



Астрофизика

Прогресс в исследованиях динамики и химии галактик

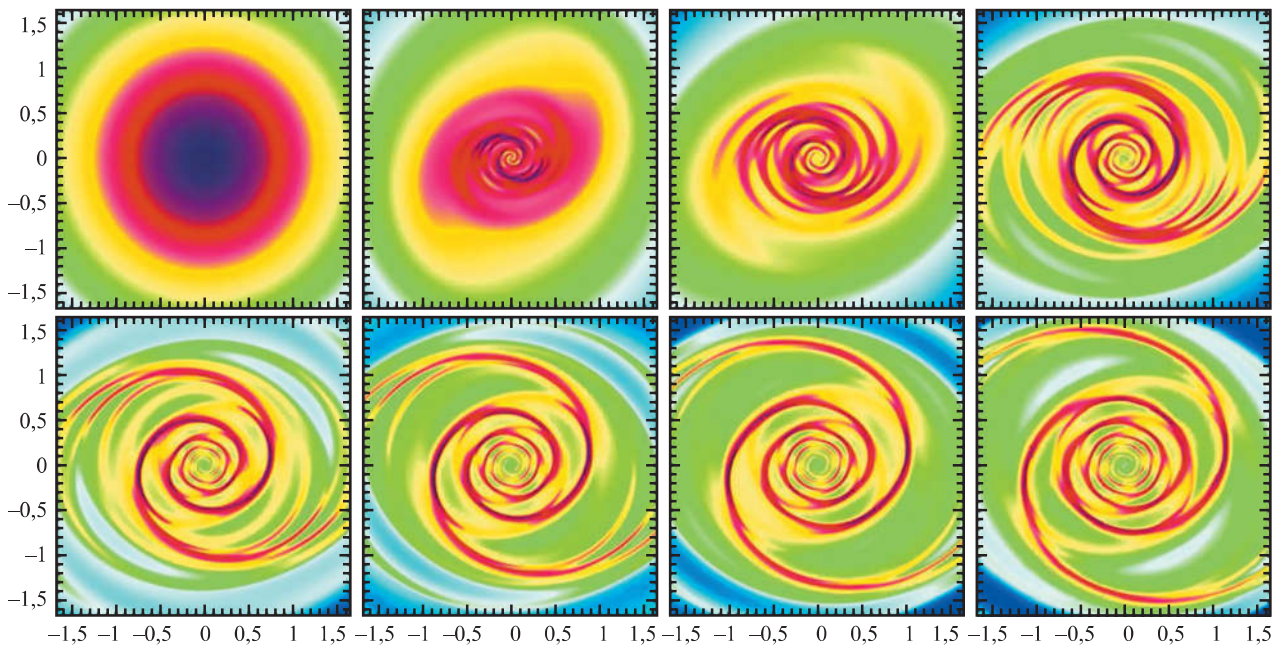
Е. В. ПОЛЯЧЕНКО,
доктор физико-математических наук
Л. И. МАШОНКИНА,
доктор физико-математических наук
С. А. ХОПЕРСКОВ,
кандидат физико-математических наук
Институт астрономии РАН



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, существенными 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-

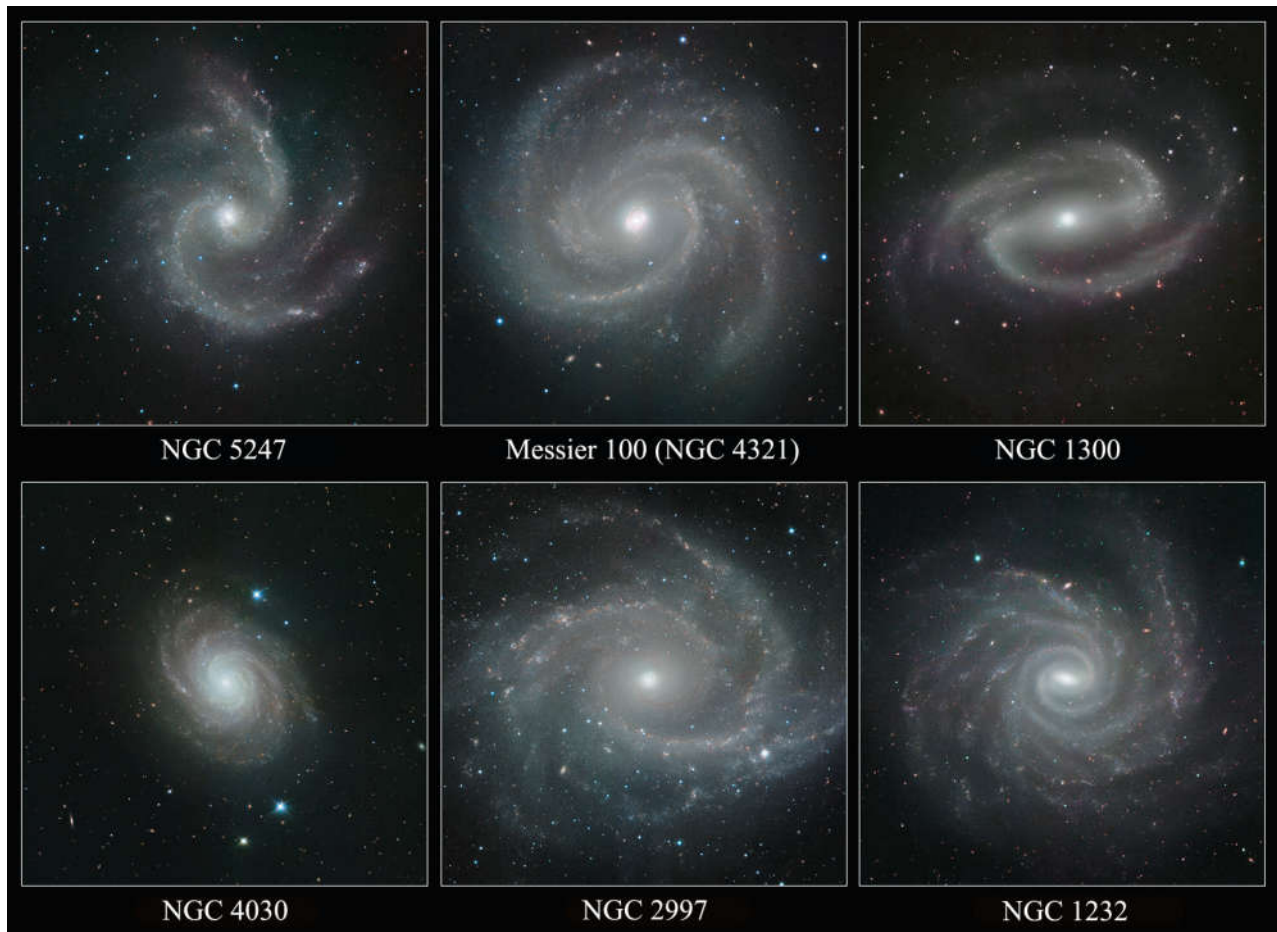
чали в себя только темную материю. Развитие компьютерной техники позволило (начиная с 1990-х гг.) учесть явления, связанные с динамикой газа, с формированием и эволюцией звезд.

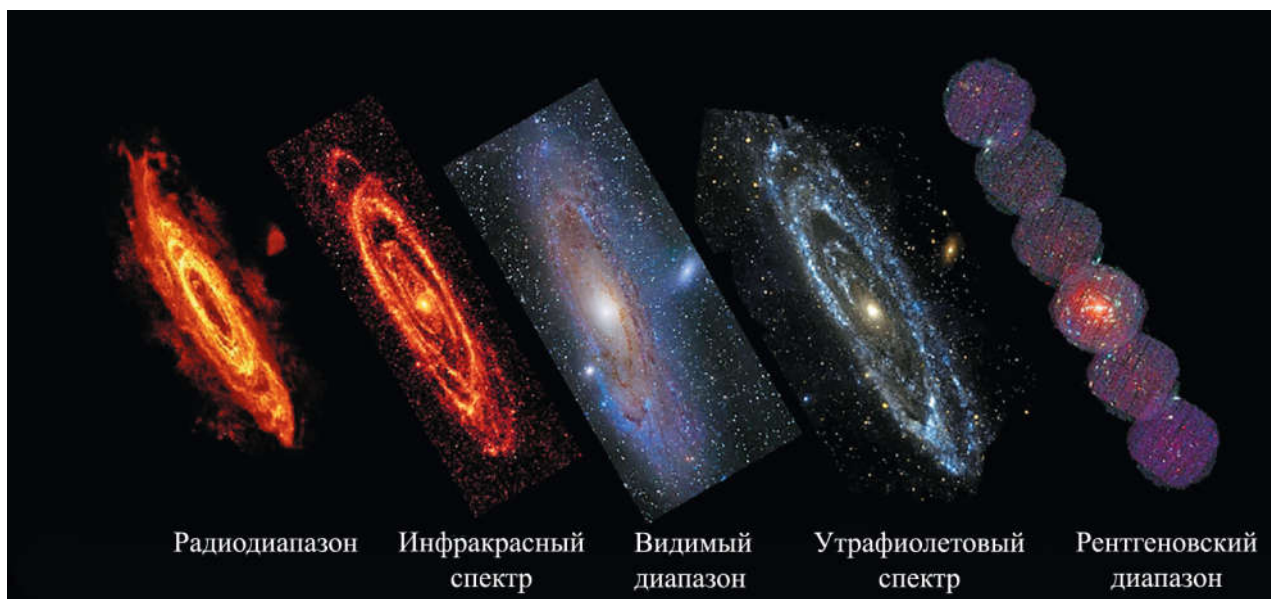
В последнее время стало возможным выполнять “прямое” моделирование, прослеживающее образование галактик из малых возмущений плотности первоначально однородной среды. Уже сейчас существуют несколько компьютерных кодов для таких вычислений, но в результате получаются различные формы галактик. Причина различия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

(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 спиралью 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 спираль 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

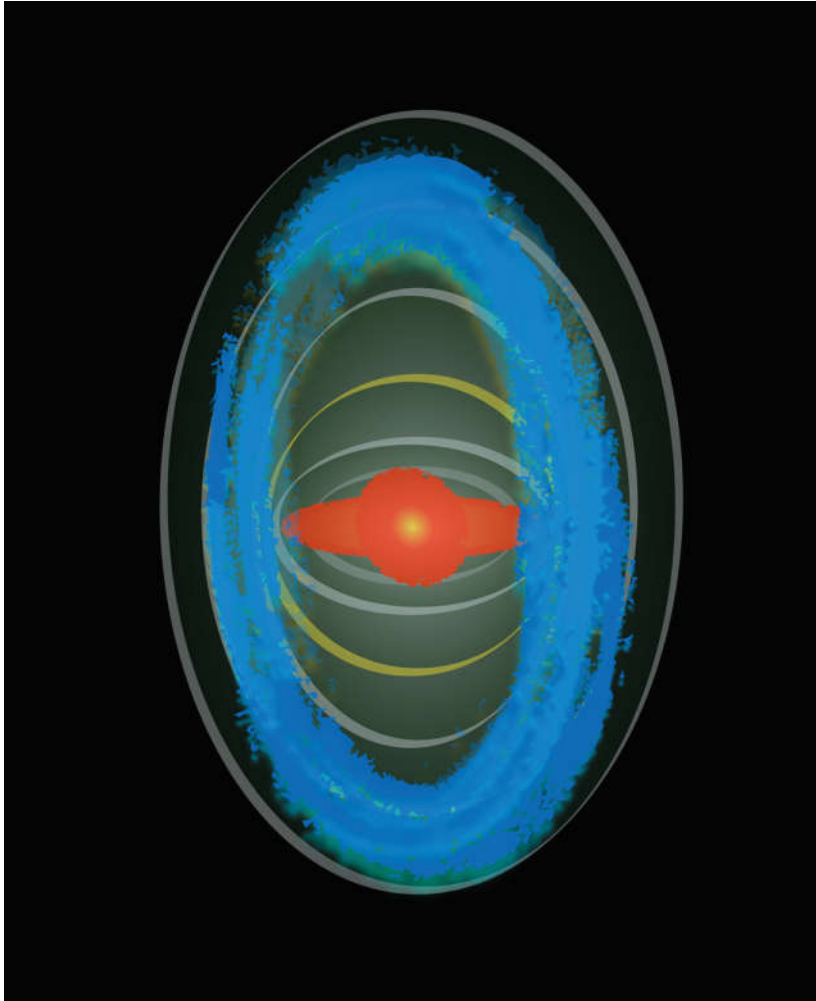


Схема формы гало темной материи в модели галактики с полярными кольцами NGC 4262 (созвездие Волосы Вероники, расстояние – 19,1 Мпк). Синим цветом показано газовое полярное кольцо, красным – центральная галактика. Линии отражают изолинии гравитационного потенциала гало темной материи.

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.

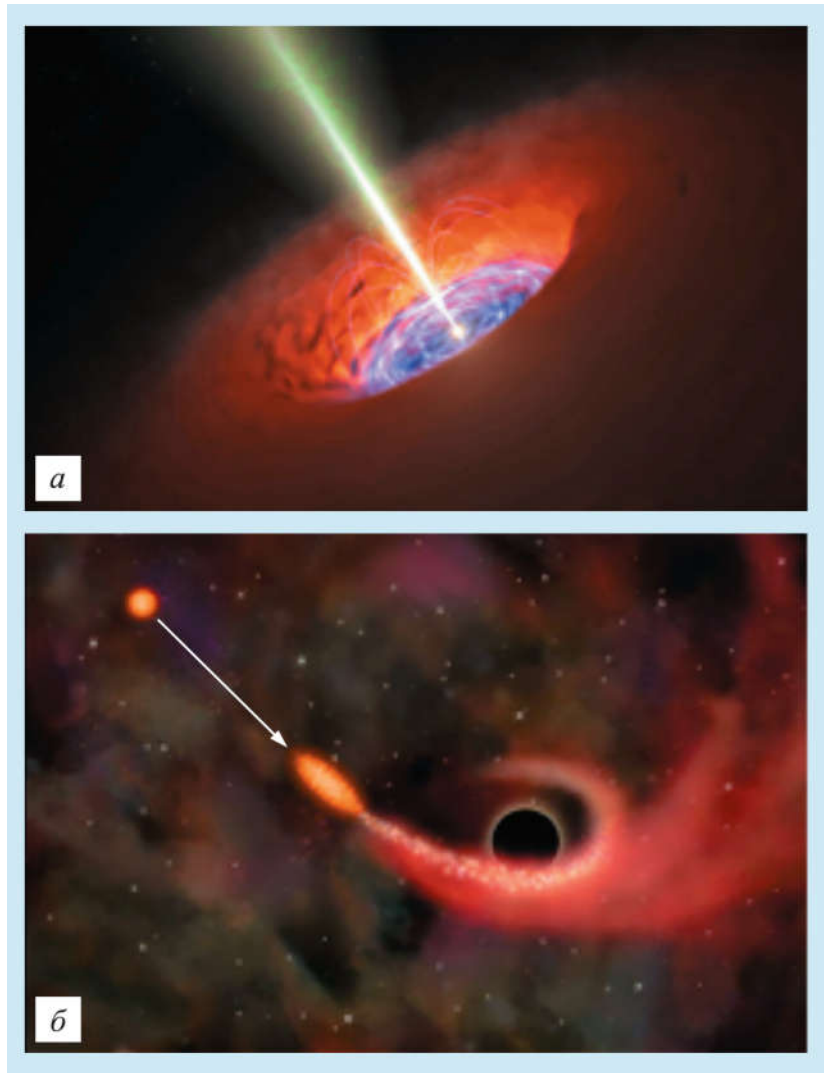
АККРЕЦИЯ В ГАЛАКТИКАХ И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

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. Казалось 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 происхождения 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

звздообразования 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-кислородного 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 многократно) поверхностных слоев, вместе с которыми синтезированные элементы попадают в межзвездный газ и изменяют его химический состав.

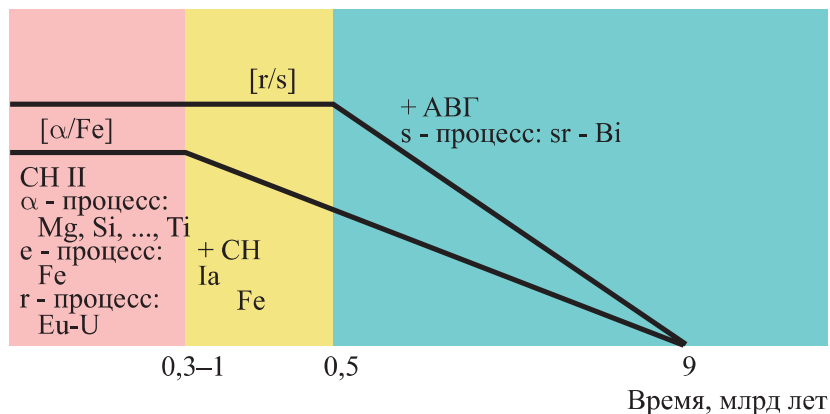
У звезд с $M > 8 M_{\odot}$ на следующем этапе эволюции термоядерным топливом служат углерод и кислород. Когда температура в ядре повышается до миллиарда градусов – рождаются новые элементы (от неона до никеля) путем захвата α -частиц (α -процесс) и при взаимодействии продуктов реакций между собой. Дальнейшие 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 быстрым нейтронным захватом (r -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 (АВГ).

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.

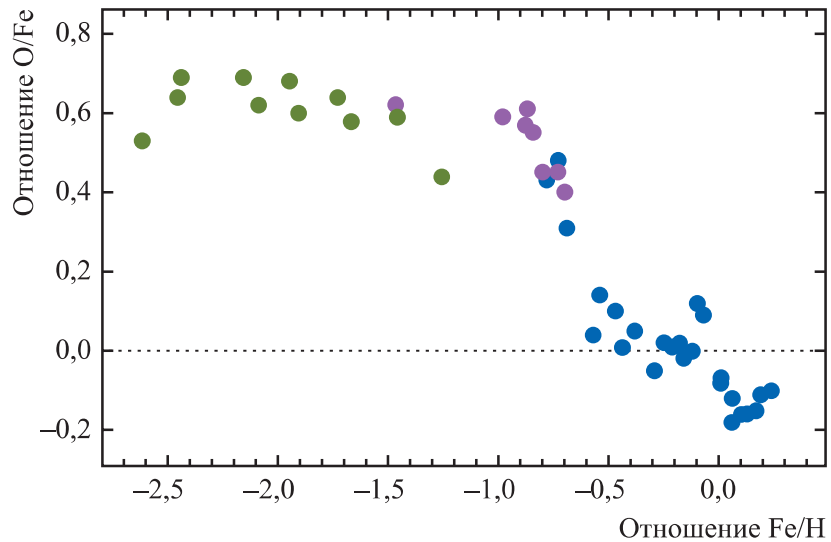
В астрофизике содержание элемента в звезде принято определять

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 O 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 стары, 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.

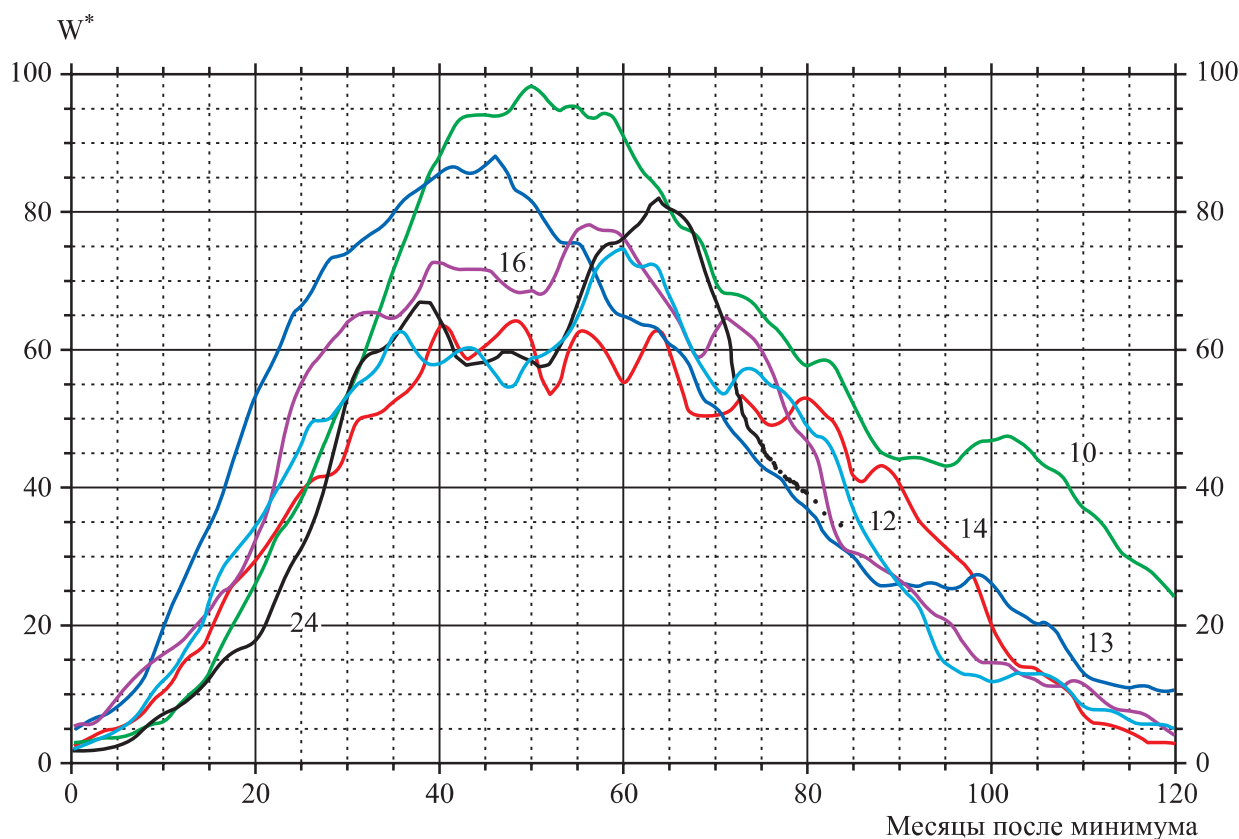
Пресс-релиз NASA,
28 июня 2016 г.

**Солнце
в июне – июле 2016 г.**

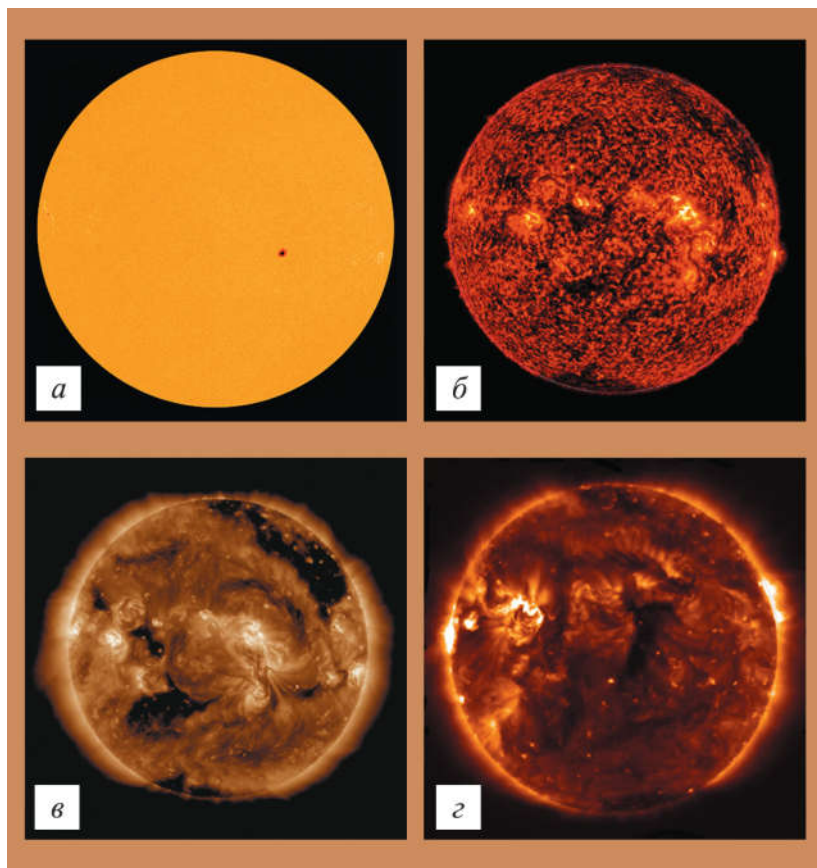
Первые летние месяцы 2016 г. характеризовались стремительным падением активности Солнца: 23 сут были без пятен! Число групп пятен небольших размеров на видимом диске Солнца в эти месяцы менялось от 0 до 4. В июне одна группа среднего размера находилась в Южном полушарии. Две группы пятен Северного полушария 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.swrsc.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. Коронграфы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали 69 корональных

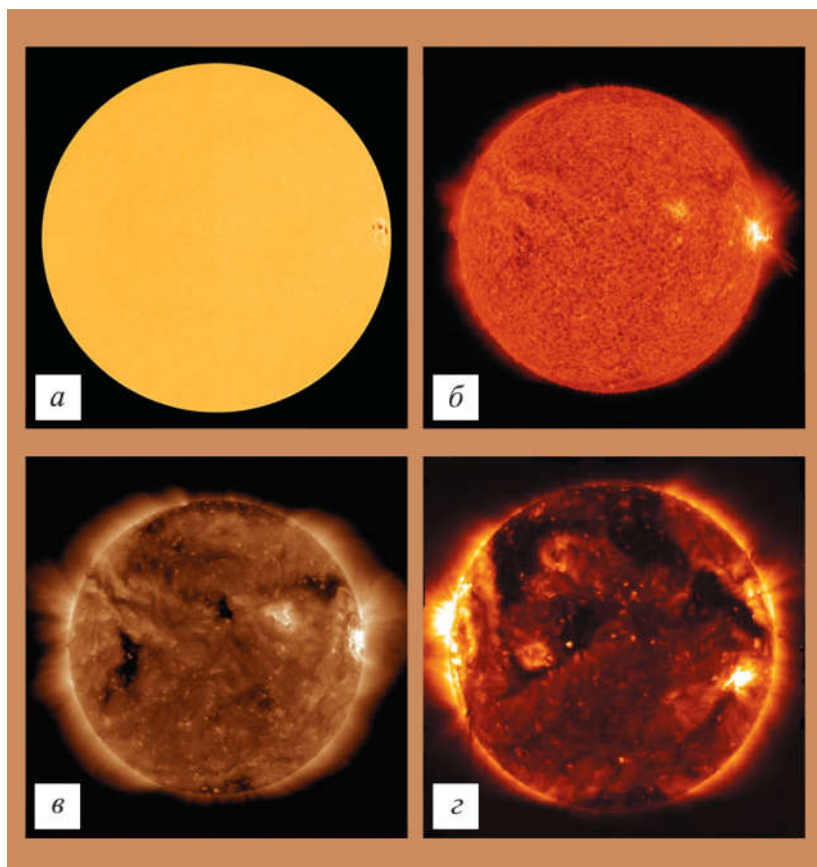


Ход развития (84 месяца) текущего 24-го цикла солнечной активности среди всех достоверных (начиная с 1849 г.) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в старой, классической системе.



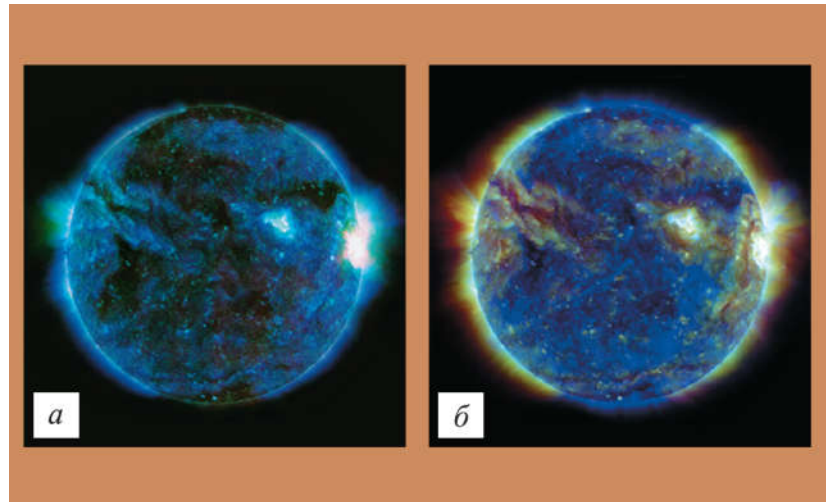
Солнце 18 июня 2016 г.:
 а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
 б – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
 в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$);
 г – обратная сторона Солнца в линии крайнего ультрафиолета Fe 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/м²) 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 низкий; 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 остановкой. 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*