varepsilon) &= 1 - \frac{5q}{2\varepsilon^2 B(\varepsilon)}; \\ B(\varepsilon) &= \frac{15}{4\varepsilon^5} \left[ (3 - 2\varepsilon^2) \sqrt{1 - \varepsilon^2} \arcsin \varepsilon - 3\varepsilon(1 - \varepsilon^2) \right] = \\ &= \frac{15}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2-k)(2k)!!}{(2k+5)!!} \varepsilon^{2k} = 1 + \frac{1}{7}\varepsilon^2 - \frac{8}{231}\varepsilon^6 - \dots = \\ &= \left( 1 - \frac{1}{7}\varepsilon^2 + \frac{1}{49}\varepsilon^4 + \dots \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Выпишем первые ненулевые постоянные Стокса:

$$I_0 = 1, \quad I_2 = \frac{3 + 2A}{15} \varepsilon^2, \quad I_4 = \frac{3 + 4A}{35} \varepsilon^4.$$

Для обоих тел  $q \sim 10^{-4}$ , тогда как  $\varepsilon$  или  $\alpha$  измерить не удалось. Есть лишь оценка  $\alpha < 6 \cdot 10^{-3}$  для Плутона и  $\alpha < 5 \cdot 10^{-3}$  для Харона [3]. Эти оценки грубы, хотя качественно и согласуются с теорией фигур равновесия, где принято  $\alpha \sim \varepsilon^2 \sim q$ . Поэтому более чем достаточно учесть лишь малые члены порядка  $\alpha^2$ , пренебрегая членами порядка  $\alpha^3$  и выше. Пользуясь рядом

$$A\varepsilon^2 = \varepsilon^2 - \frac{5}{2}q + \frac{5}{14}q\varepsilon^2 + \dots,$$

получим

$$I_0 = 1, \quad I_2 = \frac{1}{3}\varepsilon^2 - \frac{1}{21}q\varepsilon^2 + \dots, \quad I_4 = \frac{1}{5}\varepsilon^4 - \frac{2}{7}q\varepsilon^2 + \dots \quad (10)$$

Остальные  $I_{2n}$  имеют порядок не ниже  $\alpha^3$ .

### Случай $A = 0$

Если предположить однородность  $\mathcal{T}$ , то мы приходим к эллипсоиду Маклорена, для которого [1, 9]

$$q = q^*(\varepsilon) := \frac{2}{5}\varepsilon^2 \left( 1 + \frac{1}{7}\varepsilon^2 + \dots \right) = \frac{4}{5}\alpha \left( 1 - \frac{3}{14}\alpha + \dots \right). \quad (11)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 = \varepsilon^{*2}(q) &:= \frac{5}{2}q \left( 1 - \frac{5}{14}q + \dots \right), \\ \alpha = \alpha^*(q) &:= \frac{5}{4}q \left( 1 + \frac{15}{56}q + \dots \right). \end{aligned} \quad (12)$$

В [8] показано, что для эллипсоидов Маклорена  $A = 0$  точно.

Итак, если тела однородны, то при данном  $q$  эксцентриситет и сжатие даются формулами (12), а первые коэффициенты Стокса равны

$$I_2 = \frac{1}{5}\varepsilon^2 = \frac{1}{2}q \left( 1 - \frac{5}{14}q + \dots \right), \quad I_4 = \frac{3}{35}\varepsilon^4 = \frac{15}{28}q^2 + \dots \quad (13)$$

Относительные погрешности интересующих нас величин в силу (12), (13) равны

$$\begin{aligned} \delta(\alpha) &= \frac{\delta + (15/28)q\delta}{1 + (15/56)q} = \delta \left( 1 + \frac{15}{56}q + \dots \right), \\ \delta(I_2) &= \frac{\delta - (5/7)q\delta}{1 - (5/14)q} = \delta \left( 1 - \frac{5}{14}q + \dots \right), \\ \delta(I_4) &= 2\delta + \dots, \\ \delta(\alpha/q) &= \frac{15}{56}q\delta + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Числовые характеристики собраны в табл. 2. Значение последней величины в (14) столь малó, что величину  $\alpha/q$  можно считать безошибочной.

### Случай $A \neq 0$

Предполагая по-прежнему  $\mathcal{S}$  эллипсоидом, считаем теперь, что плотность возрастает с глубиной. Тогда [10, гл. 4] при постоянных  $a, m, q$  сжатие уменьшается тем сильнее, чем выше концентрация к

Таблица 2. Параметры фигур равновесия системы Плутон—Харон. Случай  $A = 0$

Параметр	Плутон	Харон
$10^4\alpha$	$3.127(1 \pm 0.00262)$	$3.406(1 \pm 0.00616)$
$\alpha/q$	1.2501	1.2501
$10^4 I_2$	$1.251(1 \pm 0.00262)$	$1.362(1 \pm 0.00616)$
$10^8 I_4$	$3.352(1 \pm 0.00524)$	$3.977(1 \pm 0.01231)$

центру. Следовательно, теперь  $\varepsilon < \varepsilon^*$ ,  $\alpha < \alpha^*$ , так что  $A < 0$ . С другой стороны, у всех сжатых тел  $I_2 \geq 0$  [7, §4.9]. Поэтому всегда

$$-3 \leq 2A \leq 0. \quad (15)$$

Мы приходим к выводу, что приведенные в табл. 2 числа  $\alpha, I_2, I_4$  служат верхними границами соответствующих величин.

*Замечание 1.* Мы фиксировали  $a, m, q$  и уменьшали  $\varepsilon$ . Согласно (8) это возможно за счет увеличения  $\omega$ . Но соответствующий поправочный множитель для  $\omega$  отличается от единицы менее чем на  $2 \cdot 10^{-4}$ .

*Замечание 2.* Убывание сжатия с ростом концентрации масс к центру известно со времен Клеро. Его доказательство элементарно. Из второго равенства (10) следует, что величины  $I_2, \varepsilon$  при фиксированном  $q$  — возрастающие функции друг друга. Но  $I_2$  пропорционально моментам инерции, которые уменьшаются до нуля с ростом концентрации масс к центру.

*Замечание 3.* Любопытно, что неравенство (15) в точности совпадает с неравенством для параметра концентрации (содержится между формулами (3) и (4) главы 4 монографии [10]) и для параметра  $(-\eta)$  (там же, после формулы (12)).

Ниже нам понадобится уравнение эллипсоида в сферических координатах:

$$\begin{aligned} \frac{r}{c} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta}} = 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \sin^2 \theta + \frac{3\varepsilon^4}{8} \sin^4 \theta + \dots = \\ &= 1 + \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \sin^2 \theta + \frac{3\alpha^2}{2} \sin^4 \theta + \dots \end{aligned} \quad (16)$$

## Фигура Гюйгенса—Роша

В теории фигур равновесия установлено убывание плотности тела от центра к периферии. Один крайний случай — однородный эллипсоид Маклорена — встретился нам в предыдущем параграфе. Второй крайний случай — сосредоточенная в центре масса, окруженная невесомой атмосферой (фигура Гюйгенса—Роша). Уравнение поверхности можно записать в виде [1, 11]

$$\frac{r}{c} = \frac{3}{\sqrt{u}} \sin \left( \frac{1}{3} \arcsin \sqrt{u} \right) \quad (17)$$

при

$$u = \frac{27}{8} q \sin^2 \theta.$$

Правая часть (17) разлагается в ряд Маклорена по степеням  $u$ . В [1, 11] приведен общий член ряда. Но нам достаточно квадратичного приближения:

$$\frac{r}{c} = 1 + \frac{4}{27}u + \frac{16}{3^5}u^2 = 1 + \frac{1}{2}q \sin^2 \theta + \frac{3}{4}q^2 \sin^4 \theta. \quad (18)$$

Здесь и ниже мы опускаем указание на отброшенные члены. Отсюда

$$a = c \left( 1 + \frac{1}{2}q + \frac{3}{4}q^2 \right), \quad \alpha = \frac{1}{2}q(1 + q), \quad q = 2\alpha(1 - 2\alpha). \quad (19)$$

С помощью (19) можно представить ряд (18) в виде

$$\frac{r}{c} = 1 + \alpha(1 - 2\alpha) \sin^2 \theta + 3\alpha^2 \sin^4 \theta. \quad (20)$$

Фигура Гюйгенса—Роша не является эллипсоидом, но ее экваториальную и полярную полуоси и сжатие мы по-прежнему обозначаем через  $a$ ,  $c$  и  $\alpha = (a - c)/a$ .

Числовые характеристики собраны в табл. 3. Погрешности считались по аналогичным (14) формулам:

$$\delta(\alpha) = (1 + q)\delta, \quad \delta(\alpha/q) = q\delta.$$

Малость  $q\delta$  делает величину  $\alpha/q$  практически безошибочной.

Что касается коэффициентов Стокса  $I_n$ , то все они обращаются в нуль (за исключением  $I_0 = 1$ ), поскольку вся масса сосредоточена в центре.

Таблица 3. Параметры фигуры Гюйгенса—Роша системы Плутон—Харон

Параметр	$10^4\alpha$	$\alpha/q$
Плутон	$1.251(1 \pm 0.00262)$	0.5001
Харон	$1.363(1 \pm 0.00616)$	0.5001

## Подход Ляпунова

Предположения постоянной плотности и сосредоточенной в центре массы — крайние. Обратимся к общему случаю, описываемому теорией Ляпунова [2], доведенной до рабочих алгоритмов в работах [1, 12, 13]. Изложим ее кратко.

Пусть эквиденситы (поверхности равной плотности) тела  $\mathcal{T}$  являются поверхностями вращения с уравнением

$$r = \bar{a}v[1 + q\zeta(q, v, \theta)]. \quad (21)$$

Здесь параметр  $v \in [0, 1]$  отмечает эквиденситу, причем  $v = 0$  отвечает центру тела, а  $v = 1$  — поверхности  $\mathcal{S}$ . По определению плотность  $\varrho$  зависит только от  $v$  и считается известной. Элемент объема в криволинейных координатах  $v, \theta, \lambda$  равен

$$d\tau = \bar{a}^3 v^2 (1 + q\zeta)^2 \left(1 + q \frac{\partial v \zeta}{\partial v}\right) \sin \theta \, dv d\theta d\lambda. \quad (22)$$

Объем бесконечно тонкого слоя между эквиденситами с параметрами  $v$  и  $v + dv$  равен

$$d\tilde{\tau} = 4\pi \bar{a}^3 v^2 \, dv. \quad (23)$$

Рассмотрим частный случай, когда плотность изменяется по закону

$$\varrho = \varrho_0 (1 - \beta v^2), \quad 0 \leq \beta \leq 1. \quad (24)$$

Параметр  $\beta$  легко выразить через плотность в центре  $\varrho_0$  и на поверхности  $\varrho_1$ :

$$\beta = \frac{\varrho_0 - \varrho_1}{\varrho_0}. \quad (25)$$

Из (23, 24) следует простое выражение для массы  $m$  и средней плотности  $\bar{\varrho}$ :

$$m = \frac{4\pi \bar{a}^3 \varrho_0}{3} \left(1 - \frac{3}{5}\beta\right), \quad \frac{\bar{\varrho}}{\varrho_0} = 1 - \frac{3}{5}\beta. \quad (26)$$

Средняя плотность небесных тел известна с достаточной для наших расчетов точностью. Плотность в центре практически неизвестна. Однако  $\varrho_0$  и  $\beta$  нетрудно выразить через среднюю плотность и плотность на поверхности, комбинируя (25) и (26):

$$\varrho_0 = \frac{5}{2}\bar{\varrho} - \frac{3}{2}\varrho_1, \quad \beta = \left(1 - \frac{\varrho_1}{\bar{\varrho}}\right) \left(1 - \frac{3\varrho_1}{5\bar{\varrho}}\right)^{-1}. \quad (27)$$

Закон (24) изменения плотности — сугубо модельный. Поэтому определим  $\beta$  по формуле (27) лишь с двумя значащими цифрами, не указывая погрешности. Средняя плотность приведена в работе [3]. Поверхность тел состоит большей частью из водяного льда при температуре 60 К [14]. Примем  $\varrho_1 = 0.94 \cdot 10^3$  [15]. По Ляпунову функцию  $q\zeta(q, v, \theta)$  следует разложить по степеням  $q$ . Ограничимся ниже линейным приближением. Тогда

$$\zeta = F(v)P_2(\cos \theta), \quad (28)$$

где  $F$  можно представить в виде ряда по степеням  $v^2$

$$F = F^0 \sum_{k=0}^{\infty} F_k v^{2k} \quad (29)$$

с постоянными  $F_k, F^0$ . Опираясь на изложенный в [12, 13] алгоритм, запишем рекуррентность

$$F_0 = 1, \quad F_k = \frac{3(2k^2 + 5k - 5)}{5k(2k + 5)} \beta F_{k-1}. \quad (30)$$

Вот первые значения  $F_k$ :

$$F_1 = \frac{6}{35}\beta, \quad F_2 = \frac{13}{175}\beta^2, \quad F_3 = \frac{52}{1375}\beta^3. \quad (31)$$

Для  $F^0$  справедливо

$$F^0 = -\frac{5}{6} \left(1 - \frac{3}{5}\beta\right) \left(1 + \frac{3}{2}\beta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{k+1} F_k\right)^{-1}, \quad (32)$$

или в виде ряда по степеням  $\beta$

$$F^0 = -\frac{5}{6} \left(1 - \frac{3}{5}\beta - \frac{9}{70}\beta^2 + \frac{1}{350}\beta^3 + \dots\right). \quad (33)$$

Теперь по формуле (29)

$$F(1) = -\frac{5}{6} \left( 1 - \frac{3}{7}\beta - \frac{11}{70}\beta^2 - \frac{699}{26950}\beta^3 + \dots \right). \quad (34)$$

Пользуясь (21), (28), найдем сжатие поверхности  $\mathcal{S}$ . Пренебрегая квадратом параметра Клеро, получим

$$c = \bar{a}[1 + qF(1)], \quad a = \bar{a} \left[ 1 - \frac{1}{2}qF(1) \right], \quad \frac{\alpha}{q} = -\frac{3}{2}F(1). \quad (35)$$

С точностью до  $\beta^3$  включительно

$$\frac{4\alpha}{5q} = 1 - \frac{3}{7}\beta - \frac{11}{70}\beta^2 - \frac{699}{26950}\beta^3. \quad (36)$$

В качестве (слабого) контроля заметим, что при  $\beta = 0$  в линейном по  $q$  приближении (36) совпадает с (12). При  $\beta > 0$ , как и должно быть,  $\alpha < \alpha^*$ .

*Замечание.* Значения  $\beta$  нельзя назвать малыми (см. ниже табл. 4). Желательно поэтому оценить радиусы сходимости введенных рядов.

Из (30) следует, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{F_k}{F_{k-1}} = \frac{3}{5}\beta.$$

Поэтому радиус сходимости ряда в (32) равен  $5/3$ .

Оценим сверху величину

$$w = \left| \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{k+1} F_k \right| \quad (37)$$

в круге  $|\beta| \leq 5/4$  комплексной плоскости. Достаточно положить  $\beta = 5/4$ . Воспользуемся точными значениями  $F_1 = 3/14$ ,  $F_2 = 13/112$  и вытекающим из (30) неравенством

$$F_k < \left( \frac{3}{4} \right)^{k-2} F_2, \quad k > 2.$$

Выделяя в (37) первые два слагаемых и заменяя в остальных  $k/(k+1)$  единицей, получим

$$w < \frac{1}{2}F_1 + \frac{2}{3}F_2 + \sum_{k=3}^{\infty} \left( \frac{3}{4} \right)^{k-2} F_2 = \frac{1}{2}F_1 + \left( \frac{2}{3} + \frac{3/4}{1-3/4} \right) F_2 = \frac{179}{21 \cdot 16}.$$

Отсюда

$$\frac{3}{2}|\beta|w < \frac{895}{896}, \quad \left| 1 + \frac{3}{2}\beta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{k+1} F_k \right| > \frac{1}{896}.$$

Поэтому  $F^0$  как функция от  $\beta$  не имеет особых точек в круге  $|\beta| \leq 5/4$ , и радиус сходимости рядов в (33), (34), (36) больше  $5/4$ .

Перейдем к параметру Стокса  $I_2$ . Вот его интегральное представление [7]:

$$I_2 = -\frac{1}{ma^2} \int_{\mathcal{T}} r^2 P_2(\cos \theta) \varrho \, d\tau.$$

Пользуясь выражением (21) для радиуса, (22) для элемента объема и (24) для плотности, получим

$$I_2 = -\frac{2\pi \bar{a}^5 \varrho_0}{ma^2} \int_0^1 v^4 (1 - \beta v^2) \, dv \int_0^\pi \Phi(v, \theta) \sin \theta \, d\theta,$$

где

$$\Phi = (1 + q\zeta)^4 \left( 1 + q \frac{\partial v \zeta}{\partial v} \right) P_2(\cos \theta).$$

С точностью до первой степени  $q$

$$\Phi = P_2(\cos \theta) + q\Phi_1(v) [P_2(\cos \theta)]^2, \quad \Phi_1 = 4F(v) + \frac{\partial v F(v)}{\partial v}.$$

Интеграл от  $P_2(\cos \theta) \sin \theta$  исчезает по ортогональности многочленов Лежандра, интеграл от  $[P_2(\cos \theta)]^2 \sin \theta$  равен  $2/5$ . Далее,

$$\Phi_1 = F^0(5 + 7F_1 v^2 + 9F_2 v^4 + 11F_3 v^6) = F^0 \Phi_2,$$

$$\Phi_2 = 5 + \frac{6}{5}\beta v^2 + \frac{117}{175}\beta^2 v^4 + \frac{52}{125}\beta^3 v^6.$$

Поскольку с принятой точностью  $a = \bar{a}$ , то, в силу (26),

$$\frac{\bar{a}^5 \varrho_0}{ma^2} = \frac{3}{4\pi} \left( 1 - \frac{3}{5}\beta \right)^{-1},$$

так что

$$\begin{aligned} I_2 &= -\frac{3}{5}qF^0 \left( 1 - \frac{3}{5}\beta \right)^{-1} \int_0^1 v^4 (1 - \beta v^2) \Phi_2 \, dv = \\ &= \frac{q}{2} \left( 1 - \frac{9}{70}\beta^2 - \frac{13}{175}\beta^3 \right) \int_0^1 v^4 (1 - \beta v^2) \Phi_2 \, dv. \end{aligned}$$

Последний интеграл равен

$$\int_0^1 \left( 5v^4 - \frac{19}{5}\beta v^6 - \frac{93}{175}\beta^2 v^8 - \frac{221}{875}\beta^3 v^{10} \right) dv = \\ = 1 - \frac{19}{35}\beta - \frac{31}{525}\beta^2 - \frac{221}{9625}\beta^3.$$

Окончательно,

$$\frac{2I_2}{q} = 1 - \frac{19}{35}\beta - \frac{197}{1050}\beta^2 - \frac{3699}{134750}\beta^3. \quad (38)$$

Напомним, что мы удерживаем члены до третьей степени  $\beta$  включительно.

Числовые данные соберем в табл. 4.

Таблица 4. Параметры фигур равновесия системы Плутон—Харон. Подход Ляпунова

Параметр	$10^{-3}\bar{\varrho}$	$10^{-3}\varrho_1$	$\beta$	$10^4\alpha$	$\alpha/q$	$10^4I_2$	$I_2/q$
Плутон	1.854	0.94	0.71	1.90	0.76	0.64	0.26
Харон	1.703	0.94	0.67	2.16	0.79	0.74	0.27

## Основные свойства фигур

Установим основные свойства трех рассмотренных фигур. Все они являются поверхностями вращения, поэтому достаточно исследовать свойства их меридиональных сечений. По симметрии можно ограничиться четвертью фигуры от полюса до экватора,  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ . Обозначим через  $S_M$ ,  $S_{HR}$ ,  $S_L$  меридиональные сечения эллипсоида Маклорена, фигуры Гюйгенса—Роша и фигуры Ляпунова соответственно. Форма эллипсоида не нуждается в пояснении.

1. Фигура Гюйгенса—Роша. Ее уравнение (20), точное до  $\alpha^2$  включительно, имеет вид (45) при  $A = c$ ,  $B = c\alpha(1 - 2\alpha)$ ,  $C = 3c\alpha^2$ . Первое условие (48) приложения равносильно

$$4\alpha^2 - 2\alpha + 1 = \left(2\alpha - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4} > 0$$

и выполнено тождественно для всех  $\alpha$ . Второе условие (48) накладывает слишком сильное ограничение на  $\alpha$ . Чтобы ослабить его, исследуем величину  $K_3$ , определенную третьей формулой (47):

$$K_3(x) = 51y^2 + (5 - 46\alpha)y + (1 - 2\alpha + 4\alpha^2), \quad y = \alpha x.$$

Дискриминант квадратного трехчлена равен

$$D = 1300\alpha^2 - 52\alpha - 179.$$

Корни  $D$  равны

$$\alpha_{1,2} = \frac{26 \pm \sqrt{233376}}{1300}, \quad \alpha_1 = 0.3916, \quad \alpha_2 = -0.3516.$$

При  $\alpha < \alpha_1$  дискриминант отрицателен,  $K_3(x) > 0$  при всех  $x$ . Но наибольшее возможное значение  $\alpha$  для фигуры Гюйгенса—Роша равно  $1/3$  [1].

Закключаем, что кривая  $S_{HR}$  выпукла и не имеет точек выпрямления при всех  $\alpha$ .

*Замечание.* При  $q = 8/27$ ,  $\alpha = 1/3$  кривая  $S_{HR}$  имеет угловую точку, а поверхность  $\mathcal{S}$  — ребро. Кривизну при  $\theta = \pi/2$  следует понимать как предел при  $\theta \rightarrow \pi/2$ , причем оба односторонних предела  $\theta \rightarrow \pi/2 \pm 0$  равны между собой.

2. Фигура Ляпунова. Обозначим  $h = -qF(1)/2$ . Соотношения (35) запишутся в виде

$$c = \bar{a}(1 - 2h), \quad a = \bar{a}(1 + h),$$

что позволяет выразить  $\bar{a}, h$  через  $c, \alpha$ :

$$\bar{a} = \frac{3 - \alpha}{3(1 - \alpha)}c, \quad h = \frac{\alpha}{3 - \alpha}. \quad (39)$$

Уравнение  $S_L$  (21) с учетом (28), (39) представим в виде

$$r = c[1 - 2hP_2(\cos \theta)] = a(1 - \alpha + \alpha \sin^2 \theta). \quad (40)$$

Уравнение (40) имеет вид (45) при  $A = a(1 - \alpha)$ ,  $B = a\alpha$ ,  $C = 0$ . Второе условие (48) выполнено, а первое равносильно  $1 > 3\alpha$ .

Таким образом, кривая  $S_L$  выпукла и не имеет точек выпрямления, если  $\alpha < 1/3$ .

При  $\alpha = 1/3$  кривая  $S_L$  выпукла, но в полюсах имеет точки выпрямления.

Если  $\alpha > 1/3$ , то кривая  $S_L$  не является выпуклой. Она прогибается около полюсов.

*Замечание.* Отброшенные члены порядка  $q^2$  при  $\alpha > 1/3$  могут оказаться существенными, так что невыпуклость кривой  $S_L$  при  $\alpha > 1/3$  нельзя считать доказанной. Но в системе Плутона  $q, \alpha$  весьма малы, и там  $S_L$  безусловно выпукла.

3. Сравним формы фигур Гюйгенса—Роша и Ляпунова с формой эллипсоида Маклорена при одинаковых  $a, c, \alpha$ .

Из (16) и (20) вытекает с точностью до  $\alpha^2$  включительно

$$r_M - r_{HR} = \frac{3c}{2}\alpha^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (41)$$

в понятных обозначениях. Формула (41) показывает, что эллипсоид охватывает фигуру Гюйгенса—Роша, касаясь ее в полюсах и на экваторе. Параметр Клеро согласно (11) и (19) существенно больше у фигуры Гюйгенса—Роша:

$$\frac{q_{HR}}{q_M} = \frac{5}{2} \left( 1 - \frac{25}{14}\alpha \right). \quad (42)$$

Напротив, при одинаковых значениях параметра Клеро сжатие фигуры Гюйгенса—Роша существенно меньше:

$$\frac{\alpha_{HR}}{\alpha_M} = \frac{2}{5} \left( 1 + \frac{41}{56}q \right). \quad (43)$$

Из соотношений (16) и (40) без труда находим с точностью до  $\alpha^2$  включительно

$$r_L - r_M = \frac{3c}{2}\alpha^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta. \quad (44)$$

Сравнение с (41) показывает, что при одинаковых  $a, c, \alpha$  эллипсоид Маклорена находится посередине между фигурами Ляпунова и Гюйгенса—Роша. Все три фигуры касаются друг друга в полюсах и на экваторе.

На рис. 1 слева приведено меридиональное сечение трех фигур с общими  $a, c, \alpha$  при  $\alpha = 0.25$ , а справа — с общими  $a, q$  при  $q = 0.22$ . Эти значения  $\alpha, q$  на три порядка превышают реальные. Но для реальных значений  $\alpha, q$  все три фигуры на глаз неотличимы от сферы.

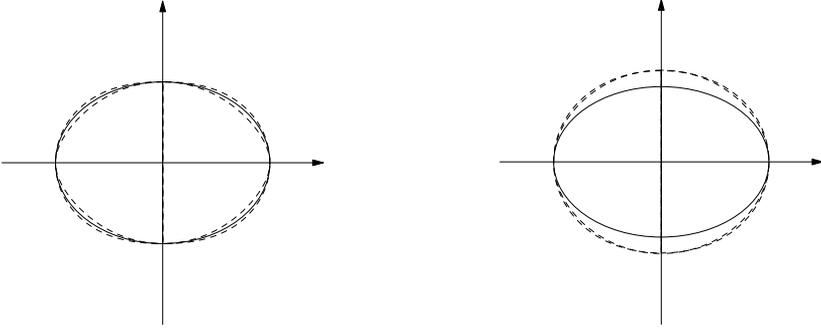


Рис. 1. Меридиональные сечения эллипсоида (сплошная линия), фигуры Гюйгенса—Роша (пунктир) и Ляпунова (штрих-пунктир); слева — с общими  $a, c, \alpha$  при  $\alpha = 0.25$ ; справа — с общими  $a, q$  при  $q = 0.22$

## Заключение

Для исследуемой пары небесных тел значение параметра Клеро  $q$  можно считать известным из наблюдений. Для сжатия меридионального сечения  $\alpha$  и коэффициентов  $I_2, I_4$  при зональных гармониках гравитационного потенциала сколько-нибудь надежных наблюдательных данных нет. Нами найдены границы их возможных значений, собранные в табл. 5 в понятных обозначениях.

Таблица 5. Границы возможных значений параметров фигур равновесия системы Плутон—Харон

Параметр	$10^4 q$	$10^4 \alpha^-$	$10^4 \alpha^+$	$10^4 I_2^+$	$10^8 I_4^+$
Плутон	2.5013	1.251	3.127	1.251	3.352
Харон	2.7247	1.363	3.406	1.362	3.977

*Замечание 1.* Равные нулю величины  $I_2^-, I_4^-$  мы не приводим.

*Замечание 2.* Обратим внимание, что отношение  $\alpha/q$  практически одинаково для Плутона и Харона во всех моделях их строения. Как и должно быть, это отношение максимально для эллипсоидов Маклорена, минимально для фигур Гюйгенса—Роша и промежуточно для фигуры с плотностью (24). Скорее всего, истинные сжатия примерно равны этим промежуточным значениям.

Что касается коэффициентов Стокса, то они максимальны для эллипсоидов Маклорена и равны нулю для фигур Гюйгенса—Роша.

Полученные оценки показывают, какой точностью должны обладать приборы, чтобы измерить хотя бы с 10-процентной точностью величины  $\alpha$ ,  $I_2$ . Измерить  $I_4$  нереально в обозримом будущем.

## Приложение

Исследуем на выпуклость плоскую кривую  $S$ , заданную в полярных координатах, уравнением

$$r = A + B \sin^2 \theta + C \sin^4 \theta, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (45)$$

при  $A > 0$ ,  $B \geq 0$ ,  $C \geq 0$ . Для этого найдем ее кривизну  $K$  [16]:

$$K = \frac{K_1}{K_2^{3/2}}, \quad K_1 = r(r - r'') + 2r'^2, \quad K_2 = r^2 + r'^2. \quad (46)$$

Кривая (45) с ростом  $\theta$  обходит по часовой стрелке. Поэтому в (46) принято правило знаков, по которому кривизна считается положительной, если касательная тоже вращается по часовой стрелке.

Полагая

$$x = \sin^2 \theta, \quad \frac{d}{d\theta} = \pm 2\sqrt{x(1-x)} \frac{d}{dx}, \quad \frac{d^2}{d\theta^2} = 4x(1-x) \frac{d^2}{dx^2} + 2(1-2x) \frac{d}{dx},$$

представим  $K_1$ ,  $K_2$  в виде

$$\begin{aligned} K_1(x) &= (A + Bx + Cx^2)K_3(x) + K_4(x), \\ K_2(x) &= (A + Bx + Cx^2)^2 + 4x(1-x)(B + 2Cx)^2, \\ K_3(x) &= (A - 2B) + (5B - 12C)x + 17Cx^2, \\ K_4(x) &= 8x(1-x)(B + 2Cx)^2. \end{aligned} \quad (47)$$

Величина  $K_2(x)$  положительна и отделена от нуля. Так как нас интересует только знак кривизны, о  $K_2$  можно больше не упоминать. Знак  $K_1(x)$  установить сложнее. Начнем со значений на полюсе и экваторе:

$$K_1(0) = A(A - 2B), \quad K_1(1) = (A + B + C)(A + 3B + 5C) > 0.$$

На экваторе кривизна положительна. На полюсе возможны три случая:

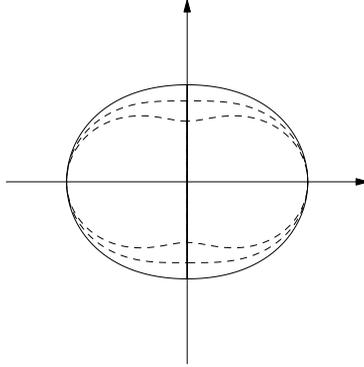


Рис. 2. Три кривые (45) при  $C = 0$  и  $A = 4/5, B = 1/5$  (сплошная линия);  $A = 2/3, B = 1/3$  (пунктир),  $A = B = 1/2$  (штрих-пунктир)

- а)  $A > 2B$ . Кривизна на полюсе положительна;
- б)  $A = 2B$ . Кривизна обращается в нуль на полюсе, так что последний служит точкой выпрямления;
- в)  $A < 2B$ . Кривизна на полюсе отрицательна. Кривая  $S$  не является выпуклой. Она прогибается в окрестности полюсов.

В первом случае в зависимости от  $C$  кривая  $S$  может быть и выпуклой, и невыпуклой. В частности, если

$$A - 2B > 0, \quad 12C \leq 5B, \quad (48)$$

то  $K_3(x)$  и  $K_1(x)$  положительны и отделены от нуля; кривая  $S$  выпукла и не имеет точек выпрямления.

Для иллюстрации на рис. 2 приведены три кривые (45) при  $C = 0$ .

Авторы благодарны В. Ш. Шайдулину за полезные замечания. Работа выполнена с использованием оборудования Вычислительного центра научного парка СПбГУ при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-02-00552, (исследование фигур Ляпунова; М. А. Боруха, Б. Б. Эскин) и при финансовой поддержке РНФ, грант 18-12-00050 (исследование фигур Гюйгенса-Роша и гармоник гравитационного потенциала; К. В. Холшевников).

### Библиографические ссылки

1. *Питъев Н. П., Титов В. Б., Холшевников К. В.* Фигуры равновесия небесных тел. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2002. — С. 108.
2. *Ляпунов А. М.* Исследования по теории фигуры небесных тел // Ляпунов А. М. Соч. — М. : Изд-во АН СССР, 1959. — Т. 3. — С. 114–146.

3. *Nimmo F., Umurhan O., Lisse S. et al.* Mean Radius and Shape of Pluto and Charon from New Horizons Images // *Icarus*. — 2017. — Vol. 287. — P. 12–29.
4. *Stern S. A., Grundy W. M., Mckinnon W. B. et al.* The Pluto System after New Horizons // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 56. — P. 357–392.
5. *Weaver H. A., Buie M. W., Buratti B. J. et al.* The small satellites of Pluto as observed by New Horizons // *Science*. — 2016. — Vol. 351. — P. 1281.
6. *Brozovič M., Showalter M. R., Jacobson R. A. et al.* The orbits and masses of satellites of Pluto // *Icarus*. — 2015. — Vol. 246. — P. 317–329.
7. *Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В.* Введение в теорию ньютоновского потенциала. — М. : Наука, 1988. — С. 270.
8. *Kholshevnikov K. V., Milanov D. V., Shaidulin V. Sh.* Laplace series of the level ellipsoid of revolution // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2018. — Vol. 130, iss. 10.
9. *Kholshevnikov K. V., Elkin A. V.* Convergence of Liapunov series for Maclaurin ellipsoids // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2002. — Vol. 84, iss. 1. — P. 57–63.
10. *Пуанкаре А.* Фигуры равновесия жидкой массы. — М. ; Ижевск : РХД, 2000. — С. 208.
11. *Kholshevnikov K. V., Kurdubov S. L.* Convergence of Liapunov series for Huygens—Roche figures // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2004. — Vol. 89, iss. 1. — P. 83–96.
12. *Заки С. Ф., Елькин А. В., Холшевников К. В.* Форма и строение небесных тел: вслед за Ляпуновым // *Астрон. журн.* — 1994. — Т. 71, вып. 5. — С. 785–793.
13. *Елькин А. В., Холшевников К. В.* Определение фигур небесных тел методом Ляпунова // *Тр. АО СПбГУ.* — 2003. — Т. 45. — С. 3–72.
14. *Grundy W. M et al.* Surface compositions across Pluto and Charon // *Science*. — 2016. — Vol. 351, iss. 6279. — P. 1283.
15. *Чубик И. А., Маслов А. М.* Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. — М. : Пищевая промышленность, 1970. — С. 261.
16. *Рашевский П. К.* Курс дифференциальной геометрии. — М. : ГИТТЛ, 1956. — С. 420.

# О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АСТРОНОМИИ

**Б. М. Шустов**

*Институт астрономии РАН*

Обсуждаются состояние и перспективы развития астрономии в России. На данный момент оно характеризуется значительным отставанием от мирового уровня, прежде всего в технологии наземных астрономических наблюдений. В целях выхода из этой ситуации проведена экспертиза проблемы и намечены наиболее перспективные инфраструктурные проекты. Для их реализации необходима поддержка государства. Также обсуждаются проблемы и перспективы участия российских астрономов в жизни Международного астрономического союза.

## ON THE STATE OF ART OF DEVELOPMENT OF ASTRONOMY IN RUSSIA

**B. M. Shustov**

*Institute of Astronomy of the RAS*

The state of art and prospects of development of astronomy in Russia are discussed. The current state is characterized by a considerable lag behind the world level, especially in the technology of the ground-based astronomical observations. Based on the results of expertise, the most promising infrastructure projects were selected. To implement them, state support is needed. The problems and prospects of participation of Russian astronomers in the life of the International Astronomical Union are also discussed.

## Введение

Общепризнано, что уровень развития страны в значительной степени определяется ее научным потенциалом, который, в свою очередь, определяется уровнем развития фундаментальной науки. Состояние астрономии как одной из важнейших фундаментальной наук — хороший индикатор общего развития страны. К сожалению, состояние российской астрономии нельзя назвать соответствующим

статусу крупной развитой державы. Особенно остро это чувствуется в наземной астрономии. В течение нескольких десятков лет поддержка астрономических исследований была явно недостаточной. В последние несколько лет ситуация, по-видимому, начинает понемногу меняться. По инициативе и при участии РАН, Научно-координационного совета при ФАНО России (НКС ФАНО), тогдашнего Министерства образования и науки, Управления Президента по научно-образовательной политике в 2015 г. была сформирована межведомственная рабочая группа (МРГ) экспертов по астрономии. Члены МРГ — эксперты в различных областях наблюдательной астрономии и астрофизики, работающие как в институтах РАН/ФАНО, так и в ведущих университетах. Группе было поручено провести анализ состояния и перспектив развития наземной экспериментальной базы астрономии и астрофизики в России, в которой приоритеты участия России в крупных зарубежных астрономических проектах были бы логистически и финансово согласованы с планами развития наземной астрономической инфраструктуры на территории РФ. В работе группы активно участвовало астрономическое научное сообщество России. Важной частью работы было проведение всеобъемлющего аудита существующих наземных астрономических средств в РФ и рассмотрение вопроса подготовки кадров. МРГ работала в течение 2015—2016 гг., результаты ее работы были доведены до астрономической общественности страны. Однако далеко не все российские астрономы, особенно научная молодежь, нашли возможность ознакомиться с этими важными материалами.

За последние годы, естественно, произошли некоторые изменения в ситуации. В том числе и весьма позитивные. Например, в программу школьного обучения возвращена дисциплина «Астрономия», согласно президентским указам существенно повышена зарплата научных работников в ряде регионов страны и т. д. Важно, что со стороны руководящих органов страны не угасло внимание к проблемам развития астрономии. Например, по поручению МОН РФ в 2018 г. работал Экспертный совет ОФН РАН по направлению «Астрономия, астрофизика, космические исследования». В результате были уточнены некоторые рекомендации по поддержке российских инфраструктурных проектов класса «мегасайенс».

Конечно, астрономия в России развивается в общемировой кооперации. Это очень важный фактор научного прогресса. Здесь у нашей астрономии пока больше перспектив, чем реального продвижения. В августе 2019 г. в Вене проходила Генеральная ассамблея

(ГА) Международного астрономического союза (МАС). Мне кажется необходимым осветить некоторые аспекты и перспективы работы российских астрономов (и особенно научной молодежи) в рамках этой международной организации.

В данной лекции кратко описаны основные результаты проведенной в последние годы работы по анализу состояния и перспектив российской астрономии, а также некоторые проблемы и перспективы участия российских астрономов в международной кооперации в свете результатов работы XXX ГА МАС. Автор в этой работе принимал самое непосредственное участие. Некоторые вопросы, затрагиваемые в лекции, более подробно описаны в [1, 2].

## **Структура астрономических исследований в России**

### **Организационно-правовые формы и количество российских научных организаций, ведущих астрономические исследования**

34 научных учреждения России, в которых проводятся астрономические исследования, имеют две организационно-правовые формы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки (ФГБУН) и подразделение (астрономическая кафедра, лаборатория, обсерватория, институт) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) Министерства науки и высшего образования РФ (Минобрнауки России).

### **Научные кадры**

Общая численность исследователей, согласно данным проведенного аудита, на начало 2016 г. составляла около 1 300 человек, из них около 20 % имеют ученую степень доктора наук, 35 % — кандидата наук.

Отметим сравнительно неплохой показатель российских астрономов (членов МАС) по продуктивности научной работы, определяемый здесь как количество публикаций в рецензируемых изданиях на одного члена МАС в год: в России — 2.3, в США — 2.3, в Германии — 3.9, в Китае — 2.0, в Японии — 1.6 (по данным Web of Science по разделу Space Science за 2016 г.). По этому показателю

Россия не уступает другим странам. Важный качественный показатель научных исследований — цитируемость научных работ российских астрономов. Согласно тому же источнику количество ссылок на работы российских астрономов, членов МАС, составляет в среднем 8 на одну публикацию за 10 лет. Средняя цитируемость научных работ всех российских астрономов гораздо ниже. Для сравнения: средний показатель для работ авторов из США, Германии, Англии — 21, Японии — 17, Китая — 8 (данные 2016 г.).

### Научно-исследовательская инфраструктура

27 из 34 астрономических учреждений имеют собственную инфраструктуру для проведения наземных астрономических наблюдений. Это оптические телескопы, радиотелескопы, полигоны, специальные аппаратные комплексы и др. В 2016 г. объектов со статусом УНУ (уникальная научная установка) насчитывалось 11. Шесть объектов инфраструктуры являлись центрами коллективного пользования (ЦКП), 4 из них одновременно представляли собой УНУ.

Как уже отмечалось, в России в последние несколько десятков лет развитию наблюдательных средств астрономии внимание практически не уделялось. Последнее крупное вложение было сделано в 70-е гг. прошлого века: были построены самый большой на то время оптический 6-м телескоп БТА и кольцевой радиотелескоп РАТАН-600 диаметром 600 м. Сегодня наш крупнейший в ту эпоху оптический телескоп по размерам (и соответственно по возможностям) уже замыкает вторую десятку работающих в мире инструментов. Начиная с 1980-х гг. в России не реализован ни один по настоящему крупный проект для задач наземных астрономических исследований. Недавно введенный в строй под Кисловодском 2.5-м оптический телескоп МГУ должен стать важным средством для подготовки научных кадров, однако с точки зрения важнейших астрофизических наблюдательных программ его возможности будут весьма скромными. Это же относится и к 2-м оптическому телескопу российско-украинской обсерватории на пике Терскол в Кабардино-Балкарии.

Аналогичная картина с наземными российскими радиотелескопами, предназначенными для астрономических исследований. И РАТАН-600 (в САО РАН), и РТ-22 (на станции ФИАН в Пущино), и другие инструменты в состоянии выполнять отдельные задачи, но не являются и не могут быть конкурентоспособными в прорывных исследованиях в современную эпоху. Созданный в последние два де-

ятилетия радиоинтерферометрический комплекс КВАЗАР используется главным образом для координатно-временного обеспечения страны. Показателем уровня развития радиоастрономических наблюдательных средств является тот факт, что в стране нет ни одного современного радиотелескопа миллиметрового диапазона, тем более интерферометра миллиметрового диапазона, а эти инструменты в наши дни относятся к основным средствам наблюдательной астрономии в мире.

### **Финансовые инструменты поддержки астрономических исследований в Российской Федерации**

Базовые бюджеты астрономических учреждений в России, как правило, почти полностью расходуются на зарплату (ставки) и коммунальные услуги. Инфраструктурные расходы на сопровождение и развитие астрономических инструментов осуществляются из внебазовых бюджетных финансовых инструментов, таких как Федеральные целевые программы (ФЦП), Программы РАН и МОН, гранты государственных научных фондов, в основном Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Российского научного фонда (РНФ). Дополнительное финансирование определяется объемом работ, выполняемых главным образом по космическим проектам из средств контрактов Роскосмоса, по договорам с заинтересованными министерствами и ведомствами, а также по грантам негосударственных фондов.

Общий годовой бюджет российской астрономии равен сумме всех бюджетов астрономических учреждений с учетом указанных выше составляющих. Базовый бюджет на 2014 г. был равен 1 323 млн руб., «внебазовая» часть — 460 млн руб. Дополнительное финансирование оценочно составляло до 50 % от суммы базовой и внебазовой частей. В последние два года финансирование несколько возросло, но в основном все это увеличение уходит на повышение зарплат научных сотрудников.

### **Перспективные проекты развития наземной астрономии в России**

МРГ собрала и рассмотрела 18 инфраструктурных предложений (проектов), присланных со всей России. Были представлены проекты

двух типов — фундаментальные и проекты, имеющие как фундаментальную, так и выраженную прикладную направленность.

Фундаментальные проекты были разделены при рассмотрении на три группы:

- **международные мега-проекты.** Доля финансового участия России составляет менее 50 % от полной стоимости, при этом сумма участия — более 1 млрд руб. на год рассмотрения. В этом разделе первый приоритет у проекта «Участие России в Европейской южной обсерватории (ЕЮО/ESO)». Несмотря на общую поддержку, типичное мнение астрономов состоит в том, что вряд ли этот проект будет поддержан, в частности, из-за кажущейся высокой «цены вопроса». И все же этот вопрос остается на столе руководства страны. Академик Ю. Ю. Балега, действующий вице-президент РАН, постоянно контактирует с правительством по данной теме. Приоритет 2 — у проекта «Участие России в проекте телескопа размером квадратный километр (SKA)»;
- **российские мега-проекты.** Доля участия России более 50 % от полной стоимости, при этом сумма участия более 1 млрд руб. на год рассмотрения. Здесь приоритет 1 у проекта 4-м оптического телескопа с широким полем зрения для постановки в Северном полушарии. Приоритет 2 — у проекта завершения строительства 70-м радиотелескопа на плато Суффа. В самое последнее время этот проект вызывал повышенное внимание у руководства страны. На момент написания статьи не было известно о принятии кардинальных решений по этому вопросу;
- **российские проекты среднего уровня.** Доля России более 50 % от полной стоимости, при этом сумма участия менее 1 млрд руб. на год рассмотрения. Приоритет 1 у проекта нейтринного телескопа «Байкал». Приоритет 2 — у проекта длинноволнового радиотелескопа широкого поля зрения.

Три проекта, имеющих прикладную направленность, рекомендованы для софинансирования при условии основного финансирования со стороны заинтересованных министерств и ведомств:

- создание Российской службы Солнца;
- создание научной наземной астрономической инфраструктуры для наземного сегмента Российской системы предупреждения и противодействия космическим угрозам;
- фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение России.

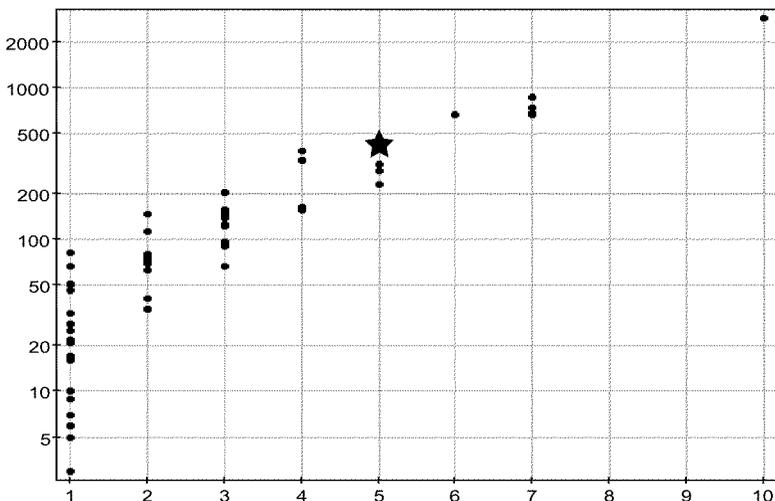
Все эти приоритеты были подтверждены в результате экспертизы, проведенной в сентябре 2018 г. Экспертным советом ОФН РАН по направлению «Астрономия, астрофизика, космические исследования».

## Россия и МАС

Россия является членом МАС с 1992 г. (СССР — с 1935 г.). Генеральная ассамблея МАС проводилась у нас единственный раз, в 1958 г., в Москве и имела статус мероприятия государственного значения. В астрономическом сообществе России обсуждается инициатива провести одну из следующих ГА МАС в нашей стране. Пока что две следующие ГА пройдут в других странах: в 2021 г. — в г. Пусан (Южная Корея), а в 2024 г. — в г. Кейптаун (Южная Африка).

На начало 2018 г. членами МАС были 437 наших соотечественников, т. е. примерно 3 на каждый миллион жителей страны. В развитых странах этот показатель выше в два-три раза. Уставом и Положением о МАС установлены градации уровня участия Национальных организаций (Национальных членов) в МАС по так называемым категориям. Раздел VII.25 Устава МАС определяет размер ежегодных взносов Национальных членов в зависимости от их категории в единицах минимального взноса (устанавливаемого для первой категории членства). Размер единицы взноса на предстоящие три года определяется Генеральной ассамблеей МАС. От категории членства страны в МАС размер взноса зависит весьма существенно. Число членов МАС от данной страны определяется категорией (хотя жесткого правила здесь нет, и в пределах одной категории разброс может быть заметным).

Россия принадлежит к 5-й категории (см. рисунок). К этой же категории принадлежат Канада, Индия и Нидерланды. Для сравнения: Китай является членом МАС категории 6; Италия, Соединенное королевство, Япония, Франция и Германия — категории 7; США — категории 10. Предложения ряда научных организаций России о существенном увеличении количества наших астрономов в МАС пока невозможно выполнить без существенного повышения категории и соответственно увеличения ежегодного взноса. Этот финансовый вопрос постоянно поднимается Национальным комитетом российских астрономов (НКРА) перед руководящими структурами нашей страны. Отметим также, что при голосовании в МАС по финансовым вопросам количество голосов зависит от категории членства.



Зависимость числа членов МАС данной страны от категории членства для стран — членов МАС. Звездочкой показано положение России. Наивысшая категория — у США

Представители России участвуют в жизни МАС — в организации и проведении ГА МАС, симпозиумов и других научных мероприятий. Советские, а затем российские ученые неоднократно избирались в руководящие органы МАС. Так, В. А. Амбарцумян в 1961–1964 гг. и А. А. Боярчук в 1991–1994 гг. были Президентами МАС. Вице-президентами МАС были А. А. Михайлов, Б. В. Кукаркин, А. Б. Северный, Э. Р. Мустель. В более поздние годы (2000–2003) вице-президентом МАС был Н. С. Кардашев (АКЦ ФИАН), а Б. М. Шустов (ИНАСАН) является вице-президентом МАС с 2015 г. Многие астрономы из СССР и России возглавляли на протяжении истории МАС тематические комиссии и рабочие группы. В Новейшее время М. Я. Маров (ГЕОХИ РАН) избирался президентом Дивизиона III Planetary Systems Sciences (2000–2003). Возглавляли комиссии МАС М. Я. Маров (ГЕОХИ РАН) — Physical Study of Planets & Satellites (1994–1997), О. Б. Длужневская (ИНАСАН) — Documentation & Astronomical Data (1997–2003), Н. Н. Самусь (ИНАСАН) — Astronomical Telegrams (2009–2012), И. И. Кум-

кова (СПбГУ) — *Astrometry* (2006—2009), Л. И. Машонкина (ИНАСАН) — *Atomic & Molecular Data* (2012—2015). Избирались президентами комиссий МАС и россияне, работающие за рубежом: Н. Е. Пискунов, А. А. Токовинин, А. Г. Косовичев. В настоящее время Д. В. Бисикало (ИНАСАН) является президентом комиссии *B1 Computational Astrophysics*, М. Я. Маров — комиссии *World Heritage and Astronomy*; выполняют обязанности членов оргкомитетов комиссий МАС: *Rotation of the Earth* — В. Е. Жаров (ГАИШ), *Meteors, Meteorites and Interplanetary Dust* — Г. О. Рябова (Томский ГУ), *Stellar and Planetary Atmospheres* — Л. И. Машонкина (ИНАСАН), *Solar System Ephemerides* — Е. В. Питьева (ИПА РАН). И все же, по мнению автора, для такой страны, как Россия, представительство в руководящих структурах МАС является недостаточным.

После распада СССР Российская академия наук, как правопреемница Академии наук СССР, взяла на себя все обязательства по участию в международных союзах. Национальный комитет российских астрономов (председатель — Б. М. Шустов), как координатор взаимодействия между российскими астрономами и МАС, участвует в научно-организационной работе МАС и представляет в МАС не только академическую, но также вузовскую и ведомственную науку.

Одним из наглядных примеров успешного и выгодного сотрудничества российских астрономов в проекте, поддерживаемом МАС, является Международная виртуальная обсерватория (МВО). Проект создания Российской виртуальной обсерватории (РВО) — члена МВО — ставит основной целью предоставление российским астрономам прямого и бесплатного доступа к мировым ресурсам астрономических данных. В создании РВО принимают участие большинство астрономических учреждений России. Другим важным проектом МАС, в котором Россия занимает лидирующие позиции, является создание и поддержка Общего каталога переменных звезд.

Важно, что МАС — организация, не застывшая в организационных формах прошлого. Особое внимание уделяется научной молодежи. На ГА МАС, состоявшейся в Вене в августе 2018 г., был введен новый вид членства в МАС — *Junior Members* (молодые члены). Отличие *Junior Member* от обычного (регулярного) членства состоит только в том, что этот новый вид членства временный. Максимум через шесть лет исследователь должен определиться со своим будущим, и, если он остается в астрономии (жизнь не проста, и, по данным европейской статистики, около 80 % исследователей в первые три года после получения PhD уходят из науки), то может перейти

в состав регулярных членов МАС. Активные молодые исследователи, защитившие диссертации не ранее, чем за три года до очередной ГА МАС, могут подать заявление на вступление в МАС в качестве Junior Member. Наша молодежь использовала эту возможность, и в списке кандидатов в члены МАС от России включены 40 регулярных и 46 молодых членов. Все наши кандидаты были утверждены! Это очень хорошо, к тому же и в отношении гендерной статистики (МАС уделяет вопросам равноправного представительства значительное внимание) россияне выглядят неплохо: доля женщин — кандидатов в члены МАС — 32 %, в то время как в настоящее время женщины составляют лишь 23 % членов МАС. Еще один способ для молодых ученых показать себя — участие в конкурсе PhD, который начал проводиться во всех девяти дивизионах МАС. Победители получают и уже использовали в Вене право выступить с большим докладом на ГА МАС. Победителям оказывается финансовая поддержка для участия в этом мероприятии. Рекомендуем следить за информацией на сайте МАС (<https://www.iau.org/>). Очень хорошие перспективы роста дает победа на конкурсе на Груберовскую стипендию. Победители конкурса получают до 50 000 долл. на поддержку своих исследований и, что намного важнее, очень существенное репутационное продвижение.

Еще одно новшество — введение статуса почетного члена МАС (Honorary Member of the IAU). Этот статус присваивается Генеральной ассамблеей начиная с 2018 г. (по рекомендациям национальных комитетов астрономов) людям, не являющимся профессиональными астрономами, но оказавшим весьма существенную поддержку развитию астрономии в своих регионах. Приятно, что среди шести почетных членов, избранных в Вене, есть россиянка. Это министр просвещения РФ — О. Ю. Васильева. Российские астрономы признательны Ольге Юрьевне за возвращение астрономии в школы, и это почетное членство — хороший знак признания.

## Заключение

На данный момент российская астрономия (прежде всего ее наблюдательная инфраструктура) отстает от мирового уровня. В целях выхода из этой ситуации проведена экспертиза проблемы и намечены наиболее перспективные инфраструктурные проекты. Для их реализации необходима поддержка государства. Но здесь нужна постоянная поддержка и соответствующая активность всех астрономов

(ибо «под лежащий камень...»). Необходимо также постоянно работать над усилением представительства России в МАС. Здесь многое зависит от активности и (хороших) амбиций самих астрономов.

Автор выражает благодарность всем членам Межведомственной рабочей группы, Экспертного совета ОФН по направлению «Астрономия, астрофизика, космические исследования» и членам Национального комитета российских астрономов, вместе с которыми была проведена большая работа, основные результаты этой работы представлены в данной статье.

## Библиографические ссылки

1. *Шустов Б. М.* О состоянии и перспективах развития наземной астрономии в России // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвящен. памяти акад. А. А. Боярчука : науч. тр. Ин-та астрономии РАН, 2018 г. — М. : Янус-К, 2018. — С. 422.
2. *Шустов Б. М., Длужневская О. Б., Малков О. Ю., Ковалева Д. А.* Российские астрономы в Международном астрономическом союзе // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвящен. памяти акад. А. А. Боярчука : науч. тр. Ин-та астрономии РАН, 2018 г. — М. : Янус-К, 2018. — С. 428.

## GAIA И СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

**Дж. Карраро**  
*Университет Падуи*

Космическая миссия Gaia служит движущей силой беспрецедентной революции в изучении нашей Галактики, ее структуры и эволюции. Конечной целью Gaia является понимание того, как наша Галактика — Млечный Путь — сформировалась в ее сегодняшнем виде, и получение ответа на фундаментальный вопрос о том, как формируются галактики. Это подразумевает осознание процесса происхождения и свойств Галактического балджа и бара, структуры Галактического диска и его спиральных ветвей, а также всего сложного многообразия звездных населений во всем Млечном Пути. Дополнительными целями исследования являются уяснение происхождения начальной функции масс и изучение внутренней динамики звездных скоплений, которые можно назвать базовыми кирпичиками формирования звездных систем. В своей лекции я расскажу о сегодняшнем статусе миссии Gaia, наиболее важных открытиях и о имеющихся ограничениях последнего доступного релиза ее данных.

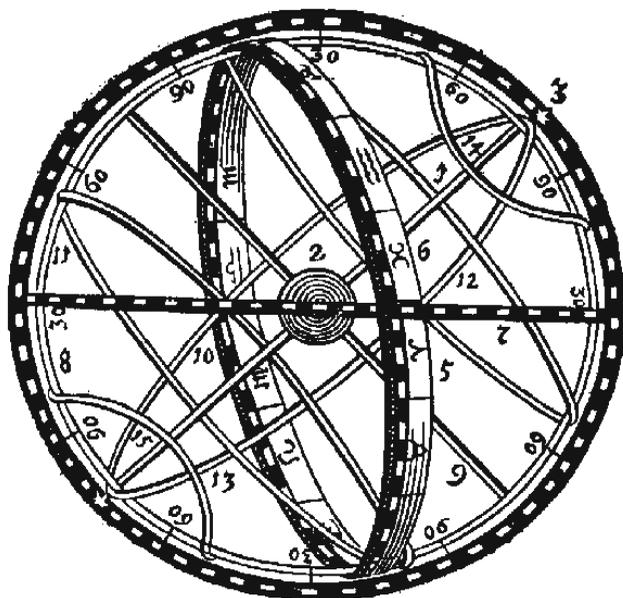
## GAIA AND THE GALACTIC STRUCTURE

**G. Carraro**  
*Padova University*

The Gaia satellite is generating a unprecedented revolution in the study of our own Galaxy and its structure and evolution. The Gaia ultimate goal is in fact to understand how the Milky Way was assembled the way we see it nowadays and, out of that, extract answer for the fundamental question of how galaxies form. This implies understanding the origin and properties of the Galactic bulge and bar, the structure of the disk and its spiral arms, and the complicated variety of stellar populations across the whole Milky Way. Side products are the origin of the Initial Mass Function and the internal dynamics of star clusters, which are the true seeds of stellar systems formation. In my lecture I will introduce Gaia actual status, the most important discoveries and the current limitations out of the last available data release.



# Студенческие доклады





# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОЙ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ПОВЕРХНОСТЬ АСТЕРОИДА

**Р. Р. Абдуллажанов, В. К. Ковальчук**

*Южно-Уральский государственный университет*

Посадка космического аппарата (КА) на поверхность астероида является одной из ключевых операций, непосредственно влияющих на выполнение общей программы полета, поскольку отказ посадочного устройства в целом или отдельных его элементов практически всегда приводит к возникновению аварийных ситуаций, которые связаны с негативными последствиями — невыполнением научных экспериментов.

## STUDY OF DYNAMIC PARAMETERS HARD LANDING SPACECRAFT ON ASTEROID SURFACE

**R. R. Abdullazhanov, V. K. Kovalchuk**

*South Ural State University*

Landing of a spacecraft on a surface of an asteroid is one of the key operations that directly affects overall mission performance. A failure of an entire lander or its individual elements almost inevitably leads to accidents, which are associated with negative consequences like a failure to perform scientific experiments.

В работе рассматривается динамика процесса посадки возвращаемого аппарата, начиная от момента первого контакта с грунтом поверхности астероида до полной остановки движения. Это конечное положение должно обеспечить дальнейшее функционирование КА.

Особенностью этапа посадки является гашение большой кинетической энергии, которой обладает спускаемый аппарат в момент контакта с поверхностью [1]. К моменту сближения с астероидом КА имеет некоторую остаточную скорость, которая и гасится в процессе движения и взаимодействия с поверхностью до полной остановки. В силу ряда факторов (погрешностей системы управления спуском, неточного знания ряда характеристик посадочной поверхности и др.) кинематические параметры КА лежат в некотором диапазоне [2].

В работе определен диапазон параметров движения КА, характеристик посадочной площадки (коэффициент трения опоры о грунт) и энергетических характеристик амортизатора, при которых спуск КА на поверхность астероида будет успешным, а также величина прижимающих усилий. Поверхность контакта считается идеально ровной.

В пакете MATLAB построена математическая модель продольного движения КА при посадке на небесное тело с малой гравитацией. В результате расчета процесса посадки с учетом жесткости грунта и прижимной двигательной установки получены зависимости между начальным значением вертикальной скорости, тягой прижимных ДУ и ускорениями [3].

### Библиографические ссылки

1. *Бусаев С. П.* Прогнозирование успешной посадки автоматической межпланетной станции на поверхность небесного тела в условиях неопределенности // *Космические исследования.* — 1987. — Т. 2. — С. 186—192.
2. *Воронин В. В.* Выбор энергетических характеристик амортизатора механического посадочного устройства возвращаемого космического аппарата // *Космонавтика и ракетостроение.* — 2013. — Т. 1, вып. 70. — С. 95—102.
3. *Казанцев В. П.* Методика определения параметров продольного движения космического аппарата при посадке на поверхность малого небесного тела // *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение».* — 2014. — Т. 1, вып. 94. — С. 26—35.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД В РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЯХ

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

Работа посвящена изучению населения двойных звезд в рассеянных звездных скоплениях. При этом исследуются распределение доли двойных систем в зависимости от интегральной звездной величины системы (от массы главного компонента) и распределение отношения масс компонентов двойной системы. Эти свойства населения двойных систем исследуются путем статистического сравнения моделей населения скопления, полученных при варьировании их параметров с диаграммой «звездная величина–показатель цвета» скопления NGC 2516, построенной по данным каталога Gaia DR2.

## AN INVESTIGATION OF THE BINARY SYSTEM POPULATION IN OPEN CLUSTERS

**O. I. Borodina, A. F. Seleznev**  
*Ural Federal University*

We investigate the properties of the binary system population in open star clusters. We study the distribution of the binary system fraction as a function of the integral stellar magnitude of the system (or of the mass of the system primary component). The properties of the binary population are investigated by statistical comparison of the cluster population models, obtained with the variation of their parameters, with the colour-magnitude diagram of NGC 2516, plotted using the data of Gaia DR2 catalogue.

# ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ В ОБЛАСТЯХ ВТОРИЧНЫХ РЕЗОНАНСОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СВЕТОВЫМ ДАВЛЕНИЕМ, В ОКРЕСТНОСТИ ОРБИТ СИСТЕМ ГЛОНАСС И GPS

В. Д. Гусев, И. А. Малютин  
*Уральский федеральный университет*

Исследована динамическая эволюция объектов в областях вторичных резонансов, обусловленных световым давлением, в окрестности орбит спутников глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Рассмотрены мультиплеты вторичных резонансов, соответствующих основным резонансам и субрезонансам  $i$ - и  $e$ -типа. Оценки больших полуосей орбит, соответствующих вторичным резонансам, получены аналитически. Положение вторичных резонансов в зависимости от отношения миделева сечения к массе уточнялось численным методом. Вторичные резонансы оказывают существенное влияние на динамическую эволюцию объектов, имеющих отношение миделева сечения к массе  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$  и более. Полученные результаты представляют интерес при описании орбитальной эволюции космического мусора.

## DYNAMICAL EVOLUTION IN REGIONS OF SECONDARY RESONANCES DUE TO SOLAR RADIATION PRESSURE IN THE VICINITY ORBITS OF THE GLONASS AND GPS SYSTEMS

V. D. Gusev, I. A. Malyutin  
*Ural Federal University*

We investigate the dynamical evolution of objects in the secondary resonances due to solar radiation pressure in the vicinity of orbits of the global navigation systems GLONASS and GPS satellites. The secondary resonances multiplets are considered that correspond to both main resonances and sub-resonances  $i$ - and  $e$ -types. The semi-major axes corresponding to secondary resonances are estimated analytically. The secondary resonance locations as a function of the area-to-mass ratio were improved numerically. The secondary resonances influence significantly the dynamical evolution of objects with an area-to-mass ratio  $10 \text{ m}^2/\text{kg}$  and more. The results will be useful to describe the orbital evolution of space debris.

Вторичные резонансы в окрестности геостационарной орбиты, обусловленные световым давлением, возникают вследствие рациональной соизмеримости между критическим аргументом основного резонанса и долготой Солнца [1, 2]. В работе исследуются области вторичных резонансов в окрестности орбит спутников глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Рассмотрены мультиплеты вторичных резонансов, соответствующие основным резонансам и субрезонансам  $i$ - и  $e$ -типа. 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 численно. Начальные значения долготы восходящего узла принимались равными 0, 90, 180, 270°. Отношение миделева сечения к массе варьировалось от малых значений (0.02, 0.2 м<sup>2</sup>/кг), соответствующих спутникам, до умеренных и больших (1, 10, 20, 30, 40 м<sup>2</sup>/кг), соответствующих космическому мусору. Орбитальная эволюция объектов моделировалась с помощью «Численной модели движения искусственных спутников Земли» [3] с учетом основных возмущающих факторов на интервалах времени 24 и 240 лет. Использовался интегратор Эверхарта 19-го порядка. Вторичные резонансы оказывают существенное влияние на динамическую эволюцию объектов, имеющих отношение миделева сечения к массе 10 м<sup>2</sup>/кг и более. Полученные результаты представляют интерес при описании орбитальной эволюции как активных спутников, так и космического мусора, а также при выборе параметров орбит для хранения космического мусора.

## Библиографические ссылки

1. Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Adv. Space Res. — 2009. — Vol. 43. — P. 1509–1526.
2. 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.
3. Бордовицына Т. В., Батурын А. П., Авдюшев В. А., Куликова П. В. Численная модель движения ИСЗ. Новая версия // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, вып. 12/2. — С. 60–65.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ ИЗБРАННЫХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

**П. Д. Ефремова**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

Фотометрические и спектральные наблюдения активных ядер галактик NGC 1275, NGC 3227, NGC 4151 проводились на 1.5-метровом оптическом телескопе РТТ-150 в обсерватории ТУБИТАК (Турция) в период 2011—2012 гг. Эти галактики с активными ядрами принадлежат к классу сейфертовских галактик. Сейфертовские галактики имеют в своем спектре эмиссионные линии, указывающие на движения ионизированного газа с большими скоростями из-за наличия сверхмассивных черных дыр в их ядрах. Проведена фотометрическая и спектральная обработка наблюдений. Измерены эквивалентные ширины спектральных линий. Выполнен поиск короткопериодической (1—10 суток) и долгопериодической (месяцы-годы) переменностей общей яркости и спектральных линий. Полученные результаты сопоставлены с оптическими и рентгеновскими данными, опубликованными в литературе.

## THE RESEARCH OF SELECTED ACTIVE GALACTIC NUCLEI'S PHOTOMETRIC AND SPECTRAL VARIABILITY

**P. D. Efremova**

*Kazan (Volga region) federal university*

Photometric and spectral observations of the active galactic nuclei NGC 1275, NGC 3227, and NGC 4151 are made with RTT-150 telescope in TUBITAK observatory (Turkey) during 2011—2012. These galaxies with active nuclei are Seyfert galaxies. Seyfert galaxies have emission lines in their spectra that show the motion of ionized gas at high velocities because of supermassive black holes in their nuclei. Photometric and spectral processing of the observations was made. Equivalent widths of the spectral lines were measured. A search of short-period (1—10 days) and long-period (month-years) variabilities of a total magnitude and spectral lines was performed. The results were compared with published optical and X-rays data.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕЛЕСКОПАХ КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

**Г. С. Жуклевич**

*Уральский федеральный университет*

В работе представлены измерения периодов вращения астероидов, наблюдаемых на телескопах Коуровской астрономической обсерватории. Использовался метод Ломба—Скаргла. Для некоторых астероидов были определены направления вращения.

## DETERMINATION OF ASTEROID ROTATION PERIODS OBSERVED ON THE TELESCOPES OF KOUROVSKAYA ASTRONOMICAL OBSERVATORY

**G. S. Zhuklevich**

*Ural Federal University*

This work provides measurements of the asteroids' rotation periods observed on the telescopes of Kourovskaya Astronomical Observatory. The Lomb-Scargle method was used. The directions of rotation were determined for some asteroids.

Одним из важнейших параметров астероида является период его вращения. Этот параметр фигурирует в таких важных вопросах, как эффект Ярковского, YORP-эффект и BYORP-эффект. Попытка определения периодов вращения астероидов в данной работе была проделана с помощью метода Ломба—Скаргла. Этот метод подходит для решения нашей задачи в связи с тем, что кривая блеска астероида не всегда представляет собой чистую синусоиду, кроме того, наблюдения производились весьма дискретными сериями. В добавок данный метод можно трактовать с точки зрения разных представлений — как с точки зрения МНК, так и с точки зрения анализа Фурье.

# ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА ЗАТМЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТИПА АМ HER

**А. И. Ихсанова**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

Представлена программа моделирования фотометрических затмений в системах типа АМ Her. Модель аккреционной струи описывается двумя составляющими: баллистической, определяемой силой притяжения компонентов, и дипольной, где движение газа управляется магнитным полем. Геометрия вторичного компонента описывается моделью полости Роша. Предполагается известное отношение масс компонентов  $q = M_2/M_1$ , наклон орбитальной плоскости  $i$ . Реализованный метод был применен к анализу кривой блеска затмения поляра V808 Aur.

## THE INTERPRETATION OF ECLIPSE LIGHT CURVES IN AM HER TYPE SYSTEMS

**A. I. Ikhsanova**

*Kazan (Volga Region) Federal University*

We have developed the code for modeling eclipse light curves in polars. The accretion stream model is described by two components: ballistic part defined by gravitational forces and dipole part where gas motions are controlled by the magnetic field. The geometry of the secondary is described by its Roche lobe. The orbital inclination  $i$  and mass ratio  $q = M_2/M_1$  are supposed to be known. The technique was implemented for the analysis of eclipse light curve of the polar V808 Aur.

Поляры (звезды типа АМ Her) представляют собой тесные двойные системы, состоящие из сильнонамагниченного белого карлика ( $B \sim 10\text{--}100$  МГс) и К-М звезды главной последовательности, заполняющей свою полость Роша. Вещество холодного компонента аккрецирует на поверхность белого карлика через точку Лагранжа  $L_1$  и при достижении альфвеновского радиуса движется вдоль линий магнитного поля в направлении магнитных полюсов белого карлика без образования аккреционного диска. В случае высокого наклона орбитальной плоскости к лучу зрения ( $i \sim 90^\circ$ ) аккреционная струя и

белый карлик затмеваются вторичным компонентом. Кривые блеска затмения зависят от геометрических параметров струи и распределения яркости по ней, поэтому анализ изменения блеска в затмениях имеет важное значение для изучения аккреции в полярах.

Разработана программа моделирования фотометрических затмений в системах типа AM Her. Модель аккреционной струи описывается двумя составляющими: баллистической, определяемой силой притяжения компонентов, и дипольной, где движение газа управляется магнитным полем. Геометрия вторичного компонента описывается моделью полости Роша. Предполагается известное отношение масс компонентов  $q = M_2/M_1$ , наклон орбитальной плоскости  $i$ .

Реализованный метод был применен к анализу кривой блеска затмения поляра V808 Aur.

# МЕТОД ОПОРНЫХ ОПЕРАТОРОВ В 3D И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КОРЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

И. А. Кондратьев<sup>1,2</sup>, С. Г. Моисеенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт космических исследований РАН, <sup>2</sup>Национальный  
исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

Метод опорных операторов хорошо проявил себя при численном моделировании различных двумерных астрофизических задач. В данной работе этот метод был расширен на трехмерный случай. Трехмерные сеточные аналоги непрерывных векторных операторов получены с использованием ячеечно-узловой аппроксимации. Трехмерное уравнение Пуассона для гравитационного потенциала решено в качестве тестовой задачи. Метод применен к моделированию анизотропной теплопроводности в коре нейтронной звезды.

## BASIC OPERATOR METHOD IN 3D AND HEAT TRANSFER MODELLING IN NEUTRON STAR CRUST

I. A. Kondratyev<sup>1,2</sup>, S. G. Moiseenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Space reseach institute RAS, <sup>2</sup>National reseach nuclear university  
“MEPhI”*

Basic operator method has proven itself well in numerical simulations of various two-dimensional astrophysical problems. In this work this method was extended to a 3D case. Grid analogues of continuous vector operators are obtained using the cell-node approximation. 3D Poisson equation for the Newtonian gravitational potential was solved as a test problem. Method is applied to anisotropic heat transfer simulation in a neutron star crust.

# ГАЗОВЫЕ ОБЛАКА В СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИКАХ

**Д. В. Козлова**

*Уральский федеральный университет*

Рассматривается движение газовых облаков внутри и за пределами галактического диска. Были выбраны две сейфертовские галактики II типа — Mrk78 и Mrk273. Проводится анализ данных наблюдений в эмиссионной линии [OIII] методом 3D-спектроскопии на 6-м телескопе САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри–Перо. Определены параметры пространственной ориентации облаков во внешних областях галактик. Мы пытаемся понять происхождение этих газовых облаков.

## GAS CLOUDS IN SEYFERT GALAXIES

**D. V. Kozlova**

*Ural Federal University*

We consider kinematics of gas clouds inside and outside of a galactic disk. Two Seyfert galaxies of the second type were chosen — Mrk78 and Mrk273. The analysis of observational data for the [OIII] emission line by 3D spectroscopy at the 6-m telescope of the SAO RAS with a Fabry-Perot interferometer is carried out. The parameters of the spatial orientation of clouds in the outer regions of galaxies are determined. We are trying to understand the origin of these gas clouds.

Мы анализировали поля лучевых скоростей ионизированного газа, описываемые в рамках модели круговых движений, с помощью которых можно определить пространственную ориентацию орбит газовых облаков во внешних областях галактик. Мы стараемся понять, каково происхождение этих газовых облаков, являются ли они результатом активности галактического ядра или же были захвачены из окружающей внегалактической среды.

Детальное изучение подсвеченных газовых облаков в отдельном круге галактик (в нашем случае — дисковых раннего типа) представляет интерес с точки зрения изучения изменения активности ядра со временем и процесса захвата газа галактикой извне. Рассматриваемые сейфертовские галактики II типа — Mrk78 и Mrk273 — активно

изучаются. Используя 3D-спектроскопию, мы получаем индивидуальный спектр для каждого пространственного элемента (хоть и в достаточно узком диапазоне) и можем подробнее изучить структуру и кинематику галактик, а также получить более детальную информацию об их газовых облаках по сравнению с традиционными методами спектроскопии с длинной целью.

# СРАВНЕНИЕ ФУНКЦИЙ БЛЕСКА РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ 2MASS И GAIA DR2

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

Функции блеска рассеянных скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714 построены методом “kernel density estimator”. Для построения были использованы данные каталога Gaia DR2. Для каждого скопления построены три функции блеска с разной степенью отбора по представленным в DR2 параллаксам и собственным движениям. Полученные результаты сравниваются друг с другом для определения числа звезд скопления, отброшенных при отборе, а также с функциями блеска, рассчитанными по данным 2MASS.

## COMPARISON OF THE OPEN CLUSTER LUMINOSITY FUNCTIONS BY THE DATA OF 2MASS AND GAIA DR2

М. V. Kulesh, A. F. Seleznev  
*Ural Federal University*

Luminosity functions of open clusters NGC 1912, NGC 2099, NGC 6834, NGC 7142, IC 2714 are obtained with the kernel density estimator. We used Gaia DR2 data for this. Three different luminosity functions have been obtained for each cluster with the different level of selection using the Gaia DR2 parallaxes and proper motions. These results are compared with other in order to determine the cluster star number, which have been rejected during selection. We also compare the results with the luminosity functions obtained by 2MASS data.

Функции блеска рассеянных звездных скоплений NGC 1912, NGC 2099, NGC 6834, NGC 7142 и IC 2714 построены по данным 2MASS [1] и Gaia DR2 [2] с помощью статистического метода [3], основанного на методе “kernel density estimator”. Функции блеска по Gaia DR2 были получены без отбора звезд, с отбором звезд по параллаксам и с отбором звезд по параллаксам и собственным движениям. Параметры отбора приведены в табл. 1. Предельные величины по 2MASS  $J_{\text{lim}} = 16^m$  и по Gaia DR2  $G_{\text{lim}} = 18^m$ .

Таблица 1. Параметры отбора звезд по параллаксам и собственным движениям

Скопление	NGC 1912	NGC 7142	IC 2714	NGC 2099	NGC 6834
$\pi$ , mas	0.87	0.4	0.7	0.7	0.2
$\Delta\pi$ , mas	0.7	0.2	0.7	0.7	0.2
$\mu_\alpha$ , mas/yr	1.62	-2.8	-7.6	1.95	-2.45
$\mu_\delta$ , mas/yr	-4.43	-1.3	2.6	-5.7	-5.15
$\Delta\mu$ , mas/yr	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Таблица 2. Числа звезд, полученные при интегрировании функций блеска

Скопление	NGC 1912	NGC 7142	IC 2714	NGC 2099	NGC 6834
$N$	1700±240	730±120	300±380	1340±180	280±260
$N_1$	1390±150	640±90	820±290	1430±200	270±220
$N_1/N$	0.82±0.14	0.89±0.19	2.8±3.7	1.07±0.21	0.96±1.22
$N_2$	1180±130	500±50	830±210	1430±210	330±150
$N_2/N$	0.70±0.12	0.69±0.13	2.8±3.7	1.07±0.21	1.20±1.25
$N_3$	540±60	370±20	750±90	1090±90	420±80
$N_3/N$	0.31±0.06	0.51±0.09	2.5±3.3	0.82±0.13	1.53±1.49

Результаты представлены в табл. 2.  $N$  — числа звезд, полученные при интегрировании функции блеска, построенной по 2MASS;  $N_1$  — числа звезд по функции блеска Gaia DR2 без отбора звезд;  $N_2$  — числа звезд по функции блеска Gaia DR2 с отбором звезд по параллаксам;  $N_3$  — числа звезд по функции блеска Gaia DR2 с отбором звезд по параллаксам и собственным движениям.

## Библиографические ссылки

1. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163–1183.
2. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. A1.
3. *Seleznev A. F.* Kernel density estimation in the study of star clusters // *Baltic Astronomy.* — 2016. — Vol. 25. — P. 267–274.

# ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЗКИХ К СОЛНЦУ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ЛИНДБЛАДОВСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

**В. В. Никифорова, А. Ф. Селезнев**

*Уральский федеральный университет*

Для нескольких близких к Солнцу рассеянных звездных скоплений проведен отбор вероятных членов скопления с использованием параллаксов, собственных движений и диаграммы «звездная величина – показатель цвета» на основе данных Gaia DR2. Получены координаты, скорости и дисперсия скоростей звезд в прямоугольной системе координат, связанной со скоплением (в Линдбладовской системе координат). На основе полученных данных проведено исследование строения, динамики и внутренней кинематики скоплений.

## AN INVESTIGATION OF OPEN CLUSTERS CLOSE TO THE SUN IN THE LINDBLAD COORDINATE SYSTEM

**V. V. Nikiforova, A. F. Seleznev**

*Ural Federal University*

We select the probable members of several open clusters close to the Sun with the use of stellar parallaxes, proper motions and the cluster colour-magnitude diagrams by the Gaia DR2 data. We obtain stellar coordinates, velocities and a velocity dispersion in the rectangular coordinate system, connected with the cluster (the Lindblad coordinate system). We use these data for an investigation of the cluster structure, dynamics and internal kinematics.

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СТРУЯ В ГАЛАКТИКЕ M87 С СУБПАРСЕКОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

**А. С. Никонов**

*Астрокосмический центр Физического института  
им. П. Н. Лебедева РАН, Государственный астрономический  
институт им. П. К. Штернберга МГУ*

Представлены результаты наблюдений релятивистской струи в M87 с субпарсекowym разрешением на 8 и 15 ГГц. Для получения РСДБ изображения были использованы 10 антенн Very Long Baseline Array, одна антенна Very Large Array (США) и радиотелескоп Effelsberg (Германия). Синтезированные карты демонстрируют высочайший динамический диапазон более 20 000:1. На них наблюдается поярчение к краю джета. Впервые полученная подробная карта распределения спектрального индекса демонстрирует уплощение радиоспектра вдоль хребта джета и у его края. Это может говорить о более высокой скорости течения плазмы в центре джета и о трении края выброса об окружающую среду. Данный вывод может служить поддержкой модели «хребет—оболочка» и объяснением эффекта поярчения к краю стратификацией вещества релятивистской струи. Измеренный спектр области малой интенсивности в направлении против джета говорит в пользу того, что это именно контрджет, а не оптически толстое начало джета.

---

© Никонов А. С., 2019

# HIGH-RESOLUTION STUDY OF THE INNER JET OF M87 AT 8 AND 15 GHz

**A. S. Nikonov**

*Astro Space Center Lebedev Physical Institute,  
Sternberg Astronomical Institute*

We present results of observation of a relativistic jet in M87 with sub-parsec resolution at 8 and 15 GHz. To obtain VLBI images, 10 Very Long Baseline Array antennas, one Very Large Array antenna (USA) and the Effelsberg telescope (Germany) were used. Synthesized images with a dynamic range higher than 20 000 : 1 clearly show a limb-brightened structure of the jet. A first reconstructed detailed spectral index map shows flattening of the spectrum along the spine of the resolved jet and at its edge. This may indicate hint at higher plasma flow velocity in the jet center and at friction between the jet edge and the surrounding material. This conclusion may support the “spine-envelope” model and explain the limb-brightening effect by the relativistic jet stratification. A measured spectrum of the faint feature in the direction of the counter jet proves that this is indeed the counter jet and not an optically thick jet origin.

# СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ДО ЗВЕЗД, ИОНИЗУЮЩИХ ТУМАННОСТИ

А. Н. Плотникова<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, <sup>2</sup>Астрономическая  
обсерватория УрФУ

В работе проведено сравнение методов определения расстояний до звезд, ионизирующих туманности. Исследована природа отклонения различных методов друг от друга.

## COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING DISTANCES TO STARS, IONIZING NEBULAE

A. N. Plotnikova<sup>1</sup>, A. M. Sobolev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, <sup>2</sup>Astronomical observatory UrFU

In this work methods for determining distances to stars, ionizing nebulae, are compared. The nature of deviation of different methods from each other is investigated.

В работе В. С. Аведисовой и Г. И. Кондратенко [1] представлен метод определения расстояний до звезд, ионизирующих туманности (далее — метод АК), и проведены оценки расстояний до 220 объектов. Список этих объектов включает далекие туманности, измерить расстояние до которых методом тригонометрических параллаксов невозможно. Для исследования точности этого метода нами были рассчитаны расстояния до звезд, ионизирующих диффузные туманности, по параллаксам, представленным в каталоге космического проекта Gaia. Для исследования точности определения расстояний методом АК проведено сравнение оценок расстояний, полученных методами параллаксов и АК (рис. 1). В исследовании мы ограничились выборкой звезд со звездными величинами ярче  $11^m$ , поскольку ошибки измерения параллаксов для более слабых звезд велики. Сравнение с результатами Gaia показывает, что метод определения расстояний АК за небольшими исключениями имеет точность не хуже 40 % на расстояниях до 4 кпк. Для объектов из каталога АК с расстояниями более 5 кпк отличие оценок расстояний меньше 30 %. По результатам статистического исследования можно сделать вывод, что относительная ошибка метода АК несколько уменьшается с

увеличением расстояния до объекта и сравнима с точностью данных о параллаксах в DR2 Gaia (рис. 2).

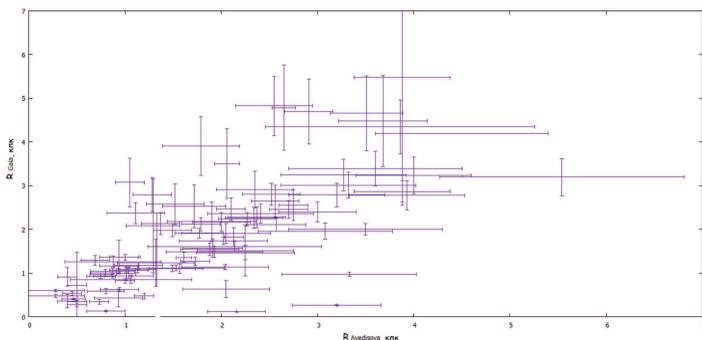


Рис. 1. Сравнительная диаграмма для расстояний, определенных методом, представленным в статье В. С. Аведисовой и Г. И. Кондратенко, и на основе параллаксов из каталога космического телескопа Gaia

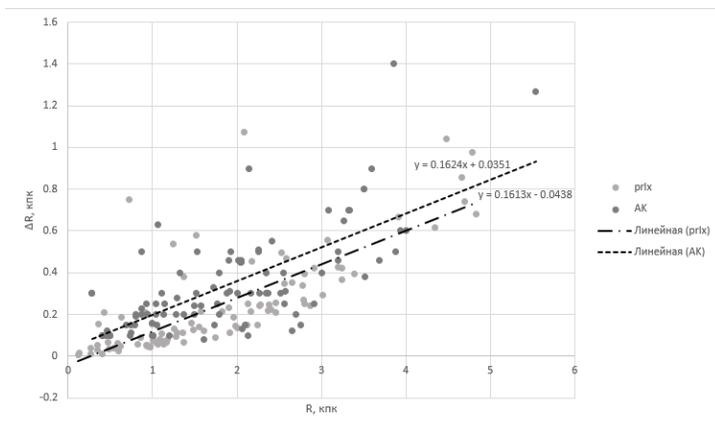


Рис. 2. Зависимость абсолютной ошибки определения расстояния от расстояния. Прямые являются линиями тренда (построены по МНК)

## 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.



# Научные сообщения





## СУБДОПЛЕРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ИЗОТОПОЛОГОВ МОЛЕКУЛ NH<sub>2</sub>D И HC<sub>3</sub>N

Р. А. Алексеев<sup>1,2</sup>, А. В. Лапинов<sup>2</sup>, Г. Ю. Голубятников<sup>2</sup>

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

*им. Н. И. Лобачевского,* <sup>2</sup>*Институт прикладной физики РАН*

При помощи созданного в ИПФ РАН субдоплеровского спектрометра выполнены исследования спектров молекул NH<sub>2</sub>D, <sup>15</sup>NH<sub>2</sub>D, а также <sup>13</sup>C и <sup>15</sup>N, изотопологов HC<sub>3</sub>N. Благодаря измерениям на основе провала Лэмба экспериментальные точности частот переходов в диапазоне 85–503 ГГц улучшены в сравнении с традиционной спектроскопией примерно на два порядка. Полученные данные представляют большой интерес при исследованиях физических параметров в областях звездообразования и при поиске возможных вариаций фундаментальных констант. Молекула NH<sub>2</sub>D представляет особый интерес из-за инверсионно-вращательных переходов, лежащих в миллиметровой области спектра и обладающих различной чувствительностью к вариации отношения массы электрона к массе протона.

## SUB-DOPPLER INVESTIGATIONS OF THE SPECTRA OF MOLECULES ISOTOPOLOGUES NH<sub>2</sub>D AND HC<sub>3</sub>N

R. A. Alekseev<sup>1,2</sup>, A. V. Lapinov<sup>2</sup>, G. Yu. Golubyatnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics RAS*

With the help of the sub-Doppler spectrometer created at IAP RAS, the spectra of molecules of once-deuterated ammonia NH<sub>2</sub>D, including <sup>15</sup>NH<sub>2</sub>D, as well as <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N isotopologues of the molecule HC<sub>3</sub>N, were studied. Due to measurements based on the Lamb dip, the experimental accuracy of transition frequencies in the range of 85–503 GHz is improved by comparing conventional spectroscopy by approximately two orders of magnitude. The data obtained are of great interest both in studies of physical parameters in star-forming regions and in the search for possible variations of the fundamental constants. The molecule of partially deuterated ammonia NH<sub>2</sub>D is of particular interest because of the inversion-rotational transitions that lie in the mm spectral range and have different sensitivity to variations in the ratio of the electron mass to the proton mass.

Нами были получены зависимости смещения частоты и ширины провала Лэмба от давления для перехода  $J = 52-51$  на частоте 470 ГГц в изотопологе молекулы  $\text{HC}_3\text{N}$  при девиации сигнала ЛОВ 120 и 60 кГц. Установлено, что при уменьшении давления примерно до 1 мТор точность определения центра линии растет. И только при малых давлениях (меньше 1 мТор) точность нелинейных субдоплеровских измерений ухудшается.

Также были проведены исследования зависимости ширины провала Лэмба от интенсивности излучения ЛОВ. В результате было получено, что ширина провала Лэмба прямо пропорциональна давлению и определяется в основном соударениями между молекулами и уширением линий за счет излучения ЛОВ.

Наши исследования показали, что, несмотря на высокую точность измерений с провалом Лэмба, частоты переходов в молекулах однократно дейтерированного аммиака и изотопологах  $\text{HC}_3\text{N}$  сильно зависят как от давления, так и от мощности ЛОВ.

Все лабораторные измерения были выполнены благодаря поддержке РФФИ (проект № 16-02-00761). Анализ данных поддержан грантом РНФ (проект № 17-12-01256).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ АСТЕРОИДОВ, ВЕДУЩИХ К СОУДАРЕНИЮ С ЗЕМЛЕЙ

**И. А. Баляев**

*Санкт-Петербургский государственный университет*

Рассматривается форма приводящих к соударению областей в шестимерном пространстве координат и скоростей.

## INVESTIGATION OF ASTEROID INITIAL DATA REGIONS, LEADING TO A COLLISION WITH THE EARTH

**I. A. Balyaev**

*St Petersburg State University*

A shape of regions leading to a collision with the Earth is considered in the six-dimensional space of coordinates and velocities.

В настоящее время известно около 20 тыс. астероидов, сближающихся с Землей. Орбиты большинства из них известны со сравнительно большой погрешностью. Во множестве возможных координат и скоростей опасных астероидов существуют области, ведущие к соударению с Землей, или щели. На кафедре небесной механики СПбГУ был разработан метод, позволяющий находить щели путем варьирования одной переменной. Результаты хорошо согласуются с полученными в JPL NASA. В настоящем исследовании делается попытка вычислить форму щели в шестимерном пространстве координат и скоростей. Для примера использованы наиболее крупные щели, ранее найденные на кафедре небесной механики СПбГУ для астероидов: 2004 MN<sub>4</sub>, 2008 EX<sub>5</sub>, 2013 XK<sub>22</sub>. Приводятся сечения полученных областей различными плоскостями и аналитические аппроксимации соответствующих зависимостей. Получаемые результаты можно использовать для оценки величины изменения скорости, необходимой для увода астероида от соударения с Землей.

# МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ В НАПРАВЛЕНИИ НА V 645 Cyg И LkH $\alpha$ 234

А. П. Бисярина<sup>1</sup>, А. М. Соболев<sup>1</sup>, С. Ю. Горда<sup>1</sup>,  
А. М. Татарников<sup>2</sup>, В. И. Шенаврин<sup>2</sup>, А. Aberfelds<sup>3</sup>,  
I. Shmeld<sup>3</sup>, А. М. Толмачев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета,* <sup>2</sup>*Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,* <sup>3</sup>*Ventspils University of Applied Sciences,*

<sup>4</sup>*Пушчинская радиоастрономическая обсерватория*

Переменность мазеров может быть связана с аккрецией вещества на молодой звездный объект. Среди молодых объектов, связанных с мазерными источниками, V 645 Cyg и LkH $\alpha$  234 — немногие из тех, излучение которых проявляется в оптическом диапазоне. Исследована их инфракрасная (ИК) и оптическая фотометрическая переменность, переменность линий оптической части спектра (H $\alpha$ ), а также возможная корреляция с мазерной активностью.

## MASER EMISSION, SPECTRAL AND PHOTOMETRIC VARIABILITY OF V 645 Cyg AND LkH $\alpha$ 234

А. P. Bisyarina<sup>1</sup>, А. M. Sobolev<sup>1</sup>, S. Yu. Gorda<sup>1</sup>,  
А. M. Tatarnikov<sup>2</sup>, V. I. Shenavrin<sup>2</sup>, А. Aberfelds<sup>3</sup>,  
I. Shmeld<sup>3</sup>, А. M. Tolmachev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Astronomical Observatory of Ural Federal University,* <sup>2</sup>*Sternberg Astronomical Institute,* <sup>3</sup>*Ventspils University of Applied Sciences,*

<sup>4</sup>*Pushchino Radio Astronomy Observatory*

Maser variability in young stellar objects can be related to episodic accretion outbursts. Among the young objects associated with maser sources, V 645 Cyg and LkH $\alpha$  234 are few of those that can be investigated in the optical range. We report their infrared and optical photometric variability, variation of optical spectral lines (H $\alpha$ ), and check for their possible correlation with the maser activity.

В 2015—2016 гг. для окрестностей объектов S255IR NIRS 3 и NGC 6334I-MM1 во время вспышки мазерного излучения впервые

---

© Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю., Татарников А. М., Шенаврин В. И., Aberfelds A., Shmeld I., Толмачев А. М., 2019

получены наблюдения сопутствующей ИК вспышки, вероятно, связанной с явлением эпизодической аккреции. В связи с этим нами был запущен ИК мониторинг ряда молодых объектов на инструментах ГАИШ: 2.2-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) и 1.25-метровом телескопе Крымской астрономической станции (КАС). Наблюдения сопровождаются мониторингом мазеров: в линии метанола 6.7 ГГц на 16-метровом телескопе в Вентспилсе (Латвия), в линии воды 22 ГГц на телескопе РТ-22 Пушчинской радиоастрономической обсерватории. Получены данные, свидетельствующие о связи переменности в фильтре К и изменении мазерного излучения (в частности, для G025.65+1.05, G107.298+5.639).

V 645 Cyg ассоциируется с квазипериодическим метанольным мазером (период около 180–190 дней), а также водяным мазером. LkH $\alpha$  234 ассоциируется с водяным мазером. Мониторинг звезд в фильтрах J, H, K, L, M ведется на фотометре КАС. В отличие от многих молодых объектов, связанных с мазерными источниками, эти две звезды (классифицируемые как звезды Ве Хербига) видны не только в ИК, но и в оптическом диапазоне; их мониторинг проводится в Коуровской обсерватории. Несмотря на сравнительно небольшую яркость ( $V \approx 13^m$ ), наличие интенсивных эмиссионных линий в спектрах делает их доступными для исследования на 1.2-метровом телескопе с высоким спектральным разрешением. Так, в спектре звезды V 645 Cyg меняется эквивалентная ширина линии H $\alpha$ ; в спектре звезды LkH $\alpha$  234 заметно изменяется ее профиль.

Работа А. П. Бисяриной по обработке и анализу спектральных данных и данных ИК наблюдений выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00314. Работа А. М. Соболева и А. П. Бисяриной по организации и анализу сопутствующих мазерных наблюдений, а также работа С. Ю. Горды по получению и обработке данных оптических наблюдений выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 18-12-00193).

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Д. З. Вибе<sup>1</sup>, А. В. Столяров<sup>2</sup>, В. Н. Варакин<sup>2</sup>,  
М. С. Мурга<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии РАН,*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет*

Исследовано влияние различных особенностей поверхностных фотопроцессов, не учитываемых в современных астрохимических моделях, на результаты моделирования молекулярной эволюции протопланетных дисков. Показано, что эффекты, связанные с особенностями фотохимии адсорбированных молекул, могут более чем на порядок величины изменять теоретические содержания ряда органических молекул.

## SOME FEATURES OF CHEMICAL PROCESSES IN PROTOPLANETARY DISKS

D. S. Wiebe<sup>1</sup>, A. V. Stolyarov<sup>2</sup>, V. N. Varakin<sup>2</sup>, M. S. Murga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy of the RAS,* <sup>2</sup>*Moscow State University*

We study the influence of various features of surface photoprocesses, which are not taken into account in modern astrochemical models, on results of modeling of protoplanetary disk molecular evolution. It is shown that effects related to distinct features of adsorbed molecule photochemistry may change theoretical abundances of some organic molecules by more than an order of magnitude.

Результаты численного моделирования химических процессов в протопланетных дисках показывают, что значительную роль в них играют поверхностные фотопроцессы, происходящие под воздействием ультрафиолетового излучения. Важно, что эти процессы могут происходить не только в атмосфере диска (где температура пылинок, вероятно, слишком высока для образования заметных мантей), но и ближе к темной срединной плоскости, где слабое ультрафиолетовое поле индуцируется в результате взаимодействия космических лучей и рентгеновского излучения с молекулярным водородом [1].

В современных астрохимических базах данных поверхностные фотопроцессы, как правило, учитываются фактически простым дублированием газофазных фотопроцессов. Между тем, хотя при физической адсорбции структура молекулы существенно не меняется, наличие поверхности приводит к заметным изменениям эффективности и каналов фотодиссоциации по сравнению с изолированной молекулой газа. Основную роль играет быстрая колебательная релаксация возбужденных молекул за счет эффективной передачи энергии фононной структуре твердого тела. Также возможны электронная дезактивация возбужденных молекул с помощью поверхностных дефектов и усиление поглощения молекулой вследствие локального усиления действующего поля вблизи шероховатостей поверхности [2, 3].

В данной работе описано влияние особенностей фотопроцессов с участием адсорбированных молекул, выявленных по результатам лабораторных исследований, на результаты моделирования химической эволюции протопланетных дисков. Показано, что учет описанных выше эффектов может приводить к существенным изменениям в модельных содержаниях ряда органических молекул, в частности, бензола.

Работа А. Столярова, В. Варакина и М. Мурги по лабораторному исследованию особенностей поверхностных химических процессов выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-13-00269.

## Библиографические ссылки

1. *Prasad S. S., Tarafdar S. P.* UV radiation field inside dense clouds - Its possible existence and chemical implications // *Astrophys. J.* — 1983. — Vol. 267. — P. 603–609.
2. *Varakin V N.* Multiple photon excitation of adsorbed toluene by KrF laser // *Laser Physics.* — 2016. — Vol. 26, № 1. — P. 016001.
3. *Varakin V N.* Photolysis of adsorbed benzene at 248 nm // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* — 2016. — Vol. 356, № 1. — P. 298–303.

# О ХАРАКТЕРИСТИКАХ СБЛИЖЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

**Е. А. Гильдебрант**

*Санкт-Петербургский государственный университет*

Рассматриваются характеристики сближений опасных астероидов с Землей и Луной. Траектории получены с использованием программ, разработанных на кафедре небесной механики СПбГУ.

## ABOUT THE CHARACTERISTICS OF THE APPROACHES TO THE EARTH HAZARDOUS ASTEROIDS

**E. A. Gildebrant**

*St Petersburg State University*

The characteristics of hazardous asteroids approaches to the Earth and the Moon are considered. The trajectories were obtained using programs developed at the Department of celestial mechanics of St. Petersburg state University.

Исследуются сближения с Землей опасных астероидов, в том числе на траекториях, ведущих к соударениям с ней. Оказывается, что траекториям соударения соответствуют более тесные сближения, чем номинальным траекториям. Появляется возможность использовать эффект гравитационного маневра для увода астероида от соударения с Землей. Это важно, поскольку увод от соударения астероида размером в несколько сотен метров с использованием современных космических средств часто нереализуем, если не использовать атомную энергию. Приводятся возможные соударения с Землей астероида 2008 EX<sub>5</sub>, полученные по номинальным орбитам NASA и NEODyS, а также сближения на траекториях, ведущих к найденным соударениям. Сравнение результатов, полученных по номинальным орбитам NASA и NEODyS, свидетельствует, что сближения на траекториях, ведущих к соударению, мало зависят от номинальной орбиты и могут характеризовать эти опасные траектории, в то время как сближения на номинальных орбитах отличаются существенно. Сближения представляют интерес также потому, что способствуют обнаружению ранее неизвестных, а также потерянных объектов и

уточнению орбит. Получены и анализируются также сближения на траекториях, ведущих к соударению с Луной, найденных с использованием номиналов NASA и NEODyS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 18-12-00050). Вычисления проводились с использованием компьютерного кластера Вычислительного центра.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СВОЙСТВА НЕЙТРАЛЬНОГО АТОМАРНОГО ВОДОРОДА В КОМПЛЕКСЕ S254—S258

П. М. Землянуха<sup>1</sup>, Д. Д. Садова<sup>1</sup>, И. И. Зинченко<sup>1</sup>,  
Д. К. Оджа<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН,*

<sup>2</sup>*Институт фундаментальных исследований Tata*

В работе представлены оценки физических свойств нейтрального атомарного водорода по данным наблюдений с обсерваторий GMRT и обзора GALFA-HI DR2 Аресибо. Наблюдаются признаки оболочки из нейтрального атомарного газа вокруг ионизированных областей S255, S256, S257. Приводятся значение лучевой концентрации газа. Для анализа данных обзора применяется метод независимых гауссовых компонентов. Идентифицируются компоненты поглощения и эмиссии в линии 21-см по данным GMRT и Аресибо.

## DISTRIBUTION AND PROPERTIES OF NEUTRAL ATOMIC HYDROGEN IN COMPLEX S254-S258

P. M. Zemlyanukha<sup>1</sup>, D. D. Sadova<sup>1</sup>, I. I. Zinchenko<sup>1</sup>,  
D. K. Ojha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of applied physics RAS,*

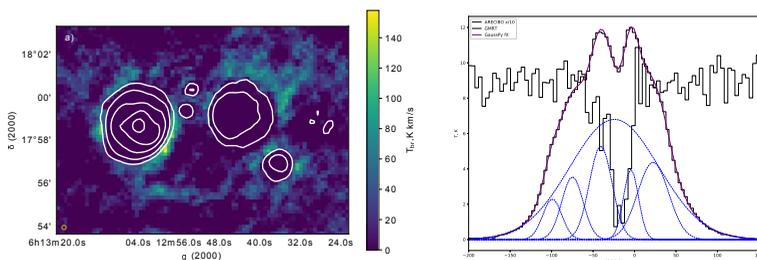
<sup>2</sup>*Tata institute of fundamental research*

In this paper we present the physical properties of neutral atomic hydrogen according to observational data from our GMRT observatories and the GALFA-HI DR2 Arecibo survey. There are signs of a neutral gas shell around the ionized regions S255, S256, S257. Gas column density estimates are given. To analyze the survey data, the method of independent Gaussian components is used. Absorption and emission features are identified in the GMRT and Aresibo 21-cm line.

В работе впервые представлены результаты наблюдений 21-см линии на обсерватории GMRT 2017 г. совместно с анализом данных обзора GALFA DR2 Аресибо [1]. Данные GMRT получены 24.01.2017. Наблюдения проводились на частоте 1 422.484 МГц с разрешением в 8.138 кГц в полосе 4.166 МГц. Использовались пять калибровочных

источников: 3C147, 3C138, 3C286 (потока) и 0632+103, 0739+106 (фазы). Координаты фазового центра при наблюдении S255 были RA  $06^h 12^m 53.7998^s$ , DEC  $+17^\circ 59' 22.1''$ ). Разрешение  $3'' \times 4''$ , PA =  $45^\circ$ , RMS  $\approx 1.25$  mJy/beam.

На рисунке слева приведено изображение нулевого момента линии по данным GMRT. Прослеживается кольцеобразная структура в окрестности ионизированных областей, которая, по всей видимости, является оболочкой НII области. На рисунке справа приведен спектр линии в направлении на ультракомпактную НII область S255-1 по данным GMRT и GALFA. Также проведена оценка лучевой концентрации водорода в линии поглощения и эмиссии аналогично [2], используя метод независимых гауссовых компонентов [3].



Изображение нулевого момента в линии 21 см, контуры — континуум (1, 4, 10, 16, 20 K) GMRT (слева). Спектр в направлении  $6^h 12^m 53.64^s$ ,  $18^\circ 00' 26.8''$  со вписанными независимыми гауссовыми компонентами (справа)

Обработка данных проведена при поддержке гранта РФФИ 17-52-45020 ИНД\_а. Анализ методом НГК и извлечение физических параметров — при поддержке РФФ 17-12-01256.

## Библиографические ссылки

1. Peek J. E. G., Babler B. L., Zheng Y. et al. The GALFA-H I Survey Data Release 2 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2018. — Vol. 234. — P. 2.
2. Saha P., Roy N., Bhattacharya M. On estimating the atomic hydrogen column density from the H I 21 cm emission spectra // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 480. — P. L126–L130. 1807.11497.
3. Lindner R. R., Vera-Ciro C., Murray C. E. et al. Autonomous Gaussian Decomposition // *Astron. J.* — 2015. — Vol. 149. — P. 138. 1409.2840.

## ПОВЕРХНОСТНАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД СКОПЛЕНИЯ ЯСЛИ ПО ДАННЫМ МИССИИ K2

**Е. С. Калиничева<sup>1</sup>, И. С. Саванов<sup>1</sup>, Е. С. Дмитриенко<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга*

Представлены оценки доли видимой поверхности звезды, занимаемой пятнами (параметр  $S$ ) для 674 звезд скопления Ясли возрастом 650 млн лет. Произведено сравнение с параметром  $S$  для звезд скопления Плеяды возрастом 125 млн лет. Представлена эволюция поверхностной активности звезд разных масс за 500 млн лет. Произведено сравнение периодов вращения и параметров запятненности звезд солнечных масс этих скоплений с соответствующими параметрами современного Солнца.

## SURFACE ACTIVITY OF STARS IN THE PRAESEPE CLUSTER OBSERVED BY THE MISSION K2

**E. S. Kalinicheva<sup>1</sup>, I. S. Savanov<sup>1</sup>, E. S. Dmitrienko<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, <sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University*

We present estimations of spottedness parameters  $S$  (the fraction of the visible surface of the star occupied by spots) of 674 stars in the Praesepe Cluster (age 650 Myr). Compared with parameters  $S$  of stars in the Pleiades Cluster (age 125 Myr) they reveal surface activity evolution of stars with different masses. We also present estimation of rotation periods and spottedness parameters of sun-like stars from both clusters compared with contemporary Sun properties.

Пятна на поверхности звезд помимо Солнца были открыты в середине прошлого века. Наблюдение за эволюцией этих пятен на различных временных интервалах позволяет делать выводы о циклах активности, дифференциальности вращения, крупномасштабной структуре магнитного поля звезд. Перечисленные характеристики важны для понимания механизма звездного и солнечного динамо, а также для разработки новых теоретических моделей.

Продолжение основной миссии космического телескопа “Kepler” — K2 позволило получить недоступные ранее высокоточные фотометрические данные звезд молодых скоплений, таких как Плеяды, Гиады и Ясли. Произведенные на основе этих данных оценки площади поверхности пятен позволяют судить об уровне активности звезд разных возрастов, о зависимости запятненности от периода вращения и массы звезды. Особенный интерес представляет сравнение активности звезд с массами, близкими к солнечной. В работе [1] была впервые получена зависимость пятенно-образовательной активности (параметр  $S$ ) от массы для большого числа (более восьми сотен) звезд одинакового возраста (скопление Плеяды). В работе [2] соответствующие оценки получены для порядка 50 звезд.

В настоящей работе [3] на основе данных по скоплению Ясли [4] получены оценки параметра пятенно-образовательной активности  $S$ . Также произведено сравнение полученных оценок с соответствующими величинами для более молодого скопления Плеяды. Полученные оценки уровня поверхностной активности двух звездных скоплений разных возрастов (Плеяды и Ясли) дают возможность утверждать, что наблюдается устойчивая тенденция к снижению активности звезд с возрастом, что согласуется с существующими теоретическими представлениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17–52–45048.

## Библиографические ссылки

1. *Savanov I. S., Dmitrienko E. S.* Spots and activity of Pleiades stars from observations with the Kepler Space Telescope (K2) // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 996–1002.
2. *Savanov I. S., Dmitrienko E. S.* Spots and the Activity of Stars in the Hyades Cluster from Observations with the Kepler Space Telescope (K2) // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 61. — P. 238–242.
3. *Savanov I. S., Kalinicheva E. S., Dmitrienko E. S.* The Spots and Activity of Stars in the Beehive Cluster Observed by the Kepler Space Telescope (K2) // *Astronomy Reports.* — 2018. — Vol. 62. — P. 352–358.
4. *Douglas S. T., Agueros M. A., Covey K. R., Kraus A.* Poking the Beehive from Space: K2 Rotation Periods for Praesepe // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 842. 1704.04507.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЛАПСА МАГНИТНЫХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ И ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ

Н. С. Каргальцева<sup>1</sup>, С. А. Хайбрахманов<sup>1,2</sup>, А. Е. Дудоров<sup>1</sup>

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

Численно исследуется образование первичных протозвездных дисков в результате коллапса вращающихся протозвездных облаков с магнитным полем. Расчеты проводятся с помощью двумерного МГД кода Enlil с учетом вращения и магнитного поля. Рассматриваются сферически-симметричные облака с массой ( $M_0 = 10M_\odot$ ), начальной плотностью ( $n_0 = 10^3 - 10^5 \text{ см}^{-3}$ ) и температурой  $T = 20 \text{ К}$ . В качестве основных параметров, характеризующих состояние протозвездного облака, используются отношения тепловой  $\varepsilon_{\text{tg}}$ , магнитной  $\varepsilon_{\text{mg}}$ , вращательной  $\varepsilon_{\Omega g}$  энергий к модулю гравитационной энергии. Данные параметры рассмотрены в диапазоне значений ( $0.2 \leq \varepsilon_{\text{tg}} \leq 0.9$ ), ( $0 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.7$ ), ( $0 \leq \varepsilon_{\Omega g} \leq 0.04$ ). Всего выполнено 16 расчетов.

Определяется зависимость характеристик первичных протозвездных дисков от начальных параметров облака. Расчеты показывают, что при умеренном магнитном поле ( $0.08 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.2$ ) перепад плотности в центре диска в расчетах с вращением меньше в 2–3 раза, чем в расчетах без вращения. При ( $0.3 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.7$ ) образуется геометрически тонкий первичный протозвездный диск с отношением толщины диска к его радиусу  $z/r \leq 0.1$ . Во всех остальных рассмотренных расчетах ( $0.2 \leq z/r \leq 0.6$ ). Вращение увеличивает геометрическую толщину первичного диска.

# SIMULATION OF THE COLLAPSE OF MAGNETIC PROTOSTELLAR CLOUDS AND FORMATION OF PSEUDO-DISKS

**N. S. Kargaltseva<sup>1</sup>, S. A. Khaibrakhmanov<sup>1,2</sup>, A. E. Dudorov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Chelyabinsk State University, <sup>2</sup>Ural Federal University*

We study numerically the formation of primary protostellar disks as a result of the collapse of rotating protostellar clouds with a magnetic field. The calculations are carried out using the two-dimensional MHD code Enlil, taking into account the rotation and magnetic field. We consider homogeneous spherically symmetric clouds with initial characteristics:  $M_0 = 10M_\odot$ ,  $n_0 = 10^3\text{--}10^5\text{ cm}^{-3}$ ,  $T = 20\text{ K}$ . The main parameters characterizing the state of the protostellar cloud are the ratios of thermal  $\varepsilon_{\text{tg}}$ , magnetic  $\varepsilon_{\text{mg}}$ , rotational  $\varepsilon_{\Omega\text{g}}$  energies, and modulus of gravitational energy. These parameters are considered in the range of values:  $(0.2 \leq \varepsilon_{\text{tg}} \leq 0.9)$ ,  $(0 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.7)$ ,  $(0 \leq \varepsilon_{\Omega\text{g}} \leq 0.04)$ . We performed 16 simulations in total.

The dependence of the characteristics of the primary protostellar disks on the initial parameters of the cloud is determined. Calculations show that with a moderate magnetic field of  $(0.08 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.2)$ , the density difference in the center of the disk in calculations with rotation is 2—3 times less than in calculations without rotation. At  $(0.3 \leq \varepsilon_{\text{mg}} \leq 0.7)$ , a geometrically thin primary protostar disk is formed with the ratio of the thickness of the disk to its radius  $z/r \leq 0.1$ . In all other considered calculations  $(0.2 \leq z/r \leq 0.6)$ . Rotation increases the geometric thickness of the primary disk.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОЙ ЭВОЛЮЦИИ  
ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА  
С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ  
КОНВЕКТИВНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ОБЛАСТЕЙ**

**Л. А. Максимова, Я. Н. Павлюченков, А. В. Тутуков**  
*Институт астрономии Российской академии наук*

Актуальной проблемой в изучении протопланетных дисков является вопрос о механизме переноса углового момента. Для разрешения этого вопроса была предпринята попытка изучить условия возникновения конвекции в аккреционном диске. С помощью модели вязкой эволюции диска и расчета вертикальной структуры исследованы эволюция кеplerовского диска и его морфология.

**SIMULATION OF VISCOUS PROTOPLANETARY DISK  
EVOLUTION WITH CONVECTIVELY UNSTABLE  
REGIONS**

**L. A. Maksimova, Ya. N. Pavlyuchenkov, A. V. Tutukov**  
*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

A topical problem in the study of protoplanetary disks is the question of the mechanism of transfer of angular momentum. To resolve this issue, an attempt was made to study the conditions for the occurrence of convection in the accretion disk. Using the model of viscous evolution of the disk and the calculation of the vertical structure, the evolution of the Keplerian disk and its morphology are investigated.

Изучение протопланетных дисков вокруг молодых звезд представляет огромный интерес. Действительно, звезда большую часть массы накапливает в результате аккреции из околозвездного диска, т. е. формирование звезды неразрывно связано с эволюцией диска. В свою очередь, естественным результатом эволюции околозвездного диска является планетная система. Несмотря на большие наблюдательные и теоретические достижения в изучении протопланетных дисков, многие вопросы физики аккреционных дисков окончательно не решены. В частности, актуальным является вопрос о механизме переноса углового момента. Основным подходом для описания аккреции в диске является формализм турбулентной вязкости, однако

---

© Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н., Тутуков А. В., 2019

механизм турбулизации течения до сих пор является дискуссионным. Одним из механизмов возникновения турбулентности может быть конвекция. В данной работе изучаются условия возникновения конвекции и крупномасштабная эволюция кеплеровского диска в ее присутствии.

В представленной работе эволюция кеплеровского диска моделируется с помощью уравнения Прингла [1], описывающего изменение поверхностной плотности со временем под действием вязкости. Одновременно с этим рассчитывается вертикальная структура диска, т. е. распределения плотности и температуры, в рамках модели, представленной в работе [2]. При расчете вертикальной структуры диска учитываются нагрев диска излучением звезды, межзвездным излучением, а также аккреционный нагрев. При этом предполагается, что диск является гидростатически-равновесным в вертикальном направлении. Основным фактором, управляющим эволюцией диска в рамках данной модели, является зависимость коэффициента вязкости от радиуса. Значение данного коэффициента вычисляется локально, в зависимости от градиента угловой скорости и условия конвективной устойчивости на данном радиусе. Представлены результаты расчета глобальной эволюции диска и морфологии диска в рамках данного подхода.

## Библиографические ссылки

1. *Pringle J. E.* Accretion discs in astrophysics // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1981. — Vol. 19. — P. 137–162.
2. *Vorobyov E. I., Pavlyuchenkov Y. N.* Improving the thin-disk models of circumstellar disk evolution. The 2+1-dimensional model // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 606. — P. A5. 1706.00401.

# СООТНОШЕНИЕ С/О В ГАЗОВОЙ И ЛЕДЯНОЙ ФАЗЕ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Т. С. Молярова<sup>1</sup>, В. В. Акимкин<sup>1</sup>, Д. З. Вибе<sup>1</sup>,  
Д. А. Семенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии РАН*

<sup>2</sup>*Институт астрономии Общества Макса Планка*

Соотношение содержаний углерода и кислорода является важным параметром, определяющим химический состав околозвездного протопланетного диска. В данной работе проводится астрохимическое моделирование ансамбля протопланетных дисков. Определяется распределение по диску соотношения С/О в газовой и ледяной фазе в зависимости от физических параметров диска. Показано, что резкое изменение С/О происходит в окрестности линий льдов основных летучих соединений.

## C/O RATIO IN GAS AND ICE COMPONENTS OF PROTOPLANETARY DISKS

T. S. Molyarova<sup>1</sup>, V. V. Akimkin<sup>1</sup>, D. S. Wiebe<sup>1</sup>,  
D. A. Semenov<sup>2</sup>

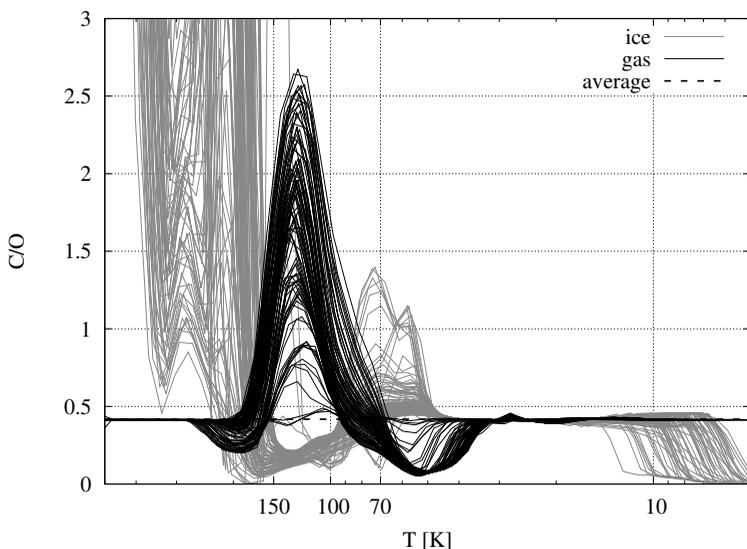
<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, RAS*

<sup>2</sup>*Max Planck Institute for Astronomy*

Carbon-to-oxygen ratio is an important parameter determining the chemical layout of protoplanetary disks. In this work, we model chemical structure of a number of protoplanetary disks. We calculate the distribution over the disk of C/O ratio in gas and ice phases for different disk parameters. We show that C/O ratio experiences significant changes in the vicinity of snow lines of major disk volatiles.

Соотношение общего количества атомов углерода к атомам кислорода, входящим в химические соединения, может отличаться для газообразной и твердой составляющих благодаря вымерзанию летучих соединений на поверхности пылинок. Наблюдаемое в атмосферах экзопланет соотношение С/О может наложить ограничения на область протопланетного диска, в которой эта планета формировалась, а также на механизм ее формирования [1].

С помощью астрохимического кода ANDES [2] проведены вычисления химической структуры для ансамбля протопланетных дисков



Распределение усредненного по вертикали распределения C/O в газовой и ледяной фазе в зависимости от температуры в срединной плоскости протопланетного диска для 100 моделей

с различными характеристическими радиусами (20—100 а. е.), массами (0.1—10 %  $M_*$ ), вращающихся вокруг звезд различных масс (0.1—2.5  $M_\odot$ ). На рисунке показано распределение соотношения C/O для данного набора моделей при общем C/O = 0.4. Как видно из рисунка, C/O испытывает резкие изменения вблизи определенных значений температуры, соответствующих температурам сублимации воды (150 K) и CO<sub>2</sub> (70 K).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 17-12-01441.

## Библиографические ссылки

1. *Öberg K. I., Murray-Clay R., Bergin E. A.* The Effects of Snowlines on C/O in Planetary Atmospheres // *Astrophys. J. Lett.* — 2011. — Vol. 743. — P. L16. 1110.5567.
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.

# ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОМПАКТНЫХ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

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

В рамках построенной авторами осредненной теории движения второго порядка исследуется орбитальная эволюция компактных внесолнечных планетных систем 61 Vir, GJ 3138 и HD 39194. По результатам интегрирования уравнений движения на длительных интервалах времени определяются устойчивость планетных орбит и их динамические характеристики. Поскольку массы и элементы орбит планет известны из наблюдений с некоторыми ошибками, даются различные варианты орбитальной эволюции в зависимости от конкретных значений этих варьируемых параметров.

## DYNAMICAL EVOLUTION OF PACKED EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

**A. S. Perminov, E. D. Kuznetsov**  
*Ural Federal University*

The orbital evolution of packed extrasolar planetary systems 61 Vir, GJ 3138 and HD 39194 is investigated in the frame of the second order averaged motion theory which is constructed by authors. The stability of planetary orbits and their dynamical properties are defined by the integration of motion equation on long-time scales. 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 varying parameters.

Авторами аналитически построены уравнения движения планетной задачи второго порядка по массам планет в средних элементах. Оскулирующий гамильтониан записывается в координатах Якоби и разлагается в ряд по элементам второй системы Пуанкаре с точностью до второго порядка по малому параметру и до 4-й степени по эксцентрисическим и облическим элементам Пуанкаре. Процедура осреднения гамильтониана выполняется методом Хори-Депри. На основе осредненного гамильтониана построены уравнения движения в средних элементах. Построенные уравнения движения применяются для исследования динамической эволюции планетных систем

с умеренными значениями эксцентриситетов, наклонов и отношений больших полуосей орбит.

В работе рассматривается орбитальная эволюция внесолнечных планетных систем 61 Vir, GJ 3138 и HD 39194. Большие полуоси орбит всех планет в системах меньше 1 а. е., эксцентриситеты не превышают 0.35, а периоды обращения лежат в интервале от 1 до 260 суток. Уравнения движения в средних элементах численно интегрируются методом Эверхарта на интервале времени 1 млн лет.

Изучены динамические свойства выбранных внесолнечных планетных систем. Устойчивость и резонансные характеристики систем определены по результатам интегрирования уравнений движения и анализа функций замены переменных, которые дают зависимость между средними и оскулирующими элементами.

Для выбранных планетных систем известны нижние границы значений масс планет, а значения известных элементов орбит (эксцентриситетов и аргументов перицентров) лежат в некотором диапазоне, поскольку определены из наблюдений с ошибками. Наклоны орбит и долготы восходящих узлов неизвестны и варьируются во всем допустимом диапазоне. Для всех систем приводятся различные варианты орбитальной эволюции в зависимости от конкретных значений варьируемых масс и элементов орбит.

Авторами предложен способ, позволяющий по результатам анализа моделирования орбитальной эволюции внесолнечных планетных систем определять диапазоны изменения неизвестных или известных с ошибками элементов орбит.

Предположение о стабильности наблюдаемых планетных систем позволяет исключить начальные условия, ведущие к экстремальному росту эксцентриситетов и наклонов орбит планет, и выявить начальные условия, при которых элементы орбит сохраняются малыми на всем интервале моделирования.

Для выборки из прочих внесолнечных планетных систем, обладающих умеренными значениями эксцентриситетов орбит, резонансные характеристики могут быть определены простым анализом уравнений движения без их интегрирования. Дано распределение наблюдаемых планетных систем по динамическим и резонансным свойствам.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-32-00283.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ МАЗЕРОВ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ГАЛАКТИКИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН

Е. А. Попова, А. М. Соболев

*Уральский федеральный университет*

В спектрах мазерной линии  $\text{H}_2\text{O}$  на частоте 22 235.08 МГц иногда наблюдается линейная поляризация, содержащая информацию о направлении и величине магнитного поля. При исследовании переменности пяти мазерных источников (W51E8, W3(H<sub>2</sub>O), G25.65+1.05, W75N, W49N) на РТ-22 в некоторых деталях была обнаружена переменность, зависящая от позиционного угла, что является характерным проявлением поляризации. Приближение синусоидой показало, что линейная поляризация присутствует во всех исследуемых источниках. По ее параметрам проводилось измерение позиционного угла вектора поляризации. Обнаружено, что в источнике W3(H<sub>2</sub>O) позиционные углы векторов поляризации отличаются. Получена нижняя оценка степени поляризации компонентов мазерной линии (для W51E8 и W3(H<sub>2</sub>O)).

## STUDY OF POLARIZATION OF MASERS IN STAR FORMING REGIONS OF OUR GALAXY BY OBSERVATION ON RT-22 OF PRAO LPI RAS

Е. А. Popova, А. М. Sobolev

*Ural Federal University*

Linear polarization containing information about the direction and magnitude of the magnetic field is sometimes observed in the spectra of the  $\text{H}_2\text{O}$  maser line at frequency 22 235.08 MHz. In the study of the variability of five maser sources (W51E8, W3(H<sub>2</sub>O), G25.65+1.05, W75N, W49N) on RT-22 a variation depending on the positional angle was found in some details, which is characteristic manifestation of polarization. The sine approximation showed that the linear polarization is present in all the studied sources. The parameters of the sine function were used to measure the positional angle of the polarization vector. It is found that in W3(H<sub>2</sub>O) the positional angles of polarization vectors differ. A lower estimates of the degree of polarization of the maser details (for W51E8 and W3(H<sub>2</sub>O)) were made.

Исследована возможность анализа излучения на наличие линейной поляризации, характерной для водяных мазеров, по наблюдениям на РТ-22 радиоастрономической обсерватории г. Пущино. Были обработаны спектральные данные пяти галактических объектов, полученные при участии автора в марте 2018 г. Для наблюдений использовался диапазон в 12.5 МГц на частоте перехода 22 235.08 МГц, который соответствует мазерной линии водяного пара.

Телескоп РТ-22 чувствителен к линейной поляризации излучения, поскольку его антенна имеет собственную линейную поляризацию, перпендикулярную горизонту. Анализ зависимости переменности от позиционного угла позволяет сделать оценку величины и направления магнитных полей в объектах.

Чтобы отследить изменения и избежать инструментальных ошибок, использовались нормированные значения сигнала: антенная температура в каждом канале делилась на суммарную (принимаемую неизменной) по отобраным компонентам линии. Для поиска наиболее неизменных деталей, а также для анализа шумовых характеристик использованы значения rms шума вне линии. Для протяженных источников W51E8 и W3(H<sub>2</sub>O) проанализировано расположение исследуемых компонентов линии, а именно проведена юстировка по каждой из них непосредственно на телескопе, и рассмотрено поведение их спектров мазерных линий за период наблюдения.

Объекты наблюдались продолжительное время за сутки и в течение нескольких дней. Повторяющаяся ежедневно наблюдаемая переменность вызвана поляризацией излучения либо в самом объекте, либо на его пути через межзвездную среду. Для рассматриваемых источников с несколькими яркими компонентами линии исследованы суточные изменения сигнала от позиционного угла (использован параллактический угол, характеризующий взаимную ориентацию источника и выделенного направления на телескопе при перемещении объекта по небу) для различных деталей. Данная зависимость приближалась синусоидой и вычислялись ее параметры.

Для всех исследуемых объектов обнаружилась поляризация излучения в большей или меньшей степени. Для компонента  $V = 57.5$  км/с в W51E8 нижняя оценка степени поляризации составила  $(43 \pm 5)$  %. В объекте W3(H<sub>2</sub>O) она различна для деталей (рассматривались  $V = -47.5, -48.3, -50.0, -54.6$  км/с) и не зависит от их интенсивности. Для детали  $V = -54.7$  км/с она составляет  $(22 \pm 6)$  %. Позиционные углы векторов поляризации в этом объекте для различных спектральных компонентов отличаются.

**ИЗМЕНЕНИЕ С ФАЗОЙ ВРАЩЕНИЯ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ  
Fe И Cr В АТМОСФЕРЕ Ap-ЗВЕЗДЫ 78 VIR**

**А. М. Романовская<sup>1</sup>, Т. А. Рябчикова<sup>1</sup>, Д. В. Шуляк<sup>2</sup>**  
*Институт астрономии РАН<sup>1</sup>, Геттингенский университет,  
Германия<sup>2</sup>*

Было проведено исследование вертикального распределения элементов (стратификации) Fe и Cr в зависимости от фазы вращения Ap-звезды 78 Vir (o Vir, HD 118022). Спектры звезды были исследованы в восьми фазах вращения. Для каждой фазы вращения были получены содержания химических элементов и выполнен анализ стратификации Fe и Cr. Сравнение распределения элементов по глубине для каждой фазы показало, что наблюдаемые неоднородности содержания Cr и Fe по поверхности скорее всего связаны с изменением содержания в самых верхних слоях атмосферы: высокое поверхностное содержание соответствует положению скачка выше в атмосфере и наоборот.

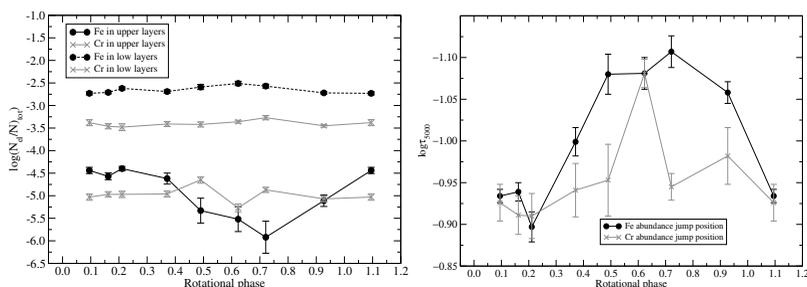
**THE VARIATION OF THE Fe AND Cr ABUNDANCE  
STRATIFICATION WITH THE ROTATION PHASE  
IN THE ATMOSPHERE OF Ap STAR 78 VIR**

**A. M. Romanovskaya<sup>1</sup>, T. A. Ryabchikova<sup>1</sup>, D. V. Shulyak<sup>2</sup>**  
*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences<sup>1</sup>, Göttingen  
University, Germany<sup>2</sup>*

We investigated vertical abundance distribution of Cr and Fe at different rotation phases of magnetic Ap star 78 Vir (o Vir, HD 118022). The spectra were analysed at 8 phases of rotation. For each phase, the chemical composition was derived and stratification analysis of Fe and Cr elements was performed. Comparison of the vertical element distributions at different phases showed that the observed surface inhomogeneities of the Cr and Fe are most likely due to a move of abundance jump position towards the uppermost layers of the atmosphere: higher surface abundance corresponds to a transition region that occurs higher in the atmosphere and vice versa.

Звезда 78 Vir (HD 188041) является первой звездой, в которой было обнаружено магнитное поле [1]. Это переменная магнитная химически пекулярная звезда A1p CrSrEu спектрального класса с сильным магнитным полем  $B_s = 3000$  Гс. Известно, что поверхность магнитных звезд имеет неоднородную пятнистую структуру, а возникновение аномалий химического состава вызвано макроскопической диффузией элементов в атмосфере звезды [2]. Поэтому исследование наблюдаемого изменения вертикального распределения содержания хрома Cr и железа Fe по поверхности (с фазой вращения звезды) представляет особый интерес для поиска причины наблюдаемой поверхностной неоднородности.

Исследование показало, что Cr и Fe имеют резкие градиенты содержания со скачками на глубине  $\lg \tau_{5000} \sim -1.5$  на всех фазах; содержание в глубоких слоях атмосферы для всех фаз меняется в очень малых пределах  $\pm 0.1$  dex; основные изменения наблюдаются в содержании элементов в верхних слоях атмосферы и, по-видимому, коррелируют с изменением магнитного поля; положение скачка содержания элементов меняется с фазой вращения и коррелирует с изменением магнитного поля (см. рисунок).



Изменение содержания Cr и Fe в верхних и нижних слоях атмосферы звезды с фазой вращения (слева), изменение положения скачка содержания с фазой вращения (справа)

## Библиографические ссылки

1. Babcock H. W. Zeeman Effect in Stellar Spectra // *Astrophys. J.* — 1947. — Vol. 105. — P. 105.
2. Michaud G. Diffusion Processes in Peculiar a Stars // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 160. — P. 641.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКНООБРАЗНОГО ТЕМНОГО ОБЛАКА WB 673

О. Л. Рябухина<sup>1,2</sup>, М. С. Кирсанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии РАН,*

<sup>2</sup>*Институт прикладной физики РАН*

Исследована область образования массивных звезд WB 673, которая находится на расстоянии 1.8 кпк в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Были проведены наблюдения на телескопе Онсала (Швеция) в радиолиниях межзвездных молекул в направлении плотных сгустков. Определены лучевые концентрации и обилия молекул  $N_2H^+$ , CS, HCN, HNC, CO.

## STUDY OF THE FILAMENTARY DARK CLOUD WB 673

O. L. Ryabukhina<sup>1,2</sup>, M. S. Kirsanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy RAS,* <sup>2</sup>*Institute of Applied Physics RAS*

We study a region of massive star formation WB 673 in the giant molecular cloud G174+2.5. Distance to the region is 1.8 kpc. We present results of molecular line identification towards dense clumps. Column densities and abundances of  $N_2H^+$ , HCN, HNC and other molecules are determined.

Данные, полученные при помощи телескопа “Herschel”, показали, что газопылевые комплексы состоят из волокон различных масштабов, которые содержат в себе сгустки и звездообразующие ядра [1]. Роль волокон в формировании ядер и в процессе звездообразования в настоящее время активно исследуется как с помощью наблюдений, так и теоретически [2].

В работе рассматривается область образования массивных звезд WB 673 — молекулярное волокно длиной около 25 пк, расположенное на периферии зоны ионизованного водорода S231. Предположительно волокно было образовано путем множественного сжатия межзвездного газа сверхзвуковыми волнами [3]. Данная область изучена в линиях изотопов монооксида углерода [4], однако для подробного исследования звездообразования молекулы CO недостаточно, так как излучение в линиях CO указывает на наличие газа умеренной плотности и переходит в насыщение при более высокой плотности.

В результате наблюдений на 20-м телескопе Онсала (Швеция) мы имеем набор спектров и карт излучения в направлении волокна WB 673 в широком диапазоне радиочастот. Мы представляем результаты отождествления радиолиний в направлении на наиболее массивный сгусток WB 673. В направлении этого сгустка были найдены следующие радиолинии молекул:  $^{13}\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ ,  $\text{CS}(2-1)$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}(2-1)$ ,  $\text{HNC}(1-0)$ ,  $\text{HCO}^+(1-0)$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ ,  $\text{H}_2\text{CS}(3-2)$ ,  $\text{SO}(3,2-2,1)$  и др. Мы построили карты распределения радиояркости в линиях  $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ ,  $\text{HNC}(1-0)$  в центральном и периферийных плотных сгустках из этого волокна и проводим сравнение распределения излучения с картами в линиях  $\text{CO}$  и  $\text{CS}(2-1)$  из работы [3]. Карты распределения содержаний молекул относительно водорода позволяют исследовать химическую структуру сгустков и физические условия, такие как температура и плотность.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-02-00834-А, 18-02-00917-А.

## Библиографические ссылки

1. *André P., Men'shchikov A., Bontemps S. et al.* From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L102. 1005.2618.
2. *Clarke S. D., Whitworth A. P.* Investigating the global collapse of filaments using smoothed particle hydrodynamics // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449. — P. 1819–1825. 1502.07552.
3. *Kirsanova M. S., Sali S. V., Sobolev A. M. et al.* Molecular gas in high-mass filament WB673 // *Open Astronomy.* — 2017. — Vol. 26. — P. 99–105. 1711.01428.
4. *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71. — P. 208–224. 1605.08917.

# ВЫМЕТАНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

**Е. Э. Сивкова, Д. З. Вибе, Б. М. Шустов**

*Институт астрономии Российской академии наук*

Рассмотрена модель движения пылинок различных размеров в Галактике под действием сил давления излучения, гравитации и сопротивления газа. Оценен темп выметания пылинок из Галактики, приводящий к потере тяжелых элементов в окологалактическое пространство. Обсуждается роль выметания пылинок давлением излучения в формировании градиента химического состава в Млечном Пути и других дисковых галактиках.

## DUST EXPULSION FROM DISK GALAXIES

**E. E. Sivkova, D. S. Wiebe, B. M. Shustov**

*Institute of Astronomy of the RAS*

A new model of motion of dust grains having different sizes in the Galaxy under the influence of radiation pressure, gravity, and gas drag is considered. A rate of dust expulsion, leading to loss of heavy element into circumgalactic space, is estimated. We discuss a role of dust expulsion by the radiation pressure in the formation of the radial gradient of chemical composition in the Milky Way and other disk galaxies.

Наблюдения указывают, что в окрестностях дисковых галактик присутствует значительное количество пылевых частиц, в том числе мелкой пыли, в частности, полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [1, 2]. Новые данные обуславливают необходимость пересмотра модели выметания пыли из дисковых галактик [3]. В новой версии модели рассматриваются три вида сил, определяющих динамику пыли в Галактике: сила давления излучения, сила гравитационного притяжения и сила сопротивления межзвездного газа. При помощи модели исследовано движение пылинок трех размеров: 0.001, 0.01 и 0.1 мк. Рассмотрены траектории пылинок, начинающих движение на различных высотах  $z$  и галактоцентрических расстояниях  $r$ . Получены оценки предельной высоты  $z_{\text{lim}}(r)$ , начиная с которой движение пылинки под действием давления излучения звезд приводит к ее выходу за пределы галактического диска за время его существования ( $\sim 10$  млрд лет).

Показано, что крупные пылинки не могут покинуть диск Галактики даже за время, сопоставимое с ее возрастом. Мелкие пылинки, наоборот, легко выходят за границу диска (принятую равной 200 пк) даже при небольших начальных высотах. Поскольку мелкие пылинки составляют большую часть всей массы межзвездной пыли [4], можно утверждать, что выметание пыли давлением излучения звезд вносит существенный вклад в потерю Галактикой тяжелых элементов. Оценка темпа выброса тяжелых элементов с пылинками — примерно  $0.02M_{\odot}/\text{год}$  — указывает, что этим процессом нельзя пренебрегать при моделировании химической эволюции дисковых галактик. Поскольку относительный вклад выметания пылинок в химический состав межзвездного газа зависит от галактоцентрического радиуса, описываемый процесс может играть важную роль и в формировании градиента химического состава, и в его уплотнении, так как на расстояниях более 10 кпк пылинки движутся главным образом параллельно плоскости галактического диска.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00834.

## Библиографические ссылки

1. *Sethi S. K., Shchekinov Y., Nath B. B.* The Mysterious 6565 Å Absorption Feature of the Galactic Halo // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — Vol. 850. — P. L20. 1711.00476.
2. *Hirashita H., Lin C.-Y.* Dust abundance and grain size in galaxy halos // *ArXiv e-prints.* — 2018. 1804.00848.
3. *Shustov B. M., Vibe D. Z.* The sweeping of dust out of the Galaxy // *Astronomy Reports.* — 1995. — Vol. 39. — P. 578—586.
4. *Jones A. P., Fanciullo L., Köhler M. et al.* The evolution of amorphous hydrocarbons in the ISM: dust modelling from a new vantage point // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A62. 1411.6293.

# О КИНЕТИЧЕСКОМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МЕТОДАХ ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

М. Д. Сизова, Б. М. Шустов

*Институт астрономии РАН*

Рассмотрена эффективность кинетического и энергетического методов изменения орбит опасных небесных тел. Кинетический метод эффективнее, но для пучковых устройств подбор глубины выделения энергии (в пике Брегга) может повысить эффективность энергетического метода.

## ON KINETIC AND ENERGETIC APPROACHES TO CHANGE ORBITS OF CELESTIAL BODIES

M. D. Sizova, B. M. Shustov

*Institute of astronomy RAS*

Efficiencies of the kinetic and energy approaches to change orbits of dangerous celestial bodies is considered. Kinetic method is more effective. For beam devices an adjusting of the depth of energy release (in the Bragg peak) can increase effectiveness of the energy approach.

В последние годы, когда все возрастающее внимание в мире уделяется проблеме астероидно-кометной опасности, внимание экспертов привлекают методы изменения орбит опасных небесных тел (ОНТ). Мы сравниваем кинетический метод (использование ударника) с энергетическим подходом, когда ударника нет, а энергия (излучения или частиц) выделяется в веществе ОНТ.

Обозначим массу и скорость (в системе отсчета ОНТ) ударника как  $m$  и  $v$ , массу ОНТ как  $M$ , а изменение скорости ОНТ после удара  $\Delta V$ . При выбросе массы из ОНТ этому телу может передаваться импульс, существенно превышающий  $vm$ . Для оценки превышения используют коэффициент усиления (multiplication factor)  $\beta$  [1]. В связи с реализацией проекта AIDA [2] исследования возможностей увеличения  $\beta$  приобрели особое значение. Увеличение  $\beta$  при высокоскоростном ударе обусловлено тем, что мишени передается не только импульс ударника, но и доля  $\alpha$  кинетической энергии ударника  $E_k$  идет на выброс вещества мишени. Если обозначить массу выброса  $m_{\text{выбр}}$ , а его скорость  $v_{\text{выбр}}$ , то  $v_{\text{выбр}} = v\sqrt{\frac{\alpha m}{m_{\text{выбр}}}}$ . Если предположить, что  $v_{\text{выбр}}$  направлена «навстречу» ударнику, то фактор

$\beta = \sqrt{\left(\frac{\alpha m_{\text{выбр}}}{m}\right) + 1}$  или  $\beta = \frac{\alpha v}{m_{\text{выбр}}} + 1$ . Очевидно, что максимальное значение  $\beta$  достигается при наибольших значениях  $m_{\text{выбр}}$  и наименьших (но обеспечивающих выброс из системы) значениях  $v_{\text{выбр}}$ . Ряд лабораторных экспериментов и расчетов показывают, что при скоростях ударника  $\sim 10$  км/с типичные скорости выброса составляют не более нескольких десятков метров в секунду, а значение отношения  $\frac{m_{\text{выбр}}}{m} \leq 1000$ . Это приводит к значениям  $\beta$  в несколько десятков (более реалистичные оценки  $\beta < 10$ ) [3]). В энергетическом подходе в мишень доставляется энергия  $E_k$ , при этом импульсом излучения или пучка частиц можно пренебречь. Пусть  $\alpha$  — доля энергии  $E_k$ , идущая на выброс (испарение) вещества мишени. Скорости разлета испаряемого вещества  $v_{\text{выбр}_э}$  составляют от сотен метров до единиц километров в секунду. Импульс, передаваемый ОНТ, будет  $\frac{2\alpha}{v_{\text{выбр}_э}}$ . Отношение импульсов, передаваемых мишени в кинетическом (к) и энергетическом (э) подходах, будет

$$\varepsilon = 2\alpha E_э \frac{v_{\text{выбр}_к}}{v_{\text{выбр}_э}} \frac{1}{(2\alpha E_k + mvv_{\text{выбр}_к})}.$$

Если принять  $E_э = E_k$ , то очевидно, что при  $v_{\text{выбр}_к} < v_{\text{выбр}_э}$   $\varepsilon$  всегда меньше единицы. То есть кинетический подход при равных энергозатратах более выгоден. Повысить эффективность энергетического подхода можно, увеличивая  $E_э$  или используя методы заглубленного выделения энергии. Эксперты из ИЯФ СО РАН предложили использовать зависимость потери энергии частицы от глубины проникновения в вещество. Для альфа-частиц и других ионов кривая зависимости имеет выраженный пик (пик Брегга) незадолго до остановки частицы. Выделение энергии пучка частиц происходит на некоторой глубине (зависящей от материала мишени и типа ионов).

## Библиографические ссылки

1. *Holsapple K. A., Housen K. R.* Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling // *Icarus*. — 2012. — Vol. 221. — P. 875–887.
2. *Cheng A. F., Rivkin A. S., Michel P. et al.* AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives // *Planetary and Space Science*. — 2018. — Vol. 157. — P. 104–115.
3. *Bruck Syal M., Michael Owen J., Miller P. L.* Deflection by kinetic impact: Sensitivity to asteroid properties // *Icarus*. — 2016. — Vol. 269. — P. 50–61.

# КИНЕМАТИКА ГАЗА И ПАРАМЕТРЫ ПЫЛИ В ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ

К. И. Смирнова<sup>1</sup>, Д. З. Вибе<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Институт астрономии РАН*

Исследование связи между параметрами пыли и молекулярного газа показало, что связь различна в галактиках различных морфологических типов. Для подтверждения этого вывода мы рассматриваем свойства кинематики газа в дисковых галактиках, подобных галактике NGC 628.

## GAS KINEMATICS AND DUST PARAMETERS IN DISK GALAXIES

K. I. Smirnova<sup>1</sup>, D. S. Wiebe<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

A study of relation between parameters of dust and molecular gas has shown that this relation differs in galaxies of different morphological types. To confirm this conclusion, we consider gas kinematic parameters in disk galaxies similar to NGC 628.

Ранее [1, 2] мы исследовали взаимозависимость различных параметров межзвездной среды (МЗС) в областях звездообразования (ОЗО): потоки излучения пыли в ближнем, среднем и дальнем инфракрасных (ИК) диапазонах, излучение в линиях CO и HI, ультрафиолетовое излучение и излучение в линии H $\alpha$ . Однако есть еще один параметр, играющий важную роль в оценке стабильности и эволюции галактических газовых дисков, а также дополняющий информацию о распределении различных компонентов МЗС, — дисперсия скоростей газа. В данной работе мы дополняем анализ ИК-излучения внегалактических ОЗО рассмотрением дисперсии скоростей в линиях CO. В отличие от работы [3] мы рассматриваем не только области с ярким излучением CO, но и ОЗО, которые являются заметными источниками ИК- и УФ-излучения, но могут при этом не быть яркими источниками линии оксида углерода.

Сопоставление результатов [1] и [2] показывает, что в изолированных галактиках и галактиках с признаками взаимодействия перечисленные выше закономерности могут иметь разный характер. Анализ кинематики ОЗО по линиям СО уже был проведен нами для галактик NGC 628, NGC 2976 и NGC 3351, и он подтвердил отличия в свойствах ОЗО галактики с кольцом NGC 3351. В данном исследовании мы дополняем нашу выборку невзаимодействующих галактик системами NGC 925 и NGC 6946.

Для каждой галактики по данным наблюдений из обзора HERACLES был оценен разброс скоростей в линии СО. По предварительным выводам в соотношении между разбросом скоростей  $\Delta V$  и потоком излучения в линии СО выделяются две группы ОЗО. Для ОЗО с  $\Delta V < 70$  км/с наблюдается рост потока в линии СО с увеличением  $\Delta V$ . Можно предположить, что в первой группе мы имеем дело с молекулярным газом, который в значительной степени остается невозмущенным процессами звездообразования. Во второй группе ( $\Delta V > 70$  км/с), вероятно, уже видны признаки поздней эволюции СО, связанной со вспышками сверхновых; в этом случае поток СО убывает с увеличением  $\Delta V$ .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (основная часть государственного задания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

## Библиографические ссылки

1. *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.
2. *Smirnova K. I., Wiebe D. S., Moiseev A. V.* Star-forming complexes in the polar ring galaxy NGC660 // *Open Astronomy*. — 2017. — Vol. 26. — P. 88—92. 1712.00956.
3. *Mogotsi K. M., de Blok W. J. G., Caldú-Primo A. et al.* H I and CO Velocity Dispersions in Nearby Galaxies // *Astron. J.* — 2016. — Vol. 151. — P. 15. 1511.06006.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЛАСТЕЙ НII НА БАЗЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ЭВОЛЮЦИЕЙ ПЫЛИ

**А. П. Топчиева, Я. Н. Павлюченков**

*Институт астрономии Российской академии наук*

Мы представляем результаты моделирования распределений инфракрасного излучения (ИК) от областей ионизованного водорода (НII) вокруг молодых звезд. Структура областей НII рассчитана при помощи самосогласованной эволюционной химико-динамической модели MARION, в которой учитываются несколько населений пыли. Расчет переноса ИК-излучения и построение синтетических карт проведен с помощью кода NATALY. Получены радиальные профили ИК-излучения в диапазоне 8–500 мкм для различных стадий эволюции репрезентативной зоны НII.

## MODELING SYNTHETIC IMAGES OF NII REGIONS BASED ON CHEMODYNAMICAL MODEL WITH DUST EVOLUTION

**A. P. Topchieva, Ya. N. Pavlyuchenkov**

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

We present the simulated infrared intensity (IR) distributions toward NII region around massive star. The structure of a NII region is calculated with the self-consistent chemodynamical model MARION which includes a number of dust components. The radiative transfer simulations and synthetic IR maps were produced with the NATALY code. The IR profiles at 8–500  $\mu\text{m}$  are presented and analysed for the different evolution stages of a representative NII region.

В работах [1–3] последовательно развивается модель эволюции области НII вокруг массивной звезды. Модель позволяет проследить эволюцию не только газа и химической структуры области НII, но и ее пылевого состава. Пыль в модели представлена набором нескольких компонент, которые могут испытывать дрейф относительно газа за счет давления излучения центральной звезды. Детальная информация о физической структуре областей НII дает

возможность построения синтетических распределений интенсивности излучения и исследовать наблюдательные проявления модели.

В работах [4, 5] сформирован каталог данных по областям HII, которые содержат информацию о потоках в ИК- и радиодиапазонах, о большой и малой полуосях, о массовой доле полициклических ароматических углеводородов, электронной концентрации и спектральном классе ионизирующей звезды. Эти данные являются превосходной базой для верификации теоретических моделей.

В данной работе на основании моделирования с помощью кодов MARION и NATALY построены теоретические распределения интенсивности ИК-излучения для различных времен эволюции области HII. Проанализированы морфологические особенности этих распределений. Соответствующие им интегральные потоки ИК-излучения сопоставляются с наблюдательными данными. Исследована возможность определения эволюционного статуса объектов на основе этого сопоставления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-20049.

## Библиографические ссылки

1. *Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M.* Chemodynamical evolution of gas near an expanding HII region // *Astronomy Reports.* — 2009. — Vol. 53. — P. 611–633.
2. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449. — P. 440–450. 1502.06865.
3. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions - II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 469. — P. 630–638. 1705.00269.
4. *Topchieva A. P., Wiebe D. S., Kirsanova M. S., Krushinskii V. V.* Infrared Morphology of Regions of Ionized Hydrogen // *Astronomy Reports.* — 2017. — Vol. 61. — P. 1015–1030. 1801.08204.
5. *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M. S.* Global photometric analysis of galactic HII regions // *Research in Astronomy Astrophys.* — 2018. 1801.04440.

# МАГНИТНАЯ ИОНИЗАЦИОННО-ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ОБЛАСТЯХ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

**С. О. Фомин, А. Е. Дудоров**

*Челябинский государственный университет*

Исследуется магнитная ионизационно-тепловая неустойчивость (МИТН) в областях ионизованного водорода. В модели учитываются нестационарная ионизация и объемные процессы нагрева и охлаждения. Методом нормальных мод получено дисперсионное соотношение, которое решается численно методом Берстоу. Комплексные корни дисперсионных уравнений получены для некоторых функций нагрева и охлаждения, а также различных параметров температуры, магнитного поля и скорости ионизации. Показано, что развитие неустойчивых мод МИТН может привести к образованию конденсаций в областях ионизованного водорода H II. Обсуждаются другие приложения МИТН.

## MAGNETIC IONIZATION-THERMAL INSTABILITY IN H II REGIONS

**S. O. Fomin, A. E. Dudorov**

*Chelyabinsk state university*

Magnetic ionization-thermal instability (MITI) in H II regions is investigated. Non-stationary ionization, cooling and heating processes are taken into account. With normal modes method the dispersion relation was obtained. The dispersion equation is solved numerically with Bairstow method. Complex roots of dispersion equations for some cooling and heating functions, different parameters of temperature, magnetic field and ionization rates are determined. It was shown, that condensations in H II regions can be consequence of growing unstable mods of MITI. Other applications of MITI are discussed.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 1802-01067/18.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДА КАК ТВЕРДОГО ТЕЛА

**В. Ш. Шайдулин**

*Санкт-Петербургский государственный университет*

В данной работе исследуются разные формулировки уравнений движения твердого тела вместе с подходящими способами численного интегрирования, а также модели некоторых негравитационных ускорений, способных изменять вращение астероида.

## STUDY OF ASTEROID'S ROTATION AS A SOLID BODY

**V. Sh. Shaidulin**

*Saint Petersburg State University*

In this paper we study various forms of the equations of motion of a solid body and suitable methods of its numerical integration, as well as some models of non-gravitational accelerations that can change the rotation of the asteroid.

Для исследования движения астероидов в настоящее время требуется учет негравитационных ускорений разной природы: световое давление, солнечный ветер, эффект Ярковского, испарение льдов и т. д. Для тщательного исследования их влияния становится важным рассмотрение астероида как протяженного тела, и наряду с его поступательным движением желательнее учитывать вращение вокруг собственной оси. Модель абсолютно твердого тела хорошо подходит для описания движения астероидов небольшого размера.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-12-00050, а также грантов РФФИ 17-02-00542 и 18-02-00552.

## **ВАРИАЦИИ ИНСОЛЯЦИИ ДЛЯ СУБАРКТИЧЕСКИХ И АРКТИЧЕСКИХ ШИРОТ УРАЛА И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ**

**К. А. Безгоднов<sup>1</sup>, А. В. Бородин<sup>1,2</sup>, Э. Д. Кузнецов<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*Институт экологии растений и животных УрО РАН*

Выполнен расчет инсоляции для субарктических и арктических широт в голоцене на основе модели долгопериодической эволюции орбиты Земли La2010. Проведена корреляция инсоляции с температурной последовательностью Ямала за последние 8 тыс. лет и глобальными температурными показателями по изотопам кислорода.

## **VARIATIONS OF INSOLATION FOR SUBARCTIC AND ARCTIC LATITUDES OF THE URALS AND WESTERN SIBERIA IN THE HOLOCENE**

**K. A. Bezgodov<sup>1</sup>, A. V. Borodin<sup>1,2</sup>, E. D. Kuznetsov<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*Institute of plant and animal ecology UB RAS*

The calculation of insolation for subarctic and arctic latitudes in the holocene is carried out based on the model long-period evolution of the Earth's orbit La 2010. The correlation of insolation is carried out with the temperature sequence of Yamal over the past 8 thousand years and global temperature indices of oxygen isotopes.

К одному из глобальных факторов, определяющих климат на Земле, относятся вариации потока солнечного излучения. Наличие солярной циклики разного масштаба, связанной с вековыми и периодическими вариациями инсоляции, определяет цикличность климата на Земле. Исследование вариации инсоляции даст возможность сопоставить выявленные центры генетического и морфологического разнообразия модельных видов, времени и масштабов внутри и межвидовой дифференциации на фоне изменений видового состава и структуры региональных фаун севера Евразии с геологическими событиями и моделью инсоляции.

Работа посвящена расчету инсоляции и оценки влияния ее на климатогенную динамику в период голоцена (последние 12 тыс. лет) для субарктических и арктических широт Урала и Западной Сибири.

Для расчета инсоляции использована модель долгопериодической эволюции орбиты Земли La2010 [1], позволяющая провести детальное исследование с высоким временным разрешением. На основе полученных данных для оценки влияния инсоляции на климатогенную динамику проведена корреляция инсоляции с температурной последовательностью Ямала за последние 8 тыс. лет и глобальными температурными показателями по изотопам кислорода.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-04-00966.

### Библиографические ссылки

1. *Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H.* La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A89. 1103.1084.

# АНАЛИЗ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ КАТАЛОГА GTSh10 ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОБЗОРОВ

**М. А. Горбачев**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

В докладе представлена информация о продолжении исследования вспышечной активности у красных карликов из каталога GTSh10 по базам данных автоматизированных фотометрических обзоров. Приведено общее число проанализированных объектов, число обнаруженных вспышек и их амплитуды.

## ANALYSIS OF THE FLARE ACTIVITY OF STARS FROM THE GTSH10 CATALOG BASED ON AUTOMATED SURVEYS

**M. A. Gorbachev**

*Kazan (Volga Region) Federal University*

The report provides information on the continuation of the study of flare activity in red dwarfs from the GTSh10 catalog in the databases of automated photometric surveys. The total number of objects analyzed, the number of flares detected and their amplitudes are presented. For the most interesting objects from the point of view of the flare activity of objects, the light curves are shown over the time interval studied.

В докладе представлена информация о продолжении исследования вспышечной активности у красных карликов из каталога GTSh10 по базам данных автоматизированных фотометрических обзоров. Ранее для 2032 звезд из каталога GTSh10 по данным проекта CRTS был проведен анализ фотометрических рядов наблюдений в полосе V за период с MJD 2 453 464.15625 по MJD 2 456 591.367188 и по 360 593 оценкам блеска у 868 звезд обнаружены 2 222 вспышки. Однако дальнейшие исследования показали необходимость более детального изучения вспышечной активности по данным других фотометрических обзоров. При обзоре литературы по звездам, вошедшим в каталог GTSh10, было обнаружено, что для некоторых из них в базе данных SIMBAD отсутствуют ссылки на публикации

по вспышечной активности. Для подтверждения наличия или отсутствия значимых изменений блеска были выполнены подробные исследования кривых блеска избранных объектов по данным фотометрических обзоров. Представлены общее число проанализированных объектов, число обнаруженных вспышек и их амплитуды. Для наиболее интересных с точки зрения вспышечной активности объектов приведены кривые блеска на исследованном интервале времени.

Работа выполнена частично при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-32-00775.

## ВОЗМОЖНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ AM LEO

С. Ю. Горда

*Коуровская астрономическая обсерватория Уральского  
федерального университета*

Известно, что кривые блеска короткопериодических контактных систем типа W UMa изменяются со временем. В настоящее время наиболее вероятной причиной таких изменений считается наличие пятен на поверхности их компонентов. На основе результатов десятилетнего фотометрического ПЗС мониторинга AM Leo, проведенного автором в 2007—2017 гг., установлено наличие возможной цикличности пятенной активности с периодом 7.5 года.

## POSSIBLE CYCLICITY OF THE SPOTTED ACTIVITY OF AM LEO

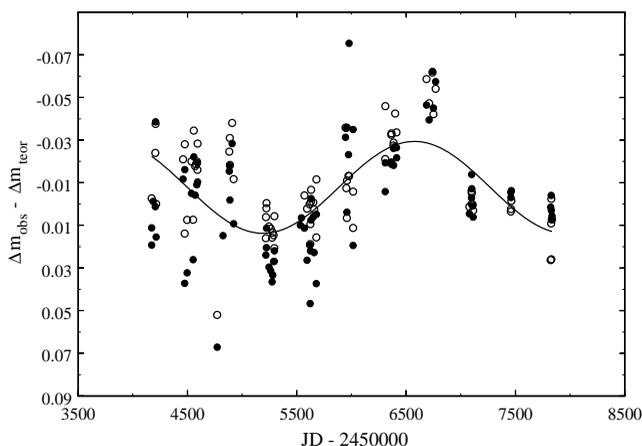
S. Yu. Gorda

*Kourovka Astronomical Observatory of Ural Federal University*

It is known that the light curves of short-period contact binaries of the W UMa type are constantly changing. Currently, the most likely cause of such changes is believed to be the presence of spots on the surface of their components. Based on the ten-year AM Leo photometric CCD monitoring carried out by the author from 2007 to 2017, the presence of a possible cyclicity of the spot activity with a period of 7.5 years was found.

Затменная переменная звезда AM Leo является ярким компонентом визуально-двойной системы ADS 8024 ( $\rho = 11.4''$ ,  $\theta = 270^\circ$ ). В период с 2007 по 2017 г. автором были проведены фотометрические ПЗС наблюдения AM Leo на телескопе АЗТ-3 ( $D = 0.45$  м,  $F_{\text{Newton}} = 2.0$  м) Коуровской астрономической обсерватории. Разности блеска определялись относительно звезды BD+10°2235, которая тоже является визуально-двойной с разделением  $13.3''$  и использовалась как звезда сравнения практически во всех исследованиях AM Leo. Для регистрации изменений общего блеска системы были вычислены значения усредненных за ночь разностей блеска наблюдаемых и теоретической кривых блеска. Для синтезирования теоретической

кривой были использованы параметры AM Leo, приведенные в работе [1]. Синтез выполнен с помощью программы РНОЕВЕ. Несмотря на значительный разброс точек, на рисунке хорошо просматривается плавная тенденция уменьшения и увеличения блеска AM Leo со временем с полуамплитудой  $\sim 0.02^m$ . Для оценки значения возможного периода данные были аппроксимированы гармонической функцией синус. В результате было получено следующее значение возможного периода:  $P = 2770^d \pm 120^d \sim 7.5^y$ . Поскольку периодичность изменения блеска наблюдается в двух фильтрах, то полученный результат можно считать с достаточной степенью достоверным. Тем не менее требуется дальнейшее исследование этого феномена, поскольку оно получено на основе данных, распределенных на временном интервале, лишь немногим превышающем само значение периода.



Зависимость от времени внеэатменных изменений блеска AM Leo; ● — фильтр V; ○ — фильтр R; сплошная линия — аппроксимационная синусоида

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА–А17–117030310283–7).

## Библиографические ссылки

1. *Gorda S. Y.* Spectrometric and photometric study of the eclipsing variable AM Leo // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71. — P. 64–74.

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗД МОЛОДЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ МИССИИ K2

**Е. С. Калиничева<sup>1</sup>, И. С. Саванов<sup>1</sup>, Е. С. Дмитриенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт астрономии Российской академии наук, <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга*

По периодограммам звезд скоплений Плеяды и Ясли обнаружены объекты, предположительно имеющие дифференциальное вращение. Представлены оценки параметров дифференциального вращения, для небольшого числа звезд представлены оценки угла наклона оси вращения к лучу зрения.

## SURFACE DIFFERENTIAL ROTATION OF STARS IN YOUNG CLUSTERS OBSERVED BY THE MISSION K2

**E. S. Kalinicheva<sup>1</sup>, I. S. Savanov<sup>1</sup>, E. S. Dmitrienko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, <sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University*

We present calculated periodograms and relative shear of possible differential rotators in Pleiades and Praesepe clusters. For some stars we are able to estimate inclinations roughly from theoretical predictions.

Пятна на поверхности звезд помимо Солнца были открыты в середине прошлого века. Наблюдение за эволюцией количества и периода вращения этих пятен на различных временных интервалах очень важно, так как позволяет судить о магнитном поле звезд, циклах активности и механизмах звездного динамо. Названные параметры играют ключевую роль в моделировании внутреннего строения звезд различных масс и возрастов [1].

Продолжение основной миссии космического телескопа “Kepler” (K2) позволило получить недоступные ранее высокоточные фотометрические данные звезд молодых скоплений. В данной работе представлены результаты начатого нами исследования периодограмм звезд двух разновозрастных скоплений, Плеяды и Ясли, с целью установления присутствия дифференциального вращения объектов.

Впервые предпринята попытка сравнения дифференциального вращения звезд для двух скоплений. На основании вычислений из [2] произведены попытки оценки наклона оси вращения для некоторых звезд. Из-за худшей стабилизации телескопа в ходе миссии K2 по сравнению с основной миссией “Kepler” полученные периодограммы существенно зашумлены. Данное обстоятельство позволяет предполагать наличие большего количества звезд с дифференциальным вращением, чем найдено авторами в настоящей работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-52-45048.

### Библиографические ссылки

1. *Reinhold T., Gizon L.* Rotation, differential rotation, and gyrochronology of active Kepler stars // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 583. 1507.07757.
2. *Santos A. R., Cunha M. S., Avelino P. P. et al.* Learning about the latitudinal distribution of starspots through the periodogram analysis of photometric data // *Seismology of the Sun and the Distant Stars* / ed. by M. J. Monteiro, M. S. Cunha, J. M. Ferreira : TASC2 KASC9 Workshop - SPACEINN HELAS8 Conference, Azores Islands, Portugal. — 2017. — Vol. 160. — EPJ Web of Conferences.

## СИНТЕЗ СПЕКТРА В ОБЛАСТИ ЛИНИИ К CaII В ПРОСТОЙ МАГНИТОГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА

**А. А. Калинин, Н. Д. Калинина**  
*Уральский федеральный университет*

В продолжение ранее начатой работы проведено моделирование спектра крыльев линии К CaII с использованием простой магнитогидростатической модели пятна (Соловьев 1997). Рассчитан спектр пятна с параметрами для функции подобия большого пятна по этой модели. Приводится результат ЛТР моделирования в области 392.7—394.0 нм для линии К ионизованного кальция.

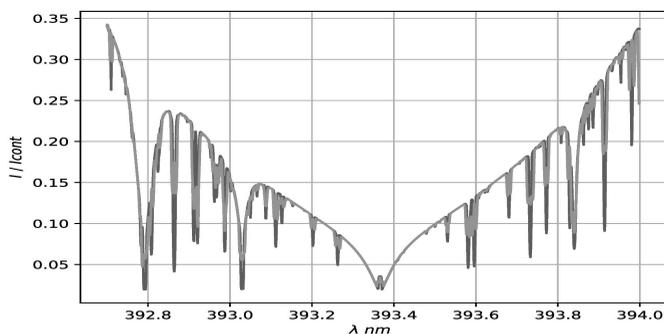
## SYNTHESIS OF THE SPECTRUM IN THE CaII K LINE REGION FOR THE SIMPLE MAGNETOHYDROSTATIC MODEL OF SUNSPOT

**A. A. Kalinin, N. D. Kalinina**  
*Ural Federal University*

In continuation of previous work we simulated the spectrum of wings of the K CaII line using a simple magnetohydrostatic sunspot model (Solovev 1997). The spot spectrum was calculated with parameters for the large-spot similarity function as in Solovev model. The result of LTE modeling in the range of 392.7—394.0 nm for the K-line of ionized calcium is given.

Данная работа является продолжением работы [1]. В июле 2017 г. по диску Солнца проходило большое солнечное пятно с напряженностью магнитного поля в максимуме 3 900 Гс. Были получены спектры пятна в области линии H $\delta$  водорода и линий H и K ионизованного кальция. В работе проведено моделирование спектра крыльев линии К CaII с использованием простой магнитогидростатической модели пятна, построенной согласно [2]: магнитное поле удовлетворяет условию подобия Шлютера—Темешвари, нижняя часть пятна экранирована защитным слоем, верхняя неэкранирована и с увеличением высоты поле стремится к потенциальному. На уровне Вильсоновской депрессии экранированная и неэкранированная части сшиваются и на сшивке удовлетворяют условию равновесия вертикального

магнитного цилиндра. С помощью программы COSSAM (версия от 18.01.2017) [3] рассчитан спектр пятна с параметрами для функции подобия большого пятна по [2]. Здесь приводится результат ЛТР моделирования в области 392.7–394.0 нм для линии К ионизованного кальция (см. рисунок). Ядро линии не отражает реального спектра пятна, так как в нем велико влияние отклонений от ЛТР и неполного перераспределения по частотам. В дальнейшем будет проведено сравнение с наблюдениями в крыльях линий H и K CaII, а также учет перераспределения по частотам в ядре линий.



ЛТР-спектр модельного пятна в области линии K CaII

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

## Библиографические ссылки

1. *Калинин А. А.* Спектры солнечного пятна с большой напряженностью магнитного поля // Физика космоса : тр. 47-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 29 янв.–3 февр. 2006 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 247–248.
2. *Соловьев А. А.* Моделирование магнитной структуры солнечных пятен // Астрон. журн. — 1997. — Т. 74. — С. 131–138.
3. *Wade G. A., Bagnulo S., Kochukhov O. et al.* LTE spectrum synthesis in magnetic stellar atmospheres. The intergreement of three independent polarised radiative transfer codes // Astron. Astrophys. — 2001. — Vol. 374. — P. 265–279.

# СЛОЖНЫЕ МОЛЕКУЛЫ ВБЛИЗИ ТУМАННОСТИ ОРИОНА

М. С. Кирсанова<sup>1</sup>, А. И. Васюнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии РАН*, <sup>2</sup>*Уральский федеральный университет*

Мы представляем результаты моделирования образования и разрушения формальдегида и метанола в плотном газе на границе ионизованной туманности Ориона и окружающего ее молекулярного облака, чтобы объяснить наблюдаемое соотношение между обилиями этих молекул.

## COMPLEX MOLECULES IN THE ORION BAR PDR

M. S. Kirsanova<sup>1</sup>, A. I. Vasyunin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*, <sup>2</sup>*Ural Federal University*

We present simulations of formaldehyde and methanol formation in the Orion Bar photodissociation region to explain the observed abundance ratio.

Мы представляем результаты моделирования образования и разрушения формальдегида и метанола в плотном газе на границе ионизованной туманности Ориона и окружающего ее молекулярного облака. Цель работы — объяснить наблюдаемое соотношение 1/5/3 между содержаниями молекул HCO/H<sub>2</sub>CO/CH<sub>3</sub>OH соответственно. Мы показываем, что получить наблюдаемые содержания с точностью около порядка величины можно, применив химико-динамическую модель MARION [1] и химическую сетку, которая включает как газофазные реакции, так и испарение молекул с поверхности пылевых частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-12-00351.

## Библиографические ссылки

1. Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. Chemodynamical evolution of gas near an expanding III region // *Astr. Rep.* — 2009. — Vol. 53. — P. 611–633.

**ОТКРЫТИЕ ГЛУБОКИХ ЗАТМЕНИЙ  
В КАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ IPHAS  
J013031.90+622132.4**

**В. П. Кожевников**

*Уральский федеральный университет*

Проводя фотометрические наблюдения катаклизмической переменной IPHAS J013031.90+622132.4, мы открыли глубокие затмения. Средняя глубина затмений  $1.87 \pm 0.03$  зв. величины. В феврале — сентябре 2018 г. мы пронаблюдали 14 затмений. Большой промежуток времени наблюдений позволил определить период затмений с высокой точностью,  $P_{\text{orb}} = 3.5844055 \pm 0.0000060$  ч.

**DISCOVERY OF DEEP ECLIPSES IN THE  
CATACLYSMIC VARIABLE IPHAS J013031.90+622132.4**

**V. P. Kozhevnikov**

*Ural Federal University*

Performing the photometric observations of the cataclysmic variable IPHAS J013031.90+622132.4, we discovered deep eclipses. The average eclipse depth is  $1.87 \pm 0.03$  mag. During 2018 February — September we observed 14 eclipses. The large time span of the observations allowed us to measure the eclipse period with high precision,  $P_{\text{orb}} = 3.5844055 \pm 0.0000060$  hr.

Катаклизмические переменные являются взаимодействующими двойными звездами, в которых красный карлик передает вещество белому карлику. Большой интерес представляют катаклизмические переменные, в которых наблюдаются затмения. Затмения позволяют оценить наклонение орбиты, которое необходимо для определения масс звезд-компонентов. Кроме того, затмения позволяют исследовать структуру аккреционного диска.

Для наблюдений катаклизмических переменных мы применяем многоканальный фотоэлектрический фотометр с фотоумножителями, установленный на 70-см телескопе системы Кассегрена. Фотометр и телескоп работают под управлением компьютера. Это означает, что компьютер автоматически поддерживает точное центрирование звезд в диафрагмах фотометра с помощью ПЗС-системы.

Кроме того, это означает, что мы можем устанавливать в диафрагмах фотометра невидимые глазом звезды, используя их координаты. Последнее существенно расширило возможности наблюдений слабых звезд. Рисунки 1 и 2 демонстрируют это на примере катаклизмической переменной IPHAS J013031.90+622132.4, в которой мы открыли глубокие затмения. Период затмений  $P_{\text{orb}} = 3.5844055 \pm 0.0000060$  ч. Их средняя глубина  $1.87 \pm 0.03$  зв. величины.

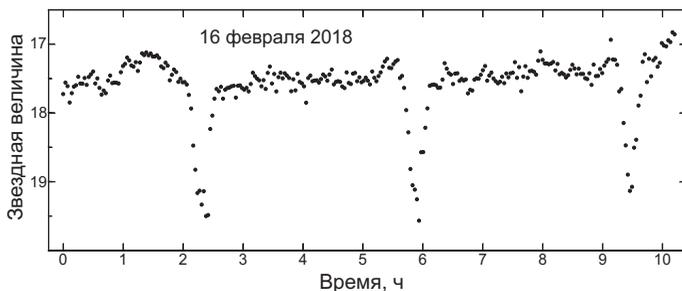


Рис. 1. Наиболее продолжительная кривая блеска IPHAS J013031.90+622132.4, в которой видны три последовательных затмения. Обратите внимание: звездная величина IPHAS J013031.90+622132.4 вне затмения приблизительно равна 17.5

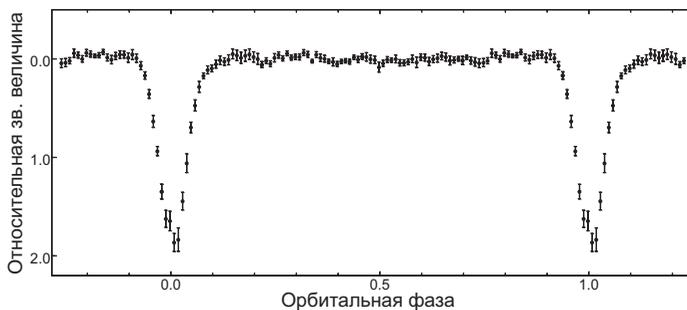


Рис. 2. Кривые блеска IPHAS J013031.90+622132.4, содержащие 14 затмений, свернуты с орбитальным периодом  $3.5844055 \pm 0.0000060$  ч. Средняя глубина затмений  $1.87 \pm 0.03$  звездной величины

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.0247).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПАР АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

**Е. С. Корень, Э. Д. Кузнецов**  
*Уральский федеральный университет*

Исследована динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах, движущихся в области планет земной группы. Сближения с планетами приводят к быстрому расхождению изначально близких орбит. Рассматривается эволюция в прошлое нескольких пар астероидов: (1566) Icarus — (5786) Talos, (177016) 2003 BM47 — (349507) 2008 QY, (152787) 1999 TB10 — (412976) 1987 WC и др. Результаты существенно зависят от начальных условий и параметров, описывающих эффект Ярковского.

## DYNAMICAL EVOLUTION RESEARCH FOR PAIRS OF NEAR-EARTH ASTEROIDS

**E. S. Koren, E. D. Kuznetsov**  
*Ural Federal University*

Dynamical evolution of asteroid pairs on close orbits has been investigated in the terrestrial planet region. Approaches to the planets lead to fast divergence of initially close orbits. Evolution in the past is considered for several asteroid pairs: (1566) Icarus — (5786) Talos, (177016) 2003 BM47 — (349507) 2008 QY, (152787) 1999 TB10 — (412976) 1987 WC and others. Results depend significantly on initial conditions and parameters of the Yarkovsky effect.

Динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах изучается более 10 лет [1]. Пары астероидов, движущихся по близким орбитам, могут быть связаны общим происхождением. Они могут образовываться в результате выброса фрагментов вещества крупных астероидов при некатастрофических соударениях этих астероидов с другими малыми телами. Пары астероидов могут формироваться в процессе дробления астероида под действием YORP-эффекта. Пары астероидов на близких орбитах могут появляться в результате распада двойных и кратных систем астероидов. Одним из механизмов, приводящих к распаду двойных и кратных систем, является действие BYORP-эффекта. Оценки возраста пар астероидов [2, 3]

указывают на продолжающийся и в настоящее время процесс формирования новых пар астероидов.

Анализ распределения пар астероидов показывает, что тесные пары сосредоточены в главном поясе астероидов. Среди известных астероидов, сближающихся с Землей, тесных пар не обнаружено. Одной из причин может быть гравитационное рассеяние образующихся пар астероидов в результате сближений с планетами земной группы.

С целью исследования механизмов гравитационного рассеяния выполнено исследование динамической эволюции нескольких пар астероидов на близких орбитах, движущихся в области планет земной группы: (1566) Icarus — (5786) Talos, (177016) 2003 BM47 — (349507) 2008 QY, (152787) 1999 TB10 — (412976) 1987 WC и др. Численное моделирование движения астероидов на интервале времени 100 000 лет в прошлое выполнялось с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit. Номинальные элементы орбит астероидов из базы AstDyS на эпоху  $T_0 = \text{MJD}58000$  ( $12^h 00^m 00^s$  03.09.2017) использовались в качестве начальных. Уравнения движения астероида, восьми больших планет и карликовой планеты Плутон интегрировались совместно.

Показано, что эффект гравитационного рассеяния пар астероидов в результате сближений с планетами земной группы можно использовать для объяснения отсутствия пар астероидов на близких орбитах среди астероидов, сближающихся с Землей. Результаты моделирования динамической эволюции конкретных пар астероидов существенно зависят от начальных условий и параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского на движение астероидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00015.

## Библиографические ссылки

1. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 280–290.
2. *Žižka J., Galád A., Vokrouhlický D. et al.* Asteroids 87887 - 415992: the youngest known asteroid pair? // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A20.
3. *Vokrouhlický D., Pravec P., Ďurech J. et al.* Detailed Analysis of the Asteroid Pair (6070) Rheinland and (54827) 2001 NQ8 // *Astron. J.* — 2017. — Vol. 153. — P. 270.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ АСТЕРОИДОВ ПО ДАННЫМ МНОГОЦВЕТНОЙ ФОТОМЕТРИИ В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ЛИРА-Б»

Э. Д. Кузнецов, М. А. Васильева  
*Уральский федеральный университет*

Анализируется возможность проведения таксономической классификации астероидов на основе данных космического эксперимента «Ли́ра-Б» о многоцветной фотометрии в 10 полосах в диапазоне от 175 до 1 050 нм. Получены оценки интегральных потоков в полосах, перекрывающихся с диапазоном, применяемым в таксономии Бас—ДеМео — от 450 до 2 450 нм. Сделан вывод, что данные многоцветной фотометрии позволят выполнить таксономическую классификацию астероидов для основных спектральных классов.

## ON POSSIBILITY OF ASTEROIDS TAXONOMY CLASSIFICATION BASED ON MULTICOLOR PHOTOMETRY IN THE LYRA-B SPACE EXPERIMENT

E. D. Kuznetsov, M. A. Vasiljeva  
*Ural Federal University*

Possibility of carrying out of asteroids taxonomy classification has been analyzed based on the LYRA-B space experiment data about multicolor photometry in 10 spectral bands in the range from 175 to 1050 nm. Estimations of integral fluxes have obtained for the bands which overlapped with the range of the Bus-DeMeo taxonomy that is from 450 to 2450 nm. Drew a conclusion that the multicolor photometry data allow to carry out of asteroids taxonomy classification for main spectral classes.

В ходе выполнения космического эксперимента «Ли́ра-Б» [1], который планируется реализовать на Российском сегменте Международной космической станции, в поле зрения телескопа будут регулярно попадать малые тела Солнечной системы. Для этих объектов будут фиксироваться звездные величины в 11 полосах с точностью не хуже  $0.1^m$ . Предельные звездные величины для объектов Солнечной системы от  $16^m$  в полосе V до  $18^m$  в панхроматическом свете.

Предельная звездная величина в панхроматическом свете не позволит обнаружить большое количество новых объектов, но даст возможность получить новые сведения о динамических и физических свойствах более чем 100 тыс. астероидов.

Многоцветная фотометрия в 10 полосах в диапазоне от 175 до 1 050 нм позволит выполнить массовые определения показателей цвета астероидов для этих полос. Особый интерес представляет полоса в области 700 нм. По этим наблюдениям можно сделать вывод о наличии на поверхности астероида гидратированных материалов.

Используемая в настоящее время таксономическая классификация астероидов Бас—ДеМео [2] основана на анализе спектров, полученных в видимом и инфракрасном диапазоне в интервале длин волн от 450 до 2 450 нм. Оценки интегральных потоков в полосах, перекрывающихся с диапазоном, применяемым в таксономии Бас—ДеМео, показали, что данные многоцветной фотометрии позволят выполнить таксономическую классификацию астероидов для основных спектральных классов. Результаты наблюдений в ходе эксперимента «Ли́ра-Б» создадут основу для расширения этой классификации в ультрафиолетовую область.

Полученные в результате решения этих задач данные о физических свойствах астероидов будут применены при исследовании динамической эволюции пар и групп астероидов, движущихся по близким орбитам [3].

Работа выполнена при поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации (контракт № 02.А03.21.0006) и Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть государственного задания, РК № АААА—А17—117030310283—7).

## Библиографические ссылки

1. *Zakharov A. I., Mironov A. V., Prokhorov M. E. et al.* The LYRA-B space experiment: Goals and principles for its realization // *Astronomy Reports*. — 2013. — Vol. 57. — P. 195–211.
2. *DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J.* An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. — 2009. — Vol. 202. — P. 160–180.
3. *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planetary and Space Science*. — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.

# ОЦЕНКА ВЕКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ БОЛЬШИХ ПОЛУОСЕЙ ОРБИТ АСТЕРОИДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

Э. Д. Кузнецов, Д. С. Устинов  
*Уральский федеральный университет*

Рассматривается практическая реализация алгоритма оценки векового дрейфа большой полуоси орбит астероидов, обусловленных влиянием эффекта Ярковского. Алгоритм основывается на данных о физических и динамических параметрах астероидов: большая полуось и эксцентриситет орбиты, диаметр, плотность, наклон оси вращения, альbedo Бонда. Получены оценки скорости дрейфа большой полуоси орбиты для ряда астероидов, включенных в программы наблюдений и теоретических исследований проекта KASPAR.

## ESTIMATION OF SECULAR PERTURBATIONS OF SEMI-MAJOR AXES OF ASTEROID ORBITS DUE TO THE YARKOVSKY EFFECT

E. D. Kuznetsov, D. S. Ustinov  
*Ural Federal University*

Practical realization of an algorithm of estimation of secular perturbations of a semi-major axis of asteroid orbits due to the Yarkovsky effect. The algorithm is based on data about physical and dynamical parameters: the semi-major axis and the eccentricity of the orbit, the diameter, the density, the obliquity, the Bond albedo. Estimations of the semi-major drift rate have obtained for several asteroids that included in the observational and theoretical parts of investigations of the KASPAR project.

В Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (АО УрФУ) реализуется проект KASPAR [1], направленный на исследование динамической эволюции астероидов на близких орбитах. В рамках этого проекта выполнен поиск пар астероидов на близких орбитах, проведен анализ связи пар астероидов с известными семействами астероидов, выполнено численное

моделирование динамической эволюции пар астероидов при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси под влиянием эффекта Ярковского. Численное моделирование движения астероидов выполнялось с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit. Номинальные элементы орбит астероидов из базы AstDyS на эпоху MJD58000 ( $12^h 00^m 00^s$  03.09.2017) использовались в качестве начальных. Уравнения движения астероида, восьми больших планет и карликовой планеты Плутон интегрировались совместно.

В работе [2] показано, что результаты моделирования динамической эволюции пар астероидов существенно зависят от параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского. Для определения этих параметров в АО УрФУ проводятся фотометрические наблюдения астероидов. Для астероидов, недоступных наблюдениям, оценки параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского, получаются на основе данных, содержащихся в каталогах орбитальных, динамических и физических параметров астероидов, основываясь на подходе, изложенном в работе [3] и примененном к задаче определения скорости дрейфа больших полуосей орбит астероидов, сближающихся с Землей. Поскольку большинство тесных пар астероидов на близких орбитах расположены вблизи внутренней границы пояса астероидов, этот алгоритм использовался для оценки скорости дрейфа больших полуосей орбит астероидов, входящих в пары. Алгоритм основывается на данных о физических и динамических параметрах астероидов: большой полуоси и эксцентриситете орбиты, диаметре, плотности, наклоне оси вращения, альбедо Бонда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00015.

## Библиографические ссылки

1. *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planetary and Space Science.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.
2. *Kuznetsov E. D., Glamazda D. V., Kaiser G. T. et al.* Pairs of Asteroids in Close Orbits // *LPI Contributions.* — 2018. — Vol. 2067. — P. 6014.
3. *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61.

# GAIA И РАССЕЯННЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

**А. В. Локтин, М. Э. Попова**

*Астрономическая обсерватория Уральского федерального  
университета*

На примере 42 рассеянных звездных скоплений показаны результаты наших первых попыток использования данных DR2 Gaia при оценивании параметров этих объектов.

## GAIA AND OPEN CLUSTERS

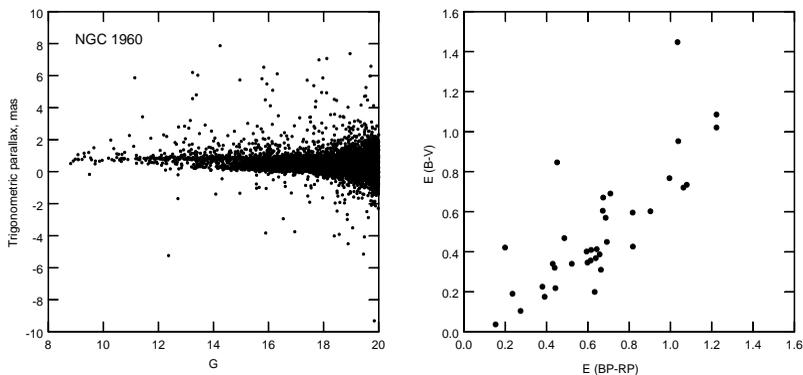
**A. V. Loktin, M. E. Popova**

*Astronomical Observatory of Ural Federal University*

We show the results of our first attempts to use Gaia DR2 data for estimation of the parameters of open clusters using on the base of 42 objects.

Рассеянные звездные скопления (РЗС) являются самыми полезными объектами для изучения структуры и эволюции диска Галактики. На основе данных Gaia их свойства могут быть исследованы с беспрецедентной точностью.

На данный момент по данным Gaia нами выделены члены для 42 интересующих нас РЗС и определены средние параллаксы и собственные движения этих скоплений. На рисунке (слева) показано распределение тригонометрических параллаксов звезд в области РЗС NGC1960, находящегося на расстоянии  $\approx 1.2$  кпк от Солнца. Члены РЗС, находящиеся на одинаковых расстояниях от Солнца, составляют горизонтальную последовательность, ширина которой определяется исключительно ошибками определения параллаксов. Из рисунка видно, что тригонометрические параллаксы Gaia прекрасно подходят для выделения вероятных членов даже удаленных от Солнца РЗС. Однако сравнение оценок модулей расстояния РЗС, полученных по данным Gaia, с величинами, полученными методом совмещения фотометрических диаграмм из «Однородного каталога параметров РЗС» [1], показало довольно большой разброс от линии, проходящей под углом  $45^\circ$ , что говорит о имеющихся неучтенных ошибках как в фотометрических данных, так и, возможно, в данных Gaia. Для некоторого количества звезд каталога Gaia DR2 имеются



Распределение тригонометрических параллаксов звезд в области РЗС NGC1960 (слева). Сравнение избытков цвета  $E(BP - RP)$  и  $E(B - V)$  (справа)

оценки избытка цвета  $E(BP - RP)$  и поглощения света  $A_G$ . Из-за особенностей полос фотометрической системы Gaia трудно построить методику, аналогичную применяемой для системы  $UBV$ . Однако получить поглощение света  $A_G$  можно, имея избыток цвета  $E(B - V)$ , известный в настоящее время практически для всех РЗС. На рисунке (справа) показано сравнение этих избытков цвета  $E(BP - RP)$  с избытками цвета  $E(B - V)$ , взятыми из «Однородного каталога параметров РЗС». Корреляция величин очевидна. Для имеющихся РЗС вычислены следующие отношения:  $A_G/E(B - V) = -3.14 \pm 0.23$ ,  $E(B - V)/E(BP - RP) = 0.767 \pm 0.062$ ,  $E(BP - RP)/E(BP - GP) = 2.07 \pm 0.08$ . Эти отношения дают возможность вычислить избытки цвета и поглощение света в фотометрической системе Gaia.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7).

## Библиографические ссылки

1. *Loktin A. V., Popova M. E.* Updated version of the “homogeneous catalog of open cluster parameters” // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Vol. 72. — P. 257–265.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ ДИСКА МЕТОДОМ НАИБОЛЬШЕГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Л. А. Максимова<sup>1</sup>, А. Ф. Холтыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт астрономии Российской академии наук,*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

На основании шкалы, описанной в работе Акимкина и др. (2012), был создан каталог расстояний до галактических планетарных туманностей (ПТ), классифицированных по Пеймбертовским типам. Промоделирована функция распределения  $Z$ -координаты ПТ, получены значения шкал высот тонкого и толстого дисков, а также высота плоскости симметрии распределения ПТ относительно Солнца. Рассчитанные шкалы высот согласуются с результатами других авторов, в том числе с полученными на основании звездных выборок.

## DETERMINING THE VERTICAL SCALE OF THE PLANETARY NEBULAE OF THE DISK BY THE METHOD OF MAXIMUM LIKELIHOOD

L. A. Maksimova<sup>1</sup>, A. F. Kholtygin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences,* <sup>2</sup>*Saint Petersburg State University*

Based on the scale from Akimkin et al. (2012), a catalog of distances to galactic planetary nebulae (PN), classified by Peimbert types, was created. The distribution function for  $Z$ -coordinate of the PN is modeled, the values of the scales of the heights of the thin and thick disks, as well as the height of the plane of symmetry of the distribution of the PN relative to the Sun are obtained. The calculated elevations are consistent with the results of other authors, including those obtained from stellar samples.

С использованием шкалы расстояний из работы [1] были рассмотрены три способа описания распределения объектов дисковых подсистем, полученных в работе [2], вдоль галактической высоты: экспоненциальное распределение (1), гауссовский профиль (2) и модель самогравитирующего изотермического диска (3) (где  $z_{\odot}$  — высота

Полученные значения вертикального масштаба и  $z_{\odot}$ .

	$h_1$ [пк]	$h_2$ [пк]	$h_3$ [пк]	$z_{\odot 1}$ [пк]	$z_{\odot 2}$ [пк]	$z_{\odot 3}$ [пк]
Весь диск	$429^{+22}_{-21}$	$580^{+21}_{-20}$	$443^{+19}_{-18}$	$-29 \pm 19$	$-60 \pm 29$	$-44 \pm 27$
Тонкий диск	$288^{+18}_{-16}$	$368^{+16}_{-15}$	$296^{+15}_{-14}$	$-8 \pm 21$	$-3 \pm 22$	$-4 \pm 22$

плоскости симметрии объектов относительно Солнца;  $h_i$  — вертикальный масштаб распределения):

$$N(z) = \frac{1}{2h_1} \exp\left(-\frac{|z - z_{\odot}|}{h_1}\right), \quad (1)$$

$$N(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z - z_{\odot}}{h_2}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$N(z) = \frac{1}{2\sqrt{2}h_3} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z - z_{\odot}}{\sqrt{2}h_3}\right). \quad (3)$$

Функция максимального правдоподобия (ФМП) равна произведению плотностей вероятности для  $n$  объектов. В таком случае искомые значения параметров достигаются при минимизации отрицательной логарифмической ФМП. Результаты моделирования представлены в таблице.

## Библиографические ссылки

1. *Akimkin V. V., Nikiforov I. I., Kholtygin A. F.* Distance scale calibration from kinematic analysis of an ensemble of the galactic planetary nebulae // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* — 2012. — Vol. 27. — P. 365–368.
2. *Maksimova L., Kholtygin A.* The spatial structure of the Galaxy subsystems as it looks from an analysis of the system of galactic planetary nebulae // *Journal of Physics Conference Series : Journal of Physics Conference Series.* — 2018. — Vol. 1038. — P. 012016.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ РЕЗОНАНСЫ

А. Э. Потоскуев, Э. Д. Кузнецов

*Уральский федеральный университет*

Исследована динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах при прохождении через области резонансов средних движений 1:4, 1:3, 2:5, 3:7. Рассмотрены явления рассеяния пар астероидов при прохождении через резонансы. Представлены возможные сценарии динамической эволюции для нескольких пар астероидов: (195807) 2002 QF17 — (243587) 1998 DU9 в окрестности резонанса 1:4, (263389) 2008 CR210 — (370095) 2001 SY238 в окрестности резонанса 1:3 и др. Показано, что результаты существенно зависят от параметров, описывающих эффект Ярковского.

## DYNAMICAL EVOLUTION RESEARCH FOR ASTEROID PAIRS IN CLOSE ORBITS UNDER PASSING THROUGH RESONANCES

A. E. Potoskuev, E. D. Kuznetsov

*Ural Federal University*

Dynamical evolution of asteroid pairs in close orbits passing through resonances 1:4, 1:3, 2:5, 3:7 has been investigated. Asteroid pairs resonant scattering has been considered under passing through the resonances. Possible dynamical evolution scenarios are presented for several asteroid pairs: (195807) 2002 QF17 — (243587) 1998 DU9 in the vicinity of the resonance 1:4, (263389) 2008 CR210 — (370095) 2001 SY238 in the vicinity of the resonance 1:3 and others. It is shown that results depend significantly on the parameters of the Yarkovsky effect.

Исследование динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах ведется более 10 лет. Пары астероидов, движущиеся по близким орбитам, могут иметь общее происхождение. Пары могут образовываться в результате выброса фрагментов вещества крупных астероидов при некатастрофических соударениях этих астероидов с другими малыми телами. Источником пар астероидов может

быть процесс дробления астероида под действием YORP-эффекта. В этом случае фрагмент под действием центробежной силы, теряющий связь с поверхностью астероида, должен двигаться относительно родительского тела со скоростью, превосходящей вторую космическую. Распад двойных и кратных систем астероидов также может приводить к формированию пар астероидов на близких орбитах. Одним из механизмов, приводящих к распаду двойных и кратных систем, может быть BYORP-эффект. Оценки возраста пар астероидов указывают на продолжающийся по настоящее время процесс формирования пар астероидов. Под влиянием эффекта Ярковского большая полуось орбиты испытывает вековые возмущения, знак которых зависит от направления осевого вращения астероидов. Одним из механизмов пополнения популяции астероидов, сближающихся с Землей, является дрейф астероидов главного пояса в области резонансов (средних движений и вековых) с последующим переходом на орбиты, лежащие в области движения планет земной группы. Как показано в работе [1], в окрестности резонансов 1:4 и 1:3 имеется несколько десятков очень тесных пар астероидов. В то же время среди известных астероидов, сближающихся с Землей, тесных пар не обнаружено. Одной из причин может быть рассеяние пар астероидов на близких орбитах при прохождении через резонансы с последующим гравитационным рассеянием на планетах земной группы.

С целью исследования механизмов рассеяния выполнено исследование динамической эволюции нескольких пар астероидов на близких орбитах, движущихся в окрестности резонансов: (195807) 2002 QF17 — (243587) 1998 DU9 в окрестности резонанса 1:4, (263389) 2008 CR210 — (370095) 2001 SY238 в окрестности резонанса 1:3 и др. Показано, что эффект рассеяния пар астероидов на резонансах можно использовать для объяснения отсутствия пар астероидов на близких орбитах среди астероидов, сближающихся с Землей. Отметим, что результаты существенно зависят от параметров, описывающих влияние эффекта Ярковского на движение астероидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00015.

## Библиографические ссылки

1. *Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planetary and Space Science.* — 2018. — Vol. 157. — P. 22–27.

## МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МАНТИИ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В УСЛОВИЯХ МЗС

**Н. А. Сатонкин, А. И. Васюнин, А. Б. Островский**  
*Уральский федеральный университет*

В работе рассматривается вопрос о микроскопическом безрешеточном моделировании эволюции мантии пылевой частицы в условиях межзвездной среды. Проведено моделирование с учетом таких физических процессов, как аккреция, десорбция и миграция по поверхности пыли. Потенциал поверхности определен при помощи поля Леннард-Джонса.

## OFF-LATTICE MICROSCOPIC MODELLING OF DUST GRAIN MANTLE IN ISM

**N. A. Satonkin, A. I. Vasyunin, A. B. Ostrovskii**  
*Ural Federal University*

We introduce an off-lattice method for modelling of evolution of dust grain mantle under typical conditions in the interstellar medium. Accretion, thermodesorption and thermodiffusion processes in grain mantle are taken into account. Surface potential is determined using Lennard-Jones field for mantle particles.

В работе рассматривается вопрос о микроскопическом безрешеточном моделировании эволюции мантии пылевой частицы в условиях межзвездной среды (МЗС). Поверхность пылевой частицы является катализатором для многих процессов в межзвездной среде [1], поэтому очень важно понимать, как она формируется и как происходит движение атомов и молекул по ней. До сих пор большинство попыток подобного моделирования основывались на использовании регулярных сеток (решеток), когда предполагается разбиение поверхности частицы на регулярные области квадратного сечения, границы которых имитируют замкнутые области пылинки. Это и есть моделирование на решетке (сеточный подход), идея которого предполагает, что атомы и молекулы передвигаются между предопределенными узлами. Барьеры диффузии и энергии связывания для ячеек зависят от парных взаимодействий в соседних квадратных областях. Но этот подход не позволяет получить полноценное

представление о морфологии пылевой частицы. Безрешеточный подход требует информации, касающейся возможных путей диффузии частицы на поверхности, а также определения места ее окончательного положения, так как эти соображения больше не будут заданы фиксированной решеткой, что серьезно увеличивает вычислительную нагрузку и усложняет сами расчеты.

Для реализации задачи был написан программный код, основанный на подходах, описанных в [2–4]. В работе проведено моделирование с учетом таких физических процессов, как аккреция, десорбция и миграция по поверхности пыли в поле потенциала поверхности, определяемого как потенциал Леннарда-Джонса [5]. Полученные результаты с учетом различных процессов, в разных условиях межзвездной среды представлены в докладе.

### Библиографические ссылки

1. *Tielens A. G. G. M.* The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium. — 2005.
2. *Garrod R. T.* Three-dimensional, Off-lattice Monte Carlo Kinetics Simulations of Interstellar Grain Chemistry and Ice Structure // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 778. — P. 158. 1310.2512.
3. *Gillespie Daniel T.* Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions // *The Journal of Physical Chemistry.* — 1977. — Vol. 81, № 25. — P. 2340–2361. <https://doi.org/10.1021/j100540a008>.
4. *Cuppen H. M., Garrod R. T.* Modelling of surface chemistry on an inhomogeneous interstellar grain // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 529. — P. A151.
5. *Jones J. E.* On the Determination of Molecular Fields. II. From the Equation of State of a Gas // *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* — 1924. — Vol. 106, № 738. — P. 463–477.

# Список участников конференции





---

ФИО	Организация	E-mail
Аберфелдс Артис	ВВШ	artis.aberfelds@venta.lv
Аввакумова Екатерина Анатольевна	УрФУ	ekaterina.avvakumova@urfu.ru
Акимкин Виталий Викторович	ИНАСАН	akimkin@inasan.ru
Алексеев Илья Юрьевич	КрАО РАН	ilya-alekseev@mail.ru
Алексеев Роман Алексеевич	ИПФ РАН	romanalexeev52@gmail.com
Алексеев Роман Константинович	УрФУ	alexeevrk73@mail.ru
Баляев Иван Алексеевич	СПбГУ	balasteravan@yandex.ru
Безгодов Константин Андреевич	УрФУ	kons.bezg@gmail.com
Белёва Елена Алексеевна	УрФУ	lenka.hakuna.matata@gmail.com
Берзиньш Карлис	ВВШ	karlis.berzins@venta.lv
Бисярина Анастасия Павловна	АО УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Бородин Александр Васильевич	ИЭРиЖ УрО РАН	bor@ipae.uran.ru
Бородина Ольга Игоревна	УрФУ	olga.o-bor@yandex.ru
Боруха Мария Александровна	СПбГУ	maybeemoi@gmail.com
Бражко Варвара Валерьевна	УрФУ	bragko12@mail.ru
Валеева Азалия Салаватовна	УрФУ	ihateadelheid@gmail.com
Варакин Владимир Николаевич	МГУ	varakin@laser.chem.msu.ru
Васильев Вячеслав Антонович	УрФУ	megbegbonok@gmail.com
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa1907@icloud.com
Васюнин Антон Иванович	УрФУ	anton@urfu.ru
Ватолин Янис Юрьевич	УрФУ	yavatolin@mail.ru
Вербицкий Елисей Сергеевич		elka-xxsa@ukr.net

---

---

ФИО	Организация	E-mail
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Вибе Юлия Зигфридовна	АО УрФУ	wjulia@mail.ru
Войтко Дарья Игоревна	УрФУ	gornosty@outlook.com
Волков Константин Валерьевич	УрФУ	kvvolkov19@gmail.com
Волошин Владимир Николаевич	УрФУ	sticknot@mail.ru
Галиев Михаил Сергеевич	УрФУ	astrotechnocrat@gmail.com
Гильдебрант Екатерина Александровна	СПбГУ	gildebrant_katerina@mail.ru
Гималиева Алина Дамировна	УрФУ	alina.gimalieva@mail.ru
Голубятников Герман Юрьевич	ИПФ РАН	ivan@mail.ru
Горбан Алёна Сергеевна	НИУ ВШЭ	grbanalj@rambler.ru
Горбачев Марк Андреевич	КФУ	mark-gorbachev@rambler.ru
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	stanislav.gorda@urfu.ru
Гусев Владислав Денисович	УрФУ	Vlad06gusev@gmail.com
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Ерохина Елена Евгеньевна	УрФУ	ghosts.in.us@gmail.com
Ефремова Полина Дмитриевна	КФУ	polyaefremowa@gmail.com
Жуклевич Глеб Сергеевич	УрФУ	zkl271828@gmail.com
Захаров Андрей Игоревич	ГАИШ МГУ	zakh@sai.msu.ru
Землянуха Петр Михайлович	ИПФ РАН	petez@ipfran.ru
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Ильина Надежда Вячеславовна	УрФУ	dr.wood.ilina@yandex.ru

---

---

ФИО	Организация	E-mail
Ихсанова Алина Ильгамовна	КФУ	ikhсанova98@gmail.com
Казанцев Максим Борисович	МАОУ «Лицей № 6»	kazantzev.maxim2018@yandex.ru
Калинин Александр Александрович	УрФУ	alexander.kalinin@urfu.ru
Калинина Наталия Дмитриевна	УрФУ	natalia.kalinina@urfu.ru
Калиничева Евгения Сергеевна	ИНАСАН	Good2jane@gmail.com
Каргальцева Наталья Сергеевна	ЧелГУ	kargaltsevans@mail.ru
Карраро Джованни	УНИПД	giovanni.carraro@unipd.it
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Ковалева Дана Александровна	ИНАСАН	dkovaleva@mail.ru
Ковальчук Валентин Константинович	ЮУрГУ	valek-kovalchuk@yandex.ru
Кожевников Валерий Петрович	УрФУ	Valery.Kozhevnikov@urfu.ru
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	alla.kozhevnikova@urfu.ru
Козлова Дарья Вадимовна	УрФУ	kozlovadaria@list.ru
Комеш Токтархан	ХАО CAS	toktarhan@xao.ac.cn
Кондратьев Илья Алексеевич	ИКИ РАН	mrkondratyev95@gmail.com
Коновалов Антон Вадимович	УрФУ	herr.paulus@inbox.ru
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Корень Екатерина Сергеевна	УрФУ	modaeru@gmail.com
Коротаева Марина Георгиевна	УрФУ	korotaevamg@mail.ru
Кругликов Николай Александрович	УрФУ	nick@imp.uran.ru
Крюкова Екатерина Андреевна	СибГУ	kate-13-kr@yandex.ru
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	УрФУ	eduard.kuznetsov@urfu.ru

---

---

ФИО	Организация	E-mail
Кулеш Максим Вячеславович	УрФУ	MV.Kulesh@yandex.ru
Лапинов Александр Владимирович	ИПФ РАН	lapinov@appl.sci-nnov.ru
Локтин Александр Васильевич	УрФУ	loktin@mail.ru
Максимова Ломара Аслановна	ИНАСАН	lomara.maksimova@gmail.com
Малков Олег Юрьевич	ИНАСАН	malkov@inasan.ru
Малютин Иван Александрович	УрФУ	Smoke074@yandex.ru
Манжосина Анастасия Юрьевна	УрФУ	manzhosinan@gmail.com
Маханькова Ульяна Андреевна	УрФУ	mahulyana@mail.ru
Медведев Михаил Геннадьевич	УрФУ	grammar.mihannik@gmail.com
Михайлова Ксения Алексеевна	УрФУ	kk17mm@mail.ru
Михневич Варвара Олеговна	УрФУ	roza999999999@gmail.com
Моисеенко Сергей Григорьевич	ИКИ РАН	moiseenko@iki.rssi.ru
Молярова Тамара Сергеевна	ИНАСАН	molyarova@inasan.ru
Мурга Мария Сергеевна	ИНАСАН	mshramcova@gmail.com
Назаров Сергей Валентинович	КрАО РАН	astrotourist@gmail.com
Немтинова Александра Вячеславовна	УрФУ	aleksandra.nemtinova14@mail.ru
Никандров Данил Юрьевич	УрФУ	nikandrovdan@yandex.ru
Никифорова Виктория Вячеславовна	УрФУ	vikkiteni@gmail.com
Никонов Алексей Сергеевич	АКЦ ФИАН	nikonalesheo@gmail.com
Никоноров Игорь Николаевич	КФУ	igornikonorov.igor@yandex.ru
Новикова Александра Алексеевна	УрФУ	sashanoviikova@gmail.com
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrey.Ostrovsky@urfu.ru

---

ФИО	Организация	E-mail
Павлюченков Ярослав Николаевич	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	perminov12@yandex.ru
Пермякова Татьяна Александровна	АО УрФУ	Tanya-Permyakova-1998@yandex.ru
Петрашкевич Игорь Вячеславович	УрФУ	petra444@mail.ru
Петрова Алена Сергеевна	УрФУ	cool.petrovaa2013@yandex.ru
Пирогов Лев Евгеньевич	ИПФ РАН	pirogov@appl.sci-nnov.ru
Плотникова Анастасия Николаевна	УрФУ	tyww@yandex.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
Прохоров Михаил Евгеньевич	ГАИШ МГУ	mike.prokhorov@gmail.com
Птухина Виктория Андреевна	АО УрФУ	vikaptuhina@mail.ru
Пунанова Анна Федоровна	УрФУ	anna.punanova@urfu.ru
Решетников Анатолий Витальевич	Police	exp_crimin@list.ru
Романовская Анна Михайловна	ИНАСАН	astoram@mail.ru
Рябухина Ольга Леонидовна	ИНАСАН	ryabukhina@inasan.ru
Саванов Игорь Спартакович	ИНАСАН	savanov@inasan.ru
Садова Дарья Дмитриевна	ИПФ РАН	daria_sadova@mail.ru
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	Svetlana.Salii@urfu.ru
Самигуллин Эдуард Робертович	УрФУ	edik.samigullin.99@gmail.com
Сатонкин Николай Артемович	УрФУ	virus909090@yandex.ru
Селезнев Антон Федорович	АО УрФУ	anton.seleznev@urfu.ru

---

ФИО	Организация	E-mail
Семенов Дмитрий Александрович	МРИА	dmitry.a.semenov@gmail.com
Сивкова Евгения Эдуардовна	ИНАСАН	sivkova@gmail.com
Сизова Мария Дмитриевна	ИНАСАН	sizova@inasan.ru
Сильченко Ольга Касьяновна	МГУ	olga@sai.msu.ru
Слодарж Николай Алексеевич	УрФУ	nikolai.slodarzh@yandex.ru
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	Arashu@rambler.ru
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	andrej.sobolev@urfu.ru
Соколова Валерия Алексеевна	УрФУ	sokolova.valeriie@gmail.com
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@gaoran.Ru
Столяров Андрей Владиславович	МГУ	avstol@gmail.com
Тараскина Анастасия Николаевна	СПбГУ	senreiho@gmail.com
Терешин Даниил Дмитриевич	УрФУ	tereshin.dd@gmail.com
Топчиева Анастасия Павловна	ИНАСАН	stasyat@inasan.ru
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Устинов Денис Сергеевич	УрФУ	denisusti@gmail.com
Фарафонтова Анастасия Александровна	УрФУ	4045673579@mail.ru
Фаткуллина Наталья Евгеньевна	УрФУ	NataliaNatanson@mail.ru
Фомин Сергей Олегович	ЧелГУ	fominso@csu.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	УрФУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Хачай Юрий Васильевич	ИГФ УРО РАН	yu-khachay@yandex.ru
Холтыгин Александр Федорович	СПбГУ	afkholtygin@gmail.com
Холщевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk3504@mail.ru

---

---

ФИО	Организация	E-mail
Чазов Дмитрий Андреевич	УрФУ	dima.chazov.00@mail.ru
Чазов Никита Андреевич	УрФУ	nikita.googlov@gmail.com
Чепкасов Валентин Леонидович	УрФУ	morkys.111@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
Шамурина Дарья Викторовна	УрФУ	warafey@gmail.com
Шарапов Константин Владиславович	Контур	shkval1993@ya.ru
Шмелдс Иварс	ВВШ	ivarss@venta.lv
Шустов Борис Михайлович	ИКИ РАН	bshustov@inasan.ru
Эскин Борис Борисович	СПбГУ	esk@astro.spbu.ru

---



# Содержание

<b>Обзорные лекции</b>	<b>5</b>
Алексеев И. Ю., Кожевникова А. В., Козлова О. В. Циклы пятенной активности у холодных звезд . . . . .	7
Зинченко И. И. Межзвездные волокна . . . . .	14
Кирсанова М. С. Поиск расширяющихся областей H II вблизи массивных звезд . . . . .	22
Ковалева Д. А. Данные Gaia DR2: особенности, ограничения и способы доступа . . . . .	29
Кононов Д. А. Обратные задачи в астрономии и астрофизике .	38
Малков О. Ю. Двойные звезды и соотношение масса—светимость	47
Прохоров М. Е., Захаров А. И. Российский космический звездно-астрономический эксперимент «Лира-Б» на борту МКС . . . . .	55
Сильченко О. К. Эволюция галактик . . . . .	75
Соловьев А. А. Строение солнечных факелов . . . . .	88
Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е. Космическое магнитное поле . . . . .	92
Холшевников К. В., Боруха М. А., Эскин Б. Б. О фигурах Плутона и Харона . . . . .	112
Шустов Б. М. О современном состоянии развития российской астрономии . . . . .	132
Карраро Дж. Gaia и структура Галактики . . . . .	143
<b>Студенческие доклады</b>	<b>145</b>
Абдуллажанов Р. Р., Ковальчук В. К. Исследование динамических параметров жесткой посадки космического аппарата на поверхность астероида . . . . .	147
Бородина О. И., Селезнев А. Ф. Исследование населения двойных звезд в рассеянных звездных скоплениях . . . . .	149
Гусев В. Д., Малютин И. А. Динамическая эволюция в областях вторичных резонансов, обусловленных световым давлением, в окрестности орбит систем ГЛОНАСС и GPS . . .	150
Ефремова П. Д. Исследование фотометрической и спектральной переменности избранных активных ядер галактик . . .	152
Жуклевич Г. С. Определение периодов вращения астероидов по наблюдениям на телескопах Коуровской астрономической обсерватории . . . . .	153
Ихсанова А. И. Интерпретация кривых блеска затмений в системах типа AM Her . . . . .	154
Кондратьев И. А., Моисеенко С. Г. Метод опорных операторов в 3D и моделирование теплопроводности в коре нейтронных звезд . . . . .	156

<b>Козлова Д. В.</b> Газовые облака в сейфертовских галактиках . . . . .	157
<b>Кулеш М. В., Селезнев А. Ф.</b> Сравнение функций блеска рассеянных звездных скоплений по данным 2MASS и Gaia DR2 . . . . .	159
<b>Никифорова В. В., Селезнев А. Ф.</b> Исследование близких к Солнцу рассеянных звездных скоплений в Линдбладовской системе координат . . . . .	161
<b>Никонов А. С.</b> Релятивистская струя в галактике M87 с субпарсековым разрешением . . . . .	162
<b>Плотникова А. Н., Соболев А. М.</b> Сравнение методов определения расстояний до звезд, ионизирующих туманности . . . . .	164
<b>Научные сообщения</b> . . . . .	167
<b>Алексеев Р. А., Лапинов А. В., Голубятников Г. Ю.</b> Субдоплеровские исследования спектров изотопологов молекул $\text{NH}_2\text{D}$ и $\text{HC}_3\text{N}$ . . . . .	169
<b>Баляев И. А.</b> Исследование областей начальных данных астероидов, ведущих к соударению с Землей . . . . .	171
<b>Бисярина А. П., Соболев А. М., Горда С. Ю., Татарников А. М., Шенаврин В. И., Aberfelds A., Shmeld I., Толмачев А. М.</b> Мазерное излучение, фотометрическая и спектральная переменность в направлении на V 645 Cyg и LkH $\alpha$ 234 . . . . .	172
<b>Вибе Д. З., Столяров А. В., Варакин В. Н., Мурга М. С.</b> Некоторые особенности химических процессов в протопланетных дисках . . . . .	174
<b>Гильдебрант Е. А.</b> О характеристиках сближений с Землей опасных астероидов . . . . .	176
<b>Землянуха П. М., Садова Д. Д., Зинченко И. И., Оджжа Д. К.</b> Распределение и свойства нейтрального атомарного водорода в комплексе S254—S258 . . . . .	178
<b>Калиничева Е. С., Саванов И. С., Дмитриенко Е. С.</b> Поверхностная активность звезд скопления Ясли по данным миссии K2 . . . . .	180
<b>Каргальцева Н. С., Хайбрахманов С. А., Дудоров А. Е.</b> Моделирование коллапса магнитных протозвездных облаков и образования первичных протозвездных дисков . . . . .	182
<b>Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н., Тутуков А. В.</b> Моделирование вязкой эволюции протопланетного диска с учетом образования конвективно-неустойчивых областей . . . . .	184
<b>Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З., Семенов Д. А.</b> Соотношение C/O в газовой и ледяной фазе в протопланетных дисках . . . . .	186

<b>Перминов А. С., Кузнецов Э. Д.</b> Динамическая эволюция компактных внесолнечных планетных систем . . . . .	188
<b>Попова Е. А., Соболев А. М.</b> Исследование поляризации мазеров в областях звездообразования Галактики по наблюдениям на РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН . . . . .	190
<b>Романовская А. М., Рябчикова Т. А., Шуляк Д. В.</b> Изменение с фазой вращения вертикальной стратификации элементов Fe и Sr в атмосфере Ар-звезды 78 Vir . . . . .	192
<b>Рябухина О. Л., Кирсанова М. С.</b> Исследование волокнообразного темного облака WB 673 . . . . .	194
<b>Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Шустов Б. М.</b> Выметание пылевых частиц из дисковых галактик . . . . .	196
<b>Сизова М. Д., Шустов Б. М.</b> О кинетическом и энергетическом методах изменения орбит небесных тел . . . . .	198
<b>Смирнова К. И., Вибе Д. З.</b> Кинематика газа и параметры пыли в дисковых галактиках . . . . .	200
<b>Топчиева А. П., Павлюченков Я. Н.</b> Моделирование синтетических изображений областей ИП на базе физико-химической модели с эволюцией пыли . . . . .	202
<b>Фомин С. О., Дудоров А. Е.</b> Магнитная ионизационно-тепловая неустойчивость в областях ионизованного водорода . . . . .	204
<b>Шайдулин В. Ш.</b> Исследование вращения астероида как твердого тела . . . . .	205
<b>Безгодов К. А., Бородин А. В., Кузнецов Э. Д.</b> Вариации инсоляции для субарктических и арктических широт Урала и Западной Сибири в голоцене . . . . .	206
<b>Горбачев М. А.</b> Анализ вспышечной активности каталога GTSh10 по данным автоматизированных обзоров . . . . .	208
<b>Горда С. Ю.</b> Возможная цикличность пятенной активности AM Leo . . . . .	210
<b>Калиничева Е. С., Саванов И. С., Дмитриенко Е. С.</b> Дифференциальное вращение звезд молодых скоплений по данным миссии K2 . . . . .	212
<b>Калинин А. А., Калинина Н. Д.</b> Синтез спектра в области линии K CaII в простой магнитогидростатической модели солнечного пятна . . . . .	214
<b>Кирсанова М. С., Васюнин А. И.</b> Сложные молекулы вблизи туманности Ориона . . . . .	216
<b>Кожевников В. П.</b> Открытие глубоких затмений в катаклизмической переменной IPHAS J013031.90+622132.4 . . . . .	217
<b>Корень Е. С., Кузнецов Э. Д.</b> Исследование динамической эволюции пар астероидов, сближающихся с Землей . . . . .	219

<b>Кузнецов Э. Д., Васильева М. А.</b> О возможности таксономической классификации астероидов по данным многоцветной фотометрии в космическом эксперименте «Ли́ра-Б» . . . . .	221
<b>Кузнецов Э. Д., Устинов Д. С.</b> Оценка вековых возмущений больших полуосей орбит астероидов под действием эффекта Ярковского . . . . .	223
<b>Локтин А. В., Попова М. Э.</b> Gaia и рассеянные звездные скопления . . . . .	225
<b>Максимова Л. А., Холтыгин А. Ф.</b> Определение вертикальной шкалы планетарных туманностей диска методом наибольшего правдоподобия . . . . .	227
<b>Потоскуев А. Э., Кузнецов Э. Д.</b> Исследование динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах при прохождении через резонансы . . . . .	229
<b>Сатонкин Н. А., Васюнин А. И., Островский А. Б.</b> Микроскопическое моделирование эволюции мантии пылевой частицы в условиях МЗС . . . . .	231

<b>Список участников конференции</b>	<b>233</b>
--------------------------------------	------------

# Contents

<b>Lectures</b>	<b>5</b>
<b>Alekseev I. J., Kozhevnikova A. V., Kozlova O. V.</b> Starspot activity cycles of cold stars . . . . .	7
<b>Zinchenko I. I.</b> Interstellar filaments . . . . .	14
<b>Kirsanova M. S.</b> Search of expanding H II regions near massive stars	22
<b>Kovaleva D. A.</b> Gaia DR2 data: characteristics, limitations, access	29
<b>Kononov D. A.</b> Inverse problems in astronomy and astrophysics . .	38
<b>Malkov O. Yu.</b> Binary stars and the mass—luminosity relation . .	47
<b>Prokhorov M. E., Zakharov A. I.</b> Russian space astronomical experiment “Lira-B” on board the ISS . . . . .	55
<b>Silchenko O. K.</b> Evolution of galaxies . . . . .	75
<b>Solovjev A. A.</b> The structure of the solar torches . . . . .	88
<b>Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E.</b> Cosmic magnetic fields	92
<b>Kholshevnikov K. V., Borukha M. A., Eskin B. B.</b> On the figures of the Pluto and Charon . . . . .	112
<b>Shustov B. M.</b> On the state of art of development of astronomy in Russia . . . . .	132
<b>Carraro G.</b> Gaia and the Galactic structure . . . . .	143
<b>Students talks</b>	<b>145</b>
<b>Abdullazhanov R. R., Kovalchuk V. K.</b> Study of dynamic parameters a spacecraft hard landing on an asteroid surface . . .	147
<b>Borodina O. I., Seleznev A. F.</b> An investigation of the binary system population in open clusters . . . . .	149
<b>Gusev V. D., Malyutin I. A.</b> Dynamical evolution in regions of secondary resonances due to solar radiation pressure in the vicinity orbits of the GLONASS and GPS systems . . . . .	150
<b>Efremova P. D.</b> The research of selected active galactic nuclei’s photometric and spectral variability . . . . .	152
<b>Zhuklevich G. S.</b> Determination of asteroids’ rotation periods observed on telescopes of the Kourovo Astronomical Observatory	153
<b>Ikhsanova A. I.</b> The interpretation of eclipse light curves in AM Her type systems . . . . .	154
<b>Kondratyev I. A., Moiseenko S. G.</b> Basic operator method in 3D and heat transfer modelling in neutron star crust . . . . .	156
<b>Kozlova D. V.</b> Gas clouds in Seyfert galaxies . . . . .	157
<b>Kulesh M. V., Seleznev A. F.</b> Comparison of the open cluster luminosity functions by the data of 2MASS and Gaia DR2 . .	159
<b>Nikiforova V. V., Seleznev A. F.</b> An investigation of open clusters close to the Sun in the Lindblad coordinate system . . . .	161
<b>Nikonov A. S.</b> High-resolution study of the inner jet of M87 at 8 and 15 GHz . . . . .	162

<b>Plotnikova A. N., Sobolev A. M.</b> Comparison of methods for determining distances to stars, ionizing nebulae . . . . .	164
---	-----

**Contributed talks** **167**

<b>Alekseev R. A., Lapinov A. V., Golubyatnikov G. Yu.</b> Sub-Doppler investigations of the spectra of molecules isotopologues NH <sub>2</sub> D and HC <sub>3</sub> N . . . . .	169
<b>Balyaev I. A.</b> Investigation of asteroid initial data regions, leading to a collision with the Earth . . . . .	171
<b>Bisyarina A. P., Sobolev A. M., Gorda S. Yu., Tatarnikov A. M., Shenavrin V. I., Aberfelds A., Shmeld I., Tolmachev A. M.</b> Maser emission, spectral and photometric variability of V 645 Cyg and LkH $\alpha$ 234 . . . . .	172
<b>Wiebe D. S., Stolyarov A. V., Varakin V. N., Murga M. S.</b> Some features of chemical processes in protoplanetary disks . . . . .	174
<b>Gildebrant E. A.</b> About the characteristics of the approaches to the Earth hazardous asteroids . . . . .	176
<b>Zemlyanukha P. M., Sadova D. D., Zinchenko I. I., Ojha D. K.</b> Distribution and properties of neutral atomic hydrogen in complex S254—S258 . . . . .	178
<b>Kalinicheva E. S., Savanov I. S., Dmitrienko E. S.</b> Surface activity of stars in the Praesepe cluster observed by the mission K2 . . . . .	180
<b>Kargaltseva N. S., Khaibrakhmanov C. A., Dudorov A. E.</b> Simulation of the collapse of magnetic protostellar clouds and formation of pseudo-disks . . . . .	182
<b>Maksimova L. A., Pavlyuchenkov Ya. N., Tutukov A. V.</b> Simulation of viscous protoplanetary disk evolution with convectively unstable regions . . . . .	184
<b>Molyarova T. S., Akimkin V. V., Wiebe D. S., Semenov D. A.</b> C/O ratio in gas and ice components of protoplanetary disks . . . . .	186
<b>Perminov A. S., Kuznetsov E. D.</b> Dynamical evolution of packed extrasolar planetary systems . . . . .	188
<b>Popova E. A., Sobolev A. M.</b> Study of polarization of masers in star forming regions of our Galaxy by observation on RT-22 of PRAO LPI RAS . . . . .	190
<b>Romanovskaya A. M., Ryabchikova T. A., Shulyak D. V.</b> The variation of the Fe and Cr abundance stratification with the rotation phase in the atmosphere of Ap star 78 Vir . . . . .	192
<b>Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S.</b> Study of the filamentary dark cloud WB 673 . . . . .	194
<b>Sivkova E. E., Wiebe D. S., Shustov B. M.</b> Dust expulsion from disks galaxies . . . . .	196

<b>Sizova M. D., Shustov B. M.</b> On kinetic and energetic approaches to change orbits of celestial bodies . . . . .	198
<b>Smirnova K. I., Wiebe D. S.</b> Gas kinematics and dust parameters in disk galaxies . . . . .	200
<b>Topchieva A. P., Pavlyuchenkov Ya. N.</b> Modeling synthetic images of HII regions based on the the physical and chemical model . . . . .	202
<b>Fomin S. O., Dudorov A. E.</b> Magnetic ionization-thermal instability in H II regions . . . . .	204
<b>Shaidulin V. Sh.</b> Study of Asteroid's Rotation As a Solid Body .	205
<b>Bezgodov K. A., Borodin A. V., Kuznetsov E. D.</b> Variations of insolation for subarctic and arctic latitudes of the Urals and Western Siberia in the holocene . . . . .	206
<b>Gorbachev M. A.</b> Analysis of the flare activity of stars from the GTSH10 catalog based on automated surveys . . . . .	208
<b>Gorda S. Yu.</b> Possible cyclisity of the spotted activity of AM Leo	210
<b>Kalinicheva E. S., Savanov I. S., Dmitrienko E. S.</b> Surface differential rotation of stars in young clusters observed by the mission K2 . . . . .	212
<b>Kalinin A. A., Kalinina N. D.</b> Synthesis of the spectrum in the CaII K line region for the simple magnetohydrostatic model of sunspot . . . . .	214
<b>Kirsanova M. S., Vasyunin A. I.</b> Complex molecules in the Orion Bar PDR . . . . .	216
<b>Kozhevnikov V. P.</b> Photometric observations of the intermediate polar V1033 Cas . . . . .	217
<b>Koren E. S., Kuznetsov E. D.</b> Dynamical evolution research for pairs of near-Earth asteroids . . . . .	219
<b>Kuznetsov E. D., Vasiljeva M. A.</b> On possibility of asteroids taxonomy classification based on multicolor photometry in the LYRA-B space experiment . . . . .	221
<b>Kuznetsov E. D., Ustinov D. S.</b> Estimation of secular perturbations of semi-major axes of asteroid orbits due to the Yarkovsky effect . . . . .	223
<b>Loktin A. V., Popova M. E.</b> Gaia and open clusters . . . . .	225
<b>Maksimova L. A., Kholtygin A. F.</b> Determining the vertical scale of the planetary nebulae of the disk by the method of maximum likelihood . . . . .	227
<b>Potoskuev A. E., Kuznetsov E. D.</b> Dynamical evolution research for asteroid pairs in close orbits under passing through resonances	229
<b>Satonkin N. A., Vasyunin A. I., Ostrovskii A. B.</b> Off-lattice microscopic modelling of dust grain mantle in ISM . . . . .	231

Научное издание

**Физика Космоса**

Труды 48-й Международной  
студенческой научной конференции  
(Екатеринбург,  
28 января — 1 февраля 2019 г.)

Редактор Т. А. Федорова  
Оригинал-макет — Д. З. Вибе, Э. Д. Кузнецов,  
А. Б. Островский, С. В. Салий

Подписано в печать 16.01.2019. Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага для множительных аппаратов. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 15,5. Усл. печ. л. 14,8.  
Тираж 150 экз. Заказ 367.

Издательство Уральского университета  
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ УрФУ  
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.  
Тел. (343) 350-56-64

ISBN 978-5-7996-2517-7



9 785799 625177