ЗВЕЗДНАЯ НОЧЬ: Млечный Путь сияет в ночном небе над Тихим океаном у чилийского побережья в районе пустыни Атакама

Кэтрин Джонстон

ОХОТА ЗА

На заре своей истории Млечный Путь с жадностью пожирал множество крошечных галактик. Россыпи космических обломков, которые избежали этой участи, дают новые факты о том, как образовался наш уголок Вселенной

РЕЛИКТАМИ

В МЛЕЧНОМ ПУТИ

ОБ АВТОРЕ

Кэтрин Джонстон (Kathryn V. Johnston)— профессор и заведующая кафедрой астрономии Колумбийского университета. Уроженка Йоркшира (Англия), она училась в Кембриджском университете и в Калифорнийском университете в Санта-Крузе. Научные интересы Джонстон направлены на изучение того, каким образом формируются и растут галактики, и в частности Млечный Путь.

Темной ясной ночью поезжайте подальше, туда, где нет сияния городских огней, и взгляните в небо прямо над собой. Вы увидите сияющую ленту Млечного Пути, словно арка эффектно протянувшуюся над головой. Прошло уже четыре столетия с тех пор, как Галилео Галилей первым направил телескоп на это вызывающее благоговейный трепет полотно и увидел, что «молоко» — это на самом деле бесчисленное скопление отдельных звезд, слишком тусклых, чтобы их можно было различить невооруженным глазом. Еще три столетия понадобились астрономам, чтобы убедиться, что Млечный Путь — всего лишь одна из миллиардов галактик во Вселенной.

На самом деле Млечный Путь — это не просто одиночная галактика: недавние исследования показали, что за время своего существования она заманила к себе и поглотила множество более мелких галактик, включив их звезды в свой состав. Известно, что вокруг нее обращаются по крайней мере 20 карликовых галактик величиной от одной миллионной до одной сотой массы Млечного Пути — и, не исключено, десятки еще не открытых. Ныне существующие галактики-спутники, как полагают, составляют всего лишь крошечную долю из тех, которые когда-то существовали, все прочие, которые силы гравитации затащили в нашу Галактику, давным-давно были ею поглощены. Это космическое пиршество началось, когда Млечный Путь был моложе и меньше, чем сейчас, и продолжается по сей день: по всей видимости, галактики-спутники, которые все еще существуют, в конце концов тоже будут проглочены.

И хотя после гибели этих жертв гравитационного аппетита Млечного Пути прошло немало времени, следы их остались в виде едва различимых звездных потоков, протянувшихся через весь небосвод. За последние 15 лет относительно новая область астрономии, которую стали называть галактической археологией, обнаружила много таких потоков. Изучая эти ископаемые остатки прошлого нашей Галактики, галактические археологи складывают вместе, как части пазла, события из истории Млечного Пути и получают ключи к загадке рождения и эволюции нашей и других так называемых спиральных галактик.

В идеале хорошо было бы изучать галактики не только изнутри, но и снаружи. Мы не можем проделать это в отношении нашей собственной Галактики. Но воспользовавшись возможностью наблюдать картину с близкого расстояния, находясь внутри Млечного Пути, мы можем извлечь подробную информацию, которую не в состоянии получить, исследуя другие галактики со стороны.

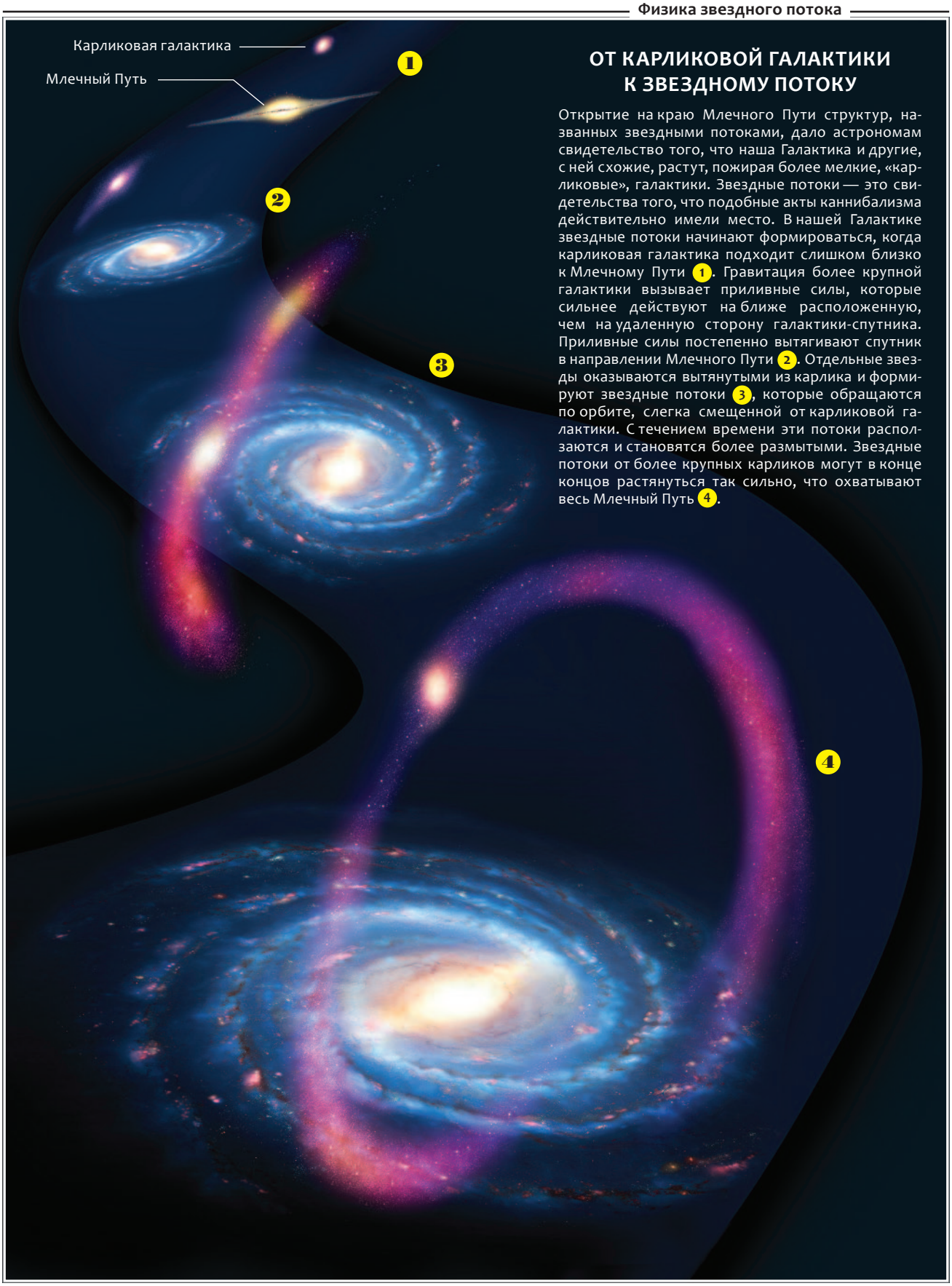
Эта область науки уже помогла найти подтверждение одному из процессов, благодаря которому разрастаются Млечный Путь и другие молодые галактики. Открытие многочисленных звездных потоков из областей, где когда-то давным-давно находились галактики-спутники, подкрепляет широко распространенную теорию, что изначально наша Галактика была небольшой и отчасти разрослась, поглощая массу большими глотками, — в ходе процесса, называемого формированием иерархической структуры. Хотя многие особенности этого сценария до сих пор остаются загадкой, мы медленно, но верно пишем биографию Млечного Пути.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Карликовые галактики обращаются вокруг Млечного Пути, гравитация которого медленно разрывает их на части и превращает в длинные звездные потоки. Астрономы, называющие себя галактическими археологами, используют ископаемые останки исчезнувших галактик для изучения прошлого Млечного Пути.
- Астрономы обнаружили первые свидетельства протяженного звездного потока вокруг нашей Галактики в 2003 г. и нашли с тех пор примерно дюжину новых. Анализ этих потоков подкрепляет теорию, что Млечный Путь рос, заглатывая более мелкие галактики.
- Будущие исследования орбитальных характеристик звезд и их химического состава, возможно, покажут, из чего состояли давно исчезнувшие звездные потоки. В конце концов галактическая археология, возможно, позволит прояснить не только историю Млечного Пути, но и то, как все галактики эволюционируют во времени.

PRECEDING PAGES: BABAK TAFRESHI National Geographic

Физика звездного потока



ОТ КАРЛИКОВОЙ ГАЛАКТИКИ К ЗВЕЗДНОМУ ПОТОКУ

Открытие на краю Млечного Пути структур, названных звездными потоками, дало астрономам свидетельство того, что наша Галактика и другие, с ней схожие, растут, пожирая более мелкие, «карликовые», галактики. Звездные потоки — это свидетельства того, что подобные акты каннибализма действительно имели место. В нашей Галактике звездные потоки начинают формироваться, когда карликовая галактика подходит слишком близко к Млечному Пути (1). Гравитация более крупной галактики вызывает приливные силы, которые сильнее действуют на ближе расположенную, чем на удаленную сторону галактики-спутника. Приливные силы постепенно вытягивают спутник в направлении Млечного Пути (2). Отдельные звезды оказываются вытянутыми из карлика и формируют звездные потоки (3), которые обращаются по орбите, слегка смещенной от карликовой галактики. С течением времени эти потоки расползаются и становятся более размытыми. Звездные потоки от более крупных карликов могут в конце концов растянуться так сильно, что охватывают весь Млечный Путь (4).

SOURCE: DAVID HENDEL

Как построить галактику

Иерархическая теория формирования галактик утверждает, что основная движущая сила роста больших галактик вроде Млечного Пути — это не барионное вещество, т.е. не звезды, газ и пыль, которые мы наблюдаем и которые сделаны из тех же самых частиц, что и мы с вами. Напротив, движущая сила этого процесса — гигантские «гало» или сферы невидимой темной материи, в которые вкраплены галактики. Считается, что сначала сформировались небольшие гало темной материи, которые постепенно объединялись в более крупные и таким образом заставляли более крупные галактики проглатывать более мелкие.

Сегодня гало темной материи каждой из галактик во много раз массивнее и простираются гораздо дальше, чем нормальное видимое вещество. Как ни странно, несмотря на то что астрономам еще только предстоит открыть природу темной материи (которую мы ощущаем лишь по ее гравитационному влиянию на все вокруг), у нас есть определенная уверенность в достоверности этой версии процесса группирования галактики в единое целое, поскольку наблюдаемые скорости кластеризации и взаимодействия галактик в точности соответствуют предсказаниям моделей, за основу которых взята идея о больших сгустках темной материи. Загадка формирования галактики на самом деле связана не с темной материей, а с обычным барионным веществом, состоящим из частиц, которые взаимодействуют известным образом и взаимодействие которых мы можем изучать здесь, на Земле.

Фундаментальный взгляд на вклад барионного вещества в эволюцию галактик начинается с гало темной материи. Это тело притягивает к себе обычное вещество в форме газа посредством силы гравитации. Когда газ движется к центру гало, он при благоприятных обстоятельствах может сформировать звезды. Когда жизнь части этих звезд подходит к концу, они взрываются, возвращая свои атомы в газ, находящийся внутри и (возможно) вне галактики, и часто запускают процесс формирования нового поколения звезд из еще оставшихся газа и пыли. Именно таким путем, скорее всего, и образовались центральное ядро («балдж») Млечного Пути и его спиральные рукава («диск»).

Но Млечный Путь включает в себя и гигантскую сферу (гало) из гораздо реже рассеянных звезд, которая окружает балдж и диск. Многие их этих звезд — вероятно, чужестранцы, прилетевшие из давно рассыпавшихся карликовых галактик. Согласно иерархической теории формирования галактик звезды попадают в гало в результате следующей цепи событий. Когда карликовая галактика обращается вокруг Млечного Пути, она испытывает гравитационное притяжение большой галактики, которое по мере приближения к ней становится все сильнее. Вещество (звезды, газ, пыль и темная материя), расположенное на стороне галактики-спутника, которая ближе к центру Млечного Пути, испытывает чуть бóльшую силу притяжения, чем вещество на ее противоположной стороне.

В результате галактика-карлик вытягивается вдоль линии, проходящей между ней самой и более крупной галактикой. Такое вытягивание есть результат действия так называемых «приливных сил» — такого же физического явления, как то, посредством которого Луна вызывает приливы на земных океанах. В отличие от взаимодействия Луны и Земли воздействие приливных сил Млечного Пути на его спутники может быть достаточно сильным, чтобы в конце концов оторвать от них вещество — в данном случае звезды вытягиваются из тела карликовой галактики. Оторвавшись от карлика, эти звезды остаются во власти гравитации Млечного Пути и продолжают двигаться по орбите, слегка смещенной от собственной орбиты карликовой галактики. Со временем это небольшое смещение заставляет осколки непрерывно расходиться и, все больше рассеиваясь и удаляясь от галактики-спутника, образовывать звездные потоки.

Известные звездные потоки, вероятно, — лишь малая часть всех существующих. Должно быть гораздо больше потоков, но они слишком тусклы, чтобы их можно было сегодня увидеть

Такая теоретическая картина вполне логична, но долгое время ученые не могли подтвердить ее результатами наблюдений. Теперь они их получили. Открытие множества звездных потоков показало, что Млечный Путь начал пожирать своих соседей миллиарды лет назад, когда сама наша Галактика была молодой, и даже сегодня она продолжает лакомиться карликовыми галактиками. Несмотря на то что мы наблюдали свидетельства потоков от карликовых попутчиков преимущественно нашей Галактики, такие потоки, вероятно, возникают и вокруг всех похожих на нее спиральных галактик, хотя в большинстве случаев эти далекие потоки, по всей видимости, слишком тусклы, чтобы их можно было заметить издалека.

Тем не менее множество деталей процесса иерархического формирования все еще остаются неуловимыми. Когда Млечный Путь поглотил большую часть своих галактик-спутников? Как часто он пожирает карликов? Сколько времени ему требуется, чтобы включить их звезды в свой состав? Чтобы ответить на эти вопросы, астрономы должны выявить новые звездные потоки, поддающиеся подробному изучению, а также остатки исчезнувших потоков.

Раскопки галактических ископаемых

Астрономы ищут звездные потоки в Млечном Пути множеством способов. Во-первых, мы можем атаковать проблему в лоб — искать группы равноудаленных от нас звезд, которые собрались в тонкие нити. Для этого нам необходима хорошая трехмерная карта звезд нашей Галактики, на которой указаны расстояние и расположение как можно большего числа звезд во всех направлениях.

В последние 15 лет галактические археологи получили в свое распоряжение именно то, что им требуется: Слоуновский цифровой обзор карты звездного неба *(SDSS)*, охватывающий четверть небосвода и содержащий данные более чем о 80 млн звезд внутри Млечного Пути с информацией о расстоянии до каждой звезды и ее цвете. Для построения этой цифровой карты используется специальный телескоп Обсерватории Апачи-Пойнт в штате Нью-Мексико. Огромное число звезд на карте Слоуна делает ее прекрасным местом для поиска следов прошлого Млечного Пути.

Считается, что доля звезд, которые были рождены в других галактиках, а затем вошли в состав нашей, невелика — где-то около 1% или даже меньше от сотен миллиардов звезд Млечного Пути. Но для поиска свидетельств давно почивших в бозе галактик карта Слоуна дала астрономам информацию о почти миллионе звезд-перебежчиков. Астрономы-археологи ищут на этой карте звезды с такими координатами, чтобы они предположительно находились в галактическом гало. Среди найденных светил астроархеологи выделяют звездные потоки, сфокусировав свое внимание на области, где плотность звезд выше, чем рядом с ними, а сами они выстраиваются в форме хвостов. На что должны быть похожи эти хвосты, астрономы знают отчасти по результатам компьютерного моделирования, которое я провела и опубликовала в 2005 г. в сотрудничестве с космологом Джеймсом Баллоком (James Bullock) из Калифорнийского университета в Ирвайне. Мы исходили из представлений о том, как гало темной материи формировались иерархически, в сочетании с физикой приливных сил, чтобы предсказать размеры и протяженность звездных потоков, которые возникнут в результате поглощения множества карликовых галактик в процессе формирования Млечного Пути.

Первое убедительное свидетельство протяженного потока звезд появилось в 2003 г., когда астрономы из Виргинского университета во главе со Стивом Маевски (Steve Majewski) обнаружили гигантские хвосты, исходящие из ближайшего к Млечному Пути из известных спутников — карликовой галактики в Стрельце, в данных Двухмикронной цифровой карты всего неба (аналогичного Слоуновскому проекта, проводимого не в видимом, а в инфракрасном диапазоне). Потоки расположены близко к предполагаемой орбите карлика в Стрельце и содержат почти столько же звезд, сколько их в самом карлике. Эти хвосты настолько длинны, что полностью окружают нашу Галактику. Мы застали Млечный Путь в момент его атаки на самого близкого (географически; но, очевидно, не самого дорогого сердцу) соседа.

После этого открытия галактические археологи откопали в Слоуновской базе данных еще примерно дюжину звездных потоков вокруг нашей Галактики. Исходя из длины хвоста Стрельца, мы можем сказать, что он терял свои звезды на протяжении 2–3 млрд лет. Другие потоки, которые мы наблюдаем, вероятно, также имеют возраст в несколько миллиардов лет. Эти открытия показывают, что Млечный Путь пожирал галактики активнее в течение раннего периода своей истории и умерил аппетит уже позже, когда число карликовых галактик, которые можно было бы съесть, значительно убыло. До сих пор эти открытия лежат в русле предсказаний иерархической теории формирования. Хотя известные нам звездные потоки — это, вероятно, лишь небольшая часть всех таких потоков. По-видимому, там имеется гораздо больше потоков, слишком тусклых, чтобы их можно было разглядеть в настоящее время, но хранящих ценную информацию о прошлом Галактики.

Новые инструменты для раскопок

Если в поисках звездных потоков полагаться на расположение звезд, то можно пропустить множество более ранних хвостов, поскольку за несколько миллиардов лет небольшая разница в параметрах орбит у звезд может вызвать удлинение, диффузию и ослабевание яркости потоков настолько, что они утратят свои характерные признаки. Сейчас астрономы работают над тем, как использовать другие звездные свойства, чтобы найти потоки, которые претерпели большие разрушения, а также останки потоков, которые полностью распались на части. Эти совокупности звезд помогут ученым исследовать самую активную эпоху формирования Галактики, которая была более 10 млрд лет назад, всего через несколько миллиардов лет после Большого взрыва, когда формировалось большинство звезд Вселенной. Это время, в течение которого не несколько, а сотни небольших галактик и звездных скоплений срослись воедино и образовали Млечный Путь.

Один из способов охоты на эти останки ныне исчезнувших галактик — поиск звезд с общими орбитами. После того как звезды в потоках рассеялись до такой степени, что потоки уже не удается идентифицировать, мы можем распознать звезды, которые когда-то были частью одной и той же галактики-спутника, и выяснить, как они присоединились к Млечному Пути, по их движению. Эта задача — одна из многих поставленных Европейским космическим агентством перед спутником «Гея», запущенным в декабре 2013 г. Четыре следующих года «Гея» проведет, собирая уникальные данные для галактических археологов, измеряя расстояние, положение и движение более миллиарда звезд. Этот улов открывает потрясающие перспективы для решения нашей задачи ввиду огромного числа звезд, заносимых в каталог, и благодаря тому, что многомерность получаемой информации для каждой из звезд позволит нам вычислить их полные орбиты. Таким образом, мы можем с большой вероятностью отбирать звезды со схожими параметрами орбит как прилетевшие к нам из одной и той же

родительской галактики, даже если их положение на небосводе не указывает на какую-либо связь между ними в настоящее время.

Помимо всего прочего существует признак, который не позволяет звездам забыть, где они родились: это их химический состав. Он дает еще один способ обнаружить звездные потоки. Звезды непрерывно изменяют свой состав в результате идущего в их недрах ядерного синтеза, который превращает легкие элементы в более тяжелые. Однако ядерный синтез может происходить лишь в самых плотных и горячих центральных областях звезды. А в атмосфере звезды (именно ее параметры и измеряют астрономы) сохраняется газ, из которого звезда родилась. Астрономы Кеннет Фриман (Kenneth Freeman) из Австралийского национального университета и Джосс Блэнд-Хоторн (Joss Bland-Hawthorn) из Сиднейского университета намерены использовать эту совершенную память не для поиска звездных потоков, а чтобы сгруппировать звезды с идентичными химическими «отпечатками пальцев» в кластеры по месту их рождения, безотносительно к тому, где на небе они расположены сегодня.

Простой метод Фримана и Блэнд-Хоторна, использующий только химический ярлык, не поможет в идентификации звезд, связанных с галактиками-карликами, поскольку в самих этих галактиках, по всей видимости, есть звезды, рожденные во множестве других скоплений, имеющих широкий спектр вариантов химического состава. Тем не менее история космоса и процесс формирования звезд «сговорились» таким образом, что подход, базирующийся на химической аналогии, быть может, даст нам какие-то сведения об истории роста Млечного Пути.

Во-первых, звезды, сформировавшиеся позднее, внутри уже существующей галактики, как правило, содержат больше тяжелых элементов, чем те, которые сформировались ранее, поскольку вещество, из которого формируются звезды, уже обогащено остатками предыдущих поколений звезд. Во-вторых, о том, как проходило обогащение, нам подробно сообщают потоки газа, которыми частично управляет гравитационное воздействие со стороны галактического гало темной материи. Эти два эффекта предполагают, что галактики примерно одинаковой массы, которые были поглощены и разрушены приблизительно в одно и то же время, должны были принести с собой звезды с одинаковым распределением химического состава — т.е. с одинаковым разбросом относительного содержания многих химических элементов. Наоборот, разница либо в массе галактики, либо во времени поглощения приведет к разнице в распределении химических элементов в ее звездах. Следовательно, суммарное распределение химического состава звезд вокруг Млечного Пути, возможно, позволит нам распознать, какая доля их появилась из галактик одинаковой массы в одно и то же время, а может быть, и точно определить, что они из одной и той же галактики. Дуэйн Ли (Duane Lee) исследовал эту идею, будучи студентом моей группы в Колумбийском университете. Его предварительная работа предполагала, что химические бирки, возможно, достаточно чувствительны, чтобы обнаружить вклад от самой маленькой карликовой галактики, разрушенной еще на заре галактической истории. Зная, какая часть звезд Млечного Пути появилась в каждую конкретную эпоху, мы можем проследить последовательность галактического каннибализма и восстановить историю роста нашей Галактики с самого раннего периода ее существования. Две группы сейчас занимаются измерением химического состава миллионов звезд, и их данные, возможно, будут использованы для поиска решения этой проблемы. Первую группу, работающую над программой «Галактическая археология с помощью спектрометра ГЕРМЕС» *(GALAH)*, возглавляют Фриман и Блэнд-Хоторн. Их пилотный проект уже идет полным ходом. Другая программа, получившая название «Эксперимент Обсерватории Апачи-Пойнт по изучению эволюции Галактики» *(APOGEE)*, стартовала в 2011 г. как составная часть ведущегося там Слоуновского проекта.

Галактические археологи только начинают понимать, что изучение Млечного Пути равнозначно изучению 1 тыс. галактик, поскольку именно такое количество объектов меньшего размера объединились, чтобы построить небесное тело подобной величины. Ископаемые останки этих «переваренных» галактик повествуют нам историю не одного лишь Млечного Пути, но и всех галактик меньшего размера, вошедших в его состав. Скоро мы, наверное, сможем изучать то, как галактики самых различных размеров создавались в самые различные эпохи, причем проделывать все это, не выходя из собственной лаборатории. Подобного рода анализ в следующем десятилетии, возможно, даст такой же вклад в наше понимание процесса формирования галактики, какой ошеломляющее открытие звездных потоков, охватывающих Млечный Путь, сделало в минувшем десятилетии.

В конечном счете нам хотелось бы выяснить, как сформировались самые первые галактики во Вселенной. Предки галактик, похожих на нашу, слишком малы и удалены, чтобы их можно было увидеть путем прямых наблюдений. Однако галактическая археология, возможно, позволит обнаружить останки этих ранних зародышей — долгоживущие звезды, которые все еще несут отпечатки своего происхождения, разбросаны прямо здесь, в Млечном Пути. Тогда естественным образом раскопки «на заднем дворе» смогут открыть нам окно в раннюю Вселенную и рассказать о первых этапах формирования Галактики, чего невозможно достичь никаким другим способом. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Гибсон Б., Ибата Р. Призраки погибших галактик // ВМН, № 6, 2007.
- Либескинд Н. Карликовые галактики и темная паутина // ВМН, № 5, 2014.
- Tracing the Milky Way's History. Cristina Chiappini in Sky & Telescope, Vol. 108, No. 4, pages 32–40; October 2004.
- Слоуновский цифровой обзор карты звездного неба (SDSS): www.sdss.org