

ISSN 0044-3948

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОСМОНАВТИКА
АСТРОНОМИЯ
ГЕОФИЗИКА

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ

6/2016





Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
“Наука”
Москва

Земля и Вселенная

6/2016



Новости науки и другая информация: Галактика Франкенштейн [16]; Межгалактический газ “падает” на черную дыру [28]; Туманность от остатка сверхновой [39]; “Галактика-головастик” [52]; Солнце в июне – июле 2016 г. [53]; Как образовалась наша Галактика? [94]; Темные полосы на Марсе [97]; 48-я основная экспедиция на МКС [98]; Самая большая звезда во Вселенной [104]; Полярное сияние на Юпитере [110]; Скопления галактик помогут найти темную энергию [111]

В номере:

- 3 ШУСТОВ Б. М. К 80-летию Института астрономии РАН
17 БИСИКАЛО Д. В., КАЙГОРОДОВ П. В., ЧЕРЕНКОВ А. А. Аккреционные процессы в двойных звездах
29 ВИБЕ Д. З. Молекулы в космосе
40 ПОЛЯЧЕНКО Е. В., МАШОНКИНА Л. И., ХОПЕРСКОВ С. А. Прогресс в исследованиях динамики и химии галактик
56 РЫХЛОВА Л. В. Околоземная астрономия
67 ЧУГАЙ Н. Н., МАШОНКИНА Л. И., ПАХОМОВ Ю. В., РЯБЧИКОВА Т. А. Раскрывая секреты звездного света
79 КУЗИН С. П., ЭБАУЭР К. В., КЛЮЙКОВ А. А. Использование методов космической геодезии в геодинимике

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

- 90 ДЛУЖНЕВСКАЯ О. Б., СИЧЕВСКИЙ С. Г. Международная виртуальная обсерватория

СИМПОЗИУМЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СЪЕЗДЫ

- 95 ЛЁВКИНА П. А. “Околоземная астрономия – 2015”

ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АСТРОНОМИЯ

- 100 ЩИВЬЁВ В. И. Небесный календарь: январь–февраль 2017 г.

ХРОНИКА СЕЙСМИЧНОСТИ ЗЕМЛИ

- 105 СТАРОВОЙТ О. Е., ЧЕПКУНАС Л. С., КОЛОМИЕЦ М. В. Сейсмичность Земли в первом полугодии 2016 г.
108 Указатель статей и заметок, опубликованных в журнале “Земля и Вселенная” в 2016 г.



© Российская академия наук, 2016
© ФГУП «Издательство «Наука», 2016
© Редколлегия журнала
«Земля и Вселенная». Составление, 2016

Zemlya i Vselennaya (Earth and Universe); Moscow, Profsoyuznaya str., 90, f. 1965, 6 a year; by the Nauka (Science) Publishing House; Joint edition of the Russian Academy of Science; popular, current hypotheses of the origin and development of the Earth and Universe; astronomy, geophysics and space research; Chief Editor V.K. Abalakin; Deputy Editor V.M. Kotlyakov; Deputy Editor S.P. Perov

На стр. 1 обложки: Туманность DEM L316A, сформированная остатком сверхновой в Большом Магеллановом Облаке (расстояние – 160 тыс. св. лет от нас). Сброшенная оболочка звезды образовала в пространстве нити горячего ионизованного газа красного цвета. Снимок получен 25 июля 2016 г. с помощью КТХ. Фото NASA/STScI/JPL (к стр. 39).

На стр. 2 обложки: Спиральная галактика UGC1382 диаметром 718 тыс. св. лет в созвездии Насос (расстояние – 250 млн св. лет). Зеленый цвет показывает распределение в пространстве водорода низкой плотности. Синтезированное изображение составлено из снимков, сделанных в УФ- (космическая обсерватория «GALEX»), радио- (наземная обсерватория VLA) и видимом диапазонах (обзор DSS). Фото NASA/JPL/Caltech/SDSS/NRAO (к стр. 16).

На стр. 3 обложки: вверху – «галактика-головастик» LEDA 36252 (Kiso 5639) в созвездии Большой Медведицы. В «голове» находится множество молодых звезд, в «хвосте» расположились длинные газовые нити и четыре области звездообразования с яркими более старыми звездами. Снимок получен в июне 2016 г. КТХ с использованием видимого, УФ-, ИК- и H α -фильтров. Фото NASA/ESA (к стр. 52). Внизу – полярное сияние на северном полюсе Юпитера. Изображение сделано 30 июня 2016 г. КТХ. Фото NASA/JPL (к стр. 110).

На стр. 4 обложки: Так по представлению художника газовые облака “падают” на сверхмассивную черную дыру массой $3 \times 10^8 M_{\odot}$ в центре скопления галактик Abell 2597 (созвездие Водолея, расстояние – 1,23 млрд св. лет от нас). Рисунок Д. Берри (ESO/NAOJ/NRAO; к стр. 28).

In this issue:

- 3 SHUSTOV B.M. To the 80th Anniversary of Institute of Astronomy of RAS
- 17 BISIKALO D. V., KAYGORODOV P. V., CHERENKOV A. A. Accretion Processes in Binary Stars
- 29 WIEBE D. S. Molecules in Space
- 40 POLYACHENKO E. V., MASHONKINA L. I., KHOPERSKOV S. A. Progress in Studies of Dynamics and Chemistry of Galaxies
- 56 RYKHLOVA L. V. Near-Earth Astronomy
- 67 CHUGAY N. N., MASHONKINA L. I., PAKHOMOV YU. V., RYABCHIKOVA T. A. Uncovering the Secrets of Starlight
- 79 KUZIN S. P., EBAUER K. V., KLYUIKOV A. A. Using the Methods of Space Geodesy in Geodynamics

INTERNATIONAL COOPERATION

- 90 DLUZHNEVSKAYA O. B., SICHEVSKIY S. G. International Virtual Observatory

SYMPOSIA, CONFERENCES, CONGRESSES

- 95 LYOVKINA P. A. “Near-Earth Astronomy – 2015”

AMATEUR ASTRONOMY

- 100 SHCHIV'YOV V. I. Celestial Calendar: January–February 2017

CHRONICLES OF THE EARTH'S SEISMICITY

- 105 STAROVOYT O. E., CHEPKUNAS L. S., KOLOMIETS M. V. Seismicity of the Earth in the First Half of 2016
- 108 Index of articles and notes published in “Earth and Universe” in 2016

Редакционная коллегия:

главный редактор член-корреспондент РАН В.К. АБАЛАКИН,
зам. главного редактора академик В.М. КОТЛЯКОВ,
зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук А.А. ГУРШТЕЙН,
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
доктор исторических наук К.В. ИВАНОВ,
кандидат физ.-мат. наук О.Ю. ЛАВРОВА,
член-корр. РАН А.А. МАЛОВИЧКО, доктор физ.-мат. наук И.Г. МИТРОФАНОВ,
член-корр. РАН И.И. МОХОВ, член-корр. РАН А.В. НИКОЛАЕВ,
член-корр. РАН И.Д. НОВИКОВ, доктор физ.-мат. наук М.В. РОДКИН,
доктор физ.-мат. наук Ю.А. РЯБОВ, член-корр. РАН В.А. СОЛОВЬЁВ,
кандидат физ.-мат. наук О.С. УГОЛЬНИКОВ, член-корр. РАН В.П. САВИНЫХ,
академик А.М. ЧЕРЕПАЩУК, доктор физ.-мат. наук В.В. ШЕВЧЕНКО

К 80-летию Института астрономии РАН

Редколлегия и редакция журнала сердечно поздравляют коллектив одного из ведущих Институты страны со славным юбилеем, открывая подборку материалов его сотрудников вступительной статьей члена-корреспондента РАН Бориса Михайловича Шустова.

К прошедшему, 70-летнему юбилею Института я написал статью (Земля и Вселенная, 2006, № 5) об истории Института. Естественно, историческая часть к настоящему времени не изменилась. Но за прошедшее десятилетие (2006–2016) в Институте астрономии появились новые темы исследований, пришли новые люди, и это радует, поскольку развитие – это и есть жизнь. В Институт пришла молодежь,



ей нужно учиться, а нам, старшему поколению, ее учить, а, значит, напоминать историю и вдохновлять на поиски, поддерживать и радоваться успехам, ну и, конечно, чему-то учиться у бывших учеников нам самим. В этой статье я вначале напомню историю образования и становления Института астрономии РАН и, конечно, познакомлю читателей с современными научными достижениями Института.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

В первой половине XX в. астрономия перестала быть уделом одиночек. Предпринимаемые учеными масштабные теоретические исследования; проектирование, создание крупных телескопов и их эксплуатация, реализуемые наблюдательные проекты – все это требовало объединения усилий не только отдельных специалистов, но и целых научных коллективов и учреждений. В 1930-е гг. перед советской наукой встала задача создания единого органа, который взял

бы на себя координацию развития обсерваторий, астрономического приборостроения, а также участия астрономов страны в международных проектах. В 1936 г. академики А.Е. Ферсман и В.Г. Фесенков представили в Президиум Академии наук СССР проект “Положения об Астрономическом совете при АН СССР”, который был утвержден Постановлением Президиума (протокол № 27 от 20 декабря 1936 г.). Эта дата считается днем рождения Астрономического совета АН СССР – в будущем Института астрономии

Российской академии наук.

Согласно “Положению” в состав Астрономического совета (широко известного также под более коротким названием Астросовет) входили все астрономы – члены Физической группы АН СССР (аналог современного Отделения физических наук). Возглавлялся он Президиумом, первыми членами которого были академики А.Ф. Иоффе (руководил работой Астросовета в первые недели до утверждения кандидатуры председателя), В.Г. Фесенков (он и стал первым председателем

Астросовета) и С.И. Вавилов, профессора Б.П. Герасимович, А.А. Михайлов и другие видные астрономы.

Первоначально Астросовет координировал исследования в области наземной оптической астрономии; их в СССР проводили астрономические организации, принадлежавшие как Академии наук, так и к другим ведомствам. Помимо этого на протяжении многих десятилетий Астросовет проводил научные совещания, налаживал снабжение обсерваторий светоприемниками, готовил научные экспозиции в СССР и за рубежом; в качестве национального комитета представлял советских астрономов в Международном астрономическом союзе, то есть выполнял функции академического научного совета. При этом (как и в других научных советах) оплачивался только труд ученого секретаря. Другие члены совета (как и председатель) работали “на общественных началах”. В частности, первый председатель Астросовета В.Г. Фесенков в то же время (1936–1939 гг.) руководил ГАИШ МГУ, академик А.А. Михайлов в 1947–1963 гг. совмещал председательские обязанности с постом директора Пулковской обсерватории.

По материалам, опубликованным в первые годы после образования

Астросовета (прежде всего, в “Астрономическом журнале”), посвященным его работе, можно проследить, как “коснулись” астрономической науки события конца 1930-х гг., происходившие в стране. Чрезвычайно высокая активность Астросовета (только в 1937 г. состоялось четыре Пленума), трагичная судьба некоторых его членов; по-видимому, связанная с этим ликвидация этого координационного органа в конце 1937 г. (по существу это была не ликвидация, а временное изменение названия на “Астрономическую группу АН СССР”); восстановление Астросовета через два года – все это “штрихи”, отражающие драматический период в истории нашей страны.

Война привела к огромным разрушениям в стране, к колоссальным человеческим жертвам. Но даже в эти годы – когда, несмотря на то, что большинство астрономических центров СССР оказались на захваченной немцами территории, а часть обсерваторий серьезно пострадала (Главный астрономический центр страны – Пулковская обсерватория – была разрушена до основания; Земля и Вселенная, 1990, № 1; 2011, № 1), советские астрономы все же продолжали напряженно работать. И не только непосредственно

на нужды обороны (поддерживалась Служба времени, составлялись различные таблицы и эфемериды для обслуживания военно-морского и воздушного флотов, была обеспечена работа Службы Солнца – для гидрометеорологических прогнозов), но и в сфере собственно фундаментальных исследований. Прошедшее в Москве в сентябре 1943 г. Астрономическое совещание приняло резолюции, в которых перед Астросоветом ставились большие и ответственные задачи на будущее по различным направлениям астрономических исследований. И снова большое внимание было уделено объектам астрономического строительства.

В развивающейся системе АН СССР научные советы создавались, ликвидировались, укрупнялись в соответствии с логикой развития науки. Но Астрономическому совету была уготована особая судьба – стать ядром будущего научно-исследовательского института. Долгие годы Астросоветом назывались две совершенно различные по функциям структуры – научный совет и научно-исследовательское учреждение. К концу 1980-х гг. Астросовет стал гораздо более известен не как координирующий орган, а как развитое многопрофильное

Знакомое почти всем астрономам страны здание Института астрономии РАН на Пятницкой улице в Москве.

научно-исследовательское астрономическое учреждение. Для того, чтобы точно определить его статус и избежать путаницы с научным советом, Астрономический совет Академии наук СССР был преобразован (в соответствии с Постановлением Президиума АН СССР № 1327 от 11 декабря 1990 г.) в Институт астрономии АН СССР. На основании Указа Президента РСФСР от 21 ноября 1991 г. № 228 “Об организации Российской академии наук” Институт вошел в состав Российской академии наук как Институт астрономии Российской академии наук. Затем в соответствии с Постановлением Президиума Российской академии наук № 274 от 18 декабря 2007 г. Институт астрономии Российской академии наук переименован в Учреждение Российской академии наук Институт астрономии РАН, а Постановлением Президиума РАН от 13 декабря 2011 г. № 262 изменен тип и наименование Института – на “Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук”. Это официальное название сохраняется до

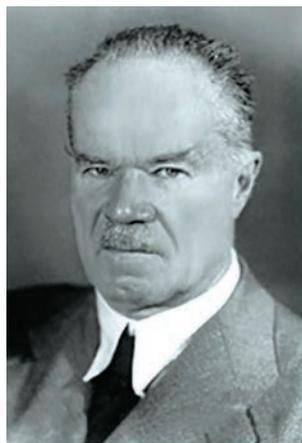


сих пор. В соответствии с Федеральным законом от 27 сентября 2013 г. № 253-ФЗ “О Российской академии наук, реорганизации государственных академий наук и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации” и распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2013 г. № 2591-р Институт передан в ведение Федерального агентства научных организаций (ФАНО) России.

Эти переименования и переподчинения от-

ражают непростые и неоднозначно оцениваемые российским обществом исторические изменения последних лет. Но усиливающаяся чиновничья активность пока не изменила внутреннего состояния и духа академического научного сообщества. Коллектив Института осознает себя именно как академический исследовательский центр и использует ясное и точное название – Институт астрономии РАН (ИНАСАН).

В разные годы председателями Астрономичес-



академик
В.Г. Фесенков



академик
А.А. Михайлов



член-корреспондент АН СССР
Э.В. Мустель



академик
А.А. Боярчук



член-корреспондент РАН
Б.М. Шустов



член-корреспондент РАН
Д.В. Бисикало

кого совета были крупнейшие советские ученые: академик В.Г. Фесенков (1936–1939), академик А.А. Михайлов (1939–1963), член-корреспондент Э.Р. Мустель (1963–1987), академик А.А. Боярчук (1987–1990). Академик А.А. Боярчук стал первым директором ИНАСАН (1990–2003), в 2003–2016 гг. эти

обязанности выполнял член-корреспондент РАН Б.М. Шустов, а с февраля 2016 г. – член-корреспондент РАН Д.В. Бисикало.

РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Начало собственных исследований в Астросовете относится к послевоенным годам. Первым крупным проектом стала

Руководители Астрономического совета АН СССР (1936–1991) и Института астрономии РАН (с 1991 г.).

работа по созданию “Общего каталога переменных звезд” (ОКПЗ), начатая по поручению Международного астрономического союза в 1946 г. под руководством докторов физико-математических

наук П.П. Паренаго и Б.В. Кукаркина. Первое издание Каталога вышло в 1947 г., второе – в 1958 г., третье – в 1969–1971 гг. К настоящему времени завершена публикация четвертого издания ОКПЗ в пяти томах и ведутся работы над пятым изданием. Многие годы этой важной работой руководит доктор физико-математических наук Н.Н. Самусь.

Позже важнейшим направлением деятельности Астросовета стали наблюдения искусственных спутников Земли, подготовка к которым началась еще до запуска первого спутника. Сотрудники под руководством заместителя председателя Астросовета доктора физико-математических наук А.Г. Масевич организовывали тренировки наблюдателей, занимались подготовкой специальных станций для визуальных наблюдений ИСЗ (Земля и Вселенная, 1965, № 1).

Алла Генриховна Масевич была неординарной личностью (Земля и Вселенная, 2008, № 5). Более 30 лет (с середины 1950-х гг. до 1987 г.) – несмотря на то, что она всегда была лишь заместителем руководителя, именно ее организаторский талант, огромная энергия, научное чутье и умение работать с людьми (от простых исполнителей до руководства страны и

международных лидеров) стали важным фактором успешного развития нашего учреждения.

К 1 октября 1957 г. под руководством Астросовета на территории СССР было создано 66 станций наблюдений ИСЗ. В 1966 г. Астросовет приступил к созданию международной сети наблюдений ИСЗ. Для нее разрабатывалась специальная аппаратура; в соответствии с договорами, заключенными с зарубежными научными организациями, создавались наблюдательные пункты. К 1975 г. таких пунктов в Евразии, Африке и Южной Америке было уже 28. На этих площадках был выполнен огромный объем визуальных и фотографических, а – позднее – и лазерных наблюдений ИСЗ, которые использовались для исследований в области геодезии, геодинамики и геофизики. В 1961 г. Астросовет совместно с Пулковской обсерваторией (ГАО АН СССР) организовал первый в мире эксперимент по спутниковой геодезии. Созданная Астросоветом сеть наблюдательных пунктов послужила основой для реализации первой глобальной геодезической программы “Большая хорда”. В период распада Советского Союза станции были закрыты, и лишь в последние годы Роскосмос начал трудную работу по созданию новой сети зарубежных



Профессор А.Г. Масевич.

пунктов наблюдений ИСЗ и космического мусора.

В 1958 г. близ Звенигорода Московской области распоряжением Президиума АН СССР была создана Звенигородская экспериментальная станция Астросовета (ныне Звенигородская обсерватория). На протяжении многих лет она была главной научной базой для разработки новых методик, аппаратуры, а также для подготовки научных кадров для наблюдений ИСЗ. В 1975 г. Астросовет также создал экспериментальную Симеизскую станцию лазерной локации ИСЗ (после распада СССР вошла в состав Крымской астрофизической обсерватории).

В 1959 г. Президиумом АН СССР в рамках Астросовета было утверждено несколько научно-исследовательских секторов. Активно развивались



Академик А.М. Фридман.

исследования по проблемам солнечной активности и физике Луны. Начиная с 1966 г., Астросовет совместно с Гидрометцентром СССР проводил исследования по физике солнечно-земных связей. В начале 1960-х гг. под руководством А.Г. Масевич в Астросовете была создана группа по исследованию физики и эволюции звезд, в 1970-е гг. начались работы по моделированию эволюции тесных двойных звездных систем и звездных пульсаций. В 1967 г. по инициативе тогдашнего председателя Астросовета Э.Р. Мустеля начались исследования в области звездной спектроскопии и нестационарных звезд. Начиная с 1980 г., ведется работа по изучению закономерностей процесса звездообразования на различных пространственно-временных масштабах – от галактик

в целом до одиночных звезд.

В 1980 г. на базе сектора прикладной математики и вычислительной техники в составе Астросовета начал работу Центр астрономических данных (ЦАД) – советский филиал международного Страсбургского центра звездных данных. Его задачей было информационное обеспечение астрономических исследований в СССР и организация передачи мировому научному сообществу каталогов, подготовленных советскими учеными. Инициатива создания ЦАД принадлежит кандидату физико-математических наук О.Б. Длужневской, она же была руководителем ЦАД на протяжении многих лет. Уже в 1981 г. база данных ЦАД содержала все наиболее востребованные каталоги, и потому на региональном уровне ЦАД стал весьма популярным – как сказали бы теперь, “центром коллективного пользования”.

В 1986 г. в Астросовете появилось новое перспективное направление исследований – динамика звездных и планетных систем. Возглавлял это направление выдающийся физик и астрофизик, трижды лауреат Государственной премии академик А.М. Фридман.

В 2005 г. в состав Института вошла, став его филиалом, Терскольская

обсерватория Международного центра астрономических и медико-экологических исследований.

На протяжении ряда лет Астросовет организовывал публикацию нескольких, продолжающих выходить в свет до сих пор изданий. В 1940–1993 гг. Астросовет издавал “Астрономический циркуляр” – компактный журнал, в котором публиковалась оперативная информация о научных результатах; еще одно издание Астросовета – журнал “Переменные звезды” – издавался с 1946 по 1995 гг.; в 2005 г. его издание возобновлено в электронном виде.

В начале космической эры интерес к информации о наблюдениях ИСЗ был столь высок, что вышедший в 1962 г. первый выпуск “Бюллетеня станций оптического наблюдения искусственных спутников Земли” (позже переименованного в “Наблюдения искусственных спутников Земли”) получил “путевку в жизнь” от группы выдающихся соотечественников – первых космонавтов страны. Выпускавшийся в период с 1965 по 1991 г. бюллетень “Научные информации Астрономического совета” был известен и популярен в среде научной общности СССР и стран социалистического лагеря. Здесь публиковались статьи по астрофизике, физике солнечно-земных

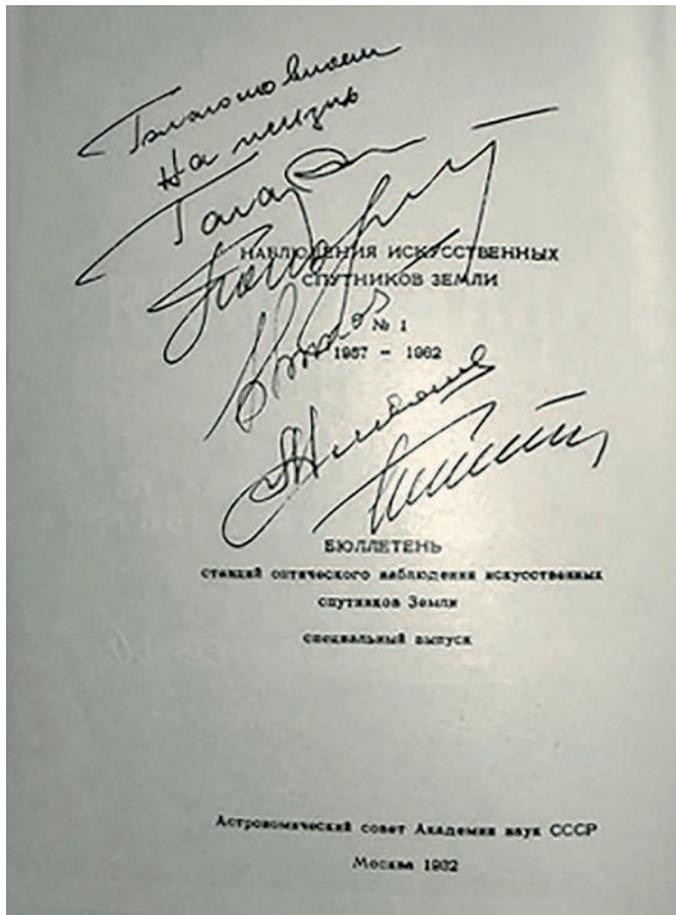
«Благословляем на жизнь» – так поддержали издание Астросоветом бюллетеня «Наблюдения искусственных спутников Земли» летчики-космонавты СССР Ю.А. Гагарин, П.Р. Попович, В.Ф. Быковский, А.Г. Николаев и Г.С. Титов.

связей, космической геодезии и геодинاميки, программному и информационному обеспечению астрономических исследований. Ссылки на опубликованные в этих изданиях материалы можно встретить в современных научных книгах и журналах.

Институт астрономии РАН является учредителем старейшего профессионального астрономического издания России – «Астрономического журнала» РАН. Редакцию «Астрономического журнала» возглавляет директор ИНАСАН Д.В. Бисикало, сменивший на этом посту А.А. Боярчука; ответственный секретарь этой редакции – доктор физико-математических наук Д.З. Вибе. Сотрудники института участвуют в работе редколлегии многих других российских и международных изданий по астрономии.

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ ИНСТИТУТА И ЕГО СТРУКТУРА

Главное направление деятельности Института астрономии – выполнение фундаментальных научных исследований



и прикладных разработок в области астрономии. Точнее – исследования в области физики звездных атмосфер, внутреннего строения и эволюции звезд, звездных систем и межзвездной среды, информационного обеспечения астрономических исследований, а также решение теоретических и прикладных проблем астрометрии, геодинاميки и геофизики; усовершенствование методов наблюдений искусственных и естественных

небесных тел, а в последние двадцать лет – развитие методов внеатмосферной астрономии. Институт имеет лицензию на проведение космических исследований.

Большая часть направлений традиционна для Астросовета и ИНАСАН, они сохраняются и развиваются и сегодня.

Астрономия – наука прежде всего наблюдательная: мы наблюдаем различные виды излучения, приходящие к нам из глубин космоса. В совре-

менной астрономии основной метод “извлечения” информации из этого излучения – астроспектроскопия. Э.Р. Мустель более полувека назад, придя в Астросовет, начал вместе с доктором физико-математических наук В.Л. Хохловой исследования методами звездной спектроскопии. А.А. Боярчук, будучи всемирно признанным специалистом по звездной спектроскопии, существенно расширил тематику исследований, и ныне ИНАСАН – наиболее авторитетный (наряду с САО РАН) центр звездной спектроскопии. Опубликованная в этом номере статья доктора физико-математических наук Н.Н. Чугая с коллегами – хорошая иллюстрация высокого уровня развития этого направления исследований в Институте.

Традиционной темой в Астросовете и в Институте было и изучение звездных ансамблей (от сравнительно небольших ассоциаций, содержащих несколько десятков членов, – до галактик, содержащих сотни миллиардов звезд). Эта тема особенно интенсивно развивалась под руководством академика А.М. Фридмана и доктора физико-математических наук В.Л. Поляченко. Современный уровень исследований в этом направлении представлен в статье Е.В. Поляченко и его коллег (материал

читайте в представленном выпуске).

В последнее время появилось и новое направление – виртуальные обсерватории – эффективное средство исследований в различных областях астрономии.

С самого начала космической эры в Астросовете проводились исследования по космической геодезии и геодинاميке. А.Г. Масевич – организатор и лидер исследований и ее соратники существенно продвинули исследования в этой области. В статье Л.В. Рыхловой рассказывается об истории исследований в околоземном пространстве; в материале, представленном кандидатом физико-математических наук С.П. Кузиным, изложена история исследований по космической геодезии и геодинاميке и показан современный уровень их развития в ИНАСАН.

С приходом в 1987 г. в Астросовет академика А.А. Боярчука начали развиваться новые научные направления (Земля и Вселенная, 2016, № 1). Так, с начала 1990-х гг. по инициативе А.А. Боярчука в институте развивается на новом уровне исследование физики двойных звезд. К традиционным методам изучения внутреннего строения и эволюции звезд (это направление развили сотрудники ИНАСАН доктора

физико-математических наук А.В. Тутуков и Л.Р. Юнгельсон, статьи которых имеют высокий индекс цитирования) добавился мощный метод исследования – численное гидродинамическое моделирование процессов массообмена во взаимодействующих двойных системах. Под руководством Д.В. Бисикало сформировалась сильная группа этих исследователей (читайте статью этого автора и его коллег в этом выпуске). Можно уверенно сказать, что ИНАСАН является лидером в исследованиях двойных звезд в России и в мире.

В последние годы Д.В. Бисикало и доктор физико-математических наук В.И. Шематович с молодыми коллегами активно развивают исследование планет вокруг других звезд. За последние пять лет ими получены несколько результатов мирового уровня. Традиционно в ИНАСАН активно ведутся исследования по физике звезд различных типов, включая сверхновые (в группе под руководством доктора физико-математических наук Н.Н. Чугая) и пульсирующие звезды (доктор физико-математических наук Ю.А. Фадеев).

Начиная с середины 1990-х гг., Б.М. Шустов и сложившаяся под его руководством группа исследователей развили новое направление в теории

образования звезд – исследование взаимовлияния химических и физических процессов в звездобразовании. В последние годы этим коллективом руководит доктор физико-математических наук Д.З. Вибе, ставший крупным экспертом в относительно новом научном направлении – астрохимии. В представленной Дмитрием Зигфридовичем статье в этом выпуске журнала рассказывается об этом направлении исследований; оно продолжает успешно развиваться.

Еще одно новое научное направление – изучение малых тел Солнечной системы и проблемы астероидно-кометной опасности. В полную силу исследования проводятся в последние десять лет, хотя начались они гораздо раньше. Своими работами ИНАСАН “заслужил” репутацию ведущего центра в российской науке по теме астероидно-кометной опасности.

Наиболее крупный научно-технический проект, над которым ведутся работы в Институте в рамках Федеральной космической программы, – это международный (ведущая роль в нем принадлежит России) проект “Спектр-УФ”. За рубежом чаще используется название “World Space Observatory – Ultraviolet” (“Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет”; Земля и Вселенная,

2006, № 5). Институт астрономии РАН – головная научная организация проекта (научный руководитель – Б.М. Шустов, координатор проекта – доктор физико-математических наук М.Е. Сачков). Группа, работающая над осуществлением проекта “Спектр-УФ”, состоит из инженеров (главный инженер проекта – О.В. Власенко) и молодых ученых и специалистов, но участвуют в этой общеинститутской работе многие научные сотрудники ИНАСАН.

Сотрудники Института астрономии кандидаты физико-математических наук Н.С. Бахтигараев, С.И. Барабанов, М.А. Ибрагимов – активно работают по программам контроля ближнего космоса.

Направления научных исследований, по которым работает Институт, отражаются в его структуре; он состоит из семи научных подразделений. Это:

– отдел исследований Солнечной системы (заведующий доктор физико-математических наук В.И. Шематович);

– отдел физики звездных систем (заведующий доктор физико-математических наук О.Ю. Малков);

– отдел физики и эволюции звезд (заведующий – доктор физико-математических наук Д.З. Вибе);

– отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии (заведующая доктор физико-математических наук Л.И. Машонкина);

– отдел экспериментальной астрономии (заведующий заместитель директора Института доктор физико-математических наук М.Е. Сачков);

– Звенигородская обсерватория (заведующий кандидат физико-математических наук С.И. Барабанов);

– Терскольский филиал ИНАСАН (заведующий доктор физико-математических наук В.К. Тарадий).

Сегодня в Институте работают 86 научных сотрудников (среди них два члена-корреспондента, два профессора, 23 доктора наук, 36 кандидатов наук; 7 сотрудников имеют звание профессора). Возраст примерно трети научных сотрудников не превышает 35 лет, при этом более 40% из них уже обладают научными степенями. Коллектив, состоящий из высококвалифицированных научных кадров и необходимого количества инженерно-технических сотрудников, позволяет Институту решать многие фундаментальные и прикладные задачи современной астрономии на мировом уровне. По статистике поисковой платформы Web of Science, число публикаций наших сотрудников в престижных



рецензируемых международных и российских научных журналах за период с 2011 по 2015 г. превышает четыре с половиной сотни. Публикаций – вдвое больше, если учитывать отечественные издания, не входящие в список Web of Science. Это неплохо, если учесть, что число научных сотрудников в Институте не превышает 85 человек. Кроме того, у нас каждый год издается одна – две монографии (или тематических сборника) научных статей и обзоров.

Коллектив получает гранты на поддержку развития двух научных школ (руководители – члены-корреспонденты РАН Б.М. Шустов

и Д.В. Бисикало) в рамках Программы поддержки ведущих научных школ РФ. Исследования сотрудников поддерживаются выделяемыми грантами Президента РФ, Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Российского научного фонда (РНФ) и ряда международных фондов.

ОБСЕРВАТОРИИ ИНСТИТУТА

Институт располагает двумя наблюдательными базами – это Звенигородская обсерватория и Терскольский филиал. С помощью установленного в обсерваториях оборудования проводятся наблюдения искусственных

Телескоп “Цейс-2000” с 2-м зеркалом – третий по величине астрономический инструмент на территории России.

и естественных небесных тел в околосемном пространстве, а также астрофизические наблюдения.

Исследования в Звенигородской обсерватории ведутся по нескольким направлениям. В последние годы она стала местом, где проводится сборка, наладка и юстировка разрабатываемых в ИНАСАН роботизированных телескопов. Один из основных инструментов обсерватории – уникальная спутниковая камера ВАУ с главным зеркалом диаметром 1 м.

Она установлена в трехэтажном павильоне оригинальной конструкции, обеспечивающем устойчивость телескопа – необходимое условие для проведения высокоточных позиционных наблюдений. Специализированная монтировка камеры позволяет проводить наблюдения как геостационарных, так и низколетящих спутников. Кроме камеры ВАУ на обсер-

ватории установлено еще несколько телескопов и других астрономических инструментов. Она работает как пункт наземной сети оптических наблюдений спутников Системы контроля космического пространства России, специализируясь на обзорных наблюдениях геостационарных объектов. Расположение обсерватории удобно для наблюдений солнечно-синхронных ИСЗ: периоды видимости благодаря этому условию длятся намного дольше, чем на южных пунктах наблюдений (об этом читайте в статье доктора физико-

математических наук Л.В. Рыхловой в данном выпуске журнала).

В ИНАСАН разработана теория и методика идентификации ИСЗ, а также определения формы и ориентации таких объектов. Звенигородская обсерватория используется для отработки этой методики. Климат средней полосы России позволяет проводить наблюдения в течение приблизительно 100 наблюдательных ночей в год. Результаты наблюдений используются в международных и общероссийских программах (в том числе в программе “Глобальная навигационная система”

Группа гостей из сотрудничающих с Институтом организаций на Звенигородской обсерватории ИНАСАН. На дальнем плане – павильон камеры ВАУ.





в рамках Международной GPS-службы области геодинамики, в федеральных программах прикладного назначения).

В 1992 г. Российская академия наук и Национальная академия наук Украины создали в Приэльбрусье Международный центр астрономических и медико-экологических исследований (МЦ АМЭИ), в состав которого вошла высокогорная обсерватория на пике Терскол (3150 м над уровнем моря). В 2005 г. в связи с реорганизацией МЦ АМЭИ обсерватория вошла в состав Института астрономии РАН в качестве Терскольского филиала ИНАСАН. Обсерватория функционирует в режиме Центра коллективного пользования.

Основные направления исследований в обсерватории формируются астрономами России и Украины; в программу исследований включаются также предложения ученых из стран дальнего и ближнего зарубежья.

РАБОТА С МОЛОДЕЖЬЮ,
ИЛИ НЕМНОГО О БУДУЩЕМ

В 2015 г. в активно работающей аспирантуре Института астрономии проходили обучение 14 аспирантов (из них 9 – на очном обучении). В 2003 г. в институте был организован научно-образовательный “Центр экспериментальной астрономии”, главные задачи которого – обучение студентов работе

Обсерватория на пике Терскол.

с передовыми технологиями астрономических наблюдений на обсерваториях ИНАСАН и их привлечение к работе над разрабатываемыми в институте космическими проектами. “Центр экспериментальной астрономии” взаимодействует с кафедрой “Нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике” Московского физико-технического института (ИНАСАН – один из базовых институтов этой кафедры), с кафедрой “Экспериментальной астрономии” МГУ и кафедрами других вузов страны. Сотрудники

института читают лекции студентам физического факультета МГУ и факультета общей и прикладной физики в Московском физико-техническом институте.

Наши молодые ученые активно участвуют в жизни Института. К примеру, в заседании Ученого совета в июне 2016 г., посвященном 85-летию со дня рождения академика А.А. Боярчука, принимало участие довольно много институтской молодежи.

На Звенигородской обсерватории ИНАСАН проходят производственную практику студенты физического и географичес-

кого факультетов МГУ, Московского государственного университета геодезии и картографии, Московского военного института радиозлектроники, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Обнинского государственного технического университета атомной энергетики, Уральского федерального университета (УрФУ), Казанского (Приволжского) федерального университета.

Институт ежегодно активно участвует в организации и проведении Всероссийских научных студенческих школ-конференций "Физика космоса" на базе УрФУ (проведено уже 45 таких форумов; Б.М. Шустов – один из организаторов школы).

Сотрудники института ведут широкую научно-популяризаторскую деятельность, регулярно выступая в СМИ (по телевидению, на радио, в газетах, журналах и других массовых и научно-популярных печатных и электронных изданиях) с информацией об астрономических событиях и современных научных достижениях. Звенигородская обсерватория ИНАСАН регулярно проводит экскурсии для школьников, студентов и преподавателей, участников астрономических кружков Московского городского дома творчества детей и юношества и Дома научно-технического творчества молодежи (об этом читайте в статье Д.З. Вибе).

Молодые сотрудники и аспиранты ИНАСАН.



Для человека 80 лет – уже изрядный возраст, для Института – это время зрелости. Будущее ИНАСАН, конечно, связано с будущим российской

науки. Я надеюсь, что оно будет достойным.

Новости и другую информацию о жизни Института астрономии РАН в наше непростое вре-

мя “академических реформ” – можно найти на сайте: <http://www.inasan.ru>.

*Б. М. ШУСТОВ,
член-корреспондент РАН*

Информация

Галактика Франкенштейн

Недавно ученым удалось раскрыть тайну изолированной эллиптической галактики UGC 1382 (ESO 435-41, MCG-5-24-22, IRAS 10042-2941) причудливой формы, расположенной на расстоянии 250 млн св. лет в созвездии Насос (см. стр. 2 обложки). *“Эту редкую галактику мы назвали Франкенштейн, поскольку она не только сформировалась из разных других галактик, но и смогла выжить в таком состоянии. А удалось ей это потому, что она расположилась в относительно пустом пространстве, где никакая другая галактика не смогла потревожить ее формирование и не заставила распадаться на составляющие части”*, – пояснил профессор Марк Сейберт из Института Карнеги (США).

Астрофизики наткнулись на эту галактику совершенно случайно. Они искали звезды, формирующиеся в обычных эллиптических галактиках, которые не вращаются и имеют обширную

пространственную форму (по сравнению с плоскими дисковыми галактиками). Первоначально думали, что галактика UGC 1382 – один из таких объектов: она считалась старой, небольшой и очень типичной. Однако во время изучения галактики в ультрафиолетовом диапазоне с помощью космической обсерватории “GALEX” было замечено, что спиральные рукава у UGC 1382 простираются далеко за ее видимые пределы. – Такой особенностью не должны обладать эллиптические галактики. Используя данные Слоановского цифрового обзора неба (SDSS), обзора 2MASS, обсерваторий – космической “WISE” и наземной VLA – специалисты выявили невидимые структуры галактики в оптическом и инфракрасном диапазонах, что позволило составить ее новую модель. Оказалось, что размер UGC 1382 составляет 718 тыс. св. лет, что более чем в семь раз превышает размер нашего Млечного Пути! Она является одной из трех самых больших изолированных дисковых галактик, когда-либо обнаруженных. Самая крупная галактика во Вселенной – эллиптическая IC 1101 диаметром 6 млн св. лет в скоплении Abell 2029

находится на расстоянии в 1 млрд св. лет от нас в созвездии Змеи.

Галактика UGC 1382 поражала возрастом своих частей. В большинстве галактик внутренняя область содержит старые звезды. По мере ее роста во внешней области происходит формирование новых, более молодых звезд. В случае с UGC 1382 – все наоборот. Центральная ее часть оказалась моложе, чем окружающий ее спиральный диск. По мнению ученых, две части галактики формировались независимо друг от друга: сначала, вероятно, существовала группа небольших галактик, состоявших главным образом из газа и темной материи. Позднее по соседству образовалась линзовидная галактика – вращающийся диск со спиральными рукавами. Более 3 млрд лет назад небольшие галактики окружили линзовидную галактику и соединились с ней, сформировав UGC 1382. Такая уникальная структура могла возникнуть в результате нескольких взаимодействий: скорее всего, две части галактики развивались независимо друг от друга – прежде, чем они слились и стали единым целым.

Пресс-релиз NASA,
11 июля 2016 г.



Аккреционные процессы в двойных звездах

Д.В. БИСИКАЛО,
член-корреспондент РАН
П.В. КАЙГОРОДОВ,
кандидат физико-математических наук
А.А. ЧЕРЕНКОВ
Институт астрономии РАН



Двойственность звезд – довольно рядовое явление; около двух третей звезд в Галактике – двойные. Однако некоторые из них представляют особый интерес для астрофизиков. Это, прежде

всего, – тесные двойные, у которых есть возможность обмена веществом между компонентами, поскольку такие системы характеризуются богатством наблюдательных проявлений. В ИНАСАН исследование тесных

двойных звезд ведется уже более 20 лет. В статье дан краткий обзор основных типов двойных звезд и представлены наиболее интересные результаты, полученные в ИНАСАН за последние 5 лет.

ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Более половины звезд в Галактике входит в состав двойных и кратных

систем. Тесные двойные звезды представляют особый интерес для астрофизиков, так как их компоненты могут об-

мениваться веществом в процессе эволюции. На ранних стадиях эволюции масса обеих звезд двойной системы про-

должает увеличиваться за счет выпадения (аккреции) на них вещества из остатков протозвездного облака. От того, как это происходит, зависит основной параметр, определяющий дальнейшую эволюцию рождающейся двойной звезды – отношение масс компонентов. На более поздних стадиях эволюции возможен обмен веществом посредством звездного ветра. Среди двойных систем выделяются симбиотические звезды с белым карликом, аккрецирующим вещество ветра красного гиганта. Если двойная звезда довольно тесная, то вещество одной из звезд просто перетекает на вторую. Для таких систем скорость обмена массой (а с ней и энерговыделение) могут быть очень высокими, что делает их крайне интересными объектами наблюдений.

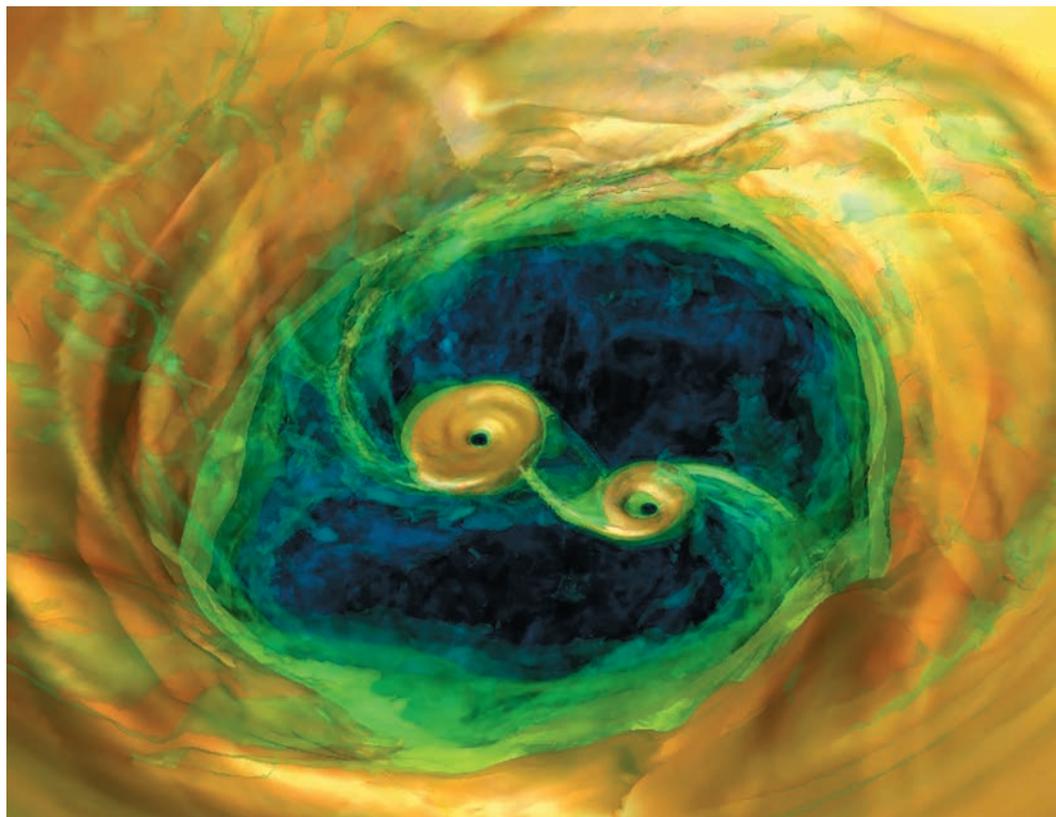
В тесных двойных системах есть ограничение на максимальный радиус компонентов – радиус полости Роша – внутри которой вещество гравитационно связано со звездой. Увеличение радиуса звезды в результате эволюции останавливается, когда она заполняет свою полость Роша: после этого начинается перетекание вещества на соседний компонент. При малой степени переполнения перетекание происходит через внутреннюю точку Лагранжа, называемую

еще точкой либрации L_1 , расположенную на границе между полостями Роша обеих звезд. Начиная с точки либрации, формируется струя вещества, отклоняющаяся силой Кориолиса; она либо попадает непосредственно на поверхность второй звезды, либо “промахивается” мимо нее, образуя аккреционный диск. Второй вариант характерен, в основном, для систем, где более массивный компонент в результате эволюции превратился в компактный объект – белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру. Для того, чтобы вещество из диска попадало на компактную звезду, дисковая аккреция должна сопровождаться отводом углового момента из внутренней части диска к периферии, что приводит в том числе к формированию общей оболочки двойной системы.

Магнитное поле звезды-аккретора – важный фактор, определяющий поведение аккреционного течения вблизи компактного объекта (например, белого карлика или нейтронной звезды). В зависимости от напряженности магнитного поля на поверхности белого карлика струя вещества из точки L_1 увлекается магнитным полем и выпадает на магнитные полюса (такие системы называются полярами), или (в промежуточных полярах) об-

разует аккреционный диск, в центре которого существует область, где течение “подхватывается” магнитным полем и аккреция “идет” на околополярные области звезды. Если магнитная ось аккретора наклонена к оси его вращения, то возможно образование систем, в которых вещество диска “разбрасывается” вращающимся магнитным полем и аккреция становится невозможной (режим “пропеллера”). В случае очень быстрого вращения и сильного поля система находится в режиме “суперпропеллера”, когда струя из L_1 не может даже сформировать аккреционный диск и вещество выбрасывается из системы, не задерживаясь в полости Роша аккретора.

Все перечисленные выше виды аккреционных процессов создают интенсивное энерговыделение на поверхности звезд и в области между звездами, где присутствуют сильные ударные волны, порождаемые столкновениями потоков. Указанные процессы хорошо наблюдаются как наземными телескопами, так и с помощью инструментов космических обсерваторий. Их изучение позволяет получить сведения о поведении вещества в условиях сверхсильных гравитационных и магнитных полей при высоких плотностях и температурах: то есть



Внутренние части протопланетного диска, окружающие молодую двойную звезду. Видны околозвездные аккреционные диски, а также спиральные ударные волны. По результатам численного моделирования.

в условиях, принципиально недостижимых в настоящий момент на Земле.

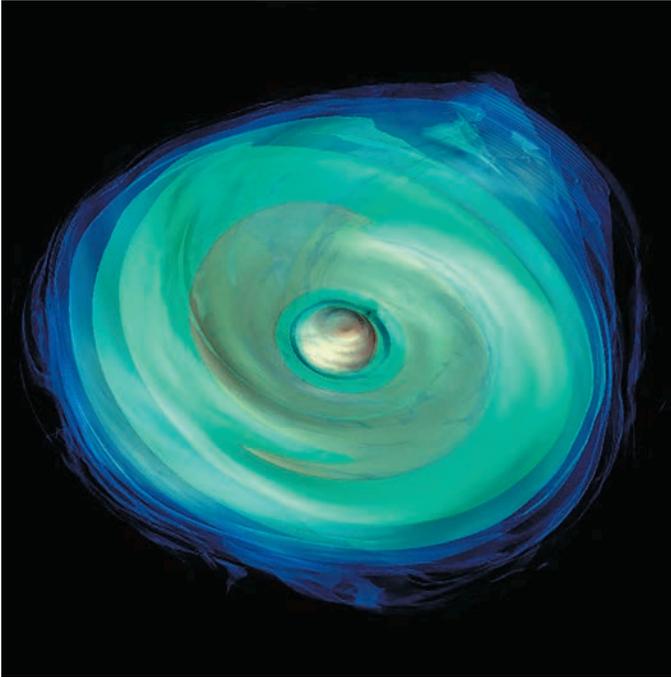
В небольшой статье невозможно описать все явления, сопровождающие аккрецию на компактные звезды в двойных системах. Мы лишь кратко обозначим направления исследований двойных

звезд, проводимых в нашем институте, и представим наиболее интересные результаты, полученные в последние годы.

НЕМАГНИТНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Более 20 лет назад в ИНАСАН было начато исследование немагнитных двойных звезд; за это время получено множество важных результатов. Структура течения в окрестности двойной звезды определяется балансом нескольких сил, связанных с гравитацией (приливные силы, резонансы) и газодинамическими явлениями

(в основном, ударными волнами различного типа). В аналитических решениях невозможно одновременно учесть все эти факторы, поэтому для исследования течений в двойных звездах широко используется численное моделирование. При проведении численного моделирования мы “закладываем” в модель только базовые законы сохранения (массы, энергии и импульса), а также уравнения, описывающие радиационный нагрев и охлаждение; задаем начальные и граничные условия – координаты, массы и размеры звезд, плотность



Be-звезда, окруженная оболочкой. По результатам численного моделирования.

и температуру газа на их поверхности; потом запускаем расчет и получаем численное решение, учитывая все заложенные параметры. Решения описывают структуру и динамику газовых оболочек двойных звезд, которые и являются объектом исследования.

Для молодых двойных звезд типа Т Тельца получаемая структура течения включает, как правило (кроме общего протопланетного диска, откуда черпают вещество обе звезды системы), еще и два околозвездных аккреционных диска, движущихся вместе с компонентами. Поскольку орбитальные скорости компонентов для большинства звезд, относящихся к типу Т Тельца, –

сверхзвуковые (относительно газа общей оболочки), то перед околозвездными аккреционными дисками образуются ударные волны; их сложное взаимодействие определяет картину течения вещества вблизи двойной звезды. С использованием такой модели нами впервые было показано, что основная масса вещества в молодых звездах аккрецируется на более массивный компонент. В 2011 г. мы усовершенствовали модель, добавив возможность расчета систем с некруговыми орбитами. Полученные результаты моделирования показали, что в таких системах имеет место периодическое частичное разрушение околозвездных

аккреционных дисков. Оно сопровождается выбросом и последующей аккрецией исторгнутого вещества, что объясняет наблюдаемые на Космическом телескопе им. Хаббла особенности двойной АК Sco (созвездие Скорпиона, расстояние – приблизительно 460 св. лет от Земли) и подобных ей.

Другим типом двойных звезд, исследуемых в ИНАСАН, являются двойные Be-звезды. В таких звездах главный компонент – массивная (порядка $10 M_{\odot}$) яркая звезда с очень быстрым собственным вращением, окруженная дисковой газовой оболочкой. Ранее считалось (гипотеза О. Струве, 1931 г.), что скорость вращения этих звезд равна критической и вещество оболочки срывается с их экватора за счет центробежных сил. Тем не менее, позднее было обнаружено несколько Be-звезд с оболочками, формировавшимися при докритических скоростях вращения. С использованием моделей, разработанных в нашем институте, впервые при учете двойственности таких звезд объяснено присутствие оболочек

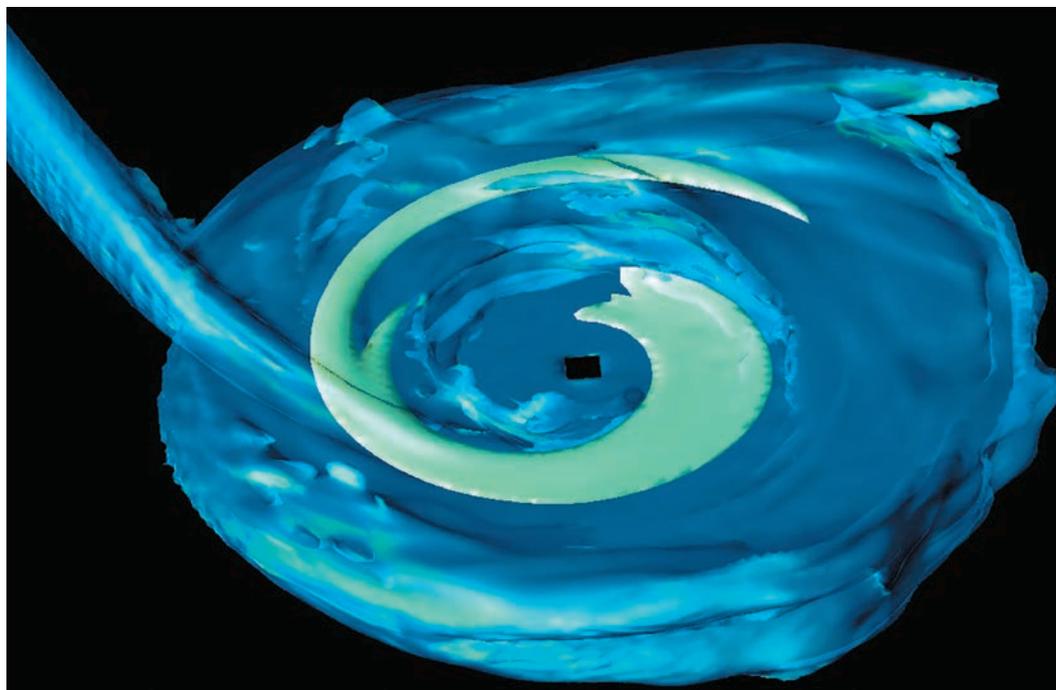
со скоростью вращения меньше критической, поскольку дополнительные силы, существующие в двойной системе, облегчают “срыв” вещества с поверхности звезды. В 2012 г. нам удалось косвенно подтвердить эту модель: профиль плотности оболочек, возникающих в результате этого механизма, может объяснить наблюдаемую зависимость рентгеновской светимости Ве/Х-звезд от их орбитальных периодов.

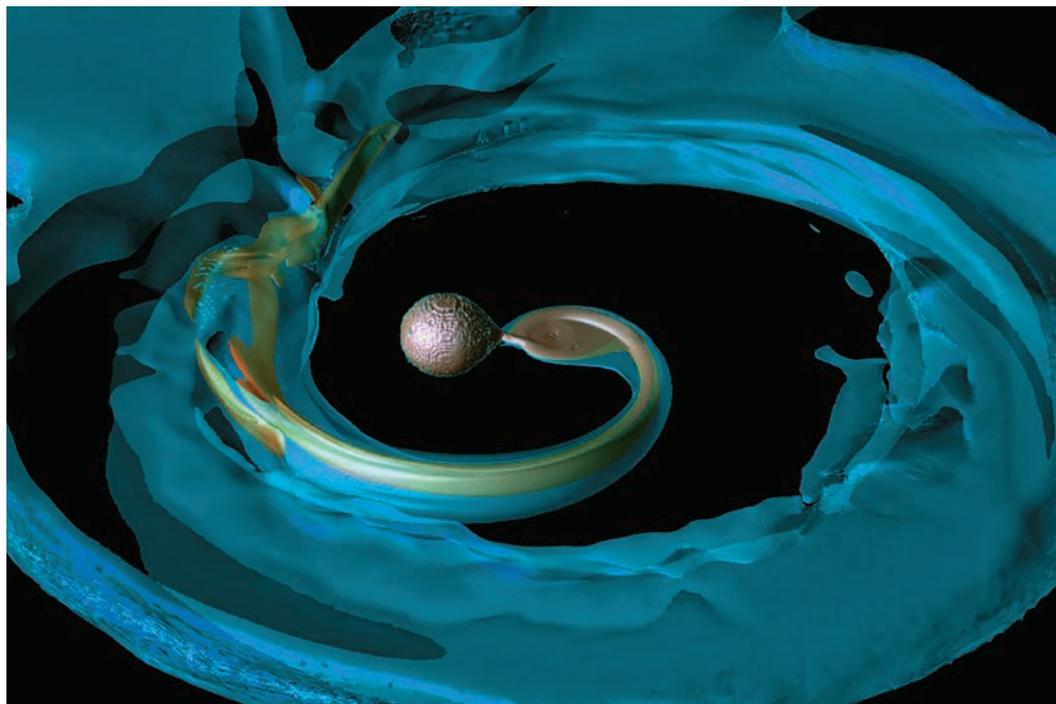
Прецессионная волна плотности в аккреционном диске катаклизмической переменной звезды. По результатам численного моделирования.

С конца 1980-х гг. в нашем институте исследуются симбиотические звезды. Обмен веществом в них происходит за счет звездного ветра (ветер от звезды-гиганта частично захватывается ее компаньоном – белым карликом, аккрецируется на него, а также образует вокруг карлика дискообразную оболочку). Одним из важных результатов, полученных в ИНАСАН, стало объяснение вспышечной активности симбиотических звезд. В его основе лежит гипотеза о нестационарном горении вещества на поверхности белого карлика, приводящем к периодическим вспышкам и частичному разрушению

аккреционного диска карлика. Как показало моделирование, во время вспышки образуются плотная тороидальная оболочка вокруг белого карлика и струйные истечения (джеты) с его полюсов, что хорошо согласуется с наблюдениями. В течение последних лет был выпущен ряд работ, подтверждающих справедливость этой модели.

Особое внимание при исследовании двойных звезд уделяется полуразделенным системам, где одна из звезд полностью заполняет свою полость Роша. В течение последних 15 лет моделирование, проведенное в ИНАСАН, позволило открыть новый тип волн в дисках – прецессионные





волны плотности, возникающие за счет постоянного смещения эллиптических линий тока в аккреционном диске под действием приливных сил. Появление такой волны резко увеличивает темп аккреции вещества и структур в диске, движущихся с прецессионными периодами, что, вероятно, приводит к механизму развития супервспышек в звездах типа SU UMa. Используя эту модель, впервые удалось объяснить одновременно все особенности супервспышек – резкое начальное повышение блеска, скорость падения блеска в процессе вспышки, образование “сверхгорба” – модуляции блеска, чей период

на несколько процентов отличается от орбитального; феномен “позднего сверхгорба”.

Ряд наших исследований посвящен ударным волнам в аккреционном диске. Ранее считалось (и до сих пор упоминается в статьях), что струя из точки L_1 ударяет в край аккреционного диска, образуя “горячее пятно” – компактную зону с повышенной температурой и яркостью. Однако, как показало моделирование, эта область совсем не компактна, а представляет собой протяженную, вытянутую вдоль края диска ударную волну, называемую “горячей линией”. Исследования, проведенные в ИНАСАН, показали, что эта волна

Оболочка двойной звезды, возникающая в результате истечений газа из аккреционного диска через окрестность точки L_3 . По результатам численного моделирования.

захватывает порядка 20% периметра диска, а возмущения, вызванные ее существованием, могут наблюдаться на гораздо большем удалении от точки первого контакта диска и струи.

Вещество аккреционного диска удерживается от падения на звезду центробежными силами – газу не позволяет “упасть” его угловой момент. Падение вещества на компактную звезду невозможно без отвода

избыточного углового момента. В случае немагнитных звезд его избыток может быть удален из системы только вместе с частью вещества, которое покидает аккреционный диск через окрестность точки L_3 (еще одна точка либрации; расположена за более массивной звездой). Как показало моделирование, небольшая эллиптичность диска, всегда присутствующая из-за приливных сил, обеспечивает периодическое перекрытие окрестности точки L_3 , так что вещество выбрасывается порциями (два выброса за один орбитальный период) и образует общую оболочку системы, обладающую специфическими свойствами. Например, наиболее плотные выбросы происходят только на определенных фазах; большую часть времени такая оболочка не вызывает существенного поглощения света, поскольку выбросы приходятся на направления, не совпадающие с лучом зрения наблюдателя. Однако, время от времени фазы выбросов из-за прецессии постоянно смещаются, направления начинают совпадать и блеск такой системы может резко “падать” в течение нескольких орбитальных периодов.

Наблюдения полуразделенных двойных звезд затруднены из-за их компактности – расстояние между компонентами

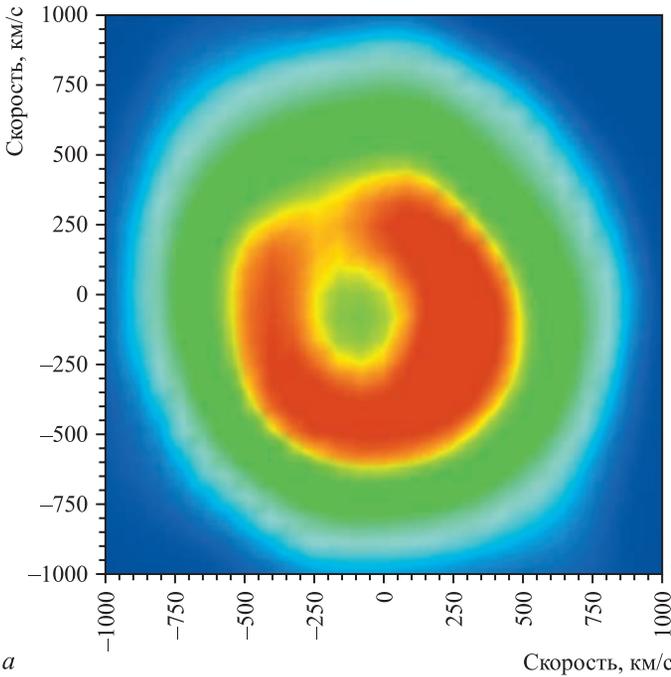
обычно не превышает нескольких радиусов Солнца. Соответственно разрешения современных телескопов недостаточно для того, чтобы различить отдельные детали течения в таких звездах. Тем не менее существует метод получения изображений отдельных деталей течения – доплеровская томография. Она родственна томографии, применяемой в медицине: по набору профилей спектральных линий, полученных на разных орбитальных фазах звезды, строится доплеровская карта – распределение интенсивности излучения в пространстве скоростей (то есть в системе координат, где по осям отложены скорости движения вещества). К сожалению, в такой системе координат различные элементы течения могут “накладываться” друг на друга, если вещество в них движется с одинаковой скоростью. Для анализа доплеровских карт мы сравниваем их с синтетическими картами, полученными по результатам численного моделирования. Затем выделяем отдельные элементы (ударные волны, истечения) и строим томограммы – точно определяя, в какую часть доплеровской карты они “вносят вклад”. В последние годы с помощью этого метода в ИНАСАН выполнен анализ спектров ряда звезд, а также показана возможность построения

трехмерных доплеровских карт для исследования течения в полярах – звездах с сильным магнитным полем.

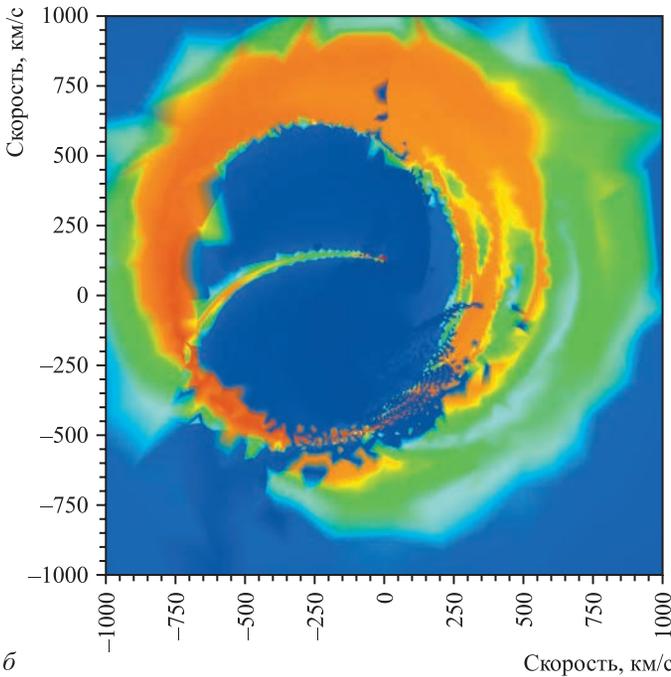
ЗВЕЗДЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Звезды с магнитным полем также исследуются в ИНАСАН методами трехмерного численного моделирования. Магнитное поле создает три дополнительных типа волн, переносящих энергию, – быстрых и медленных магнитозвуковых, а также альфеновских. Распространяющиеся вдоль магнитных силовых линий альфеновские волны движутся с высокими скоростями – вплоть до близких к световой, что сильно затрудняет расчеты. Фактически для корректного моделирования астрофизических течений с такими волнами “временной шаг” моделирования должен быть настолько мал, что полный расчет становится невозможно провести за разумное время – он требует чудовищного числа шагов. Для решения этой проблемы нами был разработан численный МГД-код, учитывающий перенос энергии альфеновскими волнами приближенно, что позволило исследовать ряд ранее недоступных моделей.

С использованием разработанного МГД-кода впервые стало возможным исследование само-



a



б

Доплеровские карты (томограммы), построенные по наблюдениям – а и по результатам численного моделирования – б. Дано распределение яркости в скоростных координатах. Кольцо на томограммах – образ аккреционного диска.

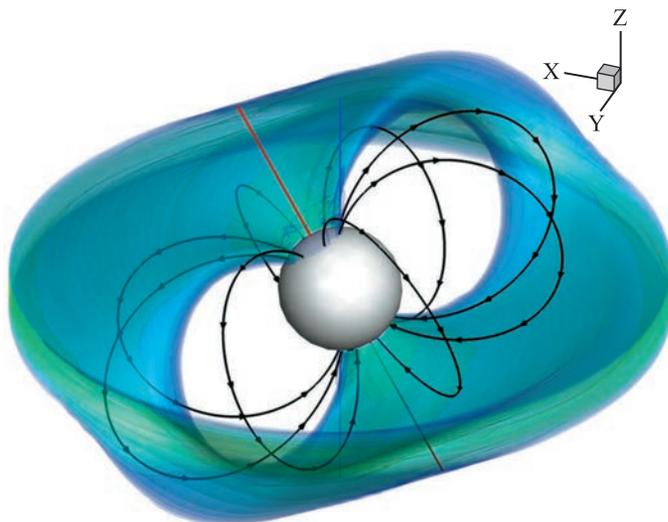
в аккреционных дисках промежуточных полярных протекать сложные процессы генерации и затухания магнитного поля; в результате чего образуется три зоны – внутренняя (где поле интенсивно генерируется) и внешняя (где поле диссипирует и образуется переходная зона токовых слоев). Поле во внутренней зоне периодически достигает значений, при которых темп аккреции падает на 15–20%, затем происходит отток поля во внешнюю зону, где оно диссипирует и цикл повторяется снова.

Традиционно считается, что аккреция в промежуточных полярных (магнитных звездах со сравнительно слабым полем) происходит на магнитные полюса звезды, однако точный вид картины течения в области магнитосферы долгое время оставался не ясен. По этой причине возникли трудности при интерпретации результатов наблюдений, поскольку именно в непосредственной близости от аккретора происходит наибольшее выделение энергии.

согласованных (включающих в себя не только магнитосферу аккретора, но и всю полость Роша

аккрецирующей звезды) моделей магнитных двойных звезд. Первые же расчеты показали, что

Аккреционные “шторки”, возникающие в области магнитосферы промежуточного поляра. Показаны потоки вещества, падающего на поверхность звезды вдоль силовых линий магнитного поля. По результатам численного моделирования.



В 2015 г. в ИНАСАН было проведено численное моделирование структуры течения в области магнитосферы промежуточного поляра и было показано, что аккреционные потоки имеют вид изогнутых плоских “шторок”, образующих полукруглые аккреционные пятна на поверхности звезды-аккретора.

В ИНАСАН исследуются также и звезды с сильным магнитным полем – поляры, у которых магнитное поле препятствует образованию аккреционных дисков. Традиционно предполагают, что поле таких звезд имеет дипольную структуру, однако наблюдения ряда звезд (например, BY Cam) не согласуются с такой простой моделью. Для объяснения наблюдательных данных нами была исследована структура течения в моделях, где магнитное поле аккретора имеет квадрупольную компоненту. По результатам моделирования нами впервые была подтверждена гипотеза о формировании в таких звездах кольцевой зоны аккреции, соответствующей магнитному поясу

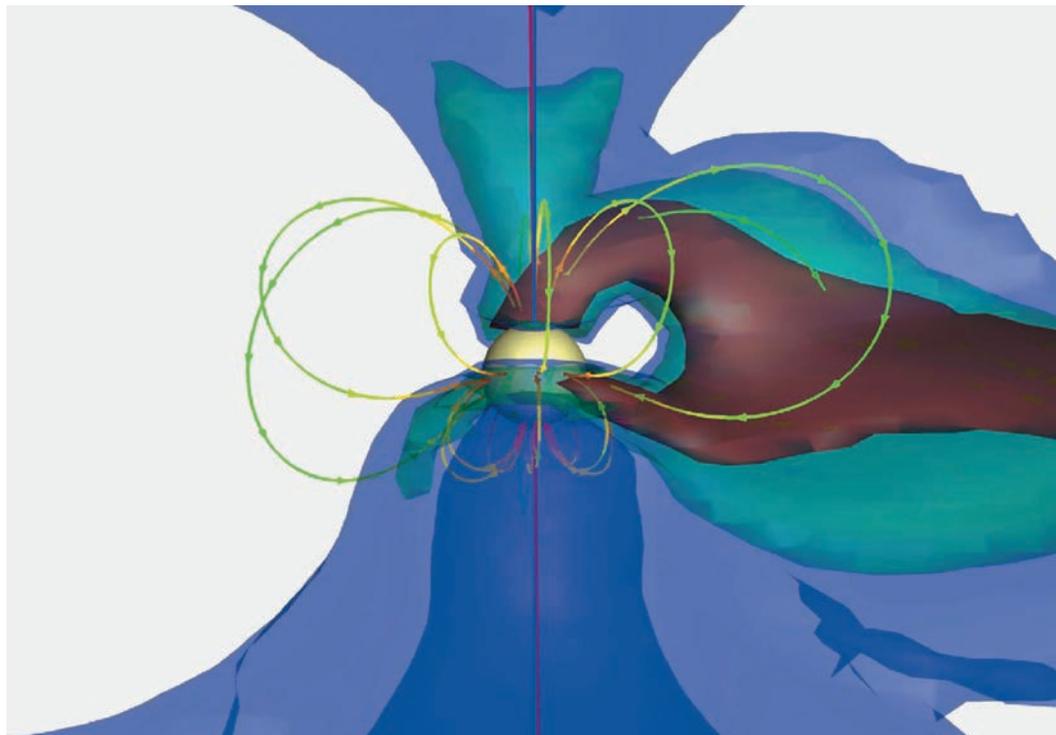
квадрупольной компоненты. Сравнение с наблюдениями показало, что разработанная модель верно описывает процессы, происходящие в звездах со сложными конфигурациями полей.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ
В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ
ЗВЕЗД

Одна из основных проблем современной астрофизики связана с объяснением возникновения турбулентности в газодинамических (без магнитного поля) аккреционных дисках. Рассматриваемые аккреционные диски устойчивы, поэтому с теоретической точки зрения турбулентности в них быть не должно, однако из наблюдений известно, что аккреционные диски звезд сильно турбулизованы. Проведенный нами в 2014 г. линейный анализ гидродинамической неустойчивости

аккреционного диска в двойной звездной системе показал, что прецессионная волна плотности в диске вызывает неустойчивость; ее причина – градиент радиальной скорости в прецессионной волне. Нами было показано, что неустойчивые возмущения, попадая в зону такого градиента, начинают усиливаться по мере распространения, создавая турбулентность с характерными параметрами, соответствующими наблюдаемым.

В 2016 г. в ИНАСАН был разработан метод, позволяющий оценивать спектр турбулентности в протопланетных дисках по результатам радиоинтерферометрических наблюдений. Ранее из наблюдений можно было лишь определить среднюю турбулентную скорость (но не распределение ее по энергиям), поэтому нельзя было



оценивать применимость тех или иных теоретических моделей. Нами выполнен анализ зависимости наблюдаемой величины турбулентной скорости от углового разрешения интерферометра. Теоретические оценки и результаты моделирования показали, что возможно провести восстановление спектра турбулентности в протопланетных дисках, анализируя профили линий, получаемые при разном разрешении уже существующих интерферометров.

ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Отметим, что математические методы, используемые для изучения

двойных звезд, могут быть применены и к экзопланетам. Действительно, планеты, относящиеся к классу “горячих юпитеров”, имеют большую массу и настолько близки к родительской звезде, что в ряде случаев находятся на грани заполнения своих полостей Роша. Анализ показал, что до трети известных “горячих юпитеров” могут переполнять свои полости Роша, а, значит, – терять вещество. Для многих из них темпы потери вещества должны быть настолько велики, что если бы не было ограничивающих механизмов, то время жизни этих планет было бы мизерным – порядка нескольких лет. В 2013 г. мы предложили

Аккреция в поляре с квадрупольной компонентой магнитного поля. По результатам численного моделирования.

механизм, объясняющий стабильность оболочек “горячих юпитеров”: наблюдаемые планеты явно существуют гораздо дольше, чем это возможно при столь интенсивной потере газа. Нами было показано, что взаимодействие со звездным ветром может стабилизировать атмосферу планеты даже на большом расстоянии за пределами полости Роша. Теоретические оценки размеров таких квазизамкнутых оболочек хорошо согласуются

с наблюдениями, показывающими, что вокруг некоторых “горячих юпитеров” существуют оболочки, вызывающие поглощение в близком ультрафиолетовом диапазоне.

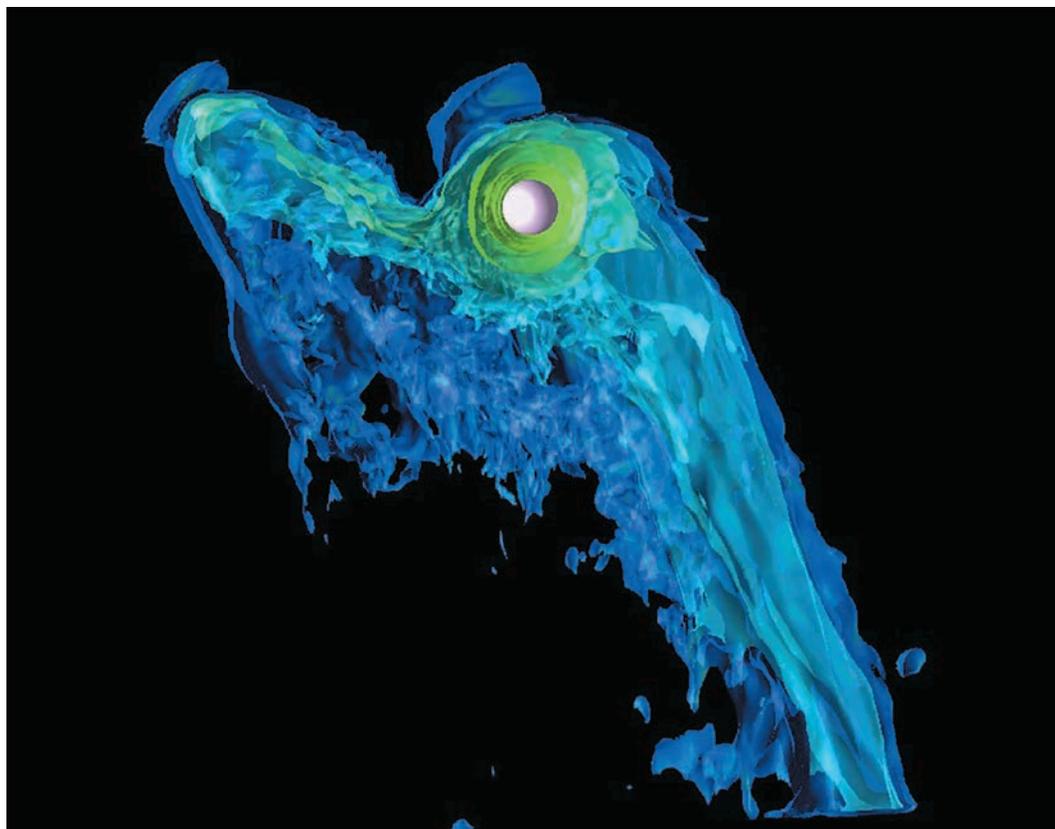
Дальнейшие расчеты показали, что квазистационарные оболочки “горячих юпитеров” слабо связаны с планетами и, следовательно,

Квазизамкнутая оболочка “горячего юпитера”, стабилизированная звездным ветром. По результатам численного моделирования.

слишком чувствительны к вариациям звездного ветра. Так, корональные выбросы с параметрами, соответствующими солнечным, могут периодически “уносить” существенную часть такой оболочки, повышая тем самым темп потери массы планетой.

К сожалению, в рамках короткой статьи невозможно дать полную картину исследований двойных звезд, которая проводится в ИНАСАН. Тем, кто всерьез интересуется данным вопросом, можно посоветовать недавно вышедшую монографию: “Газодинамика тесных

двойных звезд” (авторы Д.В. Бисикало, А.Г. Жилкин, А.А. Боярчук; издана в ФИЗМАТЛИТ в 2013 г.), где представлена более полная картина таких исследований. Также можно посоветовать монографии “Тесные двойные звезды” (в 2-х частях, автор А.М. Черепашук, ФИЗМАТЛИТ, 2013 г.) и “Аккреционные процессы в астрофизике” (под ред. Н.И. Шакуры; ФИЗМАТЛИТ, 2015), охватывающие широкий спектр вопросов, касающихся астрофизики двойных звезд.



Межгалактический газ “падает” на черную дыру

Астрофизики Йельского университета и Массачусетского технологического института (США) впервые обнаружили холодные плотные потоки газа вокруг черной дыры в ядре большого скопления галактик Abell 2597. Оно находится в центре массивной спирали, состоящей из 50 галактик в созвездии Водолея на расстоянии 1,23 млрд св. лет от нас (см. стр. 4 обложки).

Огромные межгалактические молекулярные облака из водорода и других газов “падают” со скоростью 1,29 млн км/ч (355 км/с) на сверхмассивную черную дыру массой $3 \times 10^8 M_{\odot}$: она скоро сможет поглотить примерно в миллион раз больше водорода, чем масса Солнца. Наблюдаются выбросы в виде джетов – узких пучков раскаленной

плазмы, частицы которой движутся с околосветовыми скоростями. Сегодня межгалактические облака расположены всего в 300 св. годах от черной дыры: это означает, что яркость джетов в ближайшем будущем может увеличиться, когда газ достигнет аккреционного диска черной дыры в Abell 2597. Подобное поведение газа противоречит общепринятым представлениям о характере роста сверхмассивных черных дыр. Раньше ученые считали, что черные дыры, достигая определенных размеров, не позволяют газу в своих окрестностях охлаждаться до достаточно низких температур, чем обрекают себя на остановку роста (Земля и Вселенная, 2010, № 1). Существование гигантских сверхмассивных черных дыр массой в десятки миллиардов Солнц заставляет усомниться в этом. Новые исследования с помощью радиоинтерферометра Атакамского космологического телескопа (ALMA) Европейской Южной Обсерватории в Чили показывают, что

при определенных условиях в межгалактической среде черные дыры могут также поглощать комкообразные, хаотичные “ливни” из гигантских облаков очень холодного молекулярного газа.

Сопоставление масс черных дыр, количества материи в окружающем космосе и других параметров указывает на то, что в редких случаях черные дыры могут обрести гораздо большие размеры, чем предполагает теория. Поэтому ученые разработали другую теорию, которая подразумевает быстрый рост массы черной дыры, когда в ее окрестности попадают массивные облака холодного газа. Результаты изучения черной дыры в Abell 2597 подтверждают эту теорию. Предстоит выяснить, насколько распространено такое явление во Вселенной. Ученые рассчитывают лучше разобраться в природе роста черных дыр, в устройстве и эволюции галактик.

Пресс-релиз ESO,
8 июня 2016 г.



Молекулы в космосе

Д. З. ВИБЕ,
доктор физико-математических наук
ИНАСАН

В настоящее время известно о существовании в межзвездной и околозвездной среде более полутора сотен различных химических соединений, начиная с простейших двухатомных молекул и заканчивая сложной органикой. Изучение свойств этих молекул, а также процессов,



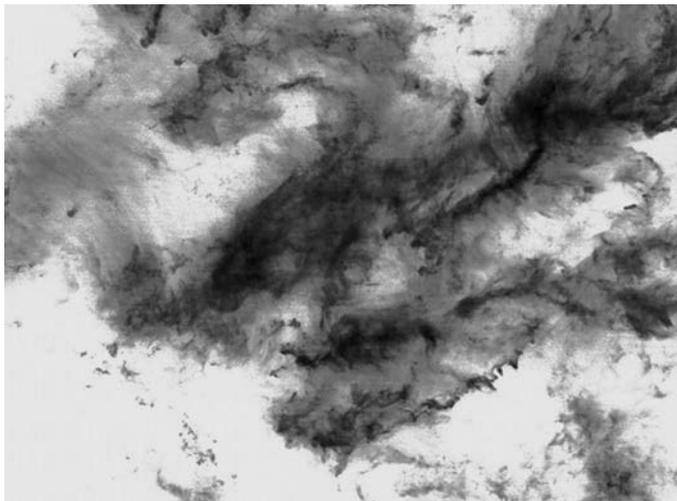
приводящих к их синтезу, способно “пролить свет” на тайны образования звезд и планетных систем вокруг них, а, может быть, – и на происхождение самой жизни. Задача исследования межзвездных молекул весьма сложна и требует больших усилий наблюдателей и теоретиков.

ОТКРЫТИЕ МОЛЕКУЛ ВО ВСЕЛЕННОЙ

На первый взгляд, космическое пространство кажется не самым подходящим местом для существования молекул. Чрезвычайно низкая плотность и температура, жесткое излучение – представить себе химические реакции в таких условиях довольно сложно. Поэтому обнаружение молекул в межзвездной среде в конце 1930-х гг. по линиям поглощения

в оптическом диапазоне оказалось совершенно неожиданным. Поначалу существование межзвездных молекул не выглядело серьезной проблемой – появление нескольких простых молекул (CH , CN , CH^+) в межзвездной среде (МЗС) можно было объяснить выбросом их с поверхности звезд. О том, что молекулы существуют в звездных атмосферах, стало известно в начале XX века.

Исследование межзвездной химии началось после появления радиоастрономии. В конце 1940-х И. С. Шкловский предсказал, что в радиодиапазоне регистрируется не только поглощение, но и излучение молекул. Эта догадка подтвердилась в 1963 г., когда по наблюдениям на длине волны 18 см в межзвездной среде ученые обнаружили молекулу гидроксила (OH). Через несколько лет в космосе нашли молекулы аммиака (NH_3),



Карта комплекса молекулярных облаков в созвездии Тельца в линии излучения молекулы оксида углерода. 2008 г.

воды (H_2O), формальдегида (H_2CO), оксида углерода (CO) и более сложные молекулы. К настоящему времени количество известных химических соединений в космосе перевалило за полторы сотни (без учета изомеров).

ЗАГАДКА МЕЖЗВЕЗДНОГО ХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Чем больше обнаруживалось в космосе молекул, тем острее вставал вопрос об их происхождении. Даже если допустить, что простые молекулы, подобные CH и CH^+ , “улетают” с поверхности звезд, откуда взялись более сложные соединения? Предложенный в качестве альтернативы механизм формирования молекул непосредственно в межзвездной среде – радиативная ассоциация (простое объединение атомов в молекулы) – оказался крайне неэффективным.

В 1973 г. нашлось окончательное объяснение – атомы гораздо охотнее взаимодействуют друг с другом и с простыми молекулами при условии, если один из них ионизован. (При низкой плотности межзвездной среды в реакциях всегда участвует только два реагента.) По современным представлениям, химические процессы в межзвездной среде инициируются космическими лучами. Эти частицы (атомные ядра), разогнанные каким-то механизмом до близких к световым скоростей, способны проникать в глубь плотных межзвездных облаков. Они ионизируют часть атомов и запускают тем самым сложное переплетение химических превращений. Главную роль в них играет водород – самый распространенный элемент во Вселенной. Первичные

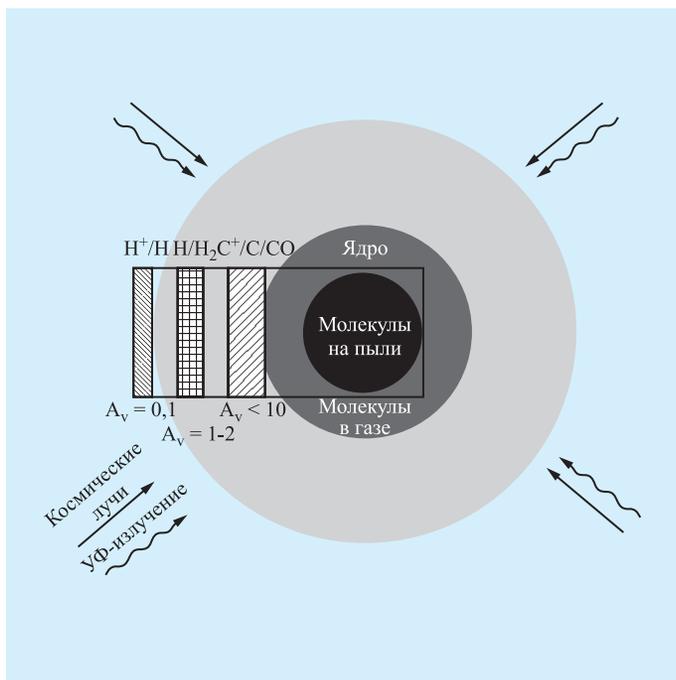
цепочки реакций с атомами и ионами кислорода, азота и углерода приводят к появлению соединений водорода с другими пространственными атомами: в частности, к формированию воды, аммиака и метана.

В перекрестных реакциях между промежуточными продуктами этих цепочек (радикалами CH , OH и другими) рождается вторая по распространенности молекула в межзвездной среде – молекула оксида углерода (CO). По концентрации она уступает только молекуле водорода (H_2), но уступает значительно: в десяток тысяч раз, а то и меньше. Последующие реакции все более и более усложняют химический состав облака, и нам по большому счету до сих пор неясно, до какой степени молекулярной сложности могут довести эти реакции. Благодаря совершенствованию наблюдательной техники в межзвездных облаках теперь удается детектировать сложные органические соединения, вплоть до молекул, содержащих более 10 атомов. Уже несколько раз сообщалось о наблюдениях

Схема строения дозвездно-го ядра молекулярного облака. Рисунок Д.З. Вибе.

в межзвездной среде простейшей аминокислоты – глицина. Правда, потом эти сообщения всякий раз оспаривались; ибо чем сложнее молекула, тем труднее доказать достоверность ее наблюдения. Рано или поздно глицин в космосе “окончательно” обнаружат. В любом случае сейчас не вызывает сомнений, что в плотных межзвездных облаках природа способна вплотную “подобраться” к аминокислотам.

При всех успехах в объяснении эволюции межзвездной органики довольно долго оставался открытым вопрос о том, откуда в плотных облаках берется молекула водорода. С одной стороны, очевидно, что в плотной межзвездной среде молекула H_2 представляет собой основную форму существования водорода, поэтому плотные газопылевые облака и заслужили наименование молекулярных. С другой стороны, объединить в молекулу два атома водорода гораздо сложнее, чем, скажем, атом водорода и атом углерода. И здесь важнейшим химическим фактором оказывается космическая пыль. Два атома водорода не



способны слиться в молекулу в газовой фазе, но эта реакция происходит на поверхности космических пылинок, к которым атомы водорода способны “примерзнуть”. Если пылинки не слишком холодны (теплее 10 K), то атомы совершают тепловые передвижения по ее поверхности и иногда сталкиваются друг с другом. При участии двух атомов водорода они объединяются в молекулу, а энергия, выделившаяся в результате реакции, “отрывает” новорожденную молекулу от пылинки и “выбрасывает” ее в окружающую среду.

В поверхностных реакциях могут рождаться не только молекулы водорода, но и такое сложное соединение, как мета-

нол (CH_3OH). Эксперименты показали, что в газовой фазе реакции его образования проходят с очень низкой скоростью, которой недостаточно, чтобы объяснить измеренное содержание молекулы метанола. Куда более эффективными оказываются “поверхностные” реакции: в начале цепочки синтеза метанола лежит молекула CO , которая в холодных условиях молекулярных облаков также “примерзает” к пылинкам, где к ней последовательно добавляются четыре атома водорода. Появлением метанола поверхностный синтез не ограничивается; образуются и другие молекулы, в том числе многоатомные органические соединения.

Межзвездные молекулы (за редким исключением) наблюдаются в газовой фазе, а не в ледяных мантиях пылевых частиц, поэтому должен существовать какой-то механизм, способный “испарять” эти мантии. Традиционно такими основными механизмами считаются тепловая десорбция (испарение мантии в результате нагрева пылинки) и фотодесорбция (разрушение мантии фотонами). В обоих случаях для десорбции необходим близкий источник излучения; предположительно в плотном молекулярном облаке ими могут быть только что образовавшиеся протозвезды. Они нагревают окружающее вещество, испаряют ледяные оболочки пылинок и тем самым переводят синтезированную на пылинках органику в газовую фазу. Правда, некоторые молекулы, включая тот же метанол, наблюдаются и в холодных облаках, где еще нет протозвезд. Возможно, что какую-то роль в разрушении мантий пылинок играет реактивная десорбция – то есть десорбция в результате выделения энергии в “поверхностных” химических реакциях.

Содержание молекул в плотных газопылевых облаках определяется сложным переплетением различных процессов, скорости протекания которых сильно зависят от температуры, плотности,

свойств поля излучения, от потока космических лучей... Внутри облака эти параметры существенно варьируются, и молекулы также распределены очень неоднородно: некоторые более эффективно синтезируются в плотном ядре облака, другие сосредоточены в основном на периферии.

В целом, молекулярная структура таких ядер определяется проникновением в них ультрафиолетового излучения и космических лучей; она состоит из двух ключевых переходов – от атомарного (частично ионизованного) водорода к молекулярному водороду и от ионизованного и атомарного углерода – к молекулам CO. В центральной, наиболее холодной части ядра газ обеднен молекулами, так как они вымораживаются на пылинках, образуя на них ледяные мантии.

Эта неоднородность очень важна с точки зрения интерпретации полученных данных. Самая распространенная в космосе – молекула водорода – в условиях, характерных для межзвездных облаков, не способна генерировать наблюдаемое излучение. Основная масса газа облаков остается для нас невидимой, и об их состоянии нам приходится судить по наблюдениям перечисленных выше соединений. Но из-за неоднородности

пространственного распределения молекул излучение каждой из них несет информацию о каком-то специфическом регионе облака. Собрать из этой мозаики цельную картину можно лишь при условии, что мы детально разберемся в своеобразии межзвездных химических процессов и в их связи с физической эволюцией межзвездной среды вообще и молекулярных облаков в частности.

ТАМ, ГДЕ ХИМИЯ
ВСТРЕЧАЕТСЯ С ДИНАМИКОЙ

Начиная с 1994 г., в Институте астрономии РАН ведутся исследования в области молекулярной эволюции межзвездных облаков, – когда доктор физико-математических наук Б.М. Шустов предложил разработать астрохимическую модель протозвездного объекта, которая бы (в отличие от прочих подобных разработок) была бы сопряжена с динамической моделью эволюции межзвездного вещества.

Как упоминалось, для численного исследования химических реакций необходимо знать как минимум температуру, плотность и свойства поля излучения. До сих пор во многих работах, посвященных астрохимической химии звездообразования, этим параметрам присваивают некие “типичные” значения, пренебрегая их эволюцией.

В более сложных моделях учитываются изменения физических параметров в процессе протозвездной эволюции, однако химические реакции рассчитываются “поверх” этих изменений, без учета обратной связи. Однако в реальности такая обратная связь существует. Например, некоторые молекулы (в первую очередь молекула оксида углерода) играют важную роль в установлении температуры облака, так как их излучение является важным каналом для потери энергии из него. Далее, от содержания молекулярных ионов зависит степень ионизации вещества облака, а значит – эффективность его взаимодействия с галактическим магнитным полем.

Химическая эволюция межзвездного облака определяется физическими условиями в нем и их изменением со временем, а физические условия существенно зависят от содержания ряда “ключевых” молекул. В нашем институте разработана модель, в которой физическая и химическая эволюции рассматриваются одновременно и самосогласованно. Это означает, что мы не только учитываем изменение физических условий (плотности, температуры, параметров поля излучения) при вычислении скоростей химических процессов, но и принимаем во внимание зависимость физических

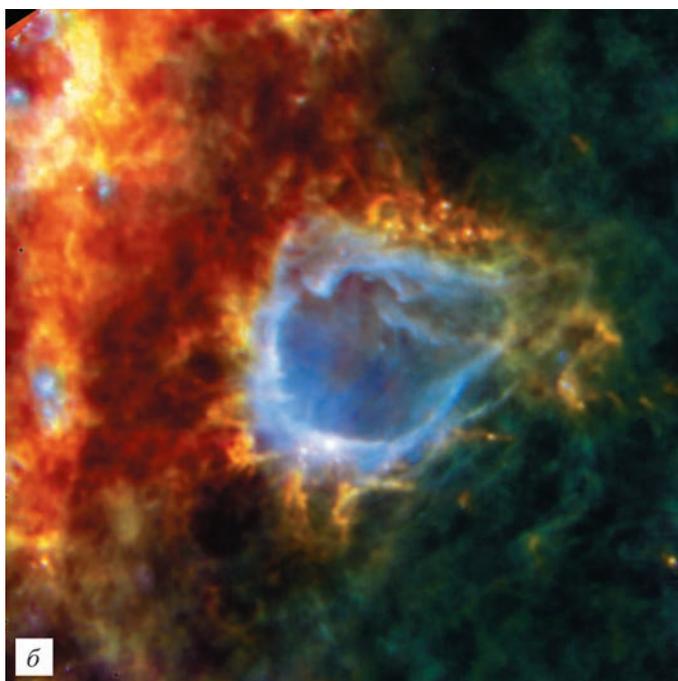
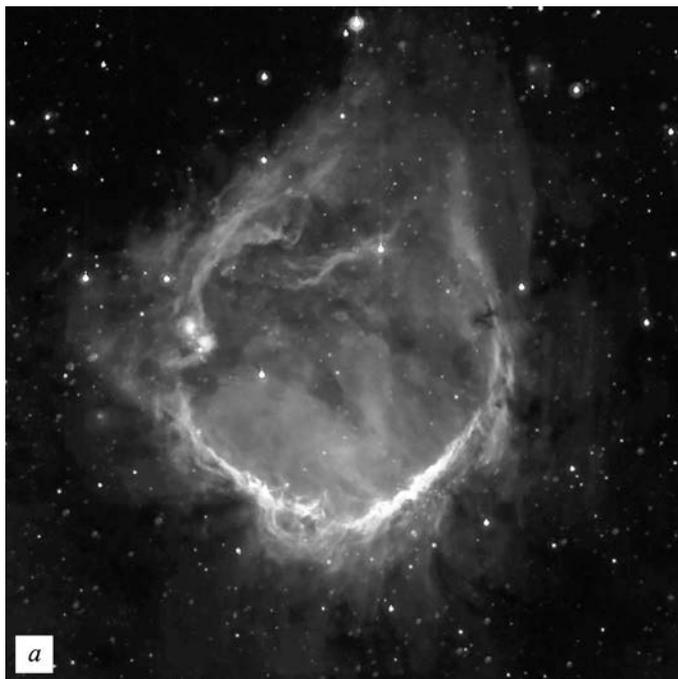
условий от текущего молекулярного состава вещества. В конце 1990-х гг. были опубликованы результаты исследований, выполненных с ее помощью, посвященные эволюции одномерных протозвездных объектов. Сейчас ученые Института в сотрудничестве с коллегами из Южного федерального университета с помощью этого же подхода моделируют более сложные объекты – протопланетные диски у звезд. Цель этих исследований состоит в том, чтобы предсказать, как будет выглядеть при наблюдениях в линиях молекул динамически эволюционирующий диск с образующимися протопланетными сгустками, вспышками на звезде и прочими “атрибутами” молодой звездно-планетной системы.

ЗОНЫ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

Второе направление исследования динамической и химической эволюции звезд – моделирование процессов, происходящих в веществе, окружающем молодую массивную звезду. У таких звезд значительная доля излучения имеет длину волны менее 91,2 нм; этого достаточно для ионизации водорода. В результате вокруг таких звезд и их скоплений возникают зоны ионизованного водорода (области HII) с температурой

внутри них порядка 10^4 К. Она существенно превышает температуру газа в родительском молекулярном облаке (10–20 К), поэтому тепловое давление “заставляет” область расширяться, “сметая” окружающий газ в плотную оболочку. Внутри нее происходит переход от горячего (преимущественно атомарного и ионизованного) газа к холодному (молекулярному) – формируется фотодиссоциационная область. В ней происходят разнообразные физико-химические процессы, связанные с испарением ледяных мантий и фотодиссоциацией газофазных молекул. Наблюдения указывают, что с этим этапом в жизни молодой звезды связано появление особого вида молекулярного излучения молекул гидроксила, воды, метанола – мазерного. До сих пор непонятны причины появления такого излучения и его точная локализация в области HII (или ее окрестностях). Не ясно даже, формируют ли мазеры на разных молекулах некую эволюционную последовательность?

Ответить на эти вопросы призвана разработанная в нашем институте химико-динамическая модель “Marion”, позволяющая исследовать эволюцию молекулярного состава в оболочке расширяющейся области HII. В моделировании динамики учитывается изменение



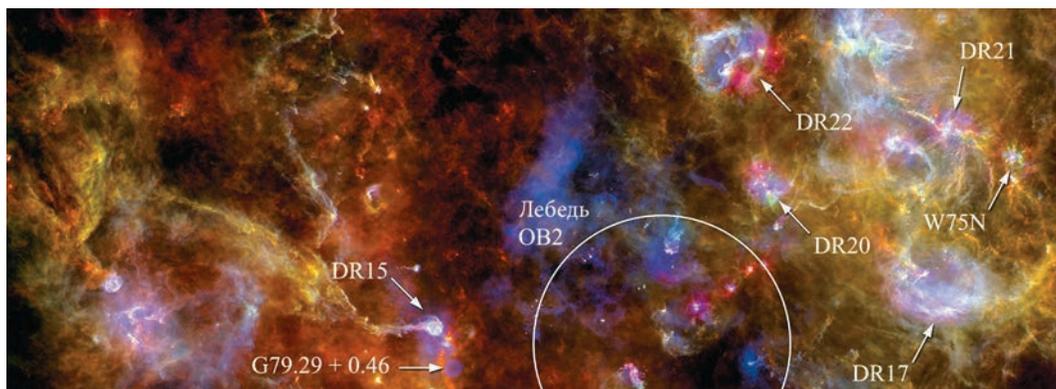
Область ионизованного водорода RCW120 (созвездие Скорпиона, расстояние – 1,4 клк): а – в ближнем инфракрасном излучении, б – в дальнем ИК-диапазоне. Кольца инфракрасного излучения отмечают плотную молекулярную оболочку, сметенную при расширении горячего ионизованного газа. Изображения получены космическими обсерваториями “Спитцер” (6 сентября 2004 г.) и “Гершель” (22 марта 2011 г.). Фото NASA/JPL/ESA.

позволяет проследить, как и где именно различные молекулы попадают в газовую фазу с поверхностей пылинок, а также на каком участке фотодиссоциационной области происходит их диссоциация. Тем самым выделяется район пространства, из которой должно исходить молекулярное излучение (в том числе мазерное). Результаты работы программного комплекса “Marion” позволяют решать задачу о переносе излучения в области HII и создавать синтетические наблюдения, то есть предсказывать, как именно объект будет выглядеть при наблюдениях с использованием различных телескопов.

Модель “Marion” также используется нами для изучения эволюции более сложных молекул – полициклических ароматических углеводородов.

состава различных компонентов газа, а в моделировании химических процессов – изменение

физических параметров, что весьма важно в таком бурно эволюционирующем объекте. Модель



Комплекс звездообразования Лебедь-X, в состав которого входит область DR21. Изображение получено космической обсерваторией "Гершель". Фото ESA/PACS/SPIRE.

В межзвездной среде присутствуют ароматические соединения, но в каком именно виде – пока неясно. Один из ключевых индикаторов полициклических ароматических углеводородов – сильное излучение вблизи длины волны 8 мкм. Карты областей HII свидетельствуют о том, что ароматические соединения в окрестностях молодых горячих звезд распределены своеобразно: излучение на длине волны 8 мкм окружает их замкнутыми кольцами или, по крайней мере, протяженными дугами, но никогда не встречается в непосредственной окрестности звезд. Инфракрасное излучение полициклических ароматических углеводородов

генерируется при поглощении ими ультрафиолетовых фотонов, поэтому ожидается, что вблизи источника УФ-излучения они будут светиться сильнее. Отсутствие же эмиссии означает, что полициклических ароматических углеводородов вблизи звезды нет, поскольку они, скорее всего, разрушаются под воздействием ее излучения. Химико-динамическая модель "Marion" позволяет детально исследовать развитие такого процесса.

Хорошим примером может служить область ионизованного водорода RCW120. В проекции на небесную сферу она окружена почти идеальным кольцом излучения на длине волны 8 мкм, принадлежащим макромолекулам полициклических ароматических углеводородов. Это кольцо свидетельствует о том, что внутри области HII полициклические ароматические углеводороды полностью разрушены. Наши расчеты показывают, что

если бы полициклические ароматические углеводороды содержались внутри области в той же пропорции, что и вне ее, то в центре кольца также наблюдалась бы яркая эмиссия на длине 8 мкм.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ ОРГАНИКА

К сожалению, подобные модели, несмотря на постоянное совершенствование вычислительной техники, продолжают оставаться очень ресурсоемкими, поэтому многие астрохимические процессы в них приходится рассматривать очень упрощенно, а то и вовсе пренебрегать ими. Для более детального исследования этих процессов в ИНАСАН используются традиционные подходы: модели, в которых физические условия либо не меняются, либо меняются независимо от химических процессов.

Важным направлением работ мы считаем изучение эволюции содержания сложных органических молекул в прото-



звездных ядрах. Для того чтобы достигнуть цели, нам пришлось существенно дополнить астрохимическую модель, включив в нее такие наблюдаемые в межзвездной среде соединения, как метилформиат, метилцианид, диметилэфир и другие. Обновленная модель получила название “Presta” (Pre-Star). Она позволяет детально изучать молекулярную эволюцию протозвездных объектов в очень широком диапазоне с учетом возраста и их других параметров. Для тестирования обновленной модели мы выбрали два очень разных региона: плотную область в хорошо изученном газопылевом облаке TMC-1 в созвездии Тельца на расстоянии порядка 140 пк и участок области звездообразования DR21 (OH) в северной части

комплекса Лебедь-X на расстоянии 1,5 кпк. Район TMC-1 является “типичным представителем” рождения маломассивных звезд, причем этот процесс только начинается. Во втором регионе происходит (довольно активно) образование звезд с массой более десятка солнечных. Важно то, что оба региона детально исследованы с астрохимической точки зрения: в них оценено содержание десятков молекул, в том числе органических. Сопоставление этих оценок содержаний с результатами наших расчетов показало, что разработанная в ИНАСАН модель “Presta” прекрасно объясняет полученные данные. Сейчас она используется нами для исследования различных аспектов влияния космических пылинок на астрохимические

Часть антенн интерферометрической системы ALMA для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Фото ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

процессы, определяется роль изучения в создании заряженных пылинок или с различными температурами.

Связь свойств пыли с химической эволюцией вещества особенно важна при детальном моделировании химической эволюции протопланетных дисков. В последние несколько лет оно стало важным направлением нашей работы и привело к созданию модели протопланетного диска “Andes”, разработанной нашими учеными в сотрудничестве с коллегами из Германии. В этой модели впервые одновременно с эволюцией молекулярного

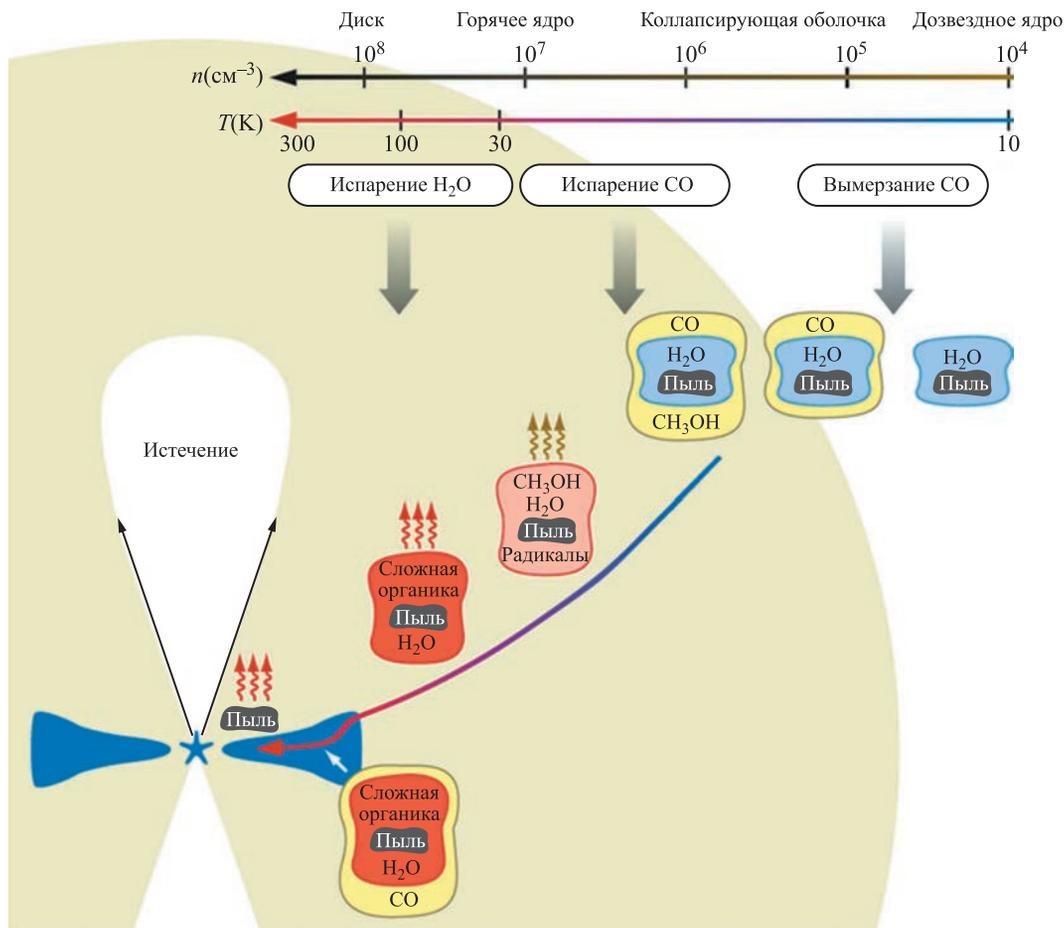


Схема эволюции молекулярного вещества в ходе формирования протопланетного диска. Рисунок ESO/NRAO.

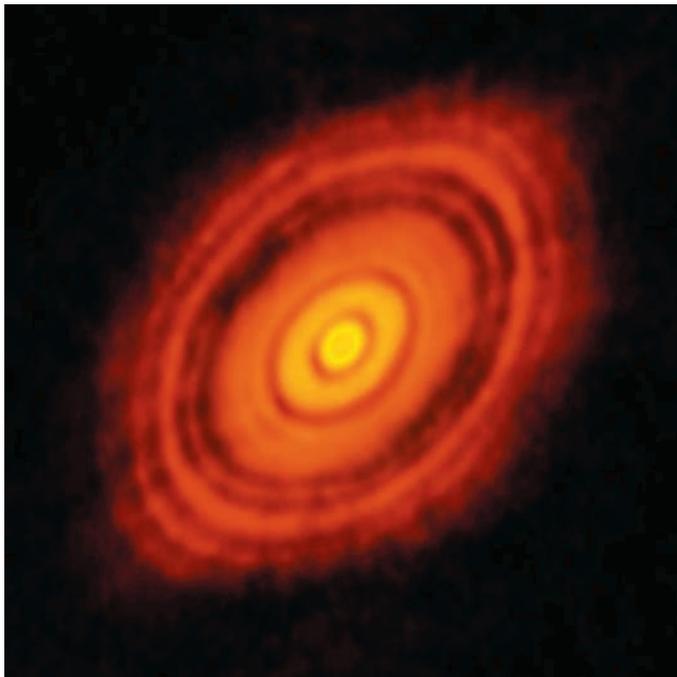
состава рассматривается и изменение размеров пылинок – неотъемлемого атрибута системы, в которой началось формирование планет.

МОЛЕКУЛЫ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Теоретическое изучение молекулярного сос-

тава протопланетных дисков становится сейчас очень популярным направлением. Главным образом это связано с началом работы интерферометра субмиллиметрового диапазона ALMA (Атакамская большая антенная решетка миллиметрового диапазона – комплекс радиотелескопов, расположенных в чилийской пустыне Атакама, ESO), который позволит получать детальную информацию о содержании молекул в газопылевых дисках у молодых звезд, похожих на

Солнце. Несмотря на то, что создано множество моделей, “изюминка” нашей состоит в том, что мы уделяем особое внимание именно протопланетному статусу диска. Если мы предполагаем, что в диске формируется (или будет формироваться) планетная система, то нам необходимо учесть в такой модели эволюцию свойств пылевых частиц – точнее их постепенный рост и оседание к плоскости симметрии диска (средней области).



Протопланетный диск у звезды HL Tau. Одно из объяснений природы колец в диске связывает их происхождение с особенностями движения пылинок с ледяными молекулярными мантиями. Изображение получено в октябре–ноябре 2014 г. с помощью интерферометра ALMA. Фото ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

излучением. В непосредственных окрестностях звезды – где температура наиболее высока – разрушаются и сами пылинки.

В атмосфере диска, где плотность вещества невелика, рост пылинок происходит медленнее, при этом формирующиеся крупные пылинки не остаются на месте, а “опускаются” в срединную область диска. Там, в свою очередь, укрупнение пылинок происходит куда быстрее, но их количество пополняется за счет “выпадения” пылинок из внешних слоев диска. Естественно ожидать, что столь сложная эволюция пылинок в диске отразится на его молекулярном составе. Модель ANDES позволяет выявить те молекулы, наблюдения которых в будущем дадут нам возможность получить информацию о самом начальном этапе рождения планет.

Развитие астрохимических исследований в ИНАСАН происходит по нескольким направлениям. Продолжается со-

Распределение пылинок по размерам – важный космохимический фактор. Например, изменение соотношения между крупными и мелкими пылинками меняет прозрачность вещества: чем больше в среде крупных пылинок (при сохранении полной общей массы пыли), тем более среда прозрачна для ультрафиолетового излучения. Это означает, что на раннем этапе формирования планетной системы диск (из-за роста пылинок) более эффективно просвечивается ультрафиолетовым излучением, исходящим из окрестностей звезды, что усиливает диссоциацию молекул, разрушает ледяную мантию на пылинках и нагревает газ. Кроме того, укрупнение

пылинок сокращает их поверхность, доступную для протекания реакций синтеза органических соединений. Мы вправе ожидать, что начало роста планет отразится на молекулярном составе диска, причем в разных областях диска “отклик” будет различным, так как эволюция пыли везде протекает по-разному. До попадания в диск большая часть молекул находится в ледяных мантиях пылевых частиц; постепенно поверхностные химические процессы обогащают мантии органическими соединениями. При попадании в области диска, нагретые излучением звезды, мантии начинают испаряться, а молекулы, попав в газовую фазу, разрушаются

вершенствование модели “Andes”. Пока рост пылинок в ней и химические процессы рассматриваются отдельно друг от друга, но для большей достоверности результатов их необходимо моделировать одновременно и согласованно. Мы предполагаем изучить, как может влиять на химические процессы электрический заряд пылинок. В модели “Marion” мы рассматриваем все более сложные

комплексы химических процессов, предполагая, что это позволит в деталях объяснить уже известные закономерности распределения молекул в окрестностях областей III, а также предсказать новые закономерности. В сотрудничестве с коллегами из Германии в модель “Presta” включены дейтерированные соединения, что открывает возможности для интерпретации существенно

более широкого круга наблюдений.

Изучение межзвездных молекул является важным источником информации о процессах, сопровождающих рождение звездных и планетных систем. Отрадно, что в этой актуальнейшей и интереснейшей области астрономии нам удастся находиться на передовых позициях, сочетая и теоретические, и наблюдательные исследования.

Информация

Туманность от остатка сверхновой

25 июля 2016 г. Космический телескоп им. Хаббла получил изображение туманности DEM L316A, находящейся на расстоянии 160 тыс. св. лет от нас, в галактике-соседке – Большом Магеллановом Облаке. Эта туманность – остаток погибшей звезды в созвездии Золотой Рыбы, от взрыва которой образовались длинные волокна горячего ионизованного газа (см. стр. 1 обложки). Помимо DEM

L316A, KTX нашел в данной галактике в 2010 г. и в 2013 г. еще два остатка сверхновых – туманности SNR 0509 и SNR 0519.

Взрыв, который сформировал туманность DEM L316A, относят к особенно грандиозным и ярким явлениям во Вселенной – образованию сверхновой типа Ia. Как правило, они вспыхивают в двойных системах, состоящих из двух белых карликов или из красного гиганта и белого карлика. В отличие от других типов сверхновых в этих по крайней мере одна из участвовавших во взрыве звезд полностью исчезает. Внешние слои умершей звезды выбрасываются в окружающее пространство на огромных скоростях, газ разогревается

и ионизируется, двигаясь сквозь межзвездное вещество. На месте “погибшей” звезды несколько тысяч лет остается светящееся облако из раскаленной плазмы и тяжелых элементов. Остатки сверхновых – большая редкость, поэтому внимание к ним астрономов – повышенное (Земля и Вселенная, 2008, № 1; 2009, № 6, с. 38; 2012, № 2, с. 19; 2015, № 2, с. 16). Изучая такие туманности, как DEM L316A, астрофизики пытаются установить: сценарий взрыва белых карликов одинаков или в далеком прошлом были такие, которые могли вести себя по-иному.

Пресс-релиз NASA,
25 июля 2016 г.



Астрофизика

Прогресс в исследованиях динамики и химии галактик

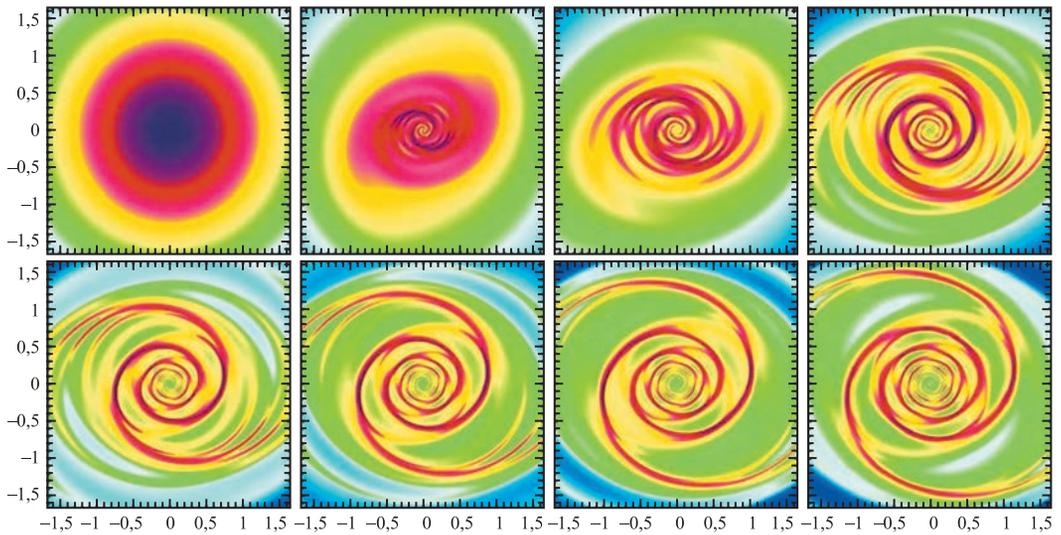
Е. В. ПОЛЯЧЕНКО,
доктор физико-математических наук
Л. И. МАШОНКИНА,
доктор физико-математических наук
С. А. ХОПЕРСКОВ,
кандидат физико-математических наук
Институт астрономии РАН



В ближайшие месяцы станут доступны результаты измерений, полученных европейской космической астрометрической обсерваторией “Gaia” (ESA), запущенной 19 декаб-

ря 2013 г. На их основе планируется создать трехмерную карту Млечного Пути (Земля и Вселенная, 2014, № 4). Институт астрономии РАН активно участвует в ведущих проектах

по исследованию динамики и химии галактик. Обзор повествует о достижениях Института в этом направлении, а также о результатах, которые вскоре предполагается получить.



Эволюция галактического газового диска (вид сверху) в поле аксиально несимметричного трехосного гало темной материи. Состояние диска показано с шагом в 250 млн лет.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЧАСТИ ВСЕЛЕННОЙ

Стандартной теорией, наилучшим образом объясняющей всю совокупность наблюдательных данных о крупномасштабной структуре Вселенной, считается так называемая Λ CDM-теория. Она включает в себя три составляющие: темную энергию, темную материю и обычную (или барионную) материю. Темная энергия “ответственна” за космологическое расширение Вселенной с ускорением и обозначается в уравнении Эйнштейна греческой буквой Λ .

В масштабах одной галактики темная энергия практически не играет роли. Холодная темная материя (CDM – cold dark matter) – напротив, очень важна. Термин “холодная” означает, что частицы темной материи движутся медленно по сравнению со скоростью света; они взаимодействуют с барионным веществом и излучением посредством гравитационных сил. Что представляют собой частицы темного вещества – до сих пор неизвестно. В качестве кандидатов предлагаются элементарные частицы и “большие компактные объекты”: например, черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики. Суммарная энергия “темных” компонент составляет примерно 95% от всей энергии Вселенной. Оставшиеся 5% приходятся на барионную материю: звезды,

галактики, межзвездный и межгалактический газ, пыль.

На раннем этапе эволюции Вселенной (12,5–13,5 млрд лет назад) формирование галактик происходило в сгустках темной материи, притягивающих к себе первичный барионный газ. Затем, спустя несколько миллиардов лет, существенно становятся столкновения галактик между собой. Столкновения во многом определяют форму и строение галактик в настоящее время. В дополнение к столкновениям, сопровождающимся быстрым изменением параметров галактики, происходит медленная, или секулярная эволюция. Это различного вида неустойчивости и релаксационные процессы, в которых роль темной материи трудно переоценить.

Первые модели формирования галактик вклю-

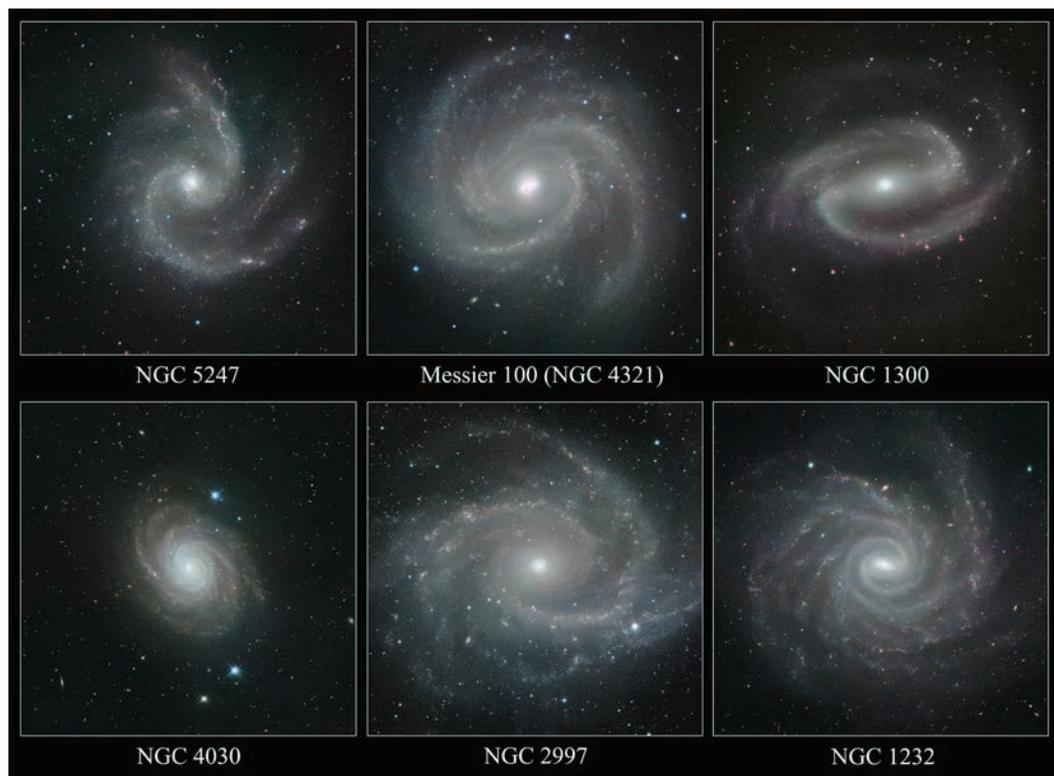
чали в себя только темную материю. Развитие компьютерной техники позволило (начиная с 1990-х гг.) учесть явления, связанные с динамикой газа, с формированием и эволюцией звезд.

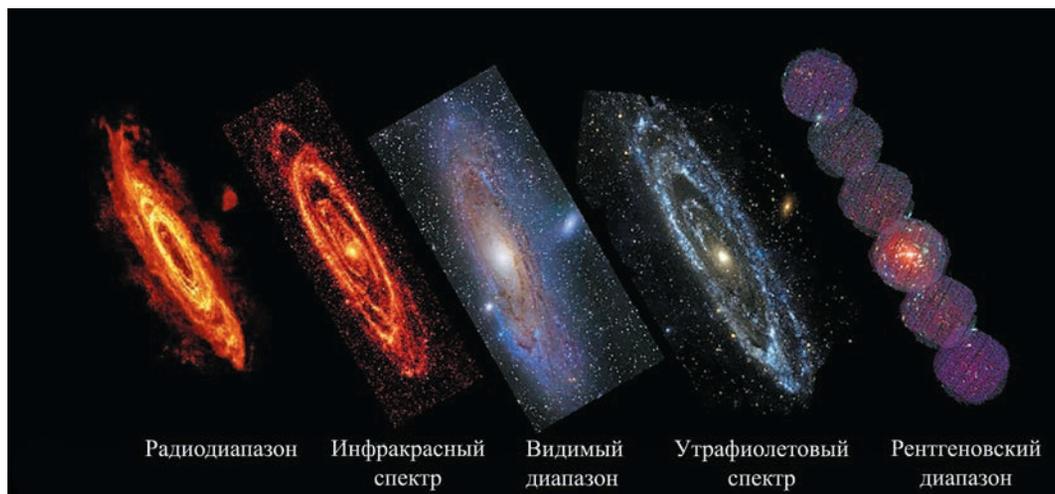
В последнее время стало возможным выполнять “прямое” моделирование, прослеживающее образование галактик из малых возмущений плотности первоначально однородной среды. Уже сейчас существуют несколько компьютерных кодов для таких вычислений, но в результате получаются различные формы галактик. Причина различия заключается

в необходимости учета явлений, протекающих на расстояниях меньше одного парсека ($1 \text{ пк} = 3,09 \times 10^{13} \text{ км}$). Пространственное разрешение даже самых лучших космологических экспериментов пока ограничено 5–50 пк, а минимальная масса объектов составляет порядка $10^3 M_{\odot}$. Этого достаточно для того, чтобы проследить формирование галактического звездного диска, но для описания тонкого газового диска необходимо учитывать процессы, происходящие на существенно меньших масштабах. Например, можно упомянуть такие процессы, протекающие на субпарсековой шкале,

как рождение и взрывы звезд, а также эволюция активных ядер галактик. Для описания энергетического баланса в межзвездной и межгалактической средах приходится прибегать к использованию упрощенных, и зачастую довольно искусственных моделей.

Спиральные галактики NGC 5247, M100 (NGC 4321), NGC 1300, NGC 4030, NGC 2997 и NGC 1232. Изображения получены с помощью новой камеры HAWK-I с радиотелескопа VLT (Параналь, Чили). Фото ESO, П. Гросбол.





Галактика M31. Изображения в различных диапазонах, полученные космической обсерваторией "Планк". Фото ESA/NASA.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Впервые о возможном наличии темной материи стали говорить, объясняя зависимость скорости вращения газа от расстояния до центра в массивных галактиках; она не "убывает" даже за пределами звездного диска. Существует много способов оценки распределения барионной и темной материи. Так, например, используют условия динамической устойчивости, обеспечивающие сохранение формы диска и спиралей, построение моделей галактических полярных колец, а также гравитационное линзиро-

вание (Земля и Вселенная, 2010, № 3).

Согласно современным космологическим моделям, в темных гало распределение вещества не является сферически симметричным, а имеет форму эллипсоида. Эта асимметрия приводит к взаимодействию гало с галактическими спиральями и позволяет спиральным рукавам сохранять свою форму на протяжении многих оборотов. Таким образом можно объяснить существование долгоживущей спиральной структуры. Однако неизвестна была степень необходимой асимметрии гало.

Численные эксперименты, проделанные авторами, показывают, что указанный механизм формирует спирали за 1–3 оборота, образуя систему туго закрученных волн. С уменьшением эллиптичности спирали оказываются более туго закру-

ченными и обладают меньшей амплитудой, а время образования спиральной структуры увеличивается. Массивное гало способно генерировать нелинейные волны в газовом диске даже при очень малой относительной разности осей эллипса (менее 0,01), но время образования спиралей в этом случае превышает промежуток времени, равный десяти периодам обращения периферии диска.

Для динамических моделей с эллиптическим темным гало характерны периодические изменения угловой скорости вращения спирального узора. Эти скачки возникают при прохождении через вытянутую потенциальную яму гало темной материи. Именно эта кинематическая особенность предсказана нашей группой, и ее изучение является перспективной с точки зрения определения

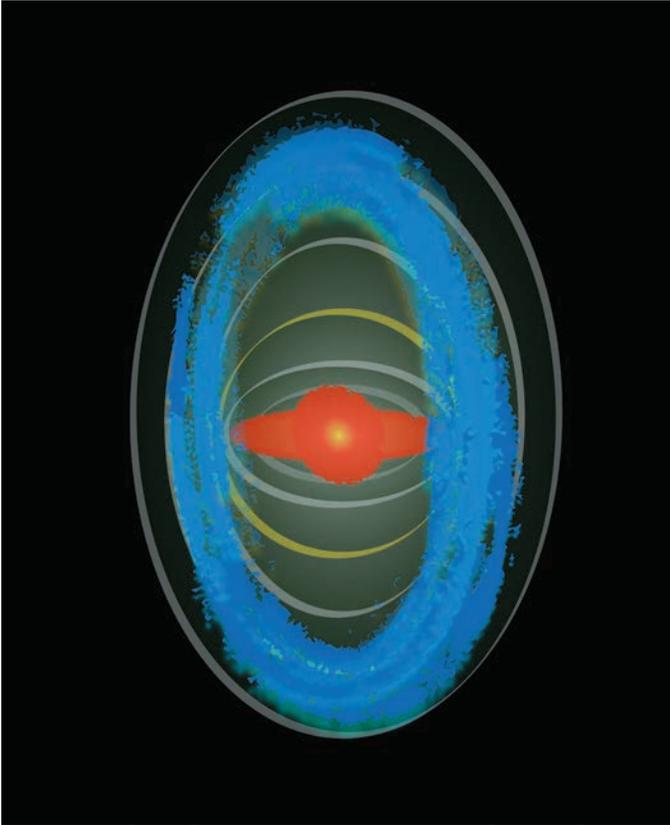


Схема формы гало темной материи в модели галактики с полярными кольцами NGC 4262 (созвездие Волосы Вероники, расстояние – 19,1 Мпк). Синим цветом показано газовое полярное кольцо, красным – центральная галактика. Линии отражают изолинии гравитационного потенциала гало темной материи.

свойств темной материи в дисках галактик.

Информацию о распределении темной материи можно получить, исследуя полярные кольца галактик. Они представляют собой протяженные, замкнутые (или незамкнутые) кольца, состоящие из звезд и газопылевой среды, обращающихся вокруг центра галактики в плоскости и наклоненные под большим углом к основному галактическому диску. Известно около 300 галактик с полярными кольцами. Считается, что полярные кольца вокруг галактик образуются в результате

близкого прохождения соседней галактики-спутника, сопровождающегося потерей части ее вещества или ее полным разрушением приливными силами. Согласно другому предположению, это – результат аккреции холодного газа из межгалактического пространства.

Изучая кинематику галактик с полярными кольцами путем сравнения результатов численных расчетов с данными наблюдений, нами была измерена трехмерная форма гало темной материи в галактиках с полярными кольцами. Основу для анализа составили

данные о вращении звезд и ионизованного газа в галактиках, полученные на 6-м телескопе БТА (САО РАН), и данные о нейтральном водороде, полученные с помощью радиотелескопа WSRT (Нидерланды). Наиболее интересной оказалась линзообразная галактика NGC4262 (созвездие Волосы Вероники, расстояние – 19,1 Мпк). Это – первая галактика с полярным кольцом, в которой авторы обнаружили значительное изменение отношения размеров полуосей гало; оно зависело от расстояния наблюдателя до галактического центра. В частности, оказалось, что гало сплюснуто вблизи галактического диска и вытянуто вдоль полярной плоскости далеко за пределами центральной галактики.

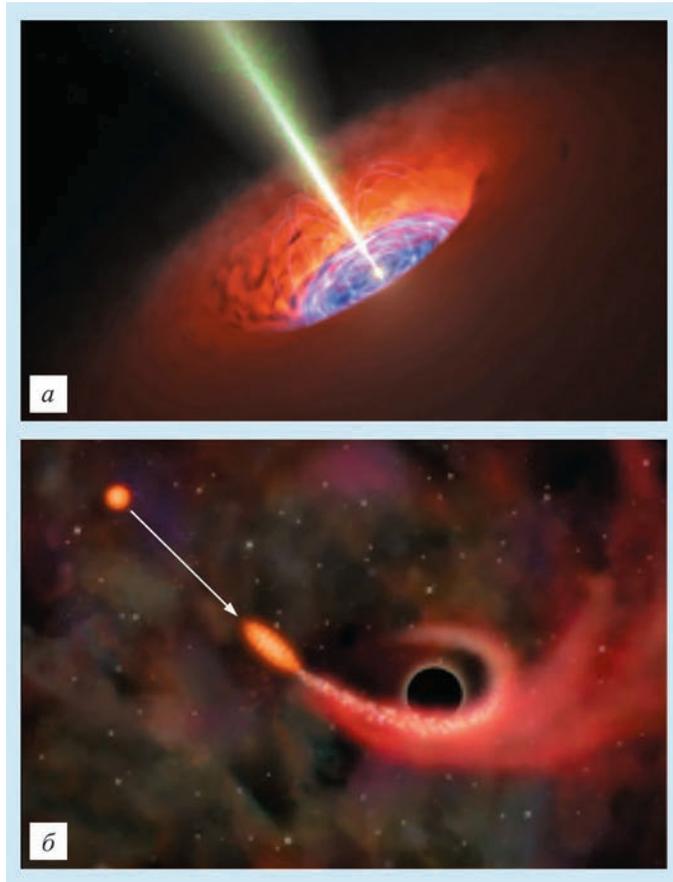
АККРЕЦИЯ В ГАЛАКТИКАХ И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

Галактики – как правило, неизолированные системы; они взаимодействуют с окружающим веществом. Помимо влияния

Художественное представление сверхмассивной черной дыры в центре галактики – а и процесс типичного приливного разрушения звезды черной дырой – б.

протяженных темных гало, которые могут быть частью масштабной сети, состоящей из гигантских стенок, сгустков, отростков и нитей, галактики испытывают постоянный приток газа из межгалактического пространства – аккрецию, сопровождающуюся звездообразованием.

Изображения самых далеких галактик с длительной экспозицией, полученные на космической ультрафиолетовой обсерватории “GALEX” (США, 2003–2009), показывают, что звездообразование протекает и в крайне удаленных от основного диска областях, то есть за пределами оптических размеров галактик. Кажется бы, на таком большом расстоянии от ядра плотность газа должна быть мала настолько, что образование облаков молекулярного газа подавлено. Однако наблюдаемый ультрафиолетовый поток от молодых звезд указывает на то, что там происходит конденсация газа и его конвертация в звезды. Большое количество нейтрального газа на далекой периферии подтверждается



изображениями высокого разрешения галактик в линии 21 см; при этом многие диски имеют спиральные структуры на расстоянии 50–100 кпк от центра. Причины звездообразования и происхождение этих спиралей до сих пор остаются загадкой.

Сейчас наша группа начинает амбициозный проект по исследованию динамических механизмов аккреции, протекающих в ядрах галактик. Это уникальные естественные лаборатории с множеством необычных

объектов и явлений. Так, многие (если не все) ядра имеют сверхмассивные черные дыры, которые взаимодействуют со звездами и газом (Земля и Вселенная, 2010, № 1). Плотные звездные системы (ядерные звездные скопления и звезды каспа – области в балдже, где плотность звезд особенно велика) медленно изменяются в гравитационном поле черной дыры таким образом, что звезды направляются к черной дыре и разрушаются под действием приливных

сил. Это, в свою очередь, вызывает всплеск активности ядра галактики, которая проявляется в виде излучения энергии и повышения скорости роста черной дыры.

В области вычислительной астрофизики сейчас происходит революция. Высокоэффективные параллельные вычисления на обычных процессорах (их еще называют центральными процессорами) вытесняются гораздо более эффективными вычислениями на графических картах. Графические карты имеют свои собственные процессоры, «архитектура» которых адаптирована для одновременного решения большого количества относительно простых задач. Последние модели карт позволяют рассчитывать до 5 тыс. задач на одной карте одновременно. Совместно с коллегами из Германии и Украины, обладающими необходимым оборудованием и опытом, наша команда планирует создать уникальный вычислительный код, способный правильно описывать различные физические явления в диапазоне от 0,001 до 1000 пк. Именно он необходим для исследования сложных динамических процессов вблизи галактических центров.

В своих недавних работах («Письма в Астрономический журнал», 2007. Т. 33. С. 261) авторы

предсказывали существование нового механизма, способного увеличить темп падения звезд на черную дыру, связанного с быстрым ростом малых возмущений распределения вещества. Похожая ситуация наблюдается в магнитных ловушках для удержания плазмы, где в результате сходного быстрого роста формируется конус, через который теряется некоторое количество частиц. Однако образование «конуса потерь» приводит к тому, что плазма быстро покидает ловушку. Аналогичный «конус потерь» возникает вблизи черной дыры, что вызывает дополнительную активность ядра галактики. Одна из целей проекта – сравнить наши теоретические «предсказания» с численными расчетами, а также сравнить эффективность нового механизма, объясняющего активность ядра, с уже известными.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

В качестве экспертов авторы статьи приглашены для участия в масштабном проекте по исследованию Млечного Пути, финансируемом немецким исследовательским фондом DFG. Одно из направлений работы связано с построением динамической модели Галактики, которая позволит определить

характеристики спирального узора – такие, как форма, скорость вращения, время существования спиральных рукавов, а также установить характер распределения темной материи внутри оптического радиуса и в окрестности Солнца.

Особенность исследования нашей Галактики (по сравнению с другими) состоит в том, что наблюдатели находятся непосредственно в плоскости диска. С одной стороны, это дает возможность собрать подробную информацию о звездном «населении» диска Галактики вблизи Солнца. С другой – оно неудобно для построения глобальной динамической модели. Поэтому здесь необходимо использовать подходы, отличные от тех, которые применяются при исследовании других галактик.

Отсутствие полноты и недостаточная точность имеющихся на сегодняшний день астрометрических, фотометрических и кинематических данных на основе крупнейших обзоров RAVE, SEGUE, APOGEE не позволяют уверенно установить распределение вещества Галактики даже в самом грубом приближении. Ситуация должна измениться с появлением данных космической обсерватории «Gaia», первый выпуск которых намечен на лето 2016 г. Обсерватория впервые

предоставит данные о координатах и скоростях движения около миллиарда звезд в пределах 3–10 кпк от Солнца (в зависимости от абсолютной звездной величины) и позволит составить представление об их фазовом распределении (Земля и Вселенная, 2014, № 3).

По мнению авторов, наиболее перспективным подходом в изучении динамических свойств нашей Галактики является сочетание численного моделирования и теоретических исследований. Последнее заключается в применении теории устойчивости и расчете неустойчивости звездного диска в форме баров и спиралей в различных окружающих условиях. Влияние этих структур на кинематические характеристики звезд вблизи Солнца можно согласовать с наблюдаемыми данными, которые будут доступны в течение ближайших месяцев благодаря миссии “Gaia”.

Известно, что наша Галактика относится к типу галактик с баром (имеет гигантскую переемычку) в центре спирального узора. Оценки размеров (радиуса) бара находятся в диапазоне от 4 до 5 кпк. Совместно с немецкими коллегами нам уже удалось решить фундаментальную проблему, объясняющую происхождение бара. Заметим, что это относится не только к нашей Галактике, но

и другим галактикам с каспом – там, где плотность материи растет в центре обратно пропорционально расстоянию от центра. Проблема заключалась в том, что при растущей плотности неограниченно растут и частоты колебаний звезд в галактическом диске, что неизбежно подавляет механизм развития бара. При численном моделировании (в котором звездная система представлена более чем 100 млн частиц) бар тем не менее образуется. Наши теоретические расчеты показывают, что ключевую роль играет толщина звездного диска, которая позволяет избежать негативного влияния роста частоты и сформировать бар путем обычной неустойчивости, которая имеет место и в галактиках без каспа.

Согласно расчетам авторов, время формирования бара значительно возрастает с уменьшением массы звездного диска. Так, если массу диска уменьшить всего на 11%, то время формирования бара увеличивается в 2,5 раза. Это означает, что для галактик, подобных нашей, весьма вероятен следующий сценарий развития. На раннем этапе в центре темного гало сформировалось центральное уплотнение – “балдж”, который представлял собой небольшую эллиптическую галактику. Затем путем аккреции газа и последующего

звездообразования стал формироваться звездный диск. Однако из-за присутствия каспа время развития неустойчивости было настолько велико, что превосходило время существования Вселенной. Лишь 3 или 4 млрд лет назад масса диска оказалась достаточной для заметного роста бара, так что в настоящее время мы имеем возможность наблюдать конец или момент, отстоящий на 1–2 млрд лет от конца его формирования (или лишь спустя 1–2 млрд лет после его формирования). Такая гипотеза создания “молодого бара” согласуется с данными наблюдений, которые, в частности, свидетельствуют о недостатке бар-галактик с красными смещениями $z > 0,5$.

До сих пор нет ясности в вопросе о скорости вращения бара в нашей Галактике. Имеющиеся оценки варьируются в диапазоне от 33 до 65 км/с/кпк. Считается, что звездный поток, наблюдаемый в созвездии Геркулес, связан с влиянием бара и спиральных рукавов Галактики. Если это так, то скорость бара должна быть около 55 км/с/кпк, что отлично согласуется с результатами наших исследований. Однако результаты гидродинамического моделирования показывают, что модель с более медленной скоростью вращения

бара (33 км/с/кпк) также не исключена.

Зависимость круговой скорости от радиуса (кривая вращения) – важная характеристика галактики. По ней можно составить представление о распределении вещества в галактике. В центральной области кривая вращения определяется звездами балджа, а в промежуточных и внешних областях – дисковой компонентой, а также звездным и темным гало. Значение скорости вращения бара очень чувствительно к изменению поведения кривой вращения в пределах центрального килопарсека. В свою очередь, кривая вращения сама не является наблюдаемой величиной, а восстанавливается по наблюдениям дисперсии скоростей “вдоль луча зрения”. Поэтому знание характера движения материи важно при ее нахождении.

Долгое время считалось, что галактические спирали обязательно должны быть связаны с баром и вращаться с одной и той же скоростью. Результаты исследования последних лет опровергают эту гипотезу. Так, на основе данных обзора RAVE и предположения, что спиральная волна является долгоживущим образованием, было продемонстрировано: в солнечной окрестности проходит участок спирали, состоящий из двух рукавов с углом закрутки

около 10° ; она вращается с угловой скоростью 18,6 км/с/кпк. Таким образом, наименьшая из упомянутых скоростей вращения бара почти в два раза превосходит скорость вращения спирального узора.

млечный путь:
ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Эволюция формы, структуры, динамики нашей Галактики сопровождалась изменением химического состава галактического вещества. Поскольку формирование Галактики началось почти сразу после образования Вселенной, то химический состав протогалактического облака определялся смесью элементов, синтезированных в Большом Взрыве: 93% всех частиц приходилось на водород (H), 7% – на гелий (He) и лишь около $10^{-8}\%$ – на литий, бериллий и бор. Другие встречающиеся в природе элементы – от углерода (C) до урана (U) – были произведены в звездах. Эти элементы в астрофизике принято называть металлами, и далее мы будем следовать этой терминологии. Многие поколения звезд на протяжении всей жизни Галактики обогащали галактическое вещество вновь синтезированными элементами, и ко времени формирования Солнца (4,6 млрд лет тому назад) доля металлов составила

0,1% (Земля и Вселенная, 1985, № 1).

Основополагающей для понимания звездного нуклеосинтеза стала работа американских астрофизиков Э. Бербиджа, Д. Бербиджа, У. Фаулера и Ф. Хойла, опубликованная в 1957 г. в журнале “Review of Modern Physics”. Все найденные в природе элементы были разбиты в ней на группы по типам ядерных реакций, в которых эти группы ядер образуются. Поскольку разные ядерные реакции требуют разных условий протекания, это определило класс звезд, в которых синтезируется каждая из групп ядер. Термоядерные реакции синтеза – это источник энергии звезд. На первом этапе жизни звезды водород в ее ядре превращается в гелий. Следующая стадия ядерной эволюции: в образовавшемся гелиевом ядре идет синтез углерода и кислорода путем слияния α -частиц. Если масса звезды меньше $2,3 M_\odot$, то гелиевая вспышка сопровождается сбросом поверхностных слоев и образованием углеродно-кислородного белого карлика, в котором вновь синтезированные элементы остаются в навсегда законсервированном виде. Это значит, что маломассивные звезды не участвуют в химическом обогащении межзвездной среды. У звезд с массой более $2,3 M_\odot$ после образования

углеродно-кислородно-го ядра источником энергии становится синтез углерода и гелия в слоях выше ядра. Звезды на этой стадии эволюции находятся на диаграмме Герцшпрунга–Рассела на асимптотической ветви гигантов. В слоях возникают благоприятные условия для медленных реакций нейтронных захватов и синтезируются изотопы элементов от галлия до висмута. Выделение энергии в слоях происходит нестационарным образом, приводя к сбросу (иногда многократному) поверхностных слоев, вместе с которыми синтезированные элементы попадают в межзвездный газ и изменяют его химический состав.

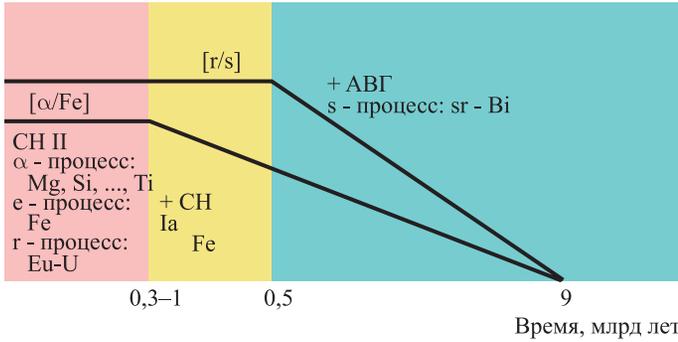
У звезд с $M > 8 M_{\odot}$ на следующем этапе эволюции термоядерным топливом служат углерод и кислород. Когда температура в ядре повышается до миллиарда градусов – рождаются новые элементы (от неона до никеля) путем захвата α -частиц (α -процесс) и при взаимодействии продуктов реакций между собой. Дальнейшие реакции захвата заряженных частиц являются эндотермическими (то есть происходят с затратами энергии), поэтому нуклеосинтез останавливается. Из-за прекращения выработки энергии нарушается механическое равновесие образовавшегося железного ядра

и начинается его гравитационное сжатие; оно происходит катастрофически быстро, с характерным временем порядка секунды. Увеличение температуры в оболочке сжимающейся звезды вызывает термоядерные реакции синтеза He, C и O. Выделение огромной энергии, которая превышает на 16–18 порядков энергию, излучаемую в секунду Солнцем, приводит к чудовищному взрыву, разлету вещества звезды и образованию Сверхновой II типа (SN II). Для внешнего наблюдателя в течение нескольких суток яркость звезды возрастает в сотни миллионов раз (Земля и Вселенная, 1968, № 5; 1981, №№ 4 и 5; 2008, № 1). При взрыве SN II элементы, синтезированные на всех этапах ядерной эволюции и во взрывных условиях, выбрасываются в межзвездную среду. Массивные звезды ($> 8 M_{\odot}$) – это главные “фабрики” по производству всех химических элементов – от гелия до самых тяжелых элементов. При взрыве SN II частицы ускоряются до энергий 10^{20} – 10^{21} эВ, что значительно превосходит возможности современных ускорителей элементарных частиц. Подобно тому, как происходит синтез новых элементов в земных ускорителях, в разлетающемся веществе Сверхновой потоки быстрых нейтронов бомбардируют

ранее образовавшиеся ядра с разным зарядом Z и атомной массой A . Захват нейтронов ядрами происходит до образования изотопов, неустойчивых по отношению к β -распаду, и последующий распад ведет к рождению ядра более высокого заряда. Такие реакции называют захватом нейтронным захватом (n -процесс). Только в них могут синтезироваться элементы с зарядом ядра больше, чем у висмута ($Z = 83$); они – основные источники многих элементов с меньшим зарядом ядра (таких, как европий, гадолиний, диспрозий).

Еще один эффективный источник обогащения галактического вещества связан со Сверхновыми типа Ia (SN Ia) – термоядерными сверхновыми. Выделение огромной энергии обусловлено термоядерным взрывом C – O белого карлика, который вызван либо аккрецией вещества со звезды-компаньона, либо слиянием двух белых карликов в двойной системе. При таком взрыве звезда полностью разрушается, нуклеосинтез превращает большую часть ее массы в ядра группы железа, которые попадают в межзвездную среду.

Характерное время синтеза различно для разных групп химических элементов: звезды с $M > 8 M_{\odot}$ очень быстро (по космическим меркам)



На диаграмме показано, как менялись во времени отношения содержания элементов, синтезируемых в α -процессе, к железу – $[\alpha/Fe]$ и элементов, синтезируемых преимущественно в r-процессе, к тем, которые производятся преимущественно в s-процессе – $[r/s]$. Шкала времени начинается от момента начала протогалактического коллапса. Переход от одного цвета к другому иллюстрирует появление новых источников нуклеосинтеза: сначала SN Ia в дополнение к SN II, а затем еще и звезд асимптотической ветви гигантов (ABГ).

завершают свою эволюцию – меньше, чем за 20 млн лет. Это значит, что такие элементы, как O, Mg, Fe, Eu, появились в галактическом веществе почти сразу после формирования в Галактике первого поколения массивных звезд. Благодаря многим последующим поколениям массивных звезд, содержание этих элементов в межзвездном веществе и в звездах, которые из него формировались, росло. Количественно это определялось скоростью звездообразования и распределением звезд по массе в предшествующие эпохи, а также эффективностью перемешивания вещества в Галактике. Скорость обогащения среды железом и элементами его группы

возросла – когда в Галактике вспыхнули первые SN Ia. По разным оценкам, время “задержки производства железа” в SN Ia составляет от 300 млн до 1 млрд лет. Действительно, предшественниками SN Ia являются две звезды в двойной системе, каждая из которых имеет массу меньше $8 M_{\odot}$ и должна завершить свою эволюцию для того, чтобы случился взрыв SN Ia. Со временем изменялось отношение содержания элементов, которые могут быть синтезированы только в SN II (O, Ne, Mg), к железу, содержание которого сначала росло за счет синтеза в SN II, а затем и в SN Ia.

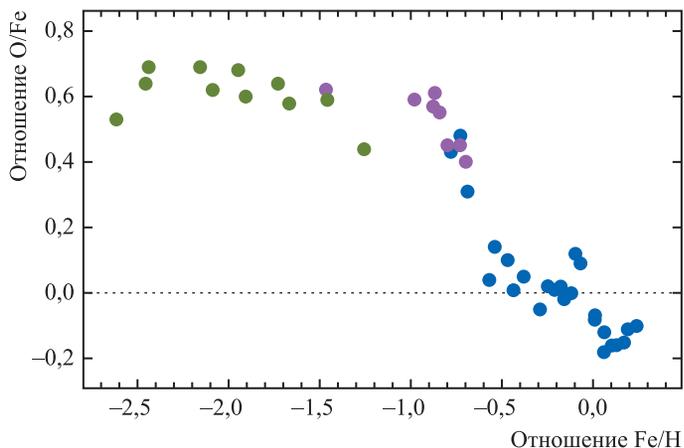
В астрофизике содержание элемента в звезде принято определять

относительно “солнечного содержания”. Например, обозначение $[Fe/H]$ используется для разности логарифмов содержания железа в звезде и на Солнце. У старых звезд, родившихся во времена доминирования SN II в нуклеосинтезе, отношение содержания (например, O к Fe) должно быть больше солнечного, поскольку темпы производства железа были ниже, чем в эпоху формирования Солнца, а кислорода – примерно такими же. После первых вспышек SN Ia отношение кислорода к железу начинает падать и должно стремиться к солнечному по мере приближения к эпохе формирования Солнца.

Как эти теоретические представления согласуются с наблюдательными данными? Фантастическую возможность заглянуть в глубь времен (вплоть до ранних эпох формирования Галактики) дает изучение звезд спектральных классов – от поздних F до ранних K. Это – объекты массой, равной (или меньше солнечной) и временем жизни 10 млрд лет и более. Например, теория эволюции звезд предсказывает, что звезда с массой $0,8 M_{\odot}$, родившаяся 12 млрд лет тому назад, все еще находится на основной стадии своей эволюции – когда источником энергии являются термоядерные реакции превращения в ядре звезды водорода

Отношение содержания О к Fe как функция содержания железа. Кружки синего, розового и зеленого цвета указывают соответственно на звезды тонкого диска, толстого диска и гало.

в гелий. Такой объект можно наблюдать в современную эпоху в виде карлика позднего спектрального класса с дефицитом металлов. Таковы звезды, числящиеся в каталоге Генри Дрейпера под номерами HD19445 и HD140283 с содержанием железа $[Fe/H] = -2$ и $-2,5$. Их возраст не менее 12 млрд лет; они почти ровесники Вселенной и “помнят” нашу Галактику новорожденной. Возраст звезд, не входящих в рассеянные или шаровые скопления, определяется неуверенно, поэтому в исследованиях химической эволюции Галактики индикатором времени служит $[Fe/H]$: чем ближе по времени к протогалактическому коллапсу образовалась звезда – тем в среднем меньше у нее содержание железа. Поиски объектов с низким содержанием железа привели к обнаружению в нашей Галактике нескольких звезд с $[Fe/H] = -5$, а “рекордсменкой” считается звезда с $[Fe/H] = -7$. Превращение водорода в гелий в ядре звезды – это самая “спокойная” стадия в ее жизни.



Процессы, происходящие в недрах, не влияют на химический состав поверхностных слоев; атмосфера “хранит” информацию о веществе, из которого сформировалась звезда. Значит: для того, чтобы узнать, какова была доля, например, атомов кислорода в галактическом веществе 8 или 11 млрд лет тому назад, нужно определить содержание кислорода в звездах, сформировавшихся в те далекие эпохи и сохранившихся до настоящего времени.

Содержание разных химических элементов в атмосфере можно определить путем анализа излучения звезды. В нашем институте спектроскопические исследования звезд с целью получения наблюдательных данных для изучения химической эволюции Галактики ведутся более 10 лет. В такой работе выборка должна включать звезды как можно более широкого диапазона

металличности, и, значит, в нее попадают звезды, принадлежащие разным “звездным населением” Галактики – тонкому диску, толстому диску и гало. Эти “звездные населения” различаются своими размерами, формой, пространственными скоростями, средней металличностью и возрастом. Наблюдаемые у звезд отношения содержания элементов разных групп позволяют изучать химическую историю тонкого диска, толстого диска и гало, а это дает информацию о глобальных физических процессах в Галактике и их эволюции.

Например, анализ содержания европия и бария позволил нам ранее, в 2000–2003 гг., сделать вывод о том, что в эпоху формирования звезд толстого диска тяжелые металлы синтезировались в основном в r-процессе, а, значит, звезды толстого диска столь же старые, как и звезды галактического гало. Совместно с на-

шими коллегами из национальных астрономических обсерваторий Китая мы получили высококачественные спектральные наблюдения на 3-м телескопе Ликской обсерватории в США для выборки звезд с содержанием железа: от $[Fe/H] = -2,62$ до $[Fe/H] = +0,24$. Благодаря высокой точности результатов определения параметров звездных атмосфер и содержания в них химических элементов обнаружены эволюционные закономерности в поведении элементных отношений. Часть из них можно истолковать в соответствии

с современными представлениями о звездном нуклеосинтезе: например, отношение $[O/Fe]$ как функцию $[Fe/H]$. Высокое (по сравнению с солнечным) и постоянное отношение $[O/Fe] = 0,6$ у звезд с $[Fe/H] < -0,8$ свидетельствует о доминировании SN II в нуклеосинтезе в эпоху формирования галактического гало и толстого диска. “Излом” в поведении $[O/Fe]$ указывает на то, что вспышки SN Ia в Галактике начались тогда, когда содержание галактического железа выросло до $[Fe/H] \approx -0,8$.

Но эволюционные закономерности, обнаруженные для других элементов, пока не поддаются объяснению: например, почему с уменьшением металличности содержание циркония в звездах толстого диска и гало растет относительно содержания стронция? Разгадать, в каких типах ядерных реакций и в каких типах звезд происходил синтез стронция и циркония в молодой Галактике, – это задача для будущих исследователей.

Информация

“Галактика-головастик”

В июне 2016 г. с помощью камеры высокого разрешения WFC3 Космического телескопа им. Хаббла получено изображение карликовой дисковой галактики LEDA 36252 (Kiso 5639), находящейся в 82 млн св. лет от нас в созвездии Большой Медведицы. Этот объект, имеющий необычную структуру, относится к “галактикам-головастикам” (см. стр. 3 обложки,

вверху). Яркие галактики с компактной “головой” и удлинённым “хвостом” встречаются очень редко: их всего 20 – из 10 тысяч в локальной Вселенной; но они были распространены в ранней Вселенной (Земля и Вселенная, 2010, № 4, с. 108; 2012, № 1, с. 55). “Галактики-головастики” возникли 10–13 млрд лет назад из более разреженной газовой среды. Теряя энергию на излучение и сохраняя свой угловой момент, газ сжимался в диск.

Звезды в LEDA 36252 очень старые: они образовались спустя 400–900 млн лет после Большого взрыва и составляют основную массу этой галактики. Изучение объекта привело

к неожиданным результатам: “голова” галактики содержит множество молодых звезд общей массой $10^4 M_{\odot}$. Предполагается, что вспышка звездообразования вызвана поглощением галактикой сохранившегося первородного газа. Многочисленные полости в головной части галактики образованы сильными звездными ветрами и взрывами сверхновых. “Хвост” LEDA 36252 состоит из длинных газовых нитей с включением тяжелых металлов, а также четырех областей звездообразования. Локализующиеся здесь ярко-синие звезды – старше, чем в головной части.

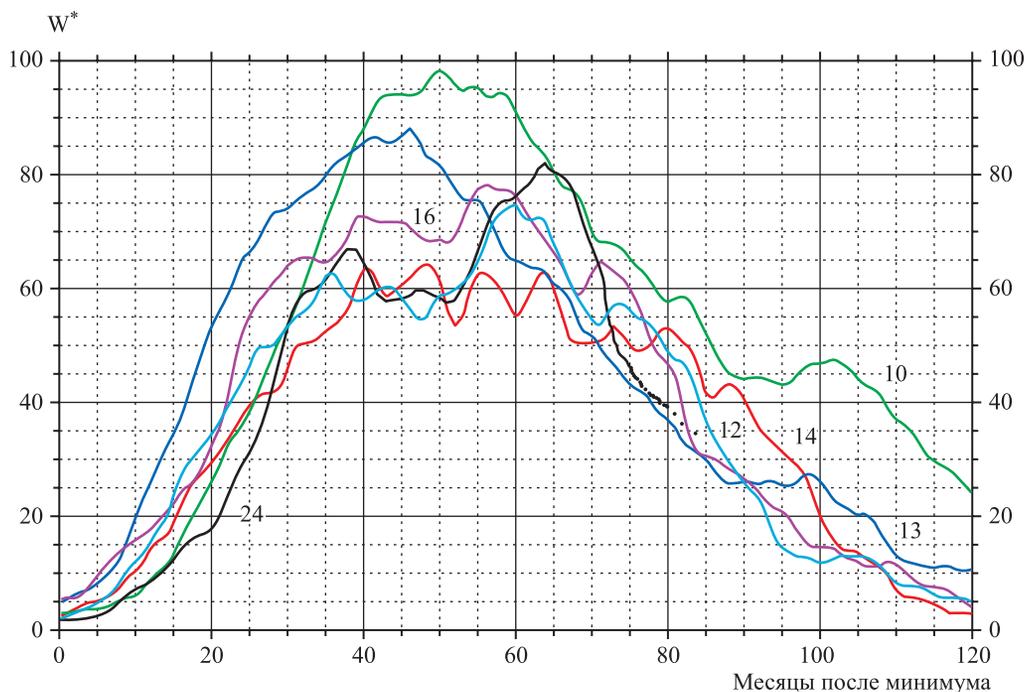
Пресс-релиз NASA,
28 июня 2016 г.

**Солнце
в июне – июле 2016 г.**

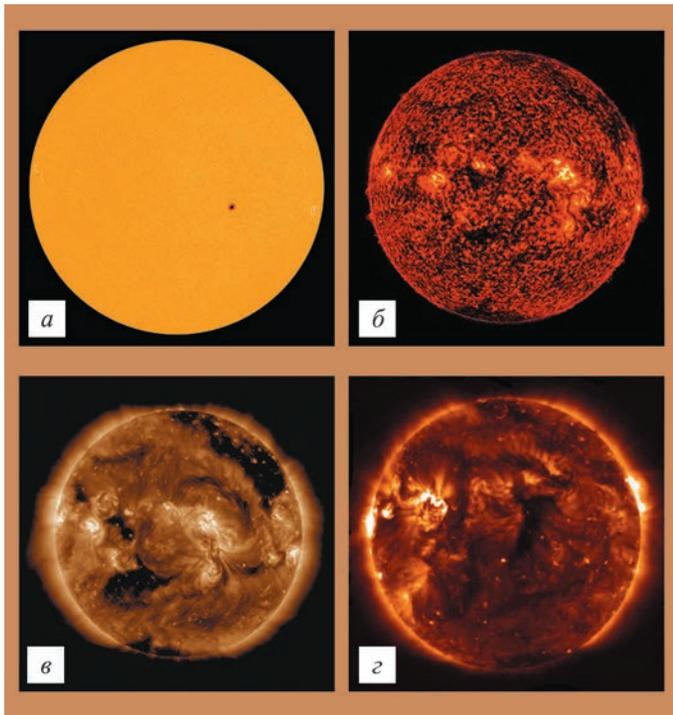
Первые летние месяцы 2016 г. характеризовались стремительным падением активности Солнца: 23 сут были без пятен! Число групп пятен небольших размеров на видимом диске Солнца в эти месяцы менялось от 0 до 4. В июне одна группа среднего размера находилась в Южном полушарии. Две группы пятен Северного полушария появились во

второй декаде июля и составили комплекс активных областей, ставший вспышечно-активным. Из 18 групп солнечных пятен 11 возникли в Северном полушарии. Кривая роста сглаженных за год значений относительного числа пятен продолжает уверенно идти на спад. Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа (мы придерживаемся старой, классической системы, как и Служба состояния околоземного пространства: www.swpc.noaa.gov) следующие: $W_{\text{июнь}} = 12,5$ и $W_{\text{июль}} = 19,0$. Сглаженное значение этих индексов в декабре и январе 2016 г. составило $W^* = 34,7$ и $W^* = 32,5$ соответственно.

В первую декаду июня пятнообразовательная активность находилась на низком и очень низком уровне, во второй декаде – на среднем, а в третьей декаде – снова на низком и очень низком уровне. С 3 по 6 и с 23 по 30 июня на Солнце пятна отсутствовали ($W = 0$); их максимальное значение достигло **19 июня ($W = 30$)**. Вспышечная активность была на низком (9, 11–13 и 19 июня) и очень низком уровнях. Выбросы солнечных волокон (11 событий) наблюдались 3, 5, 6, 8, 13 (2), 17, 21, 22 (2) и 27 июня. Коронोगрафы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали 69 корональных

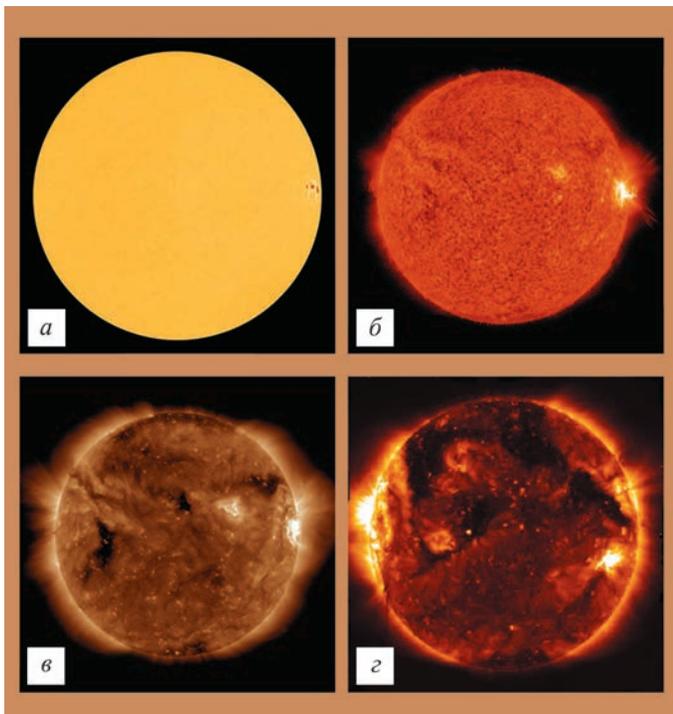


Ход развития (84 месяца) текущего 24-го цикла солнечной активности среди всех достоверных (начиная с 1849 г.) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в старой, классической системе.



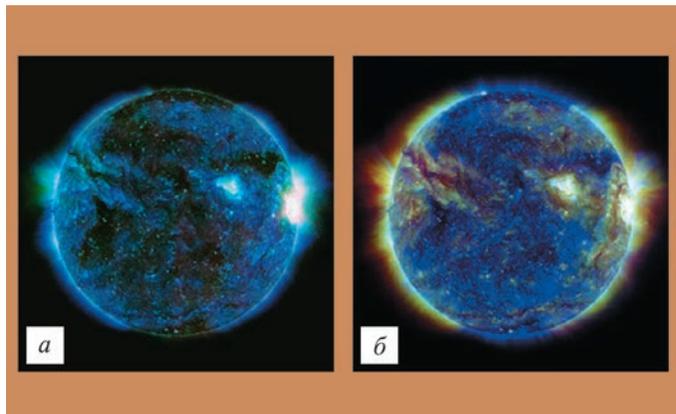
Солнце 18 июня 2016 г.:
 а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
 б – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
 в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$);
 г – обратная сторона Солнца в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 195 \text{ \AA}$).
 Черные области на снимках в, г – корональные дыры. Космические солнечные обсерватории “SDO” и “STEREO-A” (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).

выбросов вещества разной интенсивности, среди которых 5 относились к типу “частичного гало II” (угол раствора – 90° – 180°). Восемь рекуррентных корональных дыр проходили по видимому диску Солнца, и высокоскоростные потоки от двух из них “внесли” определенный “вклад” в геомагнитные возмущения. На средних широтах Земли 4–5 июня отмечена одна умеренная магнитная буря, а 14–15 июня – интенсивная геомагнитная суббуря длительностью менее 12 ч. Всего же в геомагнитном поле зарегистрировано



Солнце 23 июля 2016 г.:
 а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
 б – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
 в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 195 \text{ \AA}$);
 г – обратная сторона Солнца в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 195 \text{ \AA}$).
 Черные области на снимках в, г – корональные дыры. Космические солнечные обсерватории “SDO” и “STEREO-A” (<http://spaceweather.com>).

Большое солнечное вспышечное событие 23 июля 2016 г. на западном лимбе Солнца вблизи максимума в трех линиях крайнего ультрафиолета: а – $\lambda = 211 \text{ \AA}$ (Fe XIV), 193 \AA (Fe XII), 171 \AA (Fe IX) и б – $\lambda = 94 \text{ \AA}$ (Fe XIV), 335 \AA (Fe IX), 193 \AA (Fe XII). Изображения синтезированы из снимков космической солнечной обсерватории “SDO” (<http://www.solarmonitor.org/>).



3 возмущенных дня. На геостационарных орбитах очень высокий поток (более 10^7 частиц/ m^2) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ наблюдался 1–4, 7–10, 19, 21–22 и 25–30 июня.

В первую декаду июля уровень пятнообразовательной активности Солнца оставался очень низким; затем, до 23 июля, – средний. На видимом диске Солнца наблюдалось от 0 до 4 групп солнечных пятен, причем 7 из 11 локализовались в Северном полушарии. Максимальное наблюдаемое число солнечных пятен отмечено 15 июля ($W = 41$); 1–4 и 25–27 июля пятна не образовывались ($W = 0$). Вспышечная активность была на высоком уровне 23 июля, когда в комплексе активных областей Северного полушария Солнца, состоящего из двух вытянутых по широте групп пятен, произошло большое и сложное вспышечное событие балла 3В:

возникли два сильных рентгеновских всплеска классов М 7.6 и М 5.5. Вспышечное событие сопровождалось динамическими всплесками II и IV типов в радиодиапазоне и двумя корональными выбросами вещества II типа (угловая ширина 90° – 180°). Так как это вспышечное событие произошло вблизи западного лимба Солнца, то значимых возмущений в околоземном космическом пространстве не наблюдалось. Средний уровень вспышечной активности отмечен 20 и 24 июля, в остальные дни – низкий и очень низкий. Выбросы солнечных волокон (9 событий) наблюдались 1, 3, 5 (2), 8, 10, 16 (2) и 23 июля. Коронографы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали больше 28 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди которых три были типа “частичное гало II” (угол раствора

90° – 180°). В мае наблюдались шесть рекуррентных корональных дыр. В геомагнитном поле 19–20 июля отмечена одна умеренная, а 7, 8, 24–25 июля – три малые магнитные бури, источниками которых стали в основном возмущения от выбросов солнечных волокон и высокоскоростные потоки от корональных дыр. Всего за месяц отмечено 7 сут с возмущенной геомагнитной обстановкой. На геостационарных орбитах очень высокий поток релятивистских электронов (с энергиями больше 2 МэВ) наблюдался 9–20 июля.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>).

Страница обновляется каждый понедельник.

В.Н. ИШКОВ
ИЗМИРАН,
ГЦ РАН



Околоземная астрономия

Л. В. РЫХЛОВА,
доктор физико-математических наук
Институт астрономии РАН

Для Астросовета (ныне Институт астрономии РАН) традиционны наблюдения искусственных спутников Земли – от самых первых до фрагментов объектов искусственного происхождения (отходы космической деятельности), названные космическим мусором. Здесь разрабатывались и развивались наблюдения быстро движущихся небесных объектов. Поскольку обычные астрономические телескопы не могут проводить наблюдения



таких объектов, то в других астрономических институтах им почти не уделялось внимания. Теперь это направление астрономии (наблюдение ИСЗ и космического мусора) называется околоземной астрономией – исследуются все природные и искусственные тела, находящиеся в околоземном пространстве или проходящие через него. Особое внимание уделяется и проблеме астероидно-кометной опасности.

ЗЕМЛЯ – ЕДИНАЯ
ЭКОСИСТЕМА

Для планеты Земля окружающей средой служит околоземное космическое пространство. Хорошо прижившийся в научной литературе термин “околоземное космическое пространство” (ОКП) не имеет строгого определения и в разных областях

науки используется в привычных и приемлемых для данной области терминах. К примеру, в астрономии выделяют понятие “сферы Хилла”, ограничивающей ОКП той областью пространства, в которой могут двигаться тела, оставаясь спутниками нашей планеты. Для Земли это рас-

стояние равно 0,01 а.е., то есть приблизительно 1,5 млн км. Существует понятие сферы тяготения – области пространства, внутри которой притяжение планеты превосходит солнечное; для Земли эта область пространства ограничена расстоянием примерно 0,002 а.е., или 260 тыс. км.

С геофизической точки зрения, ОКП – это несколько внешних оболочек Земли. Некоторые из них предохраняют нас от воздействия процессов, непрерывно происходящих в сложной системе Солнце – межпланетная среда – Земля. Самая удаленная защитная оболочка Земли – это магнитосфера, образующаяся при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли. Граница магнитосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли располагается примерно на расстоянии $10 R_3$ (около 60 тыс. км), а с ночной стороны Земли магнитосфера вытянута на миллионы километров и выходит далеко за орбиту Луны. При возмущенном состоянии магнитосферы на Земле отмечаются магнитные бури. На расстоянии около 36 тыс. км от Земли наблюдаются довольно сильные потоки заряженных частиц (в основном, протонов и электронов), локализованные в радиационных поясах Земли. Атмосфера не только рассеивает и поглощает инфракрасное и коротковолновое излучение Солнца, но и не пропускает значительную часть космического радиоизлучения, ослабляет поток высокоэнергичных частиц, идущих к Земле из космоса.

С точки зрения освоения космического пространства человечеством,

ОКП – это объект исследования и новая среда обитания. Граница ОКП отодвигается все дальше по мере расширения сферы деятельности человечества. К началу XXI в. космическая индустрия освоила несколько околоземных орбит – от низких (250–450 км) до геостационарной (35 785 км) и высокоэллиптических (470 тыс. км).

В США ОКП делят на пространство со средним расстоянием до Луны (384 тыс. км, или $60 R_3$) и пространство за орбитой Луны до Солнца (1 а.е., или $23 481 R_3$). ОКП не поддается делению по государственной принадлежности, оно экстерриториально.

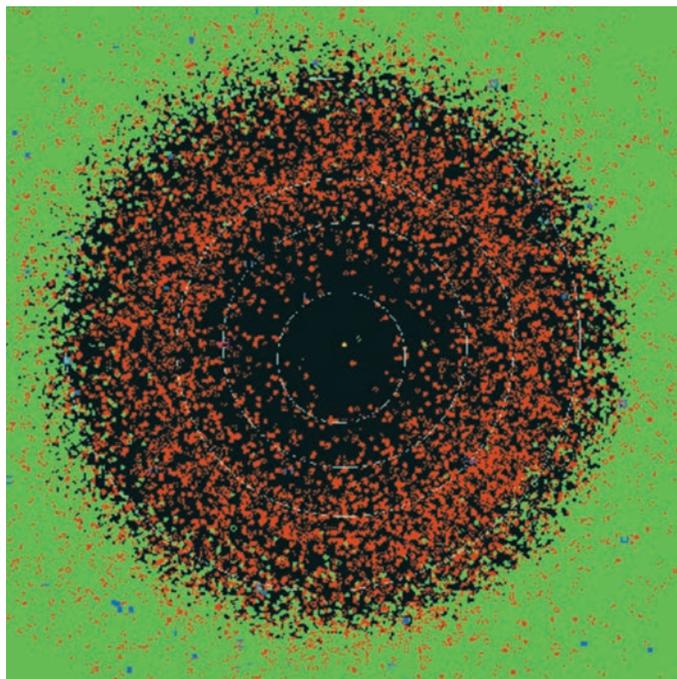
В околоземном космическом пространстве находятся как естественные, так и искусственные космические объекты, движущиеся по геоцентрическим и гелиоцентрическим орбитам. Из естественных тел только Луна движется по геоцентрической орбите, все другие – кометы, астероиды и метеороиды – по гелиоцентрическим орбитам, лишь ограниченное время находясь в ОКП. Искусственные тела – это работающие и вышедшие из строя по разным причинам искусственные спутники Земли, верхние ступени ракет-носителей и их обломки, образовавшиеся после взрывов, а также другие фрагменты. Масса и размер

выводимых на орбиты спутников и орбитальных станций возрастает по мере совершенствования космической техники (Земля и Вселенная, 2008, № 6).

Для Астрономического совета АН СССР, созданного в 1936 г. в том числе и для координации исследований в области наземной оптической астрономии, естественным важнейшим направлением деятельности стали наблюдения ИСЗ. Подготовка к этой работе началась еще до запуска первого ИСЗ. В 1966 г. под руководством профессора А.Г. Масевич была создана международная сеть станций наблюдений ИСЗ (Земля и Вселенная, 1965, № 1; 2008, № 5). Она стала основой для проведения наблюдений ИСЗ по геодезическим программам. Спутник на высоте 500–5000 км – прекрасная мишень для построения глобальных геодезических сетей, изучения поверхности, формы, гравитационного поля Земли. Развивавшаяся с самого начала космической эры тема изучения движения искусственных спутников Земли со временем естественно переросла в ставшую более актуальной проблему засоренности космического пространства.

К этому времени в научном мире стали активно обсуждаться проблемы динамики естественных малых тел Солнечной

Мгновенное положение в Солнечной системе астероидов (красные круги) и комет (синие), сближающихся с Землей (перигелийное расстояние $q < 1,3$ а.е.). Желтая звездочка почти в центре – Солнце, показаны орбиты Меркурия, Венеры, Земли и Марса. Зеленые круги – астероиды Главного пояса с перигелийным расстоянием $q > 1,3$ а.е. Рисунок Центра малых планет (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/InnerPlot2.html>)



системы, источники притока вещества в околоземное космическое пространство, а также проблема астероидно-кометной опасности для Земли. В упомянутых ниже сборниках были статьи об использовании негравитационных (сублимационных) сил для “увода” от Земли опасных комет и о транспортировке астероида в околоземное пространство. Эта тематика

стала особо актуальной уже в наше время.

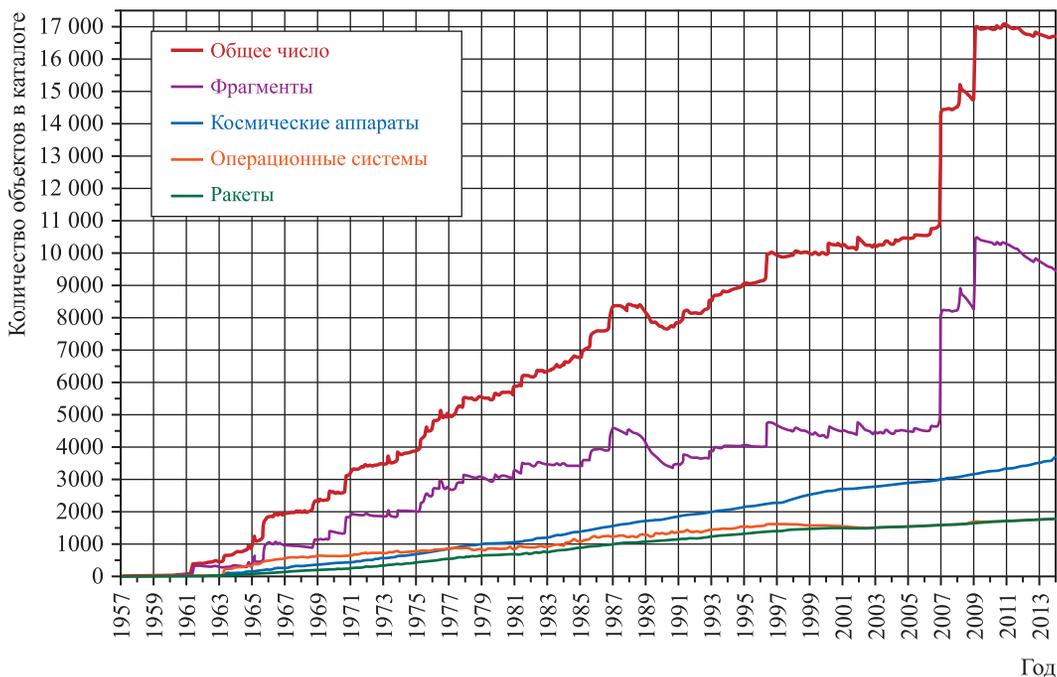
В 1993 г. и в 1995 г. в издательстве “Космосинформ” вышли сборники “Проблема загрязнения космоса (космический мусор)”, подготовленные специалистами нашего института (Земля и Вселенная, 1995, № 4). Как отметил в своей рецензии академик А.А. Боярчук, “...впервые в российской научной литературе рассматривался комплексно вопрос о загрязнении окружающего космического пространства объектами искусственного происхождения”.

А в 1998 г. в том же издательстве уже вышел сборник под названием “Околоземная астрономия (космический мусор)”.

В дальнейшем ИНАСАН каждые два года начал проводить конференции с публикацией трудов “Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы” и “Околоземная астрономия XXI века”; начиная с 2003 г. – “Околоземная астрономия – 2003”. В 2015 г. прошла IX конференция, посвященная изучению движения ИСЗ и космического мусора, средств и методов исследования малых тел Солнечной системы, а также проблеме астероидно-кометной опасности (Земля и Вселенная, 2010, № 2, с. 60–65).



Обложка сборника трудов конференции “Околоземная астрономия – 2015”.



ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР

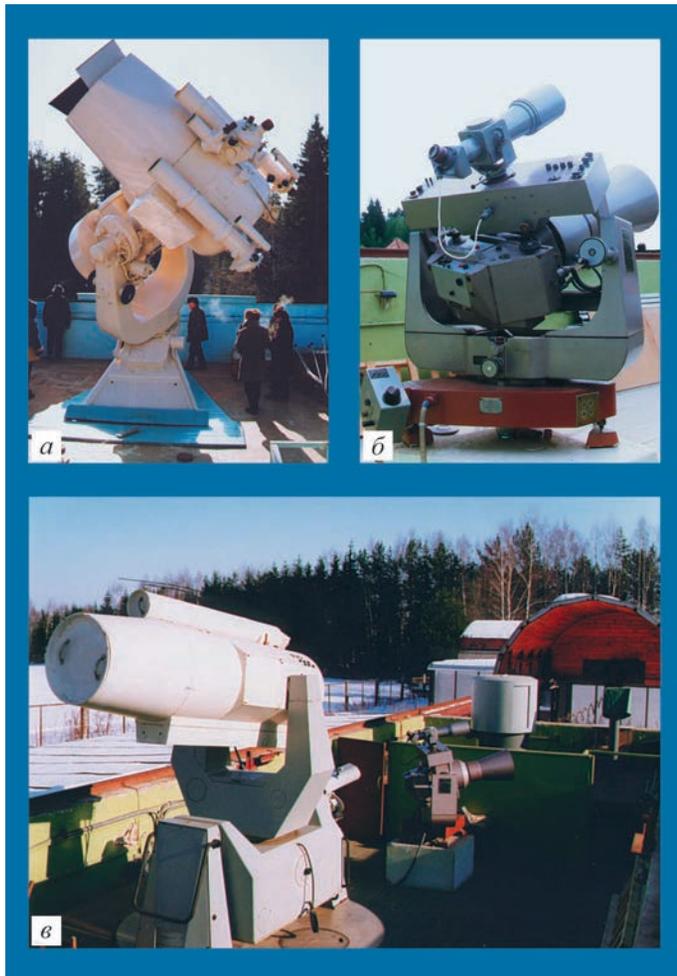
Ни первый взрыв верхней ступени американской ракеты-носителя “Able-star”, которая вывела на орбиту один из первых навигационных спутников “Транзит-4А” в 1961 г., ни первый целенаправленный взрыв по команде с Земли спутника “Космос-50” в 1964 г. не взволновали ученых, создателей космической техники и общественность. Всерьез заговорили о проблеме космического мусора лишь в 1980-х гг. Наблюдаемый в ОКП космический мусор представляет угрозу для окружающей среды, пилотируемых кораблей, орбитальных станций и работающих длительное время

научных космических аппаратов. Вот несколько примеров: в 1978 г. ИСЗ “Космос – 954” упал в таежной части Северной Канады, годом позже обломки американской орбитальной станции “Скайлэб” рассыпались над пустынными районами Австралии. Первое столкновение фрагмента космического мусора с крупным объектом было зафиксировано в июне 1996 г., когда французский спутник “Cerise” врезался в обломок верхней ступени французской ракеты-носителя “Ариан”, запущенной десятью годами раньше. В марте 2009 г. из-за позднего обнаружения фрагментов космического мусора оказался невозможным маневр уклонения МКС,

График состояния загрязненности околоземного пространства космическим мусором. Наблюдается быстрый рост числа искусственных объектов.

поэтому экипаж был на несколько минут переведен в космический корабль “Союз” для возможной экстренной посадки. В настоящее время маневры уклонения МКС по тем же причинам происходят несколько раз в год.

За 60 лет космической деятельности было осуществлено более 5 тыс. запусков ракет-носителей, с помощью которых на околоземные орбиты выведено почти 6 тыс. космических аппаратов. Накопленная масса



Астрономические инструменты ИНАСАН для наблюдения тел в околоземном космическом пространстве: а – высокоточная астрономическая установка ВАУ; б – астрономическая фотографическая установка АФУ-75; в – фотографическая камера SBG производства “Карл Цейс”.

геостационарная орбита высотой 35 786 км.

В числе первых публикаций, упомянутых во введении к Трудам конференций, были работы сотрудников Астровета, которые получили дальнейшее развитие. Фотографические наблюдения ИСЗ и их каталогизация, фотометрия низкоорбитальных космических аппаратов начинались на Звенигородской обсерватории с помощью фотокамер АФУ-75 и SBG, а также высокоточной астрономической установки ВАУ.

В настоящее время основной массив данных об объектах космического мусора в различных областях околоземного пространства (включая область ГСО) получают с помощью ПЗС-приемников на комплексе телескопа Цейс-2000 Терскольского филиала ИНАСАН в Приэльбрусье.

Проводились телевизионные наблюдения ОКП с целью обнаружения фрагментов космического мусора (А.В. Багров, М.А. Смирнов); было

искусственных объектов в ОКП приближается к 7 тыс. тонн. В настоящее время в ОКП зарегистрировано и находится под постоянным контролем около 20 тыс. объектов размером более 10 см. При этом только 7% являются функционирующими космическими аппаратами.

Наиболее полными каталогами, в которые занесены существующие на орбитах объекты и их фрагменты, являются

каталоги служб Контроля космического пространства США и России. В 1998 г. NASA впервые выполнило систематизацию наблюдаемых объектов и их фрагментов.

Наиболее чувствительные (из-за высокой “населенности” космическими аппаратами) к проблеме космического мусора области ОКП – это район низкой околоземной орбиты, простирающийся до высоты 2 тыс. км, а также

Наблюдатель Н. С. Бахтигараев с телескопом Цейс-2000 на Терскольской обсерватории ИНАСАН.

предложено проводить наблюдения фрагментов космического мусора с помощью телескопа, расположенного на геостационарном спутнике (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, Г.Б. Шоломицкий); исследовалась динамика роста обломков космического мусора, связь взрывов на низких орбитах и солнечной активности (Т.В. Касименко, Л.В. Рыхлова) и вековая эволюция орбит спутников под воздействием светового давления (А.М. Микиша, Е.С. Новикова, Л.В. Рыхлова, М.А. Смирнов); выполнялось математическое моделирование процесса образования и эволюции техногенных частиц в ОКП (В.И. Шематович); предложено использование геостационарных спутников для решения задач геодинамики (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, А.С. Сочилина); разработана схема транспортировки астероида в околоземное космическое пространство (А.М. Микиша, М.А. Смирнов, С.А. Смирнов). Некоторые из идей, заложенных в этих работах, существенно опередили свое время.

В последние годы проблема космического



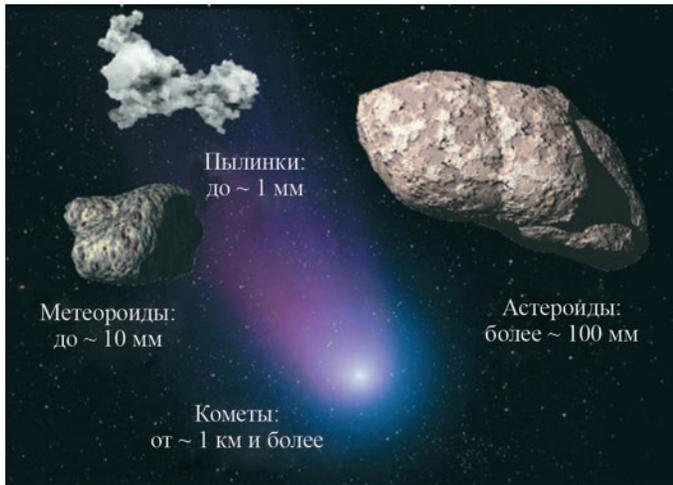
мусора значительно усложнилась из-за обнаружения множества объектов с нехарактерной для ИСЗ большой парусностью, а также вследствие появления на разных орбитах множества нано- и пикоспутников (Земля и Вселенная, 2004, № 2). Появилась другая проблема – связанная с накоплением и распространением в ОКП радиоактивных материалов.

Таким образом, космический мусор требует тщательного и постоянного научного исследе-

дования. Необходимо поддерживать каталог известных малоразмерных объектов, проводить наблюдения для уточнения их орбит, открывать и “сопровождать” новые объекты, определять их орбиты, уточнять модели движения объектов неизвестной формы.

МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Новые знания в исследовании Солнечной системы, полученные человечеством на рубеже XX–XXI вв., поражают



Размеры малых тел Солнечной системы.

оценкам, в поясе Койпера может находиться 70–100 тыс. тел размером более 100 км. У некоторых из них (Плутон, Эрида, Хаумеа) были открыты спутники (Земля и Вселенная, 2006, № 2, с. 49–50; 2011, № 6, с. 46; 2012, № 1; 2012, № 6, с. 53; 2013, № 6, с. 95).

Избранные астероиды детально исследованы автоматическими межпланетными станциями (Веста, Церера, Итокава, Эрос; Земля и Вселенная, 2006, № 1, с. 76; 2012, № 1, с. 35–37; 2012, № 3, с. 40; 2013, № 1, с. 106–107; 2015, № 5, с. 110; 2016, № 3, с. 55). Спускаемый аппарат японской АМС “Хаябуса” доставил в 2010 г. на Землю образцы грунта с астероида Итокава (Земля и Вселенная, 2010, № 2, с. 23; 2010, № 6, с. 49). До этого эксперимента земные лаборатории располагали только пробами лунного грунта, а вещество с других планет или малых тел Солнечной системы оказывалось на Земле только в виде метеоритов. Исследованы также ядра некоторых комет (Вильда 2, Темпеля 1 Чурюмова–Герасименко; Земля и Вселенная, 2005, № 2, с. 61–62; 2006, № 6, с. 106–107; 2015, № 4).

воображение; этому способствовало несколько факторов. Во-первых, появились крупные наземные оптические телескопы, целенаправленно исследующие дальний космос вплоть до границ Вселенной. Во-вторых, появилось принципиально новое оборудование на основе сверхчувствительных матричных приемников излучения с зарядовой связью (ПЗС-камеры). Их высокая квантовая эффективность дает возможность всего лишь за 30 с получать изображения точечных источников излучения (до 24^m) с помощью телескопов диаметром зеркала около 2 м, а гигантское поле зрения обеспечивает возможность проведения скоростных обзоров. Появились быстродействующие компьютеры, позволяющие сравнивать изображения исследуемой области неба, полученные в разное время, с целью

выделения перемещающихся на фоне звезд объектов. Накопленные базы данных дают возможность быстрого сравнения полученных результатов при поиске новых небесных объектов.

У планет Солнечной системы были открыты десятки неизвестных ранее спутников. Пояс Койпера, существующий за орбитой Нептуна на расстоянии 35–40 а.е. от Солнца, стал изучаемым объектом: открыто несколько сотен новых транснептуновых объектов, часть из них по орбитальным характеристикам близки к Плутону (Земля и Вселенная, 2006, № 2). По этой причине выделена группа планет-карликов, а бывшая планета Плутон стала одной из них. По решению МАС в 2006 г. все другие тела Солнечной системы (кометы, астероиды, метеороиды) стали называть малыми телами. По современным



В Главном поясе астероидов, между Марсом и Юпитером, еще недавно насчитывали тысячи астероидов. Сегодня известно о многих сотнях тысяч таких объектов (по данным Центра малых планет). За весь XIX в. было открыто около 500 астероидов. За XX в. — 5 тыс. астероидов. В XXI в. за одну ночь открывают по несколько сотен новых астероидов.

Но не менее важно изучать уже открытые астероиды. Современные методы многоцветной фотометрии, спектроскопии и поляриметрии позволяют получить информацию об астероиде: абсолютную звездную величину, скорость и наклон оси вращения; форму объекта и наличие у него спутников; минеральный состав;

плотность и пористость, средний размер неровностей и шероховатости его поверхности. На основе астрометрических наблюдений уточняются динамические характеристики орбит астероидов. Фотометрические наблюдения с использованием разных фильтров дают информацию о показателях цвета и позволяют определять таксономический класс и химический состав астероидов. Такая информация, с одной стороны, необходима для понимания природы этих объектов, эволюции их орбит и места происхождения в Солнечной системе; с другой — эти сведения нужны для понимания степени их опасности в случае возможного сближения или столкновения с Землей.

Карликовые планеты Солнечной системы.

Наряду с тем, что количество открытий новых астероидов продолжает быстро расти, до сих пор физико-химические свойства известны лишь для десятков—сотен изученных астероидов. В этом направлении проводится большая работа, она представляет не только научный интерес, но и практический. В NASA разрабатываются проекты доставки небольших астероидов на окололунную и околоземную орбиты с целью изучения и возможной добычи на них полезных ископаемых. В ИКИ РАН

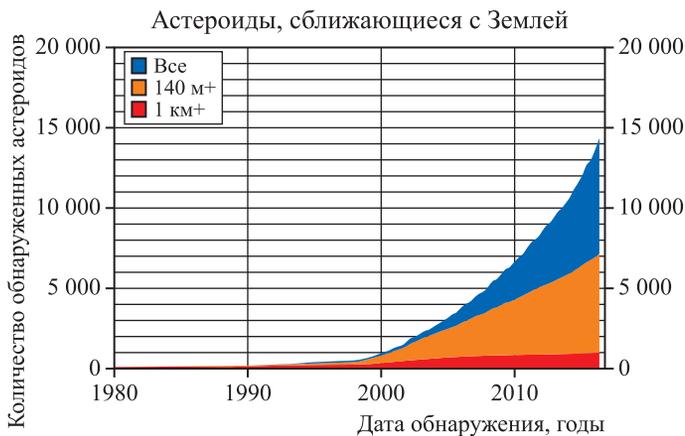


График роста числа открываемых опасных астероидов, сближающихся с Землей.

более 1 км (Земля и Вселенная, 2011, № 3). Падение астероида такого размера может вызвать глобальную катастрофу на Земле. Оказалось, что такие астероиды есть, но их всего лишь несколько десятков. Зато количество опасных тел размером менее 1 км оценивается в десятки или сотни тысяч. Поэтому на втором этапе – в проекте США “Космическая стража-2” – планируется за 15 лет обнаружить и каталогизировать около 90% всех астероидов и комет размером от 140 м, опасно сближающихся с Землей. На начало 2016 г. таких объектов обнаружено около 15 тысяч; число их быстро растет.

Задача фундаментальной науки – разработка эффективных средств предотвращения (или уменьшения) возможных последствий столкновения небесных тел с Землей. Для оценки размеров и физико-химических параметров опасных небесных тел основную информацию дают фотометрические и спектрофотометрические наблюдения астероидов и ядер комет. Ценную информацию получают при помощи радиолокационных

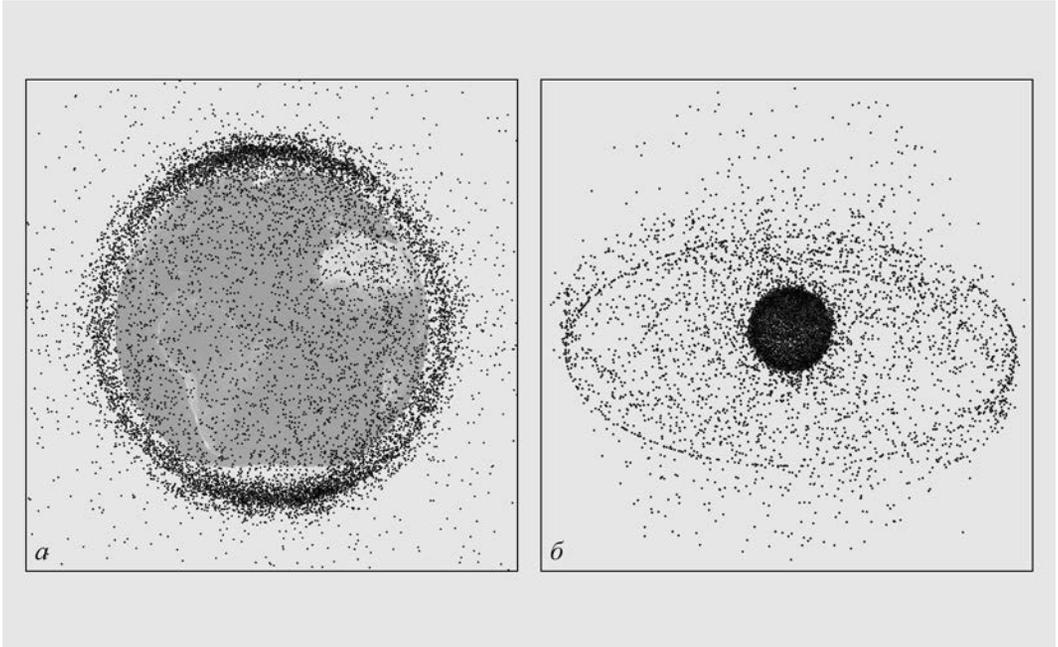
выполняются исследования по разработке методов управления движением астероидов. Цель работ – создание технологий, которые позволят отклонять опасные небесные тела от траекторий возможного столкновения с Землей, или переводить их на орбиты спутника Земли для дальнейшего исследования или использования в качестве источника ценных ресурсов.

Одна из главных тем, над которыми работают ученые нашего Института в настоящее время, – изучение малых тел Солнечной системы, путей их миграции, динамики, структурных и физических характеристик. Вновь обращаясь к публикациям сборников “Трудов конференций по околоземной астрономии за 1998 г.”, обращаем внимание читателей на статью А.М. Микиши, М.А. Смирнова, С.А. Смирнова “Транспортировка астероида в околоземное космическое пространство”.

В качестве способов передвижения больших тел в космосе рассматривалась реактивная тяга, поглощение импульса, переносимого внешним телом, и упругое соударение.

АСТЕРОИДНО-КОМЕТНАЯ ОПАСНОСТЬ

Астероидно-кометная опасность как угроза столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы, стала проблемой, требующей изучения; она обозначилась примерно два десятилетия назад – с появлением специализированных программ наблюдений малых тел. В результате планомерных наблюдений было обнаружено много потенциально опасных для Земли тел. Первый проект США “Космическая стража”, разработанный для раннего обнаружения опасных небесных тел, был ориентирован на обнаружение в 1998–2008 гг. более 90% опасных астероидов размером



и поляриметрических наблюдений. Все перечисленные типы наблюдений очень трудоемки, и потому изученных опасных объектов пока очень немного. Например, известный астероид Апофис до его обнаружения неоднократно сближался с Землей. Исследования показали, что его повторные резонансные сближения (после ожидаемого близкого сближения в 2029 г.) будут возможны вплоть до его прямого столкновения с Землей в последующие годы (Земля и Вселенная, 2007, № 1, с. 99). История наблюдений Апофиса показала, что большинство небесных тел (при условии их пролета вблизи Земли) всегда будут представлять опасность из-за возможности их повторений.

Последствия удара небесного тела о Землю (помимо его размера и химического состава) определяются скоростью, углом падения тела, структурой космического тела и многими другими геофизическими факторами. Имеет большое значение плотность “населения” на территории падения, насыщенность данного района промышленными объектами.

Событие 15 февраля 2013 г. в небе над Челябинском – вход в атмосферу Земли тела размером 16–20 м под углом примерно 20° к горизонту и последующий взрыв – сопровождалось большой областью разрушений. Взрыв произошел в атмосфере на высоте примерно 23 км, он сопровождался мощной

Схема положения искусственных объектов в околоземном космическом пространстве: а – на низких орбитах, б – на высоких. Рисунки NASA.

ударной волной; энергия взрыва была оценена в 300–500 кт. По сообщению МЧС, разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и десяти районах области. За медицинской помощью обратились более 1600 человек (Земля и Вселенная, 2014, № 5). С точки зрения проблемы астероидной опасности, Челябинское событие представляет уникальный случай, поскольку впервые это событие регистрировалось активно многими техническими средствами.

В феврале 2009 г. на 46-й сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по мирному использованию космоса был озвучен документ, в котором подчеркивалось, что проблема астероидно-кометной опасности имеет глобальный характер и должна рассматриваться как объект международного сотрудничества.

В России на уровне мировых стандартов развиваются лишь теоретические исследования. Задачи обнаружения и мониторинга астероидов, сближающихся с Землей, ведутся инициативно, без необходимой координации и целевого финансирования. После события, произошедшего в Челябинске, было объявлено о создании в России "Программы по защите от космических угроз". Проект такой программы был

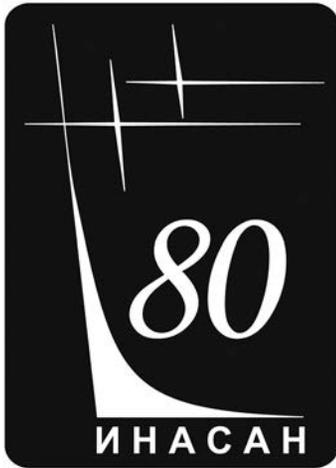
разработан еще в 2010 г. Экспертной рабочей группой по проблеме астероидно-кометной опасности, созданной при Совете РАН по космосу. Программа была представлена на совместном заседании Президиума НТС Роскосмоса и Бюро Совета РАН по космосу и получила одобрение. Но на этом все и остановилось. Возможно, при осуществлении новой Федеральной космической программы на 2016–2025 гг. ситуация изменится к лучшему.

Сфера исследований околоземной астрономии (отрасли, появившейся из-за необходимости наблюдений за неизвестными прежде объектами) теперь включает исследование всех природных и искусственных тел, находящихся в околоземном пространстве или проходящих через него). В ИНАСАН разрабатыва-

ются проекты космических телескопов для исследования таких объектов.

По современным оценкам для обнаружения более 90% входящих в околоземное пространство тел, представляющих потенциальную угрозу для планеты Земля, необходимо круглосуточное наблюдение за небосводом. Однако погодный фактор, а также невозможность проводить наблюдения в области пространства в угловой окрестности Солнца из-за засвечивания аппаратуры заставляет астрономов искать другие решения этой проблемы с помощью специальных космических аппаратов.

Автор благодарит Е.С. Баканас за помощь в оформлении статьи и рисунков.



Космохимия

Раскрывая секреты звездного света

Н. Н. ЧУГАЙ,
доктор физико-математических наук
Л. И. МАШОНКИНА,
доктор физико-математических наук
Ю. В. ПАХОМОВ,
кандидат физико-математических наук
Т. А. РЯБЧИКОВА,
доктор физико-математических наук
Институт астрономии РАН



В предлагаемой статье дается представление о современном уровне спектральных исследований в астрофизике на примере последних научных

результатов, полученных в Институте астрономии РАН. Популярно излагаются современные методы и результаты спектральных исследований обычных

звезд солнечного типа, магнитных звезд с аномалиями химического состава, активных красных гигантов и сверхновых звезд.

Два века назад, в 1817 г., немецкий оптик Йозеф Фраунгофер опубликовал статью, в которой описал темные дискретные линии солнечного спектра, — известные теперь каждому астрофизику фраунгоферовы линии. Позднее он обнаружил такие же линии в спектре Сириуса. Так родился спектральный анализ — мощный инструмент изучения окружающего мира, благодаря которому мы теперь знаем, что такое звезды и как устроена Вселенная.

Видимый свет составляет относительно узкий интервал длин волн широкого спектра электромагнитного излучения — от радио- до рентгеновского и гамма-диапазона. Но не будет преувеличением сказать, что подавляющий объем знаний о Вселенной получен именно на основе оптических спектров небесных тел. Расшифровка “послания”, записанного в свете звезды, начинается с получения спектра. Для этого поток света, “собранного” телескопом, “посылают” на спектрограф, задача которого состоит в том, чтобы разложить свет на колоссальное множество “цветов” — современные спектрографы способны различить до полумиллиона цветовых оттенков. Число таких оттенков называют спектральным разрешением. Полученный спектр попадает на

ПЗС-матрицу, с помощью которой он записывается в цифровом виде и после этого становится доступным для исследования.

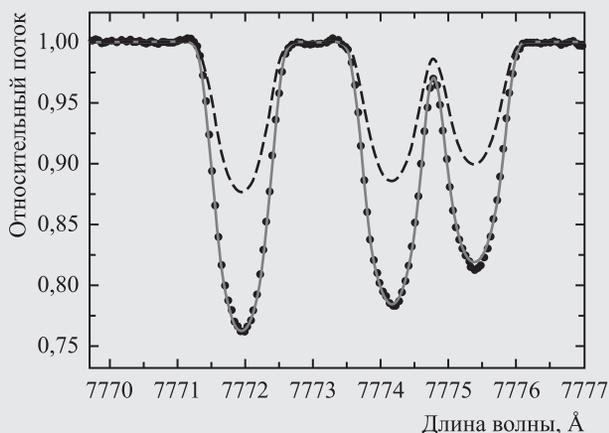
Спектр несет в себе сведения о температуре и ускорении силы тяжести на поверхности звезды, о скоростях движения звезд и газа в звездной атмосфере, о вращении звезды и, конечно, о химическом составе звездного вещества. Эта информация “записана” в линиях поглощения — многочисленных дискретных “провалах” в гладком распределении энергии по длинам волн. Впрочем, некоторые звезды показывают не только линии поглощения, но и линии излучения; в этом случае на месте ожидаемых линий наблюдаются избытки излучения. Главное свойство спектральных линий — их однозначная принадлежность данному химическому элементу — нейтральному атому либо его иону. Будем называть для удобства ионами и нейтральные атомы. Глубина линии поглощения тем больше, чем больше данного иона в атмосфере звезды. Это и дает возможность определять состав атмосферы звезды по ее спектру. Используя утонченные методы, можно извлекать из спектральных линий и другую важную информацию: в частности, о неоднородной структуре поверхности звезды, о пульсациях звезд

и о магнитном поле на поверхности звезд. Ниже рассказывается о некоторых любопытных результатах исследования звезд, полученных в последние годы в ИНАСАН с использованием спектрального анализа.

КАК ИЗУЧАЮТ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД

Свет звезды излучается фотосферой, над которой находится тонкий слой атмосферы. Ее масса ничтожна — в миллиарды раз меньше массы звезды. Проходя через атмосферу, свет частично поглощается в спектральных линиях. Каждый ион имеет свой, присущий только ему набор спектральных линий. В звездных спектрах наблюдаются линии почти 80 элементов — от водорода до урана. Сравнение наблюдаемых линий поглощения с теоретическими позволяет определить химический состав звездного вещества. Исследуя спектры звезд, удалось установить, что химический состав подавляющего большинства звезд Галактики и других галактик такой же, как у Солнца, а отклонения от этого правила всегда являются ключом к пониманию новых интересных процессов, отвечающих за такие отклонения.

Теоретический спектр звезды рассчитывается путем решения уравнения распространения света



Сравнение наблюдаемых профилей линий нейтрального кислорода в спектре звезды π Ceti (кружки) с теоретическими профилями, рассчитанными в рамках предположения ЛТР (штриховая кривая) и при отказе от приближения ЛТР (сплошная кривая). Оба теоретических спектра рассчитаны при солнечном содержании кислорода, которое следует из анализа других линий кислорода в спектре этой звезды.

в звездной атмосфере с учетом поглощения и излучения света газом. Традиционно при расчете звездных спектров предполагается, что ионизация и возбуждение газа в любом месте атмосферы звезды однозначно определяется температурой и плотностью в этом же месте. В основе этого лежит разумное соображение, что газ в звездной атмосфере находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию с окружающей средой (так же, как и газ в земной атмосфере). Этот подход называют приближением локального термодинамического равновесия (ЛТР). Приближение ЛТР оказалось столь эффективным, что его широко используют в физике звезд до сих пор, на протяжении уже почти ста лет, хотя уже в 1930-х гг. стало ясно, что такой подход дает осечку при описании некоторых

спектральных линий. Причина кроется в том, что ионизация и возбуждение газа зависит не только от локальных процессов столкновений с другими частицами, но и от взаимодействия с излучением, которое во внешних слоях звезды может заметно отличаться от равновесного. Если это так, то состояние газа, которое в значительной степени зависит от излучения, будет также не вполне равновесным, а содержание элементов, полученное из анализа спектров, может оказаться ошибочным.

Отказ от приближения ЛТР значительно усложняет теорию формирования звездного спектра, поскольку для расчета ионизации атомов и возбуждения большого числа атомных уровней требуется теперь рассматривать колоссальное множество процессов столкновений атомов с частицами и фотонами. Для того, чтобы

рассчитать спектр с учетом отклонений от ЛТР, необходимо численно решить систему большого числа уравнений баланса частиц в разных состояниях атома совместно с уравнениями распространения излучения в атмосфере звезды. В решении таких задач астрофизики ИНАСАН являются признанными мировыми лидерами.

О том, насколько важно учитывать отклонения от ЛТР, можно судить на примере линий нейтрального кислорода и нейтрального углерода в атмосфере звезды π Ceti с температурой поверхности 12800 К. При сравнении профилей, рассчитанных при приближении ЛТР и при отказе от ЛТР, с наблюдаемыми профилями мы обнаруживаем, что первая модель не объясняет наблюдаемые данные; тогда как модель (с учетом отклонений от ЛТР)

объясняет наблюдаемый спектр. Стоит заметить, что, используя методику ЛТР, невозможно согласовать теорию и наблюдения ни при какой величине содержания кислорода. Отказ от упрощающего предположения ЛТР позволяет полностью “снять проблему” и идеально воспроизвести наблюдаемые профили.

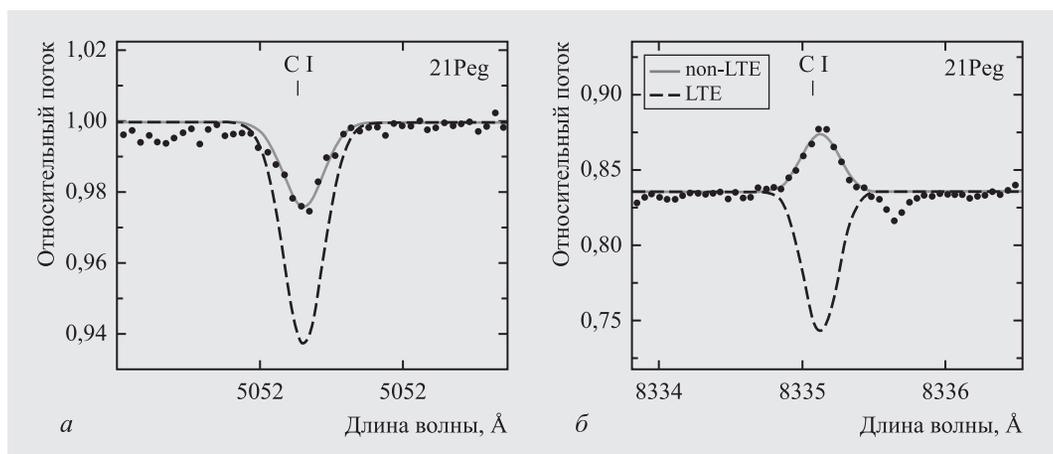
Еще более убедительный пример отклонения от ЛТР в звездах – присутствие эмиссионных линий нейтрального углерода в спектре звезды 21 Peg с температурой поверхности 10 400 К.

Профили абсорбционной линии C I 5052.17 Å а – и эмиссионной линии C I 8335.15 Å: б – в спектре звезды 21 Peg (кружки) в сравнении с теоретическими профилями, рассчитанными в рамках предположения ЛТР (штриховая кривая) и при отказе от этого приближения (сплошная кривая).

Теоретические линии, рассчитанные в рамках предположения ЛТР, – это всегда линии поглощения (независимо от длины волны, химического элемента и физических параметров атмосферы). В случае же звезды 21 Peg линия углерода 8335.15 Å оказывается не линией поглощения, а линией излучения. Воспроизвести ее профиль удалось только в модели, которая учитывает все многообразие процессов взаимодействия атомов углерода с полем излучения и окружающими частицами в атмосфере. Для сравнения: линия углерода 5052.17 Å в спектре той же звезды является линией поглощения. Но даже и в этом случае ЛТР-теория не может воспроизвести наблюдение: реальная величина поглощения меньше по сравнению с рассчитанной.

Роль отклонений от ЛТР возрастает при анализе спектров звезд

с очень низким содержанием металлов. Известно, что в ранней Вселенной (до того, как возникли первые звезды) химический состав вещества был крайне примитивен: водород (75%), гелий (25%) и мизерная примесь лития. Звезды – это та космическая “плавильная печь”, которая превратила небольшую часть (около процента) водорода посредством ядерных превращений в другие химические элементы. Обогащение вещества Вселенной новыми химическими элементами было постепенным: первое поколение звезд состояло из водорода и гелия, и это были массивные звезды, которые живут только три миллиона лет. В конце жизни они взорвались, как сверхновые звезды, и выбросили в пространство газ, обогащенный новыми химическими элементами. Он перемешался с окружающим газом, и из этой смеси родилось



второе поколение звезд, которое состояло уже не только из водорода и гелия, но включало и небольшую примесь тяжелых элементов: углерода, кислорода, азота, магния. Астрофизики называют все эти элементы “металлами”. В звездах второго поколения металлов было совсем немного – в 10–100 тыс. раз меньше, чем в солнечном веществе. Первые звезды “не дожили” до настоящего времени, а звезд второго поколения крайне мало в нашей Галактике. Тем не менее, такие звезды действительно есть, и они обнаружены. Их изучение позволяет судить о том, какими были первые сверхновые звезды, обогатившие галактический газ металлами, и как формировалась наша Галактика. Для этого, однако, требуется уметь надежно определять химический состав звезд с учетом весьма экзотических условий в их атмосферах. Дело в том, что в атмосфере звезды с очень низким содержанием металлов мало свободных электронов, поставляемых ионизацией металлов. Это ведет к уменьшению скорости столкновений атомов с электронами, а также к уменьшению поглощения ультрафиолетового излучения веществом звезды. Оба эффекта вызывают значительные отклонения состояния газа в атмосфере звезды от

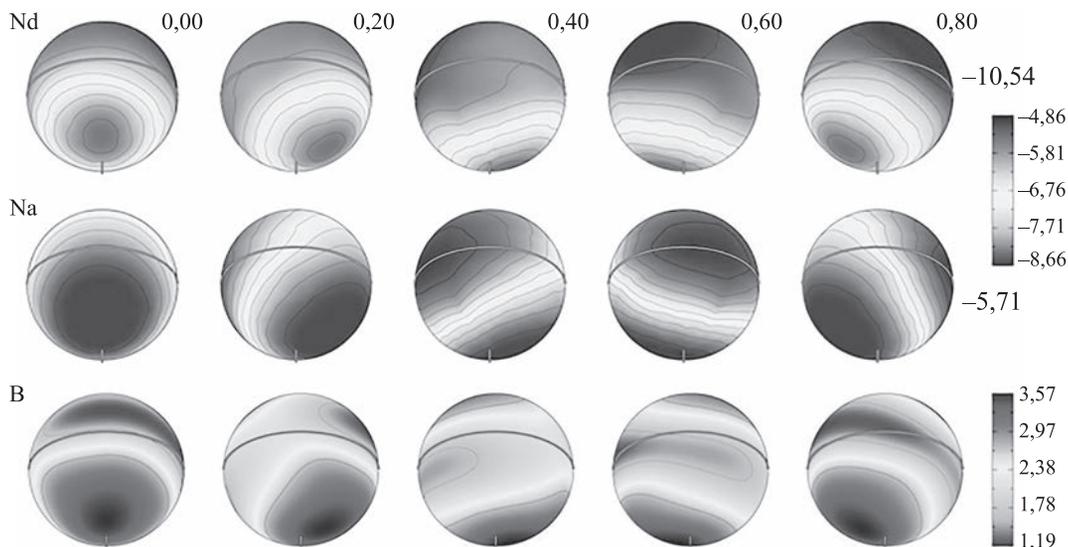
термодинамически равновесного. Моделирование спектров звезд с очень низким содержанием металлов показывает, что химический состав звездного вещества, полученный в приближении ЛТР, может значительно отличаться от того, который получается в строгой теории, учитывающей отклонения физических условий от ЛТР. Только теория (с учетом отклонений от ЛТР) может дать надежные сведения о начальных этапах химической эволюции нашей Галактики. Такие исследования интенсивно ведутся в ИНАСАН в настоящее время.

СМОТРИМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗВЕЗД И ЗОНДИРУЕМ ИХ АТМОСФЕРУ

То, что звезды – не вполне идеальные светящиеся шары с однородной поверхностью – хорошо известно на примере нашего Солнца: на его поверхности мы видим относительно холодные темные пятна. Подобные пятна (и даже гораздо больших размеров) есть на поверхности других звезд. В отличие от Солнца непосредственно увидеть детали на поверхности далекой звезды невозможно (кроме тех редких случаев, когда звезда является красным сверхгигантом и находится близко к нам как, например, в случае Бетельгейзе). И все

же поверхность звезды можно косвенно “рассмотреть”, используя методы спектрального анализа. Для этого нужно получить в наблюдениях последовательно ряд спектров вращающейся звезды. В этом случае пятна (если они есть) проявятся в виде меняющейся со временем формы профиля линии поглощения. Изменения происходят из-за того, что половина вращающейся звезды движется “на нас” (представьте вращающийся мяч), а другая половина – “от нас”. При наличии пятен это ведет к периодическим модуляциям профиля линии из-за эффекта Доплера. С помощью детального моделирования спектра такой звезды можно будет понять, где (относительно экватора вращающейся звезды) находится пятно и каковы его размеры (то есть, фактически получить карту звездной поверхности). Но спектральный анализ позволяет сделать и нечто более фантастическое: измерить содержание химических элементов в атмосфере звезды на разных высотах – иными словами, провести высотное зондирование состава атмосферы звезды. Как увидим ниже, содержание элементов в атмосферах некоторых звезд оказывается крайне неоднородным по высоте.

Среди обычных на первый взгляд звезд с температурами поверхности



Распределение химических элементов и напряженности магнитного поля по поверхности звезды HD24712. Цифрами сверху показаны фазы ее вращения в долях периода. Пятна повышенного содержания редкоземельного элемента Nd (верхний ряд) и щелочного металла Na (средний ряд) находятся на противоположных полюсах магнитного поля. Шкала относительного содержания элементов дана в виде логарифма отношения числа атомов данного элемента к полному числу всех атомов. Темный тон соответствует наибольшему содержанию, светлый – наименьшему. Числа справа – величины содержания Nd и Na в атмосфере Солнца. Шкала напряженности магнитного поля (нижний ряд) показана в килогауссах.

7000–12 000 К выделяются звезды с сильными магнитными полями и аномально высоким содержанием некоторых

элементов. Такие звезды именуют магнитными химически пекулярными звездами (Ap-звездами, от англ. слова peculiar, что означает “необычный”). У большинства таких звезд напряженность магнитного поля периодически меняется, причем эти изменения сопровождаются, как правило, изменением (с тем же периодом) интенсивности линий поглощения элементов с аномально высоким содержанием. Переменность магнитного поля и интенсивности линий объясняет модель “наклонного ротатора”. Согласно ей, ось магнитного поля наклонена под некоторым углом к оси вращения звезды, а неоднородное распределение химических элементов по поверхности определяется геометрией магнитного поля. При вращении такой звезды

наблюдатель видит разные проекции дипольного поля и “пятен” с аномальным химическим составом. Оказалось, что содержание некоторых элементов (например, редкоземельных элементов, или лантаноидов) в пятнах может на порядки превышать их содержание в атмосфере Солнца и других нормальных звезд.

Основной причиной аномалий химического состава является диффузионное разделение элементов в атмосферах, которое возникает при совместном воздействии на ионы светового давления и гравитации: свет “выталкивает” элементы вверх, гравитация – “тянет” вниз. Свободному движению частиц под действием этих сил, конечно, мешают столкновения с другими частицами, в результате чего

скорости дрейфа оказываются низкими, около одного сантиметра в год. По этой причине диффузионное разделение элементов наиболее эффективно в звездах со спокойными атмосферами: любые движения (конвекция или меридиональная циркуляция) “перемешивают” вещество, разрушая неоднородности химического состава, вызванные диффузионным разделением элементов. В звездах с температурами поверхности ниже 7000 К атмосферы конвективные (одно лишь излучение не успевает эффективно выносить тепло на поверхность), поэтому диффузионное разделение элементов неэффективно. В звездах с температурой поверхности 7000–12 000 К конвекции нет, но они, как правило, быстро вращаются. Это приводит к меридиональной циркуляции вещества звезды, что также разрушает диффузионное разделение элементов. Кроме того, спектральный анализ показывает, что в атмосферах этих звезд все же присутствуют турбулентные движения газа со скоростями 1–3 км/с. Это дополнительно препятствует диффузионному разделению элементов. Ар-звезды, наоборот, вращаются медленно, а детальный анализ их спектров свидетельствует об отсутствии турбулентных движений, которые невозможны из-за

сильного магнитного поля. Эти условия благоприятствуют высокой эффективности диффузионного разделения элементов, приводящего к аномалиям распределения химического состава как по глубине, так и по поверхности. Подчеркнем, что все аномалии образуются лишь в атмосфере и не отражают химического состава звезды в целом.

Высокая точность современных спектральных и спектрополяриметрических наблюдений в сочетании с вычислительной техникой позволяют восстанавливать распределение магнитного поля и химического состава на поверхности Ар-звезд – фактически получать карту поверхности звезды. Пионерские работы в этом направлении, названном доплер-зеemannовским картированием, были начаты астрофизиками ИНАСАН В.Л. Хохловой и Н.Е. Пискуновым (в сотрудничестве с математиками МГУ) и в дальнейшем развиты в работах Н.Е. Пискунова. Доплер-зеemannовское картирование поверхности звезд основано на уже упомянутом ранее изменении вида спектральных линий “пятнистой” вращающейся звезды. Оно выполнено для ряда Ар-звезд. Одним из наиболее изученных объектов является Ар-звезда HD24712. Картирование поверхности этой звезды осуществлено в

сотрудничестве с астрофизиками Упсальского университета (Швеция) на основе прецизионных спектро-поляриметрических наблюдений, полученных со спектрографом HARPS3.6-метрового телескопа Европейской Южной Обсерватории. Найденные распределения магнитного поля и ряда химических элементов имеют дипольную структуру. Это иллюстрируют карты распределения редкоземельного элемента Nd, щелочного металла Na и магнитного поля по поверхности HD24712.

Диффузионное разделение элементов в Ар-звездах создает слоистую структуру содержания элементов по высоте. Анализируя спектры этих звезд, удастся измерить содержание химических элементов на разных высотах в атмосфере, то есть провести высотное зондирование атмосферы. Такое исследование проведено, в частности, для той же звезды HD24712. Показанные на рисунке “срезы” атмосферы – результат детального моделирования спектров, выполненного совместно астрофизиками ИНАСАН и Упсальского университета. Содержание каждого из исследованных элементов значительно изменяется с высотой, причем по-разному: во внешних слоях вещество довольно обеднено кремнием (Si), кальцием

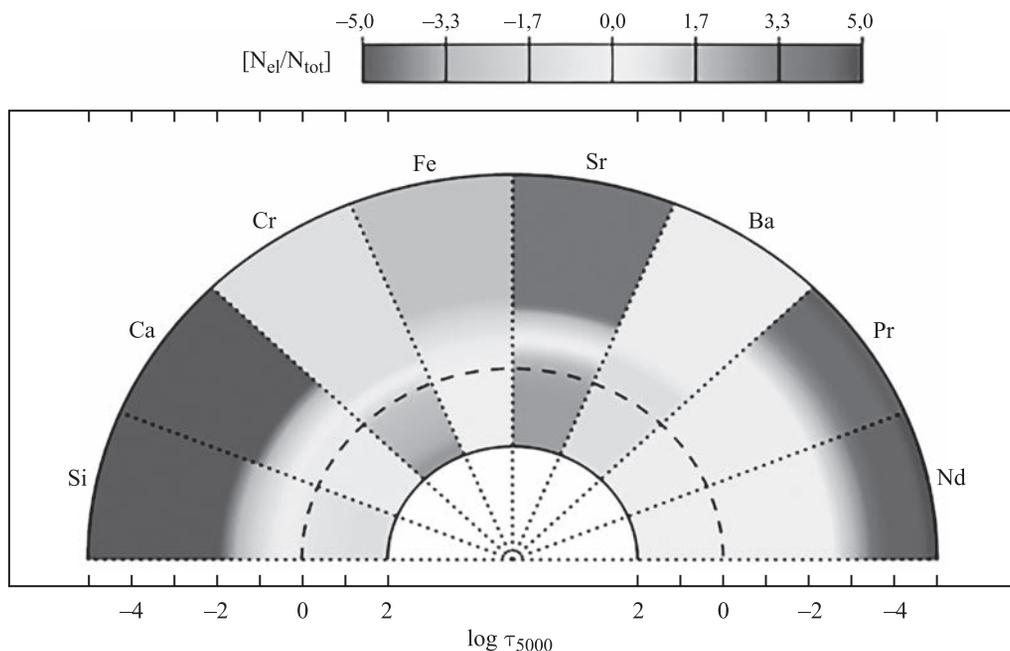


Диаграмма распределения химических элементов по глубине в атмосфере HD24712. Разными оттенками серого показано содержание элементов на логарифмической шкале относительно их содержания в атмосфере Солнца. В случае Pr и Nd темный цвет соответствует минимальному содержанию этих элементов, а в остальных случаях – максимальному. Штриховой линией показан уровень фотосферы.

(Ca), хромом (Cr), железом (Fe) и стронцием (Sr), и, наоборот, – содержание празеодима (Pr) и неодима (Nd) во внешнем слое на много порядков превышает солнечное (при том, что содержание этих элементов в глубине является нормальным). Иными словами, Si, Ca, Cr,

Fe и Sr “тонут” в атмосфере звезды, тогда как Pr и Nd демонстрируют ярко выраженную способность к левитации. Разная способность элементов к образованию слоистого распределения их содержания по высоте определяется различной способностью атомов и ионов поглощать свет: ионы празеодима и неодима хорошо поглощают свет и поэтому более эффективно “выталкиваются” вверх.

КРИЗИС ИДЕНТИЧНОСТИ PZ ЕДИНОРОГА

Переменная звезда PZ Моп (созвездие Единорога) с небольшой амплитудой вариаций блеска (всего 0,05^m, то есть около 5% потока) более полувека считалась красным

карликом типа UV Cet на расстоянии около 20 пк. Поскольку звезда ничем особым не выделялась, то она наблюдалась крайне редко. В начале 1990-х гг. сотрудник Крымской астрофизической обсерватории Н.И. Бондарь собрала данные фотографических наблюдений PZ Моп за 100 лет и показала, что звезда медленно меняет блеск, с амплитудой около 1^m (поток меняется в 2,5 раза) с периодом около 50 лет. Колебания блеска с амплитудой 0,05^m оказались регулярными, с периодом 34 дня; эти вариации обусловлены вращением “пятнистой” звезды.

Неожиданное обстоятельство выявилось после измерения параллакса PZ Моп космической обсерваторией

“Hipparcos”: оказалось, что звезда в действительности находится на расстоянии в интервале 400–1800 пк – гораздо дальше, чем предполагалось ранее, и, следовательно, она должна быть скорее гигантом, нежели карликом. Для того, чтобы внести ясность в вопрос о природе PZ Mon, астрофизиками ИНАСАН были получены спектры на 6-м телескопе БТА (САО РАН). Анализ спектров показал, что PZ Mon действительно является гигантом с массой около 1,5 солнечной, температурой поверхности 4700 К и скоростью вращения на экваторе 10,5 км/с. С учетом найденных характеристик гиганта удалось показать, что PZ Mon находится на расстоянии от нас около 250 пк. Данные о потоках излучения в разных диапазонах спектра и найденное расстояние позволили определить радиус PZ Mon, который оказался в 7,7 раз больше радиуса Солнца. Характеристики PZ Mon указывают на то, что ось вращения гиганта наклонена на 70° по отношению к лучу зрения: мы смотрим на эту звезду почти в экваториальной плоскости.

В спектре PZ Mon обнаружено излучение в линии водорода H_{α} и поглощение в линии гелия 5876 Å, – обе эти особенности характерны для звезд с высоким уровнем хромосферной активности. Этот факт согласуется

с данными ультрафиолетовых наблюдений на спутнике “IUE”, а также со значительным потоком рентгеновского излучения, зарегистрированного орбитальной рентгеновской обсерваторией “Einstein”. То и другое также являются признаками сильной хромосферной активности звезды. Звезды с данным типом активности имеют пятна наподобие солнечных, но занимающих гораздо большую долю поверхности. В случае PZ Mon-пятна покрывают около 20–30% поверхности (судя по полувековой вариации блеска с амплитудой 1^m). Переменность таких активных гигантов вызывается вращением пятнистой звезды и изменением уровня активности, то есть числа и площади пятен. Вращение звезды при максимальной разнице площади пятен на видимой и невидимой стороне звезды в 4% объясняет переменность блеска PZ Mon с периодом 34,13 сут и амплитудой 0,05^m, а медленное изменение уровня активности, аналогичное 11-летнему солнечному циклу, “отвечает” за полувековые изменения блеска на одну звездную величину.

Звезды с хромосферной активностью и пятнистой поверхностью могут принадлежать к одной из двух разновидностей переменных звезд: BY Dra либо RS CVn. Во втором

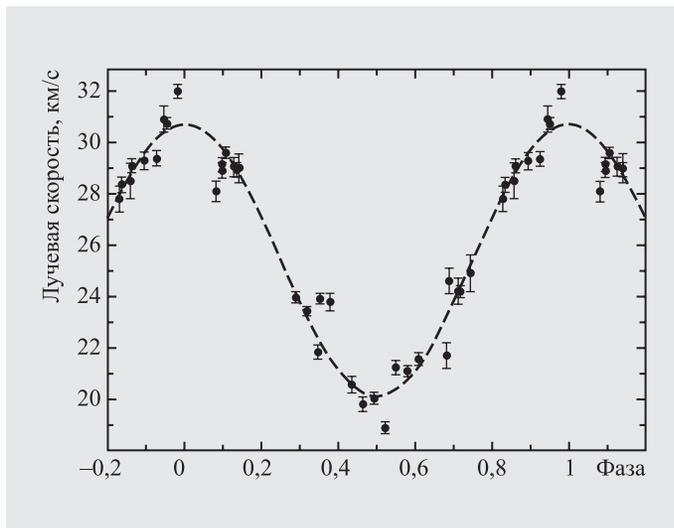
случае звезда должна быть двойной. Для ответа на вопрос, не является ли PZ Mon двойной системой, была выполнена большая серия измерений лучевой скорости на 1-м телескопе (Симеиз, Крым). Если второй компонент существует, то это должно проявиться в переменности доплеровского смещения линий гиганта из-за орбитального движения. Такие изменения с амплитудой в 5,4 км/с и периодом 34,15 сут действительно были обнаружены. Это стало решающим аргументом в пользу того, что PZ Mon – двойная звезда типа RS CVn. Анализ лучевых скоростей свидетельствует о том, что второй компонент имеет небольшую массу: в 10 раз меньше, чем масса главного компонента. Любопытно, что отношение масс вторичного и главного компонентов системы PZ Mon является наименьшим среди всех известных звезд типа RS CVn: обычно в двойных системах этого класса компоненты имеют соизмеримые массы.

ПАРАДОКС СКОРОСТЕЙ НЕОБЫЧНЫХ СВЕРХНОВЫХ

Вспышка сверхновой сопровождается взрывом звезды с разлетом вещества со скоростями порядка 10 тыс. км/с и последующим мощным свечением длительностью от месяца до нескольких лет.

Наблюдаемые изменения лучевой скорости PZ Моп с периодом 34,15 дней (кружки). Штриховая линия показывает модель, дающую наилучшее согласие с наблюдениями. На горизонтальной оси указаны доли периода.

Скорости расширения оболочки определяют по ширине спектральных линий на основе эффекта Доплера. Подавляющее число сверхновых относится к одному из двух типов: сверхновые, порождаемые термоядерным взрывом углеродно-кислородного белого карлика (термоядерные сверхновые) и сверхновые, порождаемые гравитационным коллапсом ядер массивных звезд (гравитационные сверхновые). В нашей Галактике сверхновые не наблюдались, начиная с 1604 г.: все сверхновые, которые мы сейчас видим, находятся за пределами нашей Галактики. Благодаря использованию телескопов-роботов, темп обнаружения сверхновых за последние 20 лет вырос более, чем в 30 раз и сейчас составляет около 1000 сверхновых в год. По этой причине среди множества открываемых сверхновых все чаще сталкиваются с редкими, крайне необычными случаями.



Одна из таких необычных сверхновых — SN2011ht (запись означает, что сверхновая открыта в 2011 г., а “ht” указывает на порядковый номер события в том же году). Она светила как самые яркие гравитационные сверхновые, а оболочка (судя по линиям поглощения) расширялась с необычно низкой скоростью — около 600 км/с (против 3–10 тыс. км/с у обычных гравитационных сверхновых). Но самое интересное — что крылья спектральных линий излучения водорода одновременно указывают на высокие скорости расширения, достигающие 5000 км/с.

Объяснение парадокса скоростей предложено в ИНАСАН и состоит в том, что высокие доплеровские скорости в “крыльях” линий водорода не имеют никакого отношения к реальной скорости

расширения оболочки: она, действительно, низкая — 600 км/с. Присутствие широких “крыльев” связано с тем, что излучение рождается глубоко в оболочке и, прежде чем выйти на поверхность, фотоны испытывают многократные рассеяния на электронах. Средние тепловые скорости легких электронов велики — около 400 км/с — по сравнению с 10 км/с у атомов водорода. При каждом рассеянии на тепловом электроном фотон приобретает доплеровское смещение в “синюю” или “красную” сторону на величину порядка 400 км/с. После многократных рассеяний фотон может “уйти” по оси лучевых скоростей далеко от центра линии, на величину до 5000 км/с. Число рассеяний и, следовательно, смещение фотона от центра линии ограничено тем, что в процессе



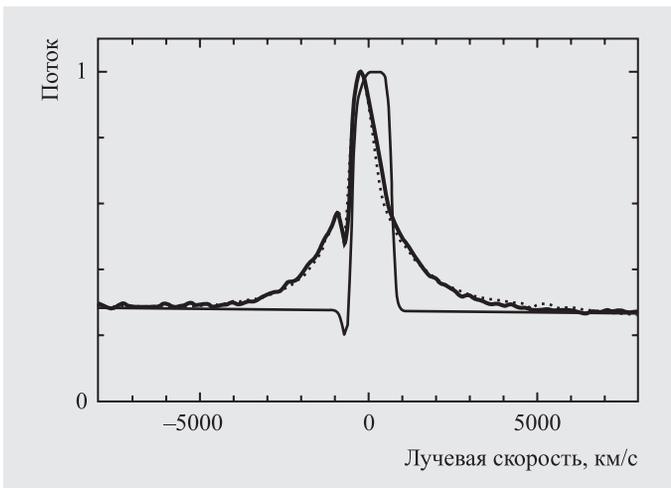
случайного блуждания фотон, перемещаясь в пространстве, подлетает к границе оболочки и, в конце концов, покидает ее. Таким образом, широкие “крылья” линии – лишь имитация высокой скорости расширения оболочки, которая на самом деле мала.

Необычность спектра, низкая скорость расширения и высокая светимость сверхновой SN2011ht связаны с тем, что в данном случае произошло столкновение оболочки

сверхновой с очень массивной околозвездной оболочкой, “сброшенной” незадолго (за год–три) до взрыва сверхновой. Энергия взрыва сверхновой была на порядок меньше, чем у обычных гравитационных сверхновых, что и объясняет низкую скорость расширения. Высокая светимость сверхновой – не результат самого взрыва, а следствие столкновения оболочки сверхновой с околозвездным веществом. Эффективность переработки

Двойная система PZ Mon, состоящая из красного гиганта и карликовой звезды. Холодные пятна на поверхности гиганта показаны темным оттенком. Круглое пятнышко справа – карликовая звезда-спутник в масштабе.

Профиль спектральной линии H_{α} в сверхновой SN2011ht на 38-й день. Спектр (пунктир) получен американскими астрофизиками (Мауэрхан и др., 2013). На горизонтальной оси отложены лучевые скорости, которые соответствуют доплеровскому смещению длины волны относительно нулевого (несмещенного) положения. Модельный профиль с учетом рассеяния фотонов на электронах (тонкая линия) сравнивается с наблюдаемым профилем (пунктир). Толстая линия – модельный профиль линии без учета рассеяния фотонов на электронах. Огромное отличие одного модельного профиля от другого подчеркивает большую роль рассеяния фотонов на электронах и одновременно указывает на то, что модель отражает физику явления.

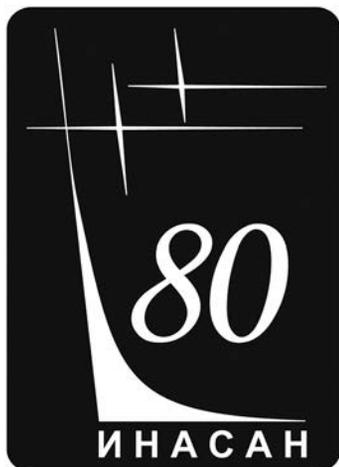


кинетической энергии в “выходящее излучение” при этом оказывается гораздо выше, чем при взрыве обычной сверхновой. Рассмотренный случай иллюстрирует типичную ситуацию в науке, когда кажущийся парадокс (в данном случае парадокс скоростей) становится ключом к новому знанию.

Приведенные примеры показывают, сколь эффективны методы современной спектроскопии в получении новых знаний о звездах различных типов. Конечно, прогресс в этой области немыслим без больших телескопов, чувствительных

детекторов света и мощных вычислительных средств. Мы, однако, не упомянули о чрезвычайно важной составляющей успеха спектроскопии – об “атомных данных”, которые получают в результате экспериментальных исследований и квантово-механических расчетов столкновений частиц и взаимодействия фотонов с ионами. Без качественных “атомных данных” возможности спектроскопии были бы крайне ограничены. Принимая это во внимание, сотрудники ИНАСАН (совместно с европейскими коллегами) создали обширную базу атомных данных

VALD, которая непрерывно пополняется и уточняется в процессе астрофизических исследований. Спектроскопическое исследование холодных звезд приводит к необходимости включить в модель не только данные об атомах и ионах, но и о молекулах. Это побудило европейских исследователей (с участием астрофизиков ИНАСАН) реализовать проект VAMDC. Он обеспечивает пользователям доступ в унифицированном формате к уже существующим базам “атомных и молекулярных данных” в архивах различных исследовательских центров.



Использование методов космической геодезии в геодинاميке

С.П. КУЗИН,
кандидат технических наук
К.В. ЭБАУЭР,
кандидат физико-математических наук
А.А. КЛЮЙКОВ,
кандидат технических наук
Институт астрономии РАН



В статье обсуждаются вопросы, связанные с использованием измерений различных спутниковых систем для

геодинамических исследований, проводимых группой космической геодезии ИНАСАН. Рассмотрены основные

современные методы наблюдений геодинاميческих параметров. Приведены некоторые результаты исследований.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В ГЕОДИНАМИКЕ

Наша жизнь протекает на динамичной, изменяющейся планете. Это

делает необходимым проведение постоянного и долговременного изучения глобальных изменений в системе Земли, их количественной

оценке в высокоточной, стабильной системе координат. Для исследования и понимания изменений формы, вращения и гравитационного поля

Земли, а также для установления глобальной геодезической системы отсчета под эгидой Международной геодезической ассоциации была создана Глобальная геодезическая система наблюдений (Global Geodetic Observing System – GGOS). Эта организация действует в нескольких направлениях: сбор, математическая обработка и анализ данных, поступающих от глобальных навигационных спутниковых систем и доплеровских наблюдений системы DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite – спутниковые доплеровские измерения орбиты и местоположения); получение информации от радиointерферометров со сверхдлинными базами (VLBI) и результатов спутниковой лазерной локации (SLR), принятых с пунктов наземных геодезических сетей. Составной частью системы GGOS являются также гравиметрические обсерватории. GGOS поддерживает разработку новых космических альтиметрических программ с использованием спутников по составлению карт гравитационного поля Земли, а также помогает использовать для этих же целей классические геодезические наземные измерения. Система GGOS внедряет в область изучения Земли геометрические и гравитационные аспекты геодезии,

стимулируя улучшение качества геодезических решений, увеличивая инвестиции в космические технологии.

На ближайшее десятилетие определены главные проблемы в изучении Земли с целью регистрации глобальных планетарных изменений: мониторинг водного цикла в мировом и региональном масштабах, исследования изменений уровня Мирового океана и ледниковых масс. Поскольку амплитуды этих изменений малы (составляют несколько миллиметров в год), то для их регистрации необходимо иметь точную “земную” опорную систему координат соответствующей стабильности – 1 мм по координатам и 0,1 мм в год по скорости их изменения. Достижение такой точности к 2020 г. – главная цель проекта GGOS. В рамках проекта GGOS планета Земля рассматривается как единое целое, включая ее твердые слои, океаны и атмосферу в статике и во времени. В случае успешной реализации проекта его достижения станут значительным вкладом в фундаментальные научные исследования происходящих глобальных изменений на Земле.

Малые изменения уровня Мирового океана, объема ледниковых масс и глобального водного цикла отражаются в структуре гравита-

ционного поля планеты и в его изменениях, происходящих во времени. Отметим некоторые особенности коэффициентов гравитационного поля Земли. При их определении методом математической обработки лазерных измерений ученые используют данные геодезических ИСЗ “Lageos-1/2” (США) и “Эталон-1/2” (Россия). Тонкая структура гравитационного поля уточняется на основе градиентометрических измерений (данные с европейского научного спутника “GOCE”, 2009–2013; Земля и Вселенная, 2009, № 4, с. 71) и наблюдений в измерительных системах “спутник – спутник” по схеме “низкий – низкий” (данные с немецких геодезических спутников “GRACE-1/2”) и “высокий – низкий” (результаты проектов “CHAMP” и “GRACE”, Земля и Вселенная, 2010, № 5).

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Изучение Земли астрономическими и геодезическими методами подразумевает решение трех основных задач:

– определение положений точек земной поверхности, а также скоростей их изменения и положения центра масс Земли (геоцентра);

– исследование изменения ориентации оси вращения в теле Земли

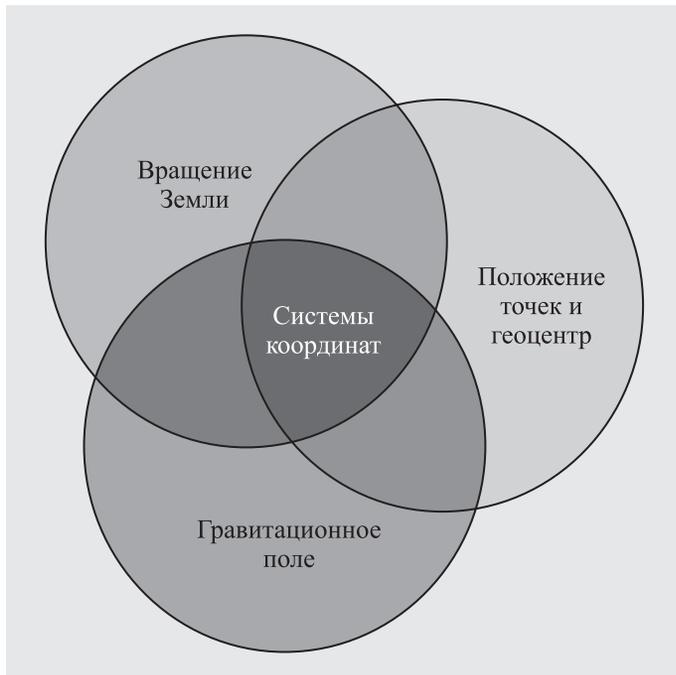
(движение полюсов) и в пространстве (прецессия и нутация), а также изучение вариаций скорости вращения Земли;

– определение гравитационного поля Земли, изучение его временных вариаций.

Необходимым условием в определении и изучении этих трех составляющих является определение общей системы отсчета, относительно которой проводятся все измерения. Построение такой системы и контроль за ее стабильностью есть первоочередная задача космической геодезии. Геодинамические параметры – это координаты наземных станций, параметры вращения Земли, движение геоцентра, коэффициенты гравитационного поля планеты и их изменения со временем.

В настоящее время исследования Земли выполняются с применением шести основных методов, каждый из которых позволяет определять ее геодинамические параметры:

– использование радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (VLBI);



– использование возможностей глобальных навигационных спутниковых систем (российской “Глонасс”, американской GPS, китайской “Compass”, европейской “Galileo”);

– с помощью доплеровских измерений (система DORIS);

– использование результатов лазерных наблюдений спутников (SLR) и Луны (LLR);

– с помощью спутниковой альтиметрии;

– с помощью спутниковой градиентометрии (SGG) и системы “спутник-спутник” (STT).

Каждый из методов помогает решать определенный круг задач. Они представлены ниже в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Измерения системы DORIS. Спутниковая радиотехническая система DORIS была разработана и реализована французским космическим агентством (CNES) в тесном сотрудничестве с научно-исследовательской группой по космической геодезии (GRGS, Франция) и французским Национальным институтом географии (IGN) с целью осуществления высокоточного контроля орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецизионные альтиметры. Первый из семи спутников французской системы IC3 дистанционного

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

Определяемые параметры	РСДБ	ГНСС	ДОРИС	SLR	LLR	Альтиметрия	SGG STT
Нутация							
Движение полюса							
UT1-UTC							
Δ LOD							
Амплитуды океанических волн							
Координаты станций							
Гравитационная постоянная GM							
Координаты геоцентра							
Гравитационное поле Земли							

зондирования Земли "SPOT-2" был выведен на орбиту в феврале 1990 г. и проработал до 2009 г.

В середине 2003 г. Международная геодезическая ассоциация (IAG) установила для Международной службы DORIS (IDS) новый высокий статус – она стала одной из технических служб IAG в составе создаваемой в настоящее время системы GGOS. В данный момент более 50 исследовательских групп из 35 стран принимают участие

в деятельности IDS на разных этапах ее работы. Сейчас шесть Центров анализа измерений DORIS получают и посылают свои результаты в Центры данных; один из них находится в ИНАСАН.

С 1997 г. в Аналитическом центре нашего Института ведется регулярная обработка данных измерений, поступающих из глобальной сети DORIS. Для обработки этих измерений наш Институт использует лицензионный программный пакет GIPSY/OASIS II,

разработанный в Лаборатории реактивного движения (JPL, NASA). Эта программа позволяет обрабатывать и анализировать различные типы спутниковых измерений (лазерные, доплеровские; выполненные различными радионавигационными системами). Центр анализа DORIS на базе ИНАСАН переработал все измерения, полученные системой DORIS за 1993–2015 гг., используя при этом модели, рекомендованные Международной службой вращения Земли



и опорных систем координат (IERS).

Особое значение для построения глобальной системы координат имеет задача определения и контроля за движением центра масс Земли (геоцентра). Относительно

геоцентра описываются движение Земли в инерциальном пространстве и орбитальное движение искусственных спутников Земли.

Под таким движением понимают смещение центра масс Земли

Карта сети станций системы DORIS. Рисунок из интернет-сайта IDS.

Станция BADB системы DORIS (Бадары, Россия).





Карта международной сети лазерных станций. Рисунок из интернет-сайта SLR.

относительно центра поверхности твердой Земли, которое, в свою очередь, может быть определено по данным наблюдений ИСЗ станций глобальной сети.

Лазерные измерения. В 2015 г. в нашем Институте разработан программно-вычислительный комплекс “ГеоИС” (геодинамические исследования), реализующий самые современные и высокоточные алгоритмы и модели, применяемые при обработке спутниковых измерений. Программный пакет “ГеоИС” предназначен для обработки лазерных наблюдений, полученных искусственными

спутниками Земли; он позволяет определять орбиты сферических геодезических ИСЗ, уточнять координаты станций, параметры вращения Земли, коэффициенты гравитационного поля нашей планеты, а также координаты ее геоцентра.

При вычислении возмущающих ускорений, действующих на спутники, исследователи учитывают широкий спектр факторов: влияние гра-

витационного поля Земли; твердых земных, океанических и полюсных приливов; притяжение тел Солнечной системы, световое давление, атмосферное торможение, переотражение и переизлучение Землей солнечной радиации; перемещение неприливных масс в атмосфере и в океанах, влияние атмосферных приливов. Реализованы способы определения смещения станций

Луч лазера из купола лазерной станции в Гринбелт, США. Фото NASA.

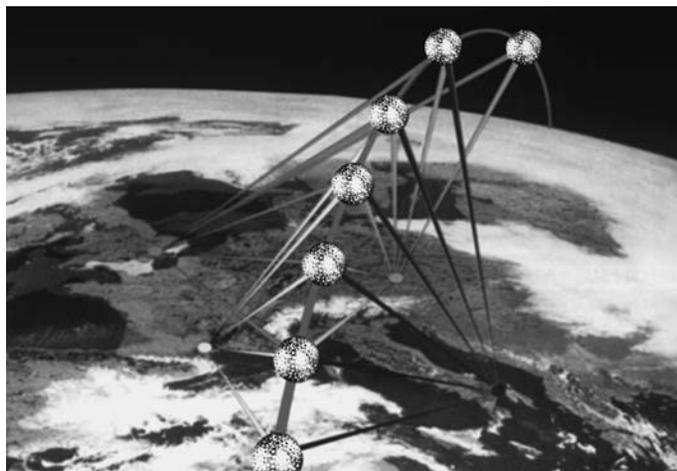


Схема проведения лазерных измерений.

наблюдений, происходящие из-за влияния различных видов нагрузок, действующих на станции измерения (твердой приливной, океанической, атмосферной); деформаций, вызванных вращением Земли.

В 2001–2013 гг. GGOS выполнена обработка результатов некоторого количества лазерных наблюдений, полученных со спутников “Lageos-1,2”. Ученые ИНАСАН определили орбиты указанных спутников, координаты станций, параметры вращения Земли и коэффициенты гравитационного поля до четвертой степени. При совместной обработке высоко- и низкоорбитальных спутников удалось существенно снизить связь между некоторыми параметрами и повысить их точность, особенно для поправок ко Всемирному времени. В результате определения длительности суток получают среднеквадратические отклонения от эталонного ряда – 0,194 мс и 1,074 мс соответственно.

В целом на основе полученных результатов можно утверждать, что разработанный программный комплекс “ГеоИС” позволяет определять орбиты спутников, координаты станций, параметры вращения Земли (ПВЗ) и коэффициенты



гравитационного поля Земли с высокой точностью. Он соответствует уровню зарубежных программных комплексов, а именно:

- ряды коэффициентов гравитационного поля Земли согласуются с аналогичными результатами из мировых центров, полученными в результате обработки лазерных наблюдений различных спутников;

- полученные ряды параметров вращения Земли сопоставимы с результатами, полученными с применением других программных пакетов;

- суммарные ошибки в плоскости и по высоте определения координат станций не превосходят 7–10 мм для большинства станций (важное значение имеет количество проведенных наблюдений).

Перспективы дальнейшего развития качества обработки лазерных измерений в ИНАСАН мы

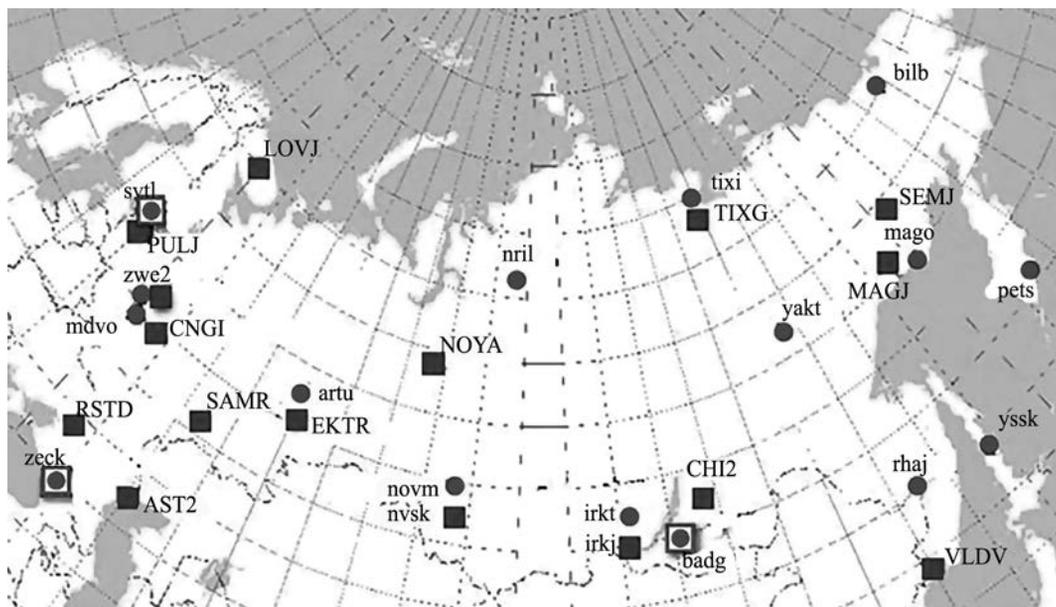
связываем с решением следующих задач:

- комплекс “ГеоИС” в дальнейшем планируется развивать, расширяя количество определяемых параметров и повышая точность их определения путем включения в обработку большего числа ИСЗ;

- необходимо увеличивать количество исследований и повысить точность получаемых результатов;

- включить результаты, получаемые с использованием комплекса “ГеоИС”, в базу данных Международной службы лазерной локации.

Обработка измерений навигационных спутниковых систем. Помимо обработки измерений, полученных со станций сети DORIS и лазерной локации, нами проводится обработка измерений глобальных навигационных спутниковых систем GPS и “Глонасс”. Эта работа проводилась с помощью



Карта действующих станций российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), использующей данные глобальных навигационных спутниковых систем. Станции ФАГС обозначены квадратами, международные станции – кружками, станции с несколькими космическими технологиями – кружками в квадрате.

программного комплекса GIPSY/OASIS II, при этом учитывались новые модели и методики, влияющие на точность измерений. Использовались данные от 15-ти постоянно действующих станций российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) за один год (2013–2014).

На станциях были установлены двухчастотные приемники различных

типов. Разницы в оценке координат, полученных из независимых источников (от систем “Глонасс” и GPS), находятся в интервале от 1 до 10 мм – тем самым подтверждая идентичность точностных характеристик, полученных двумя указанными навигационными системами.

Гравитационное поле Земли и спутниковая градиентометрия. В ИНАСАН выполняются исследования по определению параметров гравитационного поля Земли на основе использования градиентометрических измерений.

Станция ИРКТ (Иркутск, Россия) глобальной навигационной спутниковой системы.

Гравитационное поле является одним из физических полей системы Земля. Точная информация о его параметрах необходима для решения задач во многих областях науки (в геодезии, геофизике, геодинамике, в океанологии, в небесной



механике). Для решения этих задач до начала XXI в. использовались результаты наземных и морских измерений, а также наблюдений ИСЗ с пунктов слежения. После 2000 г. началась новая эра в изучении гравитационного поля Земли. Прежде всего это связано с реализацией проектов “CHAMP” (Германия), “GRACE” (США, Германия), “GOCE” (ESA).

Проект “CHAMP” был разработан в 1994 г. Немецким аэрокосмическим центром (DLR) и Научно-исследовательским центром Земли в Потсдаме. Этот проект был разработан для решения следующих задач:

- глобальное определение длинноволновой структуры гравитационного поля Земли и его временных вариаций;
- оценка глобального магнитного поля Земли и характеристик его

пространственно-временной изменчивости;

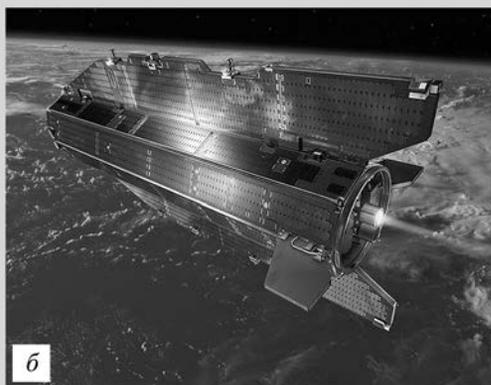
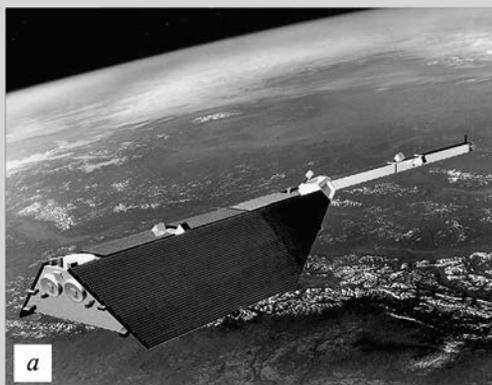
- получение данных о рефракции, вызванной влиянием атмосферы и ионосферы.

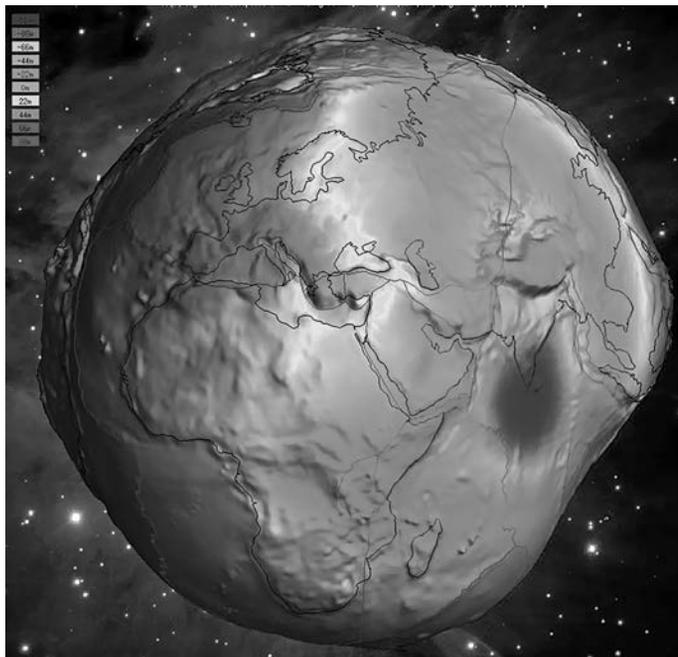
Для решения этих задач 15 июля 2000 г. был запущен немецкий научный ИСЗ “CHAMP” (Challenging Minisatellite Payload – перспективный научно-исследовательский мини-спутник) массой 522 кг и длиной 8 м (включая “хвостовую стрелу” в 4 м) на орбиту высотой 422 × 475 км и наклоном 87,27° (Земля и Вселенная, 2002, № 1, с. 104). На его борту были установлены следующие сенсорные системы: трехосный акселерометр для измерения действующих на него возмущений негравитационного характера; двухчастотная аппаратура спутниковой навигации для определения орбиты спутника; система поддержания ориентации

и параметров орбиты; лазерные уголкового отражатели для измерения дальности до спутника с наземных пунктов наблюдения; две звездные камеры для получения информации об ориентации в инерциальном пространстве; магнитометр для измерения параметров магнитного поля Земли.

Основываясь на математических данных из обработанной информации, полученной за 10 лет работы ИСЗ “CHAMP”, были построены модели гравитационного поля Земли. По этим моделям были рассчитаны высоты геоида (поверхности Земли)

Немецкий научный спутник для изучения гравитационного и магнитного полей Земли “CHAMP” – а; европейский геодезический ИСЗ “GOCE” – б. Рисунки DLR и ESA.





Модель геоида. Темными и светлыми оттенками показаны отклонения от земной поверхности, полученные при обработке данных проекта "GRACE". Рисунок из интернет-сайта GFZ, Потсдам.

Определяют параметры гравитационного поля Земли следующим образом: два спутника движутся по одной и той же орбите на расстоянии около 220 км один от другого; расстояние между ними измеряется дальномерной системой с точностью до 1 мкм; изменяющееся расстояние между спутниками дает информацию о возмущающих ускорениях, исходящих от гравитационного поля Земли; эффект действия на спутники возмущающих сил негравитационного характера измеряется с помощью акселерометров; орбита каждого спутника, оборудованного аппаратурой спутниковой навигации, непрерывно отслеживается глобальной навигационной спутниковой системой GPS, а также определяется по лазерным измерениям дальности до спутников с наземных пунктов наблюдения.

Основываясь на математических результатах обработанной информации, полученной за время работы ИСЗ "CHAMP-1,2", были построены модели гравитационного поля Земли:

с точностью 10 см и пространственным разрешением 350 км (70 первых гармоник гравитационного потенциала Земли).

Проект "GRACE" (Gravity Recovery And Climate Experiment – эксперимент по изучению гравитационного поля и климата Земли) разработали Немецкий аэрокосмический центр и Научно-исследовательский центр в Потсдаме. 17 марта 2002 г. на круговую орбиту высотой около 500 км, наклоном 89° и периодом обращения 94,5 мин запущены два идентичных немецких научных спутника "GRACE" (Земля и Вселенная, 2003, № 1, с. 76). Между ними выдерживается расстояние – 220 км. Оба ИСЗ массой по 432 кг и длиной 3,12 м оснащались

микроволновым дальномером, аппаратурой спутниковой навигации GPS, акселерометром и лазерным отражателем для высокоточных измерений дальности (1–2 см) до КА с наземных пунктов наблюдения. В задачи полета спутников входили:

- определение параметров гравитационного поля Земли (его длинноволновой и средневолновой части с более высоким пространственным разрешением, чем в проекте "CHAMP");

- исследование временных вариаций гравитационного поля Земли, вызванного крупномасштабными перемещениями воздушных масс и установление их связи с изменением климата на Земле.

GGM01S (2003), GGM02S (2004), GGM03S (2008). По ним были рассчитаны высоты геоида с точностью до 5 см и пространственным разрешением 160–110 км (120–180 гармоник гравитационного потенциала Земли).

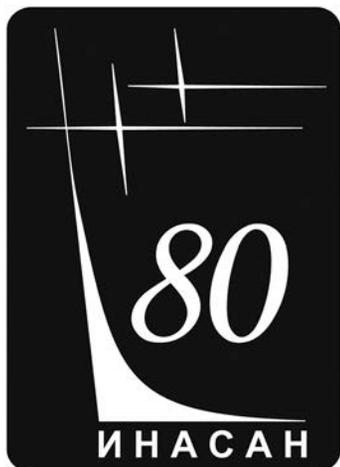
В проекте “GOCE” (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer – гравитационное поле Земли и океанические течения) планировалось изучить физику процессов, связанных с геодинамикой литосферы Земли и ее мантии; исследовать циркуляцию океана и перемещения океанических масс; оценивать толщину полярных шапок; устанавливать глобальную высокоточную систему высот, которая служит основой при исследовании различных физических процессов, протекающих на Земле (включая эволюцию ледяных полярных шапок). Этим целям предлагалось достичь путем определения параметров гравитационного поля Земли относительно

высот геоида и аномалий силы тяжести с точностью до 1 см и 1 мГал соответственно, с пространственным разрешением 100 км. Столь высокая точность в решении этой задачи достигается в результате математической обработки информации, полученной спутниковым гравитационным градиентометром. На борту ИСЗ “GOCE” находятся следующие приборы: двухчастотные датчики спутниковой навигации для определения орбиты по наблюдениям спутников глобальной навигационной спутниковой системы GPS; уголкового лазерные отражатели для высокоточных измерений расстояния (от 1 до 2 см) до спутников с наземных пунктов наблюдения; звездные камеры для определения ориентации КА в инерциальном пространстве; система контроля высоты полета спутников.

17 марта 2009 г. был успешно осуществлен запуск европейского науч-

ного спутника “GOCE”, который выведен на круговую орбиту с высотой 270 км, наклоном 96,8° и периодом обращения 90 мин. По измерениям, выполненным за время его работы (до 13 октября 2013 г.), составлены высокоточные модели гравитационного поля Земли (Земля и Вселенная, 2010, № 5).

Земля – одна из планет Солнечной системы, на которой мы живем, поэтому изучение ее строения, взаимодействия составных частей между собой и проявления этого взаимодействия во внешней среде представляет огромный научно-практический интерес. Это помогает предсказывать многие катастрофические явления, влияющие на жизнь всего человечества. Методы космической геодезии позволяют исследовать геодинамические параметры, отражающие физические процессы, протекающие на нашей планете.



Международная виртуальная обсерватория

О.Б. ДЛУЖНЕВСКАЯ,
кандидат физико-математических наук
С.Г. СИЧЕВСКИЙ
Институт астрономии РАН

В связи со значительными достижениями в наблюдательных, регистрирующих и вычислительных технологиях астрономия в конце XX в. столкнулась с лавинообразным увеличением количества получаемых данных. Для решения многих астрофизических задач накопленного сейчас наблюдательного материала

уже достаточно, но этими данными нужно суметь воспользоваться. Многие астрономические каталоги становятся взаимосвязанными, результаты анализа данных оказываются столь же богатыми, как и полученные с действующих телескопов. Технологические достижения фундаментально изменяют

характер астрономических исследований – в частности, заметно облегчают работу коллективов, “распределенных” по учреждениям мира, и позволяют уравновесить возможности исследователей в крупных и небольших обсерваториях и астрономов-любителей.

ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

За прошедшие годы концепция виртуальной обсерватории, призванной удовлетворять существующим требованиям к управлению данными, их анализу и распространению приобрела широкую популярность (Земля и Вселенная, 2004, № 2).

Виртуальная обсерватория – это система, в которой распределенные по всему миру гигантские

астрономические архивы и базы данных (вместе с инструментами анализа и вычислительным сервисом) интегрированы в единую среду. Современная астрономия стоит у границ новых открытий; возможности для их возникновения и развития предоставляют современные информационные технологии, а также политическая и техническая международная кооперация. Необходимо

отметить, что виртуальная обсерватория является эффективным инструментом “демократизации” астрономии, поскольку даже небольшие научные (а также образовательные астрономические учреждения) получают, по существу, те же возможности для проведения научных исследований на современном наблюдательном материале, что и ведущие астрономические организации мира.

В традиционном подходе к научной деятельности львиная доля времени и усилий исследователя затрачивается на разнообразные низкоуровневые операции: конвертацию форматов, редукцию данных и их подготовку к научному анализу; на поиск информации, написание сценариев автоматизированной обработки данных для многократных операций и другие действия. Их повторное использование зачастую ограничено или вовсе не представляется возможным. При этом собственно интеллектуальные усилия – анализ и интерпретация подготовленного научного материала, имеющие решающее значение во всем процессе получения научного результата, – занимают несравнимо меньшее время.

Назначение виртуальной обсерватории в широком смысле заключается в разделении творческого, интеллектуального, “высокоуровневого” процесса от “низкоуровневых” технических операций, которые должны либо происходить прозрачно (незаметно) для исследователя, либо быть максимально пригодными для повторного использования в ходе работы над последующими научными задачами. Таким образом, на первое место выходит получение “абстрагированных” от конкретных инструментов и наблюдателей данных, “готовых” к научной обработке; существование сервисов



Эмблемы организаций–членов альянса “Международная виртуальная обсерватория”.

для доступа к ним и широкий набор соглашений (форматов, стандартов, образцов) для рутинных операций. Всем этим условиям в той или иной степени удовлетворяет виртуальная обсерватория. В ее успешном развитии уже заложены новые возможности для проведения эффективных научных исследований без “низкоуровневой” составляющей.

**АЛЬЯНС
МЕЖДУНАРОДНЫХ
ВИРТУАЛЬНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ**

Проект “Международная виртуальная обсерватория” стартовал около 10 лет назад, а к настоящему времени в мире функционируют более 20 национальных и международных проектов виртуальных обсерваторий. Цель каждого: вооружить астрономов мощными механизмами современного

исследования наблюдательных данных. Механизмами, которые могут быть использованы и нашими коллегами из смежных областей наук.

Для разработки, внедрения и поддержания набора единых стандартов и технологий, необходимых для успешного функционирования виртуальной обсерватории, был создан альянс “Международная виртуальная обсерватория” – союз национальных обсерваторий, призванный координировать их деятельность по стандартизации описания, поиска, доступа к данным и их опубликованию.

Одним из основателей и активным участником альянса является Российская виртуальная обсерватория (РВО), созданная по инициативе Института астрономии РАН и Специальной астрофизической

обсерватории РАН с целью обеспечения – в первую очередь, для российских астрономов – доступа к обширным международным ресурсам астрономических данных, а также объединения российских астрономических информационных ресурсов для дальнейшей интеграции в Международную виртуальную обсерваторию.

Актуальность создания РВО продиктована, в первую очередь, тем, что с распадом СССР российская астрономия практически лишилась инструментальной базы – обсерваторий на юге страны. Весьма затруднена (или вовсе оказалась невозможной) научная работа в Абастуманской астрофизической обсерватории в Грузии, Шемахинской обсерватории в Азербайджане, Майда-накской – в Узбекистане. Закрыты наблюдательная станция Санкт-Петербургского университета в Бюракане и станция Шорбулак Главной астрономической обсерватории на Памире. Оставшаяся в России, на Северном Кавказе, САО РАН не в состоянии полностью обеспечить наблюдательные потребности всех астрономических учреждений. Оптимальным выходом из сложившейся ситуации представляется интеграция российского астрономического сообщества в мировую информационную сеть астрономических данных – прежде всего, в европейские

и американские наблюдательные архивы.

Вклад РВО в процесс интеграции мировых астрономических ресурсов уже весьма значителен. В России действуют около 30 астрономических институтов и организаций, многие из которых располагают обширными архивами данных в электронном виде и сотрудничают с другими членами альянса в работе по созданию Международной виртуальной обсерватории. Одно из преимуществ использования российских астрономических данных – возможность создания объединенных (с данными обсерваторий других стран) продолжительных рядов наблюдений. Это обусловлено тем, что многие обсерватории в нашей стране (она, как известно, расположена в 9-ти часовых поясах по долготе и простирается почти до 40-й параллели по широте) находятся на противоположной стороне земного шара относительно места расположения большинства крупных мировых обсерваторий. Это обстоятельство позволяет российским обсерваториям вести наблюдения в те часы, когда большинство крупных обсерваторий мира находятся на дневной, освещенной стороне земного шара.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗД
И МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

Виртуальная обсерватория может служить успешным инструментом

для проводимых в Институте астрономии РАН работ по исследованию звезд и построению карты межзвездного поглощения.

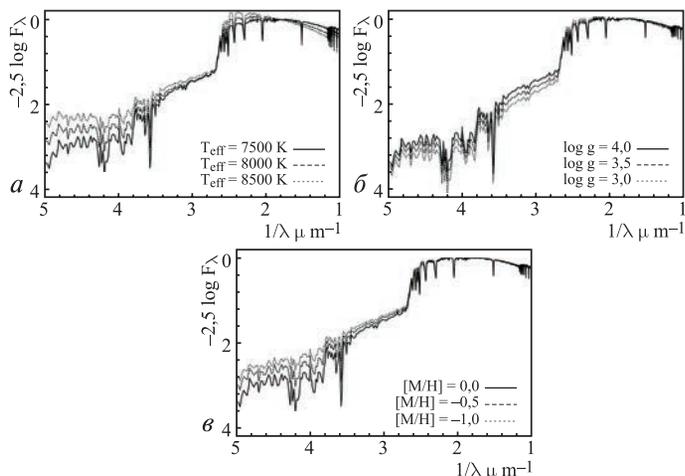
Изучение строения и эволюции нашей Галактики невозможно без знания основных характеристик ее звездной составляющей. Расчеты в рамках теории строения звезд и их эволюции позволяют вычислять значения физических характеристик звезды для любого момента времени, а теория звездных атмосфер позволяет связывать между собой физические и наблюдательные характеристики звезды. Это создает основу для разработки способов определения физических параметров звезды (радиуса, массы, светимости) по ее атмосферным параметрам (температуре, поверхностному ускорению, химическому составу), которые, как правило, получают, анализируя ее спектр. Однако задача осложняется наличием межзвездной среды, которая ослабляет свет звезд и искажает распределение энергии в их спектре. Следовательно, определение характеристик звезд и межзвездного поглощения – задачи взаимосвязанные.

Современные фотометрические каталоги (такие, как 2MASS, GALEX, SDSS, UKIDSS) предоставляют результаты наблюдений миллионов объектов и неявным образом содержат

информацию о характеристиках звезд и межзвездной среды. Однако для одновременного использования всей доступной информации необходимо провести отождествление одних и тех же объектов в разных каталогах. Такие работы астрономы начали проводить почти сразу после появления цифровых фотометрических каталогов, пригодных для обработки на ЭВМ. Результаты отождествления объектов в разных каталогах – ценный источник данных для решения целого ряда задач; поэтому разные коллективы, работающие в рамках виртуальной обсерватории, разработали ряд специальных программных комплексов, в том числе и российские – CATS (CAO РАН) и SAI CAS Crossmatch (ГАИШ МГУ), преимущественно ориентированные на радиоастрономические и обзорные каталоги.

Большой научный интерес представляет исследование возможности определения физических условий в атмосфере звезды по широкополосным фотометрическим наблюдениям – именно результаты таких наблюдений для миллионов объектов содержатся в современных цифровых каталогах.

Расчеты в рамках теории звездных атмосфер позволяют определить, как меняется распределение энергии в спектре звезды в зависимости от физических условий



Графики распределения энергии в спектре звезды для разных значений характеристик ее атмосферы: а – значения эффективной температуры; б – значения поверхностного ускорения; в – значения металличности. На графике (а) показаны три случая распределения энергии в спектре звезды, соответствующие трем различным значениям T_{eff} .

в ее атмосфере. Видно, что, в отличие от температуры, изменение давления (поверхностного ускорения) и металличности (отношения содержания тяжелых элементов к водороду) не приводят к заметным изменениям в спектре; однако они существуют и проявляются в виде перераспределения потоков энергии между разными полосами фотометрической системы. Это дает основание полагать, что физические условия в атмосфере звезды могут быть определены по результатам широкополосных фотометрических наблюдений (при условии их высокой точности).

Используя возможности и средства виртуальной обсерватории, были

измерены наиболее вероятные спектральные классы звезд на основе результатов их широкополосных фотометрических наблюдений. (Использовалась одна из самых высокоточных фотометрических систем – WBVR – Каталога ярких звезд северного неба.) Предложен способ определения наиболее вероятного спектрального класса звезд и оценки избытка их цвета и расстояний.

Далее, на основе многополосной фотометрии, взятой из современных каталогов 2MASS, SDSS и GALEX, проанализирована возможность одновременного определения температуры звезд, их поверхностного ускорения и химического состава, а также полного

поглощения света и его отношения к селективному поглощению. Кроме того, основываясь на характерной точности фотометрических данных используемых каталогов, оценена точность определяемых величин. Показано, что (при достигнутой в используемых каталогах точности) определение атмосферных характеристик звезд и межзвездной среды на основе широкополосной фотометрии возможно, но неопределенность значения температуры и межзвездного поглощения составляет не менее 300 К и 0,25^m.

Наконец, с использованием спектроскопических данных, представленных в обзоре LAMOST, были определены радиусы, массы и светимости

782 020 звезд спектральных классов А, F, G и К. Определение характеристик звезд выполнено с использованием результатов современных расчетов моделей внутреннего строения звезды и ее эволюции, описывающих звезды с начальной массой от 0,8 M_☉ до 120 M_☉ разных химических составов.

Полученные оценки фундаментальных характеристик почти миллиона звезд стали важным исходным материалом для решения одной из важнейших задач астрономии – определения для различных направлений на небе зависимости межзвездного поглощения от расстояния.

Традиционная парадигма открытий астрономических объектов под-

разумеает изобретение, создание и использование новых телескопов и наблюдательных методов. Виртуальная обсерватория позволяет видоизменить эту концепцию, поскольку для новых открытий используются существующие данные из архивов и каталогов. Трудность подобного подхода заключается в том, что объем публикуемых данных начинает существенно превосходить возможность их обработки любыми стандартными методами.

Системы автоматического поиска и анализа имеющихся в “публичном пространстве данных”, которые предоставляет виртуальная обсерватория, могут стать единственным выходом из сложившейся ситуации.

Информация

Как образовалась наша Галактика?

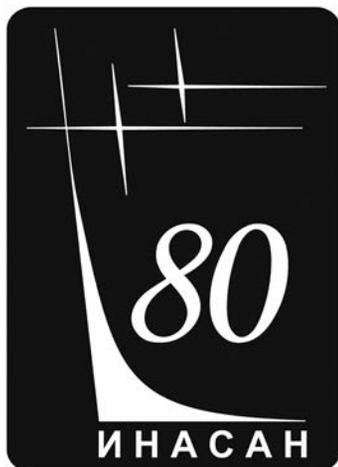
Астрономы из Японии, Южной Африки и Италии, проводившие наблюдения на 11-м Большом южноафриканском телескопе в Сатерленде (ЮАР) обнаружили, что в огромной области вокруг центра нашей Галактики нет молодых звезд. Этот неожиданный результат может привести к пересмотру взглядов на эволюцию Млечного Пути. Вопрос о том, как она образовалась и развивалась – один из главных. Основным

источником информации об этом, помимо химического состава звезд, служит измерение их пространственного распределения. Наиболее удобны для таких измерений пульсирующие звезды – цефеиды; у них обнаружена довольно точная зависимость между периодом пульсаций и светимостью. Это позволяет астрономам вычислить светимость, сравнив ее с наблюдаемой, определить расстояние до звезды. За это цефеиды прозваны “маяками Вселенной”.

Ученые искали во внутренней области Млечного Пути классические цефеиды, представляющие собой молодые звезды возрастом 10–300 млн лет. Это – довольно сложная задача,

поскольку Галактика полна межзвездной пыли, которая мешает увидеть многие звезды и влияет на их светимость. Оказалось, что в радиусе 8 тыс. св. лет вокруг центра Галактики нет ни одной цефеиды. Исключение составляет небольшая область в самом центре Галактики радиусом 150 св. лет, где ранее обнаружены четыре цефеиды. Если в этом огромном регионе внутреннего диска Галактики нет молодых звезд – значит, на протяжении сотен миллионов лет там не было никакого существенного звездообразования.

журнал “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society”,
22 июня 2016 г.



“Околоземная астрономия – 2015”

Девятая международная конференция по околоземной астрономии “Околоземная астрономия – 2015” (или ОЗА – 2015) прошла в сентябре 2015 г. в пос. Терскол (Приэльбрусье). Конференция была организована Институтом астрономии РАН и Международным центром астрономических и медико-экологических исследований Национальной академии наук Украины. (О традициях проведения конференций по около-

земной астрономии читайте в статье Л.В. Рыхловой в этом номере журнала).

Тематика конференции была широкой и охватывала как фундаментальные, так и прикладные проблемы. Обсуждались следующие научные направления:

- астероидно-кометная опасность;
- обнаружение, определения степени угрозы (оценка рисков) и принятие решений;
- противодействие и уменьшение ущерба;

– динамика и миграция малых тел Солнечной системы;

– свойства, состав, форма малых тел Солнечной системы;

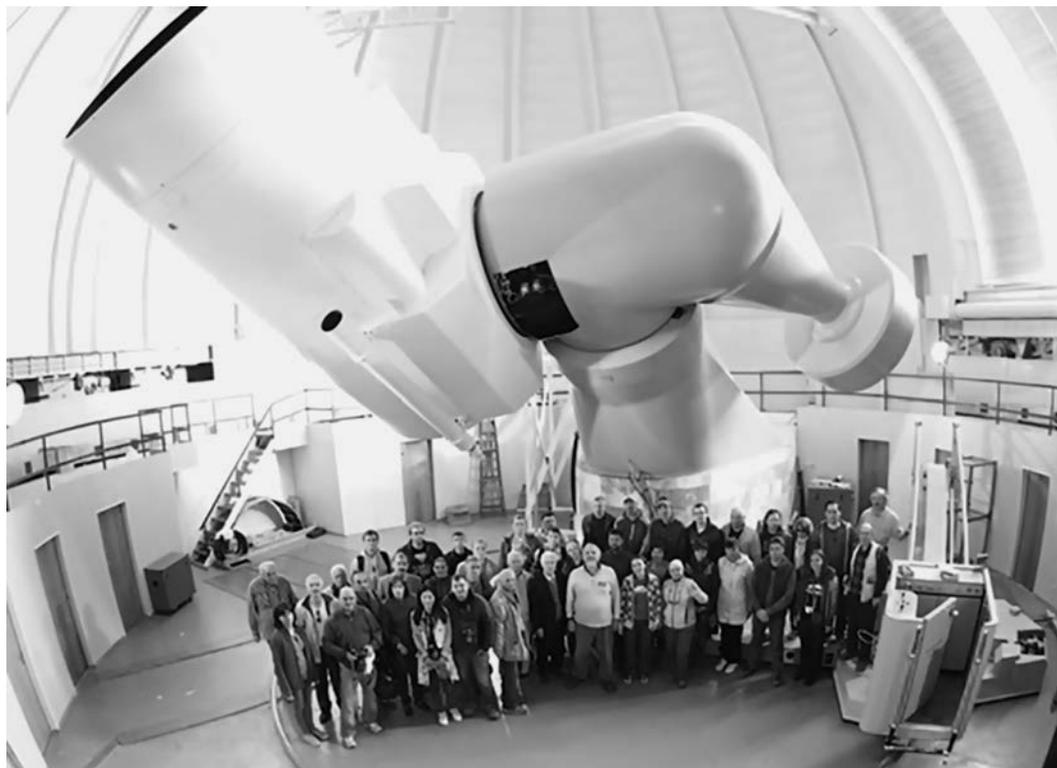
– пыль и метеороидные потоки;

– ИСЗ и космический мусор;

– радарные и оптические наблюдения;

Участники конференции в пос. Терскол.





- мониторинг космического пространства и создание каталогов;

- моделирование околоземного космического пространства (ОКП);

- определение орбит и прогнозирование орбитальных событий (в том числе оценка риска падения);

- состояние засоренности ОКП и экологические проблемы; пути уменьшения засоренности.

В работе конференции принимали участие 87 ученых и специалистов (а также аспирантов и студентов) из России, стран Европы, Азии и Америки; это представители 62 научных, промышленных и образовательных

предприятий и организаций России и стран Ближнего и Дальнего зарубежья. На конференции было заслушано 115 устных и 28 стендовых докладов. Труды Международной конференции “ОЗА – 2015” опубликованы и по запросу в ИНАСАН могут быть получены желающими. Часть работ была отобрана членами научного оргкомитета конференции для их опубликования в журнале “Кинематика и физика небесных тел”, входящем в международную систему цитирования Web of Science.

Конференция была поддержана Федеральным агентством научных орга-

Участники конференции на фоне главного инструмента Терскольской обсерватории – телескопа “Цейс – 2000”.

низаций (ФАНО) и Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ).

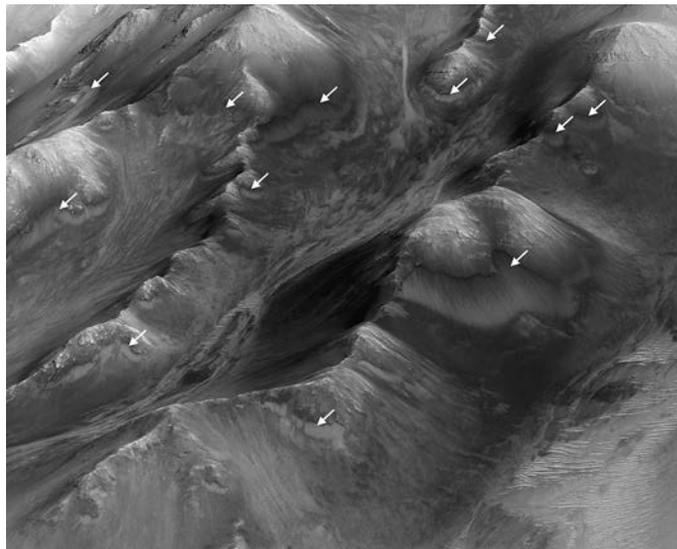
Участникам конференции запомнились не только содержательные научные дискуссии, но и интересные экскурсии на обсерваторию, располагающуюся на пике Терскол (3150 м над уровнем моря) и на Баканскую нейтринную обсерваторию.

*П.А. ЛЁВКИНА
ИНАСАН*

Темные полосы на Марсе

Продолжаются исследования сезонных изменений на Марсе – потоков жидкости, прорывающей летом на поверхность на внутренних стенках ударных кратеров, на склонах каньонов и холмов, а затем исчезающей во время похолодания. Впервые об их существовании стало известно в 2011 г. (Земля и Вселенная, 2012, № 2, с. 110–111). Следы воды в виде полос сфотографировал в 2015 г. с помощью камеры HiRISE ИСМ “Марсианский орбитальный разведчик” (“Mars Reconnaissance Orbiter”, “MRO”). Каждый кадр съемки охватывает область $5,4 \times 12$ км. Вскоре присутствие потоков было подтверждено и на горе Эолида, у подножья которой в настоящее время работает марсоход “Кьюриосити” (“Curiosity”; Земля и Вселенная, 2015, № 1, с. 50–51).

В настоящее время изучается появление темных полос на склонах системы гигантских каньонов на Марсе, названных периодическими линиями на склонах



Фрагмент Долины Маринера (Valles Marineris). Стрелками указаны места появления темных полос во время теплых сезонов. Снимок получен в июне 2016 г. с помощью фотокамеры HiRISE AMC “Марсианский орбитальный разведчик”. Фото NASA/JPL.

(recurring slope lineae, RSL). Например, около экватора Марса выявлены тысячи подобных образований в 41 области системы каньонов Долины Маринера (Valles Marineris). Маловероятно, что здесь присутствует тонкий лед, который мог растаять при повышении температуры. Скорее всего, вода осаждается из атмосферы в виде гидратированных солей, которые способны связываться с водой в виде пара и аккумулировать жидкость на поверхности. После испарения воды

появляются полосы в виде отложений солей. Если RSL в действительности окажутся индикаторами присутствия воды, то это расширит границы ее существования. Согласно расчетам, в Долине Маринера должно быть 30–100 тыс. м³ воды. Над этой областью ее существенно больше, но неизвестен процесс, который мог бы так эффективно извлекать из нее воду.

Пресс-релиз NASA,
7 июля 2016 г.

48-Я ОСНОВНАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ НА МКС

18 июня 2016 г. спускаемый аппарат КК “Союз ТМА-19М” с экипажем 47-й основной экспедиции (МКС-47; Земля и Вселенная, 2016, № 4, с. 109–111) в составе командира корабля Ю.И. Маленченко, бортинженера Т. Пика (ESA, Великобритания) и командира МКС-47 Т. Копры (США) благополучно приземлился в 150 км юго-восточнее г. Джекказган (Казахстан). Экипаж полностью выполнил программу научно-прикладных исследований в течение 185 сут 22 ч. Ю.И. Маленченко установили рекорд длительности за шесть

полетов – 827 сут 09 ч, совершил выход в открытый космос длительностью 4 ч 43 мин (всего – 6 выходов, 34 ч 50 мин). Т. Копра выполнил два выхода в открытый космос общей продолжительностью 7 ч 59 мин, Т. Пик – один (4 ч 43 мин). В ходе полета экипаж принял четыре грузовых корабля “Прогресс МС-02” (Россия), “Сигнус-6”, “Дрэгон-8 и -9” (США).

7 июля 2016 г. с космодрома Байконур стартовала РН “Союз-ФГ” с КК “Союз МС-01”. Транспортный пилотируемый корабль серии “Союз МС” является новой модернизированной версией космического корабля “Союз ТМА-М”; они оснащены усовершенствованной системой управления движением и навигацией; улучшена система электропитания: увеличена площадь и мощность фотоэлементов – солнечные батареи вырабатывают больше

энергии; используются новые системы – телевизионная, бортовых измерений, связи и пеленгации. Это – 128-й пилотируемый полет корабля серии “Союз”. На борту “Союза МС-01” находился экипаж 48-й основной экспедиции на МКС: командир корабля и командир МКС-49 А.А. Иванишин (Россия), бортинженер-1 Т. Ониси (Япония) и бортинженер-2 К. Рубинс (США). Полет к станции происходил по 34-витковой (двухсуточной) схеме, стыковка произошла 9 июля в автоматическом режиме с модулем “Рассвет” (МИМ-1). Этот экипаж будет работать в течение 130 сут – до 14 ноября 2016 г. А.А. Иванишин выполняет второй полет, Т. Ониси и К. Рубинс – первый.

Анатолий Алексеевич Иванишин (522-й астронавт мира, 112-й космонавт России) родился 15 января 1969 г. в Иркутске. В 1987 г. со второй попытки поступил в Черниговское высшее военное авиационное училище летчиков и в 1991 г. окончил его с золотой медалью. В 1991–2003 гг. проходил службу в строевых частях ВВС. Военный летчик 3-го класса, инструктор парашютно-десантной подготовки, гвардии полковник авиации. В 2003 г. окончил Московский государственный университет экономики. В 2003 г. зачислен в отряд космонавтов ЦПК им. Ю.А. Гагарина, проходил подготовку в нескольких экипажах МКС. Совершил космический полет в ноябре 2011 г. – апреле 2012 г. продолжительностью 165 сут 07 ч на КК “Союз ТМА-22”



Экипаж нового КК “Союз МС-01” и 48-й основной экспедиции на МКС: К. Рубинс (США), А.А. Иванишин (Россия) и Т. Ониси (Япония). Фото NASA.

и МКС в качестве бортинженера МКС-29. Герой России.

Токуя Ониси (543-й астронавт мира, 11-й астронавт Японии) родился 22 декабря 1975 г. в Токио. В 1998 г. окончил Токийский университет и получил степень инженера в области авиационного и космического машиностроения. Начиная с 1998 г., работал в авиакомпании “Ниппон эрвейс” (ANA) в управлении обслуживания пассажиров в токийском международном аэропорту Ханеда. Окончил двухгодичные курсы начальной летной подготовки в Калифорнии (США) и годичную школу повышения летной подготовки в Токио. В 2003–2009 гг. работал пилотом пассажирского самолета “Боинг-767”. В 2009 г. зачислен в отряд астронавтов Японского космического агентства JAXA, приступил к общей космической подготовке в космическом центре Японии, которую закончил в Космическом центре им. Л. Джонсона вместе с астронавтами NASA.

Кэтлин Рубинс (Kathleen H. Rubins; 544-й астронавт мира, 336-й астронавт США) родилась 14 октября 1978 г. в г. Фармингтон (штат Коннектикут). В 1999 г. получила степень бакалавра по молекулярной биологии в Калифорнийском университете, в 2005 г. – доктора философии

в области микробиологии в Стэнфордском университете. Работала в Институте биологических исследований над проблемой изучения вируса иммунодефицита человека, в Научно-исследовательском медицинском институте инфекционных заболеваний Армии США, ведущим исследователем в Уайтхедовском институте биомедицинских исследований при Массачусетском технологическом институте, участвовала в проведении исследовательских работ в Конго. В 2009 г. зачислена в отряд астронавтов NASA.

В ходе полета на “Союзе МС-01” экипаж отрабатывал новые системы навигации и управления, установленные на корабле. В программу МКС-48/49 включены прием КК “Союз МС-02”, грузовых кораблей “Прогресс МС-03 и МС-04” (Россия), японского “Конотори-6” и американского частного “Дрэгон-9”, выполнение более 40 экспериментов по 6 направлениям: 15 – человек в космосе (в основном медицина), 10 – технологии освоения космоса, 7 – космическая биология и биотехнология, по 3 – изучение Земли из космоса (новый – “Дубрава”), образование и популяризация космических исследований, 2 – физико-химические процессы и материалы, 1 – контрактные работы.

А.А. Иванишин примет участие в российско-американском эксперименте “Spaceshift” (космическое изменение), в ходе которого будет изучаться влияние невесомости на зрение участников космического полета. Результаты эксперимента впоследствии найдут применение при диагностике и лечении некоторых заболеваний глаз.

В июле – сентябре 2016 г. на борту МКС работала 48/49-я основная экспедиция: А.Н. Овчинин, О.И. Скрипочка, А.А. Иванишин (Россия), Дж. Уильямс, К. Рубинс (США) и Т. Ониси (Япония). Посадка экипажа МКС-47 на корабле КК “Союз ТМА-20М” в составе А.Н. Овчинин, О.И. Скрипочка и Дж. Уильямс произошла 7 сентября 2016 г. На 23 сентября 2016 г. был намечен старт КК “Союз МС-02” с экипажем МКС-49 – С.Н. Рыжиков, А.И. Борисенко (Россия) и Р. Кимброу (США). Из-за сбоя в кабеле системы взаимодействия с ракетой-носителем старт корабля состоялся 19 октября 2016 г. В декабре 2016 г. планируется запустить КК “Союз МС-03” с экипажем МКС-50 – О.В. Новицкий (Россия), Т. Песке (ESA, Франция) и П. Уитсон (США).

По материалам
Роскосмоса,
ЦУП-М и NASA

НЕБЕСНЫЙ КАЛЕНДАРЬ: январь – февраль 2017 г.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Дата	Время, ч	Событие
Январь		
1	6	Марс проходит в 1' южнее Нептуна
2	7	Луна проходит в 2° севернее Венеры
3	6	Луна проходит в 1° южнее Марса
3	14	<i>Максимум метеорного потока Квадрантиды</i>
4	14	Земля в перигелии
5	19	Луна в первой четверти
8	14	Меркурий переходит от попятного движения к прямому
10	5	Луна в перигее
12	11	Полнолуние
12	11	Венера в наибольшей восточной элонгации (47°)
12	21	Венера проходит в 0,4° севернее Нептуна
19	7	Луна проходит в 2° севернее Юпитера
19	13	Меркурий в наибольшей западной элонгации (24°)
19	22	Луна в последней четверти
22	0	Луна в апогее
24	10	Луна проходит в 3° севернее Сатурна
28	0	Новолуние
31	17	Луна проходит в 4° южнее Венеры
Февраль		
1	2	Луна проходит в 3° южнее Марса
4	4	Луна в первой четверти
6	13	Луна в перигее
6	19	Юпитер переходит от прямого движения к попятному
11	0	Полнолуние
15	16	Луна проходит в 2° севернее Юпитера
18	19	Луна в последней четверти
18	21	Луна в апогее
20	23	Луна проходит в 3° севернее Сатурна
26	14	Новолуние
27	0	Марс проходит в 0,6° южнее Урана

Примечание. Во всех таблицах и в тексте дано Всемирное время (UT), кроме особо оговоренных случаев.

ЭФЕМЕРИДА СОЛНЦА

Дата	α		δ		45°		55°		65°	
					восход	заход	восход	заход	восход	заход
	ч	м	°	'	ч : м	ч : м	ч : м	ч : м	ч : м	ч : м
Январь 01	18	46	-23	01	07:40	16:31	08:26	15:45	10:08	14:03
11	19	30	-21	50	07:38	16:42	08:21	15:59	09:50	14:29
21	20	12	-19	57	07:32	16:54	08:10	16:17	09:24	15:03
31	20	54	-17	27	07:22	17:08	07:54	16:37	08:53	15:38
Февраль 10	21	34	-14	26	07:10	17:23	07:35	16:58	08:19	16:13
20	22	13	-11	01	06:55	17:37	07:13	17:19	07:44	16:47
Март 02	22	51	-07	18	06:38	17:51	06:49	17:39	07:08	17:20

Примечание. В таблице дано среднее солнечное время.

Пример. Определить время восхода Солнца 14 января 2017 г. в Санкт-Петербурге (широта – $59^{\circ}57'$, долгота – $2^{\text{ч}} 01^{\text{м}}$, 2-я часовая зона – московское время УТ + 3^ч). Пользуясь *Таблицей II*, интерполируем по широте значение времени восхода Солнца на 14 января, получаем $8^{\text{ч}} 50^{\text{м}}$. Вычтем из него долготу места, прибавим 3^ч, получим $9^{\text{ч}} 49^{\text{м}}$.

Таблица III

ЭФЕМЕРИДЫ ПЛАНЕТ

Дата	α		δ		m	d	F	Продолжительность видимости для разных широт, ч			Период видимости	
								45°	55°	65°		
	ч	м	°	'	"	"	"	"	"			
Меркурий												
Январь 01	18	13,0	-20	22	3,3	9,8	0,05	–	–	–		
11	17	56,1	-20	46	0,0	7,9	0,41	0,9	–	–	Утро	
21	18	29,6	-22	10	-0,2	6,4	0,66	0,8	–	–	Утро	
31	19	23,5	-22	26	-0,2	5,6	0,80	–	–	–		
Февраль 10	20	25,4	-20	45	-0,3	5,1	0,88	–	–	–		
20	21	30,6	-16	54	-0,6	4,9	0,94	–	–	–		
Март 02	22	38,0	-10	48	-1,4	4,8	0,99	–	–	–		
Венера												
Январь 01	21	59,9	-13	47	-4,4	21,9	0,57	4,2	4,7	5,5	Вечер	
11	22	39,1	-09	14	-4,5	24,2	0,52	4,4	4,9	6,1	Вечер	
21	23	14,5	-04	30	-4,6	27,1	0,46	4,5	5,1	6,3	Вечер	
31	23	45,6	+00	13	-4,7	30,7	0,40	4,5	5,1	6,3	Вечер	
Февраль 10	00	11,3	+04	38	-4,8	35,3	0,33	4,3	4,9	6,1	Вечер	
20	00	29,3	+08	25	-4,8	41,1	0,25	3,9	4,5	5,7	Вечер	
Март 02	00	36,7	+11	05	-4,8	48,0	0,16	3,3	3,9	5,2	Вечер	

Таблица III (окончание)

Дата	α		δ		m	d	F	Продолжительность видимости для разных широт, ч			Период видимос- ти	
	ч	м	°	'				45°	55°	65°		
Марс												
Январь	01	22	44,8	-08	54	0,9	5,7	0,90	4,5	4,8	5,3	Вечер
	11	23	12,7	-05	51	1,0	5,5	0,91	4,3	4,7	5,3	Вечер
	21	23	40,1	-02	45	1,0	5,3	0,92	4,1	4,5	5,1	Вечер
	31	00	07,3	+00	22	1,1	5,1	0,92	3,9	4,3	4,9	Вечер
Февраль	10	00	34,4	+03	27	1,2	4,9	0,93	3,6	4,0	4,6	Вечер
	20	01	01,5	+06	27	1,2	4,7	0,94	3,4	3,7	4,3	Вечер
Март	02	01	28,6	+09	19	1,3	4,6	0,95	3,1	3,5	4,0	Вечер
Юпитер												
Январь	01	13	19,2	-06	58	-1,8	35,5	0,99	6,7	7,2	8,1	Утро
	11	13	22,7	-07	17	-1,9	36,6	0,99	7,2	7,7	8,4	Утро
	21	13	25,2	-07	29	-1,9	37,7	0,99	7,7	8,1	8,6	Утро
	31	13	26,6	-07	35	-2,0	38,9	0,99	8,2	8,5	8,8	Утро
Февраль	10	13	26,8	-07	33	-2,1	40,0	0,99	8,7	8,8	8,9	Утро
	20	13	25,8	-07	25	-2,1	41,2	1,00	9,1	9,1	9,0	Утро
Март	02	13	23,7	-07	10	-2,2	42,2	1,00	9,5	9,4	9,2	Ночь
Сатурн												
Январь	01	17	21,8	-21	52	0,5	15,2	1,00	-	-	-	
	11	17	26,6	-21	56	0,5	15,3	1,00	1,1	0,5	-	Утро
	21	17	31,1	-21	59	0,5	15,4	1,00	1,7	1,2	-	Утро
	31	17	35,3	-22	02	0,5	15,6	1,00	2,2	1,6	-	Утро
Февраль	10	17	39,1	-22	04	0,5	15,8	1,00	2,6	2,0	-	Утро
	20	17	42,4	-22	05	0,5	16,0	1,00	3,1	2,3	-	Утро
Март	02	17	45,1	-22	05	0,5	16,2	1,00	3,4	2,6	-	Утро

Примечание. Координаты даны на момент 0^ч по Всемирному времени, F – фаза планеты.

ВИДИМОСТЬ ПЛАНЕТ

Меркурий в начале января удаляется от Солнца. 8 января он переходит от попятного движения к прямому, его блеск увеличивается и ближайшую к Солнцу планету можно увидеть утром с 11 по 21 января в течение менее 1 ч в южных широтах нашей страны. 19 января Меркурий окажется в наибольшей западной элонгации (24°). Блеск планеты в период видимости около 0^м и немного ярче, видимый угловой диаметр уменьшается с 7,9'' до 6,4''. В феврале Меркурий приближается к Солнцу и невидим.

Венера в самом начале года окажется в созвездии Водолея, 23 января перейдет в созвездие Рыбы. Она видна в вечернее время в начале января в течение 4,2–5,5 ч, в начале марта – 3,3–5,2 ч. Венера постепенно становится ближе к Земле, ее блеск чуть увеличится с -4,4^м до -4,8^м, видимый угловой диаметр растет с 21,9'' до 48,0''. В небольшой телескоп 12 января можно увидеть вблизи нее Нептун. Луна окажется около Венеры 2 и 31 января.

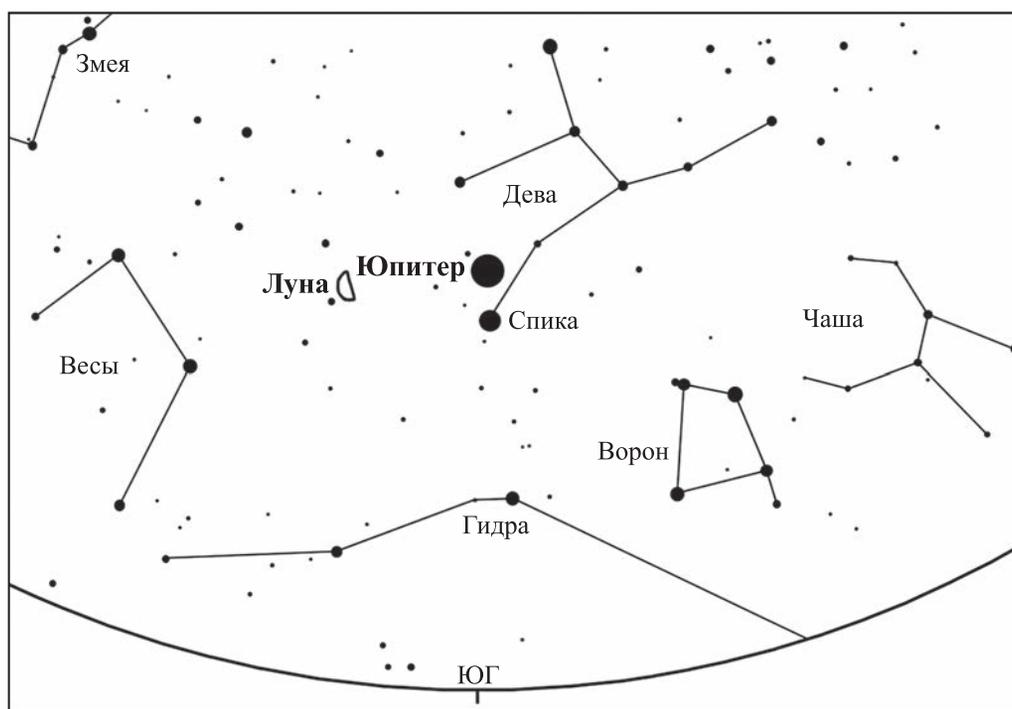
Марс пройдет 1 января в 1' южнее Нептуна – это тесное сближение планет

можно увидеть в небольшой телескоп! В начале года Марс появляется вечером, перемещается сначала по созвездию Водолея, а 19 января переходит в Рыбы. Продолжительность видимости планеты постепенно сокращается с 4,2–5,5 ч в январе до 3,3–5,2 ч в начале марта. Марс постепенно удаляется от Земли, его видимый угловой диаметр уменьшается с 5,7" до 4,7", блеск падает с 0,9^м до 1,3^м. 27 февраля Марс пройдет вблизи Урана. Луна окажется вблизи красной планеты 3 января и 1 февраля.

Юпитер перемещается по созвездию Девы в 3–4° севернее звезды Спика (α Девы) и виден во второй половине ночи. Продолжительность видимости планеты-гиганта (в зависимости от широты места наблюдения) увеличивается

с 6,7–8,1 ч в январе до 9,5–9,2 ч в начале марта. Блеск Юпитера становится немного ярче с –1,8^м до –2,2^м, видимый угловой диаметр увеличивается с 35,5" до 42,2". 9 февраля Юпитер переходит от прямого движения к попятному. Луна окажется вблизи Юпитера 19 января и 15 февраля.

Сатурн появится утром после 11 января в средних и южных широтах России в созвездии Змееносца, а 24 февраля перейдет в созвездие Стрельца. Продолжительность видимости планеты увеличивается в средних широтах 11 января – 2 марта с 0,5 ч до 2,6 ч, в южных широтах – с 1,1 ч до 3,4 ч. Блеск Сатурна будет 0,5^м, видимый угловой диаметр увеличится с 15,3" до 16,2". Луна окажется вблизи планеты-гиганта 24 января и 20 февраля.



Вид южной части звездного неба в Москве 20 января 2017 г. в 6^ч 00^м по московскому времени. Отмечено положение Юпитера и Луны.

МЕТЕОРНЫЙ ПОТОК КВАДРАНТИДЫ

3 января в 14 ч по Гринвичу ожидается максимум метеорного потока **Квадрантиды**, он активен 1–5 января 2017 г. Радиант располагается в северной части созвездия Волопаса около границы с созвездиями Геркулеса и Дракона ($\alpha = 230^\circ$, $\delta = +49^\circ$) и поднимается высоко над горизонтом в предутренние часы. Растущая Луна не мешает наблюдениям. Максимальная

активность потока непродолжительна – лишь несколько часов, по прогнозам зенитное часовое число приблизится к 120. Наблюдать Квадрантиды лучше всего, начиная с 23 ч по местному времени и до рассвета, при этом радиант набирает высоту в течение всего указанного периода. В 2016 г. максимальное зенитное часовое число потока достигло 123.

В. И. ЩИВЬЁВ

г. Балашиха,

Московская область

Информация

Самая большая звезда во Вселенной

В настоящее время самой большой по размерам звездой считается UY Scuti – переменный с периодом пульсации в 740 сут красный гипергигант массой 7–10 M_\odot , находящийся в 9500 св. годах от нас в созвездии Щита. Это самые редкие (их всего 10) и короткоживущие звезды (несколько сотен тысяч или миллионов лет). Она

удалена от нас более чем на 9500 св. лет и состоит по большей части из водорода и гелия, а также ряда более тяжелых элементов. По химическому составу UY Scuti напоминает наше Солнце, но радиусом $1708 \pm 192 R_\odot$, или почти $1,2 \times 10^{12}$ км, в результате чего ее окружность составляет более 7,5 млрд км! Если поместить UY Scuti вместо Солнца, то ее диск диаметром 15,9 а.е. будет больше орбиты Юпитера. Объем звезды примерно в 5 млрд раз больше объема Солнца и в 340 тыс. его ярче! Учитывая огромный размер и массу, плотность UY Scuti составит всего 7×10^{-6} кг/м³, что более чем в миллиард раз меньше

плотности воды. Более чем в миллион раз менее плотная, чем земная атмосфера, UY Scuti, подобно воздушному шару, летала бы в воздухе. Температура на ее поверхности составляет 3365 ± 134 К, а жить ей осталось всего два миллиона лет; затем она взорвется как сверхновая и сколлапсирует в черную дыру. Чрезмерное количество космической пыли скрывает от нас UY Щита. Но не будь такого количества пыли, звезда была бы пятым по величине объектом, видимым невооруженным глазом.

По материалам
интернет-сайта “Quasar”,
7 июля 2016 г.

Сейсмичность Земли в первом полугодии 2016 г.

В январе – июне 2016 г. в Службе срочных до-несений Геофизической службы РАН зарегистрировано 2260 произошедших землетрясений, из них 29 имели магнитуды $M \geq 6,5$.

На территории России в этот период наблюдалась сравнительно невысокая сейсмическая активность. На Дальнем Востоке (Камчатка, Курилы, Сахалин) произошло около 170 землетрясений, в Восточной Сибири (в основном Байкальский регион) – около 30, на Кавказе – около 100. Наиболее активным по-прежнему был Тихоокеанский сейсмический пояс (“огненное кольцо”), где отмечено 1300 землетрясений.

Рассмотрим несколько наиболее сильных землетрясений, произошедших на территории России в сейсмически активных регионах.

У восточного побережья Камчатки имели место два землетрясения (30 января 2016 г. и 20 марта 2016 г.) с магнитудами $M = 6,6$ и $6,5$ соответственно. Очаг первого

находился на восточном побережье Камчатки, на глубине 170 км, в 61 км к юго-востоку от Пуцино, в 80 км к северо-востоку от Елизово и в 93 км к северо-востоку от Петропавловска-Камчатского и в 302 км к юго-западу от Ключей. Наиболее сильно землетрясение ощущалось на маяках Круглый и Водопадный (5–6 баллов), в Петропавловске – не более 4-х – 5-ти баллов и в Северо-Курильске – 3–4 балла. Этот район Камчатки характеризуется высокой сейсмичностью: здесь 24 ноября 1971 г. произошло одно из сильнейших разрушительных землетрясений – Петропавловское с $M = 7,3$, а 15 декабря 1971 г. – Усть-Камчатское с $M = 7,7$. Землетрясения ощущались с силой до 7–8 баллов, а Усть-Камчатское вызвало слабое цунами в этом населенном пункте (сб. “Землетрясения в СССР в 1971 году”: изд-во “Наука” М., 1975). Второе случилось у восточного побережья Камчатки, на глубине 60 км, в 245 км

к югу от Усть-Камчатска; в 289 км к юго-востоку от Ключей и в 308 км к северо-востоку от Петропавловска-Камчатского, где оно ощущалось силой 2–3 балла.

3 февраля 2016 г. очаг землетрясения в Бурятии ($M = 4,5$) находился в озере Байкал, на глубине 10 км, в 39 км к юго-востоку от Харанцов, в 86 км к востоку от Еланцов, в 120 км к северу от Улан-Удэ и в 238 км к северо-востоку от Иркутска. Землетрясение ощущалось в Еланцах силой 5 баллов, в Харанцах силой 4–5 баллов, в Иркутске, Ангарске, Усолье-Сибирском, Шелехове, Улан-Удэ – в 4 балла. Его эпицентр расположен в 50 км к юго-западу от эпицентра землетрясения 6 апреля 2015 г. с $M = 4,8$ (Земля и Вселенная, 2015, № 6).

13 мая 2016 г. землетрясение в Дагестане имело $M = 5,3$ и глубину очага 70 км. Эпицентр находился в 17 км к юго-западу от Хасавюрта, в 30 км от Чиркейского водохранилища, в 38 км

к северо-востоку от Ведено. В Хасавьюрте и Махачкале его сила была 4 балла. В этом районе они случались неоднократно. Например, 16 апреля 2013 г. в 125 км к юго-востоку от землетрясения 13 мая 2016 г. на глубине 10 км произошло землетрясение с $M = 5,1$ (Земля и Вселенная, 2013, № 6).

26 июня 2016 г. на границе Кыргызстан – Таджикистан произошло сильное землетрясение с $M = 6,6$. Его очаг располагался на глубине 15 км, в 128 км к юго-востоку от г. Ош (Кыргызстан), в 170 км к юго-востоку от Ферганы (Узбекистан) и в 223 км к западу от Каши (Китай). Его эпицентр был расположен в 137 км к северо-востоку от эпицентра мощного землетрясения 7 декабря 2015 г. с $M = 7,5$ (Земля и Вселенная, 2015, № 6).

3 января 2016 г. в Индии отмечено разрушительное землетрясение с $M = 6,5$. Очаг находился на северо-востоке Индии, в пограничной области Мьянма – Индия, на глубине 50 км, в 29 км к западу от Импхала (Индия) и в 240 км к северу от Хакхи (Мьянма). По данным ИТАР–ТАСС, 11 человек погибли, более 200 человек получили ранения. Наибольший ущерб нанесен городу Импхал – там были повреждены линии электропередачи, телефонная связь, разрушены несколько десятков домов.

6 января 2016 г. в Северной Корее был произведен подземный ядерный взрыв магнитудой 5,2. В Геофизической службе РАН определены время возникновения взрыва – 1 ч 29 м по Гринвичу (4 ч 29 м по московскому времени). Эпицентр взрыва находился в северо-восточной части Северной Кореи (в районе ядерного полигона Пунгери), в 81 км к юго-западу от Чхонджина, в 314 км к юго-западу от Владивостока, в 378 км к северо-востоку от Пхеньяна. В этом же районе Северной Кореи были зарегистрированы взрывы 25 мая 2009 г. с магнитудой $M = 5,0$ (Земля и Вселенная, 2010, № 1) и 12 февраля 2013 г. с магнитудой $M = 5,3$ (Земля и Вселенная, 2013, № 6).

Наиболее сильные землетрясения произошли в Тихоокеанском сейсмическом поясе в Японии. На стыке Евразийской и Филиппинской тектонических плит в одном из сейсмически активных регионов расположен о. Тайвань – здесь происходят разрушительные землетрясения. С сентября 1999 г. по февраль 2016 г. на территории Тайваня и прилегающей акватории зафиксировано около 300 землетрясений с $M \geq 5$, из них 22 – с $M = 6–6,5$.

14 апреля 2016 г. на японском острове Кюсю на глубине 10 км зарегистрировано землетря-

сение с $M = 6,3$. Эпицентр располагался в 62 км к востоку от Нагасаки, в 88 км к югу от Фукуоки, в 237 км к юго-западу от Мацуяма. По данным ИТАР–ТАСС в результате землетрясения погибли 9 человек, почти 1000 доставлены в больницы. Наибольший ущерб зафиксирован в пос. Масики, где обрушились десятки зданий. В спасательных операциях здесь принимали участие около 5 тыс. полицейских, военнослужащих, пожарных и спасателей. Для предотвращения взрывов и пожаров власти перекрыли подачу газа примерно в 4,5 тысячи домов. Работа железнодорожного транспорта была нарушена, ограничено движение и по скоростным автомобильным магистралям. Здесь же 20 марта 2015 г. на удалении 90 км на северо-запад произошло землетрясение с магнитудой $M = 7$; более 1000 человек получили серьезные травмы.

На следующий день, 15 апреля 2016 г., там же (в 25 км к юго-востоку от эпицентра 14 апреля 2016 г.) произошло второе разрушительное землетрясение с $M = 7,4$ и глубиной очага 10 км. Эпицентр находился в 78 км к востоку от Нагасаки, в 113 км к югу от Фукуоки, в 240 км к юго-западу от Мацуяма. В результате основного толчка и серии афтершоков в наиболее пострадавшей

префектуре Кумамото погибли 42 человека, ранены более 1000 человек. Более 150 тыс. местных жителей были вынуждены покинуть свои дома. Более 400 домов разрушены полностью, повреждены 1200 зданий.

На Тайване 5 февраля 2016 г. произошло сильное землетрясение с магнитудой $M = 6,5$, повлекшее за собой многочисленные жертвы (погибло более 100 человек), зафиксированы значительные разрушения.

Землетрясение ощутили на всей территории Тайваня и в Китае. 20 сентября 1999 г. в 120 км к северо-востоку от землетрясения 5 февраля 2016 г. произошло катастрофическое землетрясение с $M = 7,7$. Оно стало причиной гибели более 1500 человек. Практически полностью был разрушен г. Пули (Тайвань). Событие 1999 г. по числу погибших было вторым в истории Тайваня. В апреле 1935 г. к северу от Тайчжун при землетрясении погибло более 3200 человек. Несколько сот человек погибло при землетрясении с $M = 7,3$ в декабре 1941 г. в 55 км

к северо-западу от землетрясения в феврале 2016 г.

16 апреля 2016 г. на побережье Эквадора произошло разрушительное землетрясение с $M = 7,5$. Очаг находился на северо-западном побережье Эквадора, на глубине 20 км, в 75 км к юго-западу от Эсмеральдаса, в 163 км к северо-востоку от Портовьехо, в 170 км к северо-западу от столицы Кито. Погибли 413 человек, свыше 2 тысяч пострадали. Уничтожено много зданий, серьезный ущерб нанесен инфраструктуре населенных пунктов. Наиболее сильно в результате землетрясения пострадали города Портовьехо, Манта и Педерналес. Власти ряда стран региона (в том числе Мексики, Колумбии и Сальвадора) направили в Эквадор гуманитарную помощь, врачей, спасателей и технику. В этом районе известны катастрофические землетрясения; например, 31 января 1906 г. около побережья Эквадора магнитудой в 8,8 балла. В результате мощных подземных толчков возникло цунами, которое обрушилось на все

побережье Центральной Америки, погибло более тысячи человек.

8 мая 2016 г. на побережье Эквадора произошло еще одно сильное землетрясение с магнитудой $M = 6,5$, менее чем через 9 ч – второй толчок с $M = 6,6$. Ряд сейсмологов эти два землетрясения с $M = 6,5$ и $M = 6,6$ относят к наиболее сильным афтершокам разрушительного землетрясения 16 апреля 2016 г. В результате около 100 человек пострадало. Несколько населенных пунктов остались без электричества. Землетрясение ощущалось в Чили, Аргентине, Бразилии и Перу.

Параметры всех землетрясений представлены на информационном сервере Геофизической службы РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>).

О.Е. СТАРОВОЙТ,
кандидат физико-математических наук

Л.С. ЧЕПКУНАС,
кандидат физико-математических наук

М.В. КОЛОМИЕЦ
Геофизическая служба РАН

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И ЗАМЕТОК, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ “ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ” в 2016 г.

Ананьева В.И. “Мессенджер” изучает Меркурий	4	Черепашук А.М. Гравитационные волны и черные дыры	4
Балега Ю. Ю. К 50-летию Специальной астрофизической обсерватории РАН	5	Чугай Н.Н., Машонкина Л.И., Пахомов Ю.В., Рябчикова Т.А. Раскрываем секреты звездного света	6
Басикало Д.В., Кайгородов П.О., Фадеев Н.А., Черенков А.А. Аккреционные процессы в двойных звездах	6	Шематович В.И. Атмосферы экзопланет	2
Богод В.М. Исследования атмосферы Солнца	5	Шустов Б.М. К 80-летию Института астрономии РАН	6
Верходанов О.В., Парийский Ю. Н. РАТАН-600 и радиогалактики	5	ЛЮДИ НАУКИ	
Вибе Д.З. Молекулы в космосе	6	Академик Владимир Евгеньевич Фортов (к 70-летию со дня рождения)	2
Ихсанов Н.Р. Взрывные переменные звезды: от поляров до суперпропеллеров	4	Герасютин С.А. Херберт Фридман (к 100-летию со дня рождения)	4
Кузин С.П., Эбауэр К.В., Ключиков А.А. Использование методов космической геодезии в геодинاميке	6	Гиндилис Л.М. Иосиф Самуилович Шкловский (к 100-летию со дня рождения)	5
Клочкова В.Г. Телескоп БТА в поиске звездного нуклеосинтеза	5	Еремеева А.И. Аристотель (к 2400-летию со дня рождения)	3
Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В. Исследование активных ядер галактик	5	Исследователь странников Вселенной (к 70-летию профессора М.И. Панасюка)	1
Перов С.П., Костко О.К. Нижняя ионосфера (натурные эксперименты)	1	Наговицын Ю.А. Рудольф Вольф (к 200-летию со дня рождения)	4
Поляченко Е.В., Машонкина Л.И., Хоперсков С.А. Процесс в исследовании динамики и химии галактик	6	Памяти Игоря Михайловича Гуревича	3
Родионов Д.С., Зелёный Л.М., Кораблёв О.И. Проект “ЭкзоМарс”	3	Памяти Юрия Владимировича Баркина	3
Рыхлова Л.В. Околоземная астрономия	6	Семёнова Т.А., Темирова А.В. Юрий Николаевич Парийский	5
Сачков М.Е. Современное состояние метеорной астрономии	1	Шустов Б.М., Сачков М.Е. Памяти Александра Алексеевича Боярчука	1
Сидоренков Н.С. Геодинамические причины декадных изменений климата	3	ИСТОРИЯ НАУКИ	
Трушкин С.А. Радиоизлучение микроквazarов	5	Герасютин С.А. Исследование кометы Галлея (к 30-летию полета АМС “Вега” и “Джотто”)	2
Фортов В.Е. Эксперимент “Плазменный кристалл” на Международной космической станции	2	Желнина Т.Н. Из истории орбитальных станций до 1957 г. (окончание)	1
		Масликов С.Ю. Астролябия Петра Первого	3
		Менцин Ю.Л. Роль А.Н. Драшусова и Б.Я Швейцера в истории Астрономической обсерватории Московского университета	4

Судаков В.С., Сударченко А.П. Самый мощный в мире жидкостный ракетный двигатель РД-170	3	Шивьёв В.И. Небесный календарь: май—июнь 2016 г	2
СИМПОЗИУМЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СЪЕЗДЫ		Шивьёв В.И. Небесный календарь: июль—август 2016 г.	3
Бочкарёв Н.Г., Самусь Н.Н. Юбилей Астро	1	Шивьёв В.И. Небесный календарь: сентябрь—октябрь 2016 г.	4
Галеев А.И., Гаврилов М.Г. Международная астрономическая олимпиада в Казани	4	Шивьёв В.И. Небесный календарь: ноябрь—декабрь 2016 г.	5
Конференция по астрофизике	3	Шивьёв В.И. Небесный календарь: январь—февраль 2017 г.	6
Лёвкина П.А. “Околоземная астрономия—2015”	6	ХРОНИКА СЕЙСМИЧНОСТИ ЗЕМЛИ	
Нефедьев Ю.А., Галеев А.И. Наблюдение и исследование Луны, планет и их спутников	2	Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В. Сейсмичность Земли во втором полугодии 2015 г.	3
Соколов В.В. Форум в России по нейтринным сигналам	5	Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В. Сейсмичность Земли в первом полугодии 2016 г.	6
АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ		НОВОСТИ НАУКИ И ДРУГАЯ ИНФОРМАЦИЯ:	
Угольников О.С. Астрономическая олимпиада—2015	1	Астрономия	
КОСМОДРОМЫ МИРА		Активное ядро галактики	5
Герасютин С.А. Байконуру—60!	1	Взаимодействующая галактика	2
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО		Выяснена причина взрыва сверхновой	4
Длужневская О.Б., Сичевский С.Г. Международная виртуальная обсерватория	6	Газ, пыль и звезды туманности Пеликан	3
ПЛАНЕТАРИИ		Галактика Франкенштейн	6
Язев С.А., Семёнов Д.В. Иркутский планетарий	2	“Галактика-головастик”	6
ГИПОТЕЗЫ, ДИСКУССИИ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ		Гравитационно линзированное галактическое скопление	2
Аксёнов Г.П. Косминта, ее образование и эволюция	4	Детали пылевого диска вокруг звезды	4
Смольков Г.Я., Баркин Ю.В. Солнечно-земные связи: новое в изучении и объяснении	3	Детали эволюции массивных галактик	1
Цыганков О.С. Космическое происхождение жизни на Земле	2	“Доун”: исследования Цереры	3
ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АСТРОНОМИЯ		Жидкая вода на Марсе	1
Шивьёв В.И. Небесный календарь: март—апрель 2016 г.	1	Замерзшее озеро Плутона и его малые спутники	4
		Зародыши сверхмассивных черных дыр	5
		Звздообразование в комплексе Хербига—Аро 24	1
		Звездное скопление R 136	4
		Исследователь гравитационных волн	3
		Как образовалась наша Галактика	6
		“Кассини”: горы на Титане	4
		“Кассини”: Энцелад крупным планом	2

Квезары замедляют звездообразование	4	Солнце в феврале – марте 2016 г.	4
“Кеплер”: разрушенная планета у белого карлика	2	Солнце в апреле – мае 2016 г.	5
Комета Каталина	2	Солнце в июне–июле 2016 г.	6
КТХ: туманность Вуаль	1	Столкновение четырех галактик	5
Маломассивные звезды в Галактике	2	Уничтожение темной материи в Галактике	4
Межгалактический газ “падает” на черную дыру	6	Темные полосы на Марсе	6
На Юпитер упал загадочный объект	4	Туманность от остатка сверхновой	6
Новые данные о Плутоне и Хароне	1	Черная дыра массивнее ожидаемого	1
Открыта девятая планета Солнечной системы	3	Черная дыра “поедает” звезду и испускает джеты	2
Поиски гравитационных волн	1	Экстремально горячий квазар 3C273	4
Почти идеальное кольцо Эйнштейна	2	Эмиссионная туманность в Малом Магеллановом Облаке	5
Подтверждение существования гравитационных волн	3	Космонавтика	
Причина потери воды на Марсе	2	Запуск экспедиции к Марсу	3
Продолжение исследований кометы Чурюмова–Герасименко	1	Запуск японской обсерватории	3
Проект “Миллиметррон”	1	Метеоспутник-обсерватория	1
“Радиоастрон”: наблюдения ядра галактики	3	“Новые горизонты”: снимки Плутона	2
Радиоисточник снова заработал	2	Новый океанографический спутник	3
Самая большая звезда во Вселенной	6	Полярное сияние на Юпитере	6
Самое древнее галактическое скопление	2	Проект “Мунспайк”	2
Скопления галактик помогут найти темную энергию	6	Российские двигатели для американской ракеты	3
Солнце в августе – сентябре 2015 г.	1	Успешная посадка ракеты	2, 3
Солнце в октябре – ноябре 2015 г.	2	46-я основная экспедиция на МКС	2
Солнце в декабре 2015 г. – январе 2016 г.	3	47-я основная экспедиция на МКС	4
		48-я основная экспедиция на МКС	6
		“Юнона” вышла на орбиту Юпитера	5
		Науки о Земле	
		Ураган Хоакин	1

Информация

Полярное сияние на Юпитере

NASA и Европейское космическое агентство представило снимки полярного сияния на северном полюсе Юпитера,

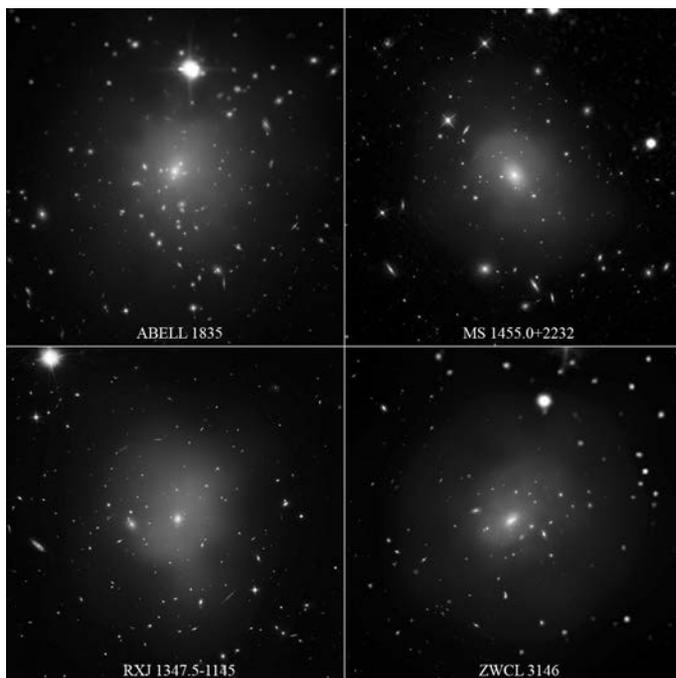
сделанные в дальней ультрафиолетовой области спектрографом Космического телескопа им. Хаббла (см. стр. 3 обложки внизу). Полярные сияния на Юпитере в сотни раз интенсивнее, чем на Земле и никогда не прекращаются; они охватывают огромные области и были замечены и ранее (Земля и Вселенная, 2004, № 3). Однако на этот раз ученые наблюдали на планете-гиганте самое яркое свечение за всю историю наблюдений. Эти

явления на Юпитере возникают вследствие столкновения высокоэнергетического солнечного ветра с заряженными частицами газов в атмосфере планеты над ее магнитным полюсом. Проводившиеся в течение нескольких месяцев с помощью КТХ наблюдения помогут понять динамику полярных сияний и мельчайших изменений в атмосфере Юпитера.

Пресс-релиз NASA/ESA,
30 июня 2016 г.

Скопления галактик помогут найти темную энергию

Ученые Алабамского университета (США), используя данные космических обсерваторий “Чандра” и “Планк” и нескольких наземных оптических телескопов построили модель для проверки Стандартной космологической модели и изучения темной энергии. В основе модели – принцип матрешки, который предполагает, что рентгеновское излучение скоплений галактик и расстояние до них имеет масштабируемые характеристики, зависящие от их массы. “В этом смысле скопления галактик похожи на матрешек: более мелкие аналогичны крупным. Это позволяет сравнивать их и точно определять расстояния между ними”, – пояснил руководитель проекта А. Моранди (США). На основе оптических снимков сверхновых (например, получены изображения четырех скоплений галактик) с данными о скорости расширения Вселенной и реликтовом излучении, ученые



Четыре галактических скопления с признаками присутствия темной энергии. Изображения получены 7 декабря 2005 г. с помощью KTX и 25 августа 2006 г. “Чандра” (экспозиция – 53 ч 20 мин). Фото NASA.

исследовали более чем 300 скоплений, расположенных на расстоянии 0,76–8,7 млрд св. лет от нас, чтобы понять, где помещается темная энергия (Земля и Вселенная, 2015, № 5, с. 88). Используя наблюдения за этими скоплениями как маркеры расстояний, можно понять, как расширялась Вселенная в разные периоды после Большого взрыва. Считается, что скорость расширения Вселенной определяется свойствами темной

энергии и темной материи, а, значит, если предполагаемые параметры неверны, то удаленные скопления галактик не будут подобны друг другу. Последние результаты подтверждают, что темная энергия лучше всего объясняет “космологическую постоянную” и ее свойства не изменялись в течение миллиардов лет.

Пресс-релиз NASA,
28 апреля 2016 г.

Дорогие читатели!

*Напоминаем, что подписаться на журнал
“Земля и Вселенная” вы можете с любого
номера по Объединенному каталогу
“Пресса России”*

(I полугодие 2017 г.) во всех отделениях связи.

*Подписаться можно и по интернету,
воспользовавшись каталогом журналов
на сайте “Почта России”.*

Подписной индекс – 70336.

Заведующая редакцией Л.В. Рябцева

Зав. отделом космонавтики и геофизики С.А. Герасютин

Художественные редакторы О.Н. Никитина, М.С. Вьюшина

Оператор ПК Н.Н. Токарева

Корректоры Р.В. Молоканова, Т.И. Шепвалова

Обложку оформила О.Н. Никитина

Сдано в набор 12.09.2016. Подписано в печать 26.10.2016. Дата выхода в свет 23.11.2016

Формат $70 \times 100^{1/16}$ Цифровая печать

Уч.-изд.л. 12,3 Усл. печ.л. 9,1 Усл.кр.-отг. 2,5 тыс. Бум.л. 3,5

Тираж 263 Зак. 730 Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Президиум

Издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

Адрес редакции: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

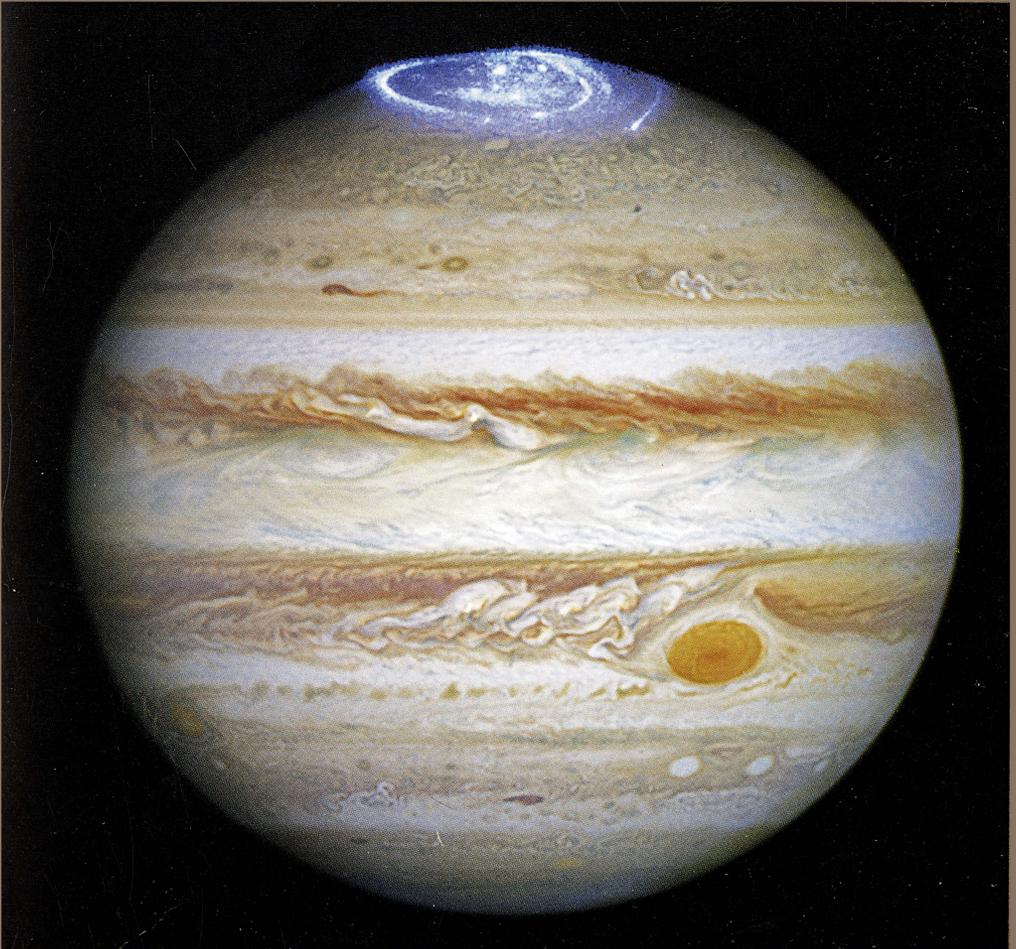
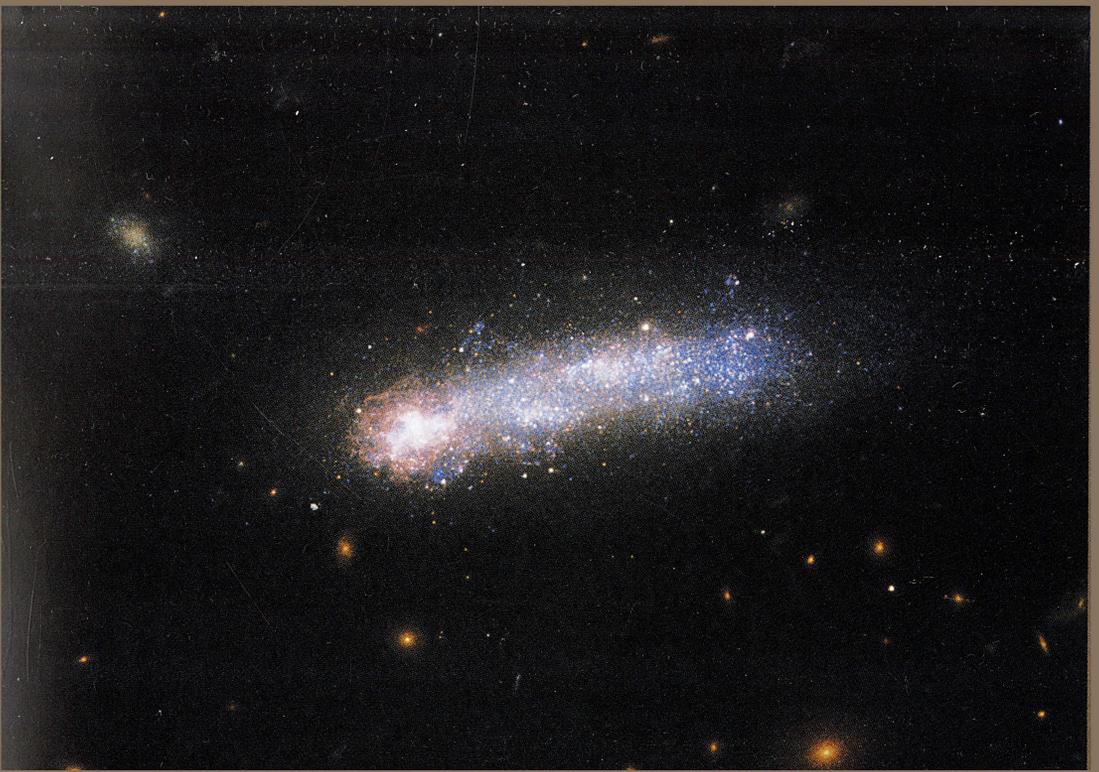
Телефон: (495) 276-77-28 доб. 42-31 или 42-32

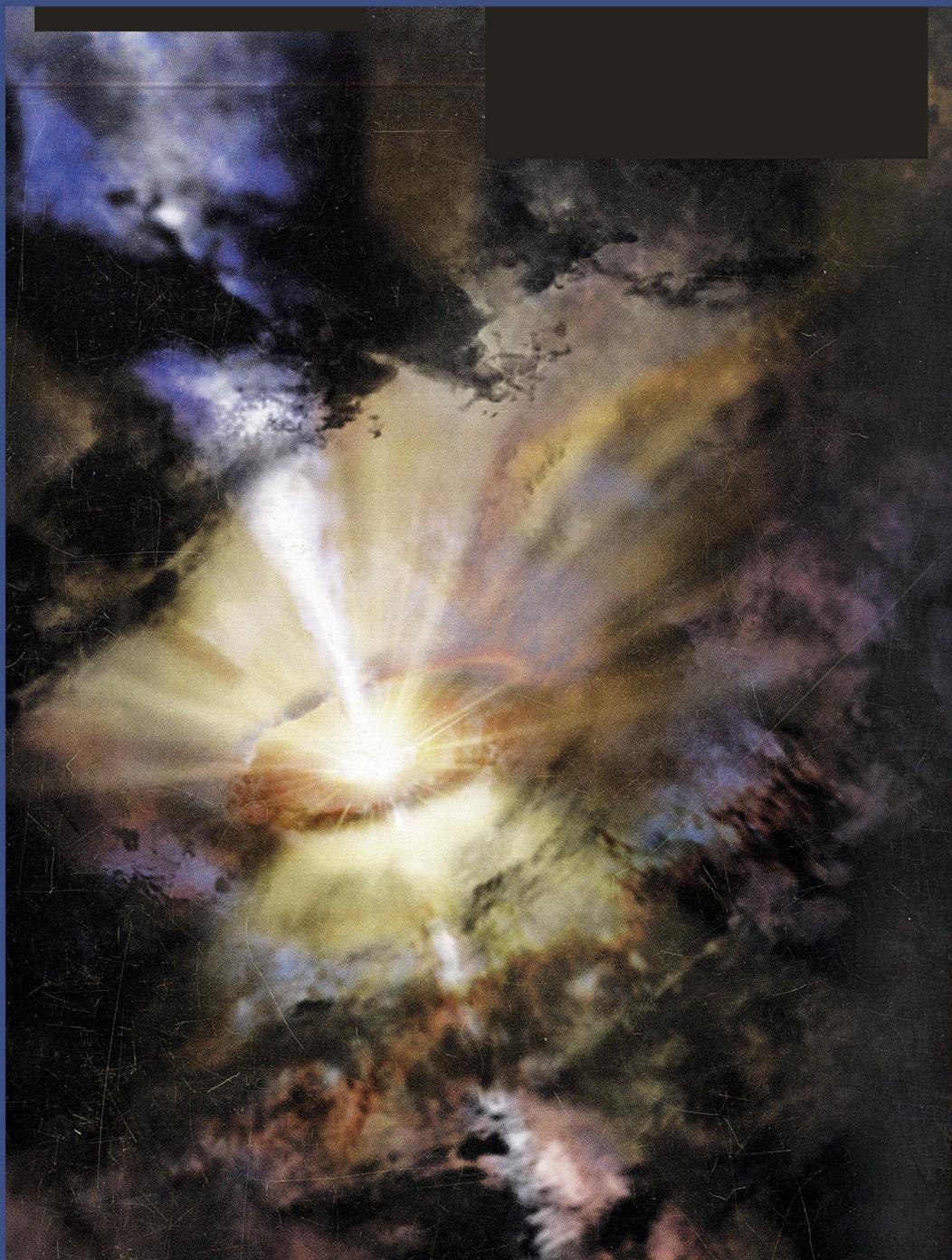
E-mail: zevs@naukaran.com

Оригинал-макет подготовлен ФГУП «Издательство «Наука»

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука» (Типография «Наука»)

121099, Москва, Шубинский пер., 6





"НАУКА"
Индекс 70336