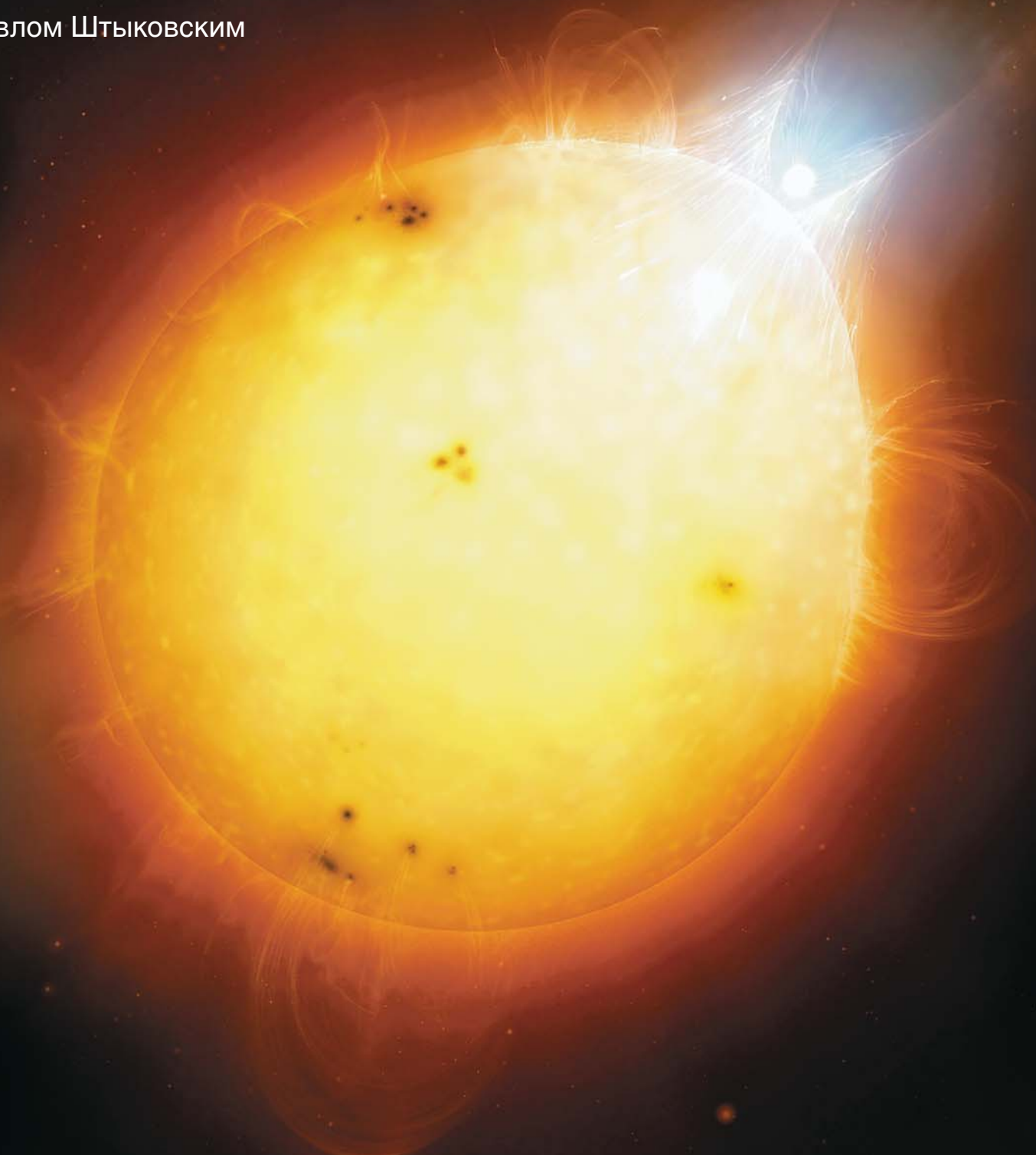


РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДЫ

По материалам беседы
с Маратом Гильфановым
и Павлом Штыковским



Теория звездной эволюции в общих чертах уже известна, и многие ее выводы подтверждаются наблюдениями. Но до сих пор в ней существуют нерешенные проблемы, в частности, касающиеся возникновения звезд. В этом смысле особый интерес представляет история звездообразования во Вселенной, то есть интенсивность, с которой рождались звезды в галактиках от момента появления первых светил до наших дней

В настоящее время в нашей Галактике каждый год рождаются звезды, общая масса которых примерно равна 2—3 солнечным. А как этот процесс протекал раньше? За 15 млрд лет существования Млечного Пути в нем сформировалось около 60 млрд солнечных масс. Был ли это монотонный процесс, или звездообразование происходило вспышками, вызванными, например, сближением с нашими соседями — Магеллановыми Облаками? Пока нет ответа на этот вопрос.

Астрономы не могут «прокрутить» время назад и посмотреть, как менялся темп звездообразования в интересующем их месте пространства. Тем не менее они могут заглянуть в прошлое, наблюдая далекие галактики. Исследуя процессы во все более удаленных объектах, ученые могут определить, как менялся темп звездообразования при эволюции Вселенной. Это, в свою очередь, поможет узнать, когда сформировались наиболее древние галактики, и как их состав изменялся со временем.

Для решения данной задачи нужны надежные индикаторы звездообразования. Из-за высокой температуры спектр молодых светил смещен в ультрафиолетовую область. Кроме того, они часто окружены пылью, которая поглощает их излучение и затем переизлучает его в виде тепла, т.е. в инфракрасном свете. Это дает возможность использовать излучение в ультрафиолетовом и далеком инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра для диагностики звездообразования. На практике такие индикаторы удалось внедрить только во второй половине XX в., когда появились телескопы, позволяющие проводить астрономические наблюдения за пределами видимого диапазона. Однако индикаторы не всегда надежны, т.к. ультрафиолетовое излучение поглощается межзвездной средой, а интенсивность инфракрасного зависит от количества пыли в галактике, которое зачастую не известно.

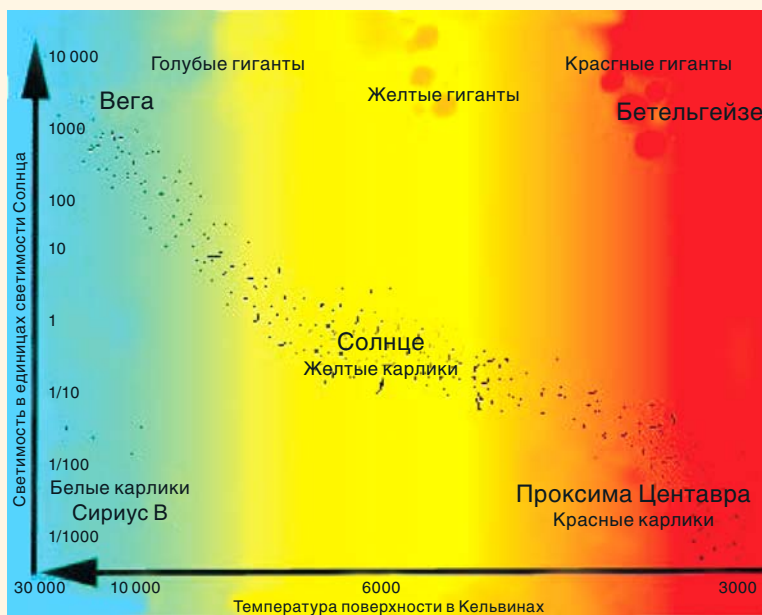
Солнце греет Землю уже около 5 млрд лет и, судя по запасам водорода, этот процесс будет ▶

Фаза термоядерного горения водорода — наиболее длинная и устойчивая в жизни любой звезды

РАСПОЛОЖЕНИЕ ЗВЕЗД НА ДИАГРАММЕ «ТЕМПЕРАТУРА — СВЕТИМОСТЬ»

К началу двадцатого века был накоплен огромный объем знаний о звездных спектрах, а также измерены расстояния до многих звезд, что позволило определить их светимости (светимость звезды — это мощность, с которой она излучает электромагнитную энергию). В связи с этим возникла потребность систематизировать полученную информацию. Наиболее эффективной оказалась следующая классификация.

Звезда в зависимости от температуры своей поверхности и светимости изображалась в виде точки на диаграмме «температура-светимость». Изучая ее, датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астроном Г. Рессел обнаружили очень интересный и важный факт: звезды заполняют всю площадь диаграммы не беспорядочно, а группируются внутри ярко выраженных областей. Подавляющее большинство всех известных звезд располагается вблизи линии, пересекающей диаграмму по диагонали и называемой «главная последовательность» (красные и желтые карлики, голубые гиганты). Все остальные звезды также образуют определенные группы (белые карлики, красные и желтые гиганты). Изучение особенностей этой диаграммы помогло астрономам построить теорию звездной эволюции.



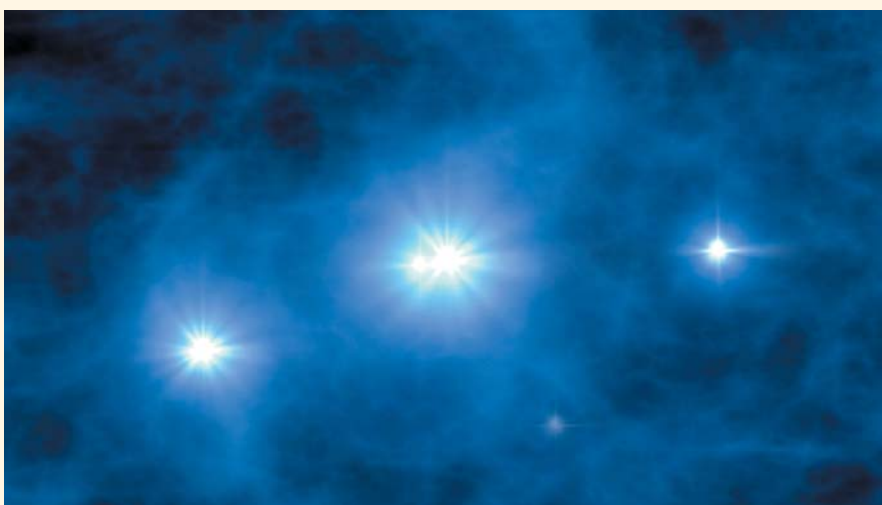
продолжаться еще столько же. У звезды, масса которой в 8 раз больше, а светимость в тысячи раз выше, срок жизни существенно меньше — всего 40 млн лет. Более массивные объекты расходуют свои запасы топлива еще быстрее. Фаза термоядерного горения водорода — наиболее длинная и устойчивая в жизни любой звезды. Все это время она находится на так называемой главной последовательности

(рис. сверху). Когда весь водород в недрах превращается в гелий, она с нее «сходит». Источник энергии иссякает, равновесие нарушается, и под действием гравитационных сил светило начинает сжиматься. Дальнейшая судьба зависит от его массы.

У небольших звезд температура в ядре не поднимается выше нескольких десятков миллионов градусов, поэтому термоядерный синтез тяжелых элементов не происхо-

дит. Звезда медленно перемещается по диаграмме (рис. сверху) в область белых карликов и затем постепенно остывает. Более массивные звезды сжимаются достаточно сильно для того, чтобы вызвать последовательный термоядерный синтез химических элементов вплоть до железа. Синтез более тяжелых элементов становится энергетически невыгодным и поэтому не происходит. Когда выделение

СВЕРХНОВЫЕ



Очень редко в жизни звезд случаются грандиозные катастрофы: звезда взрывается и при этом может светить ярче 10 млрд солнц. Такая вспышка получила название «сверхновая». Изучая сверхновые, астрономы пришли к выводу, что часть из них связана с взрывами старых звезд, возраст которых составляет много миллиардов лет, а масса — порядка солнечной, а другая часть является результатом взрыва молодых и массивных звезд

тепла прекращается, сжатие ничто не препятствует, и образовавшееся железное ядро быстро коллапсирует до размеров 10—20 км, превращаясь в нейтронную звезду или черную дыру в зависимости от первоначальной массы звезды. От выделившейся гравитационной энергии оболочка взрывается и со скоростью около 10 тыс. км/с выбрасывается в окружающее пространство. Происходит так называемый взрыв сверхновой II типа.

Рентгеновские источники

В 1970 г., после запуска первой рентгеновской обсерватории «Ухуру», были открыты удивительные объекты — яркие рентгеновские источники. Как выяснилось позднее, они представляют собой тесную двойную систему, состоящую из обычной звезды и коллапсара — черной дыры или нейтронной звезды. Вещество обычной звезды, перетекая на компактный объект под действием его гравитационного притяжения, нагревается до температуры в десятки миллионов градусов и излучает в рентгеновском диапазоне. Как вспоминает основатель рентгеновской астрономии американский физик, лауреат Нобелевской премии Риккардо Джиакони, открытие таких объектов стало полной неожиданностью, т.к. считалось, что двойная система должна разрушиться, если один из ее компонентов, взорвавшись, превратится в нейтронную звезду.

К настоящему времени в нашей Галактике обнаружено около 150—200 ярких рентгеновских источников. В зависимости от массы нормальной звезды, их можно разделить на два класса: маломассивные, если звезда-компаньон имеет массу порядка солнечной или меньше, и массивные, когда она в пять и более раз превышает солнечную. Эти объекты позволяют изучать, как протекают физические процессы в экстремальных условиях, которые невозможно создать в земных лабораториях: сверхплотные состояния вещества, сверхсильные гравитационные и магнитные поля.

В некоторых случаях масса компактного объекта в двойной системе, намного превышает верхний теоретический предел для нейтронных звезд, что позволяет классифицировать такие объекты, как двойные системы с черными дырами. В нашей Галактике уже обнаружено более десятка таких объектов.

К настоящему времени в нашей Галактике обнаружено около 150—200 ярких рентгеновских источников

Как стало ясно несколько лет назад, двойные рентгеновские звезды можно использовать для измерения темпа звездообразования. Детальное исследование популяций рентгеновских источников в других галактиках стало возможным лишь после того, как в самом конце XX в. были выведены на околоземную орбиту две рентгеновские обсерватории. Это телескоп «Чандра», разрешение которого достигает долей угловой секунды и не уступает лучшим наземным оптическим телескопам, и рентгеновский телескоп «ХММ-Ньютон», обладающий рекордно высокой чувствительностью.

В 2003 г., используя данные, полученные с космической обсерватории «Чандра», Ханс-Якоб Гримм

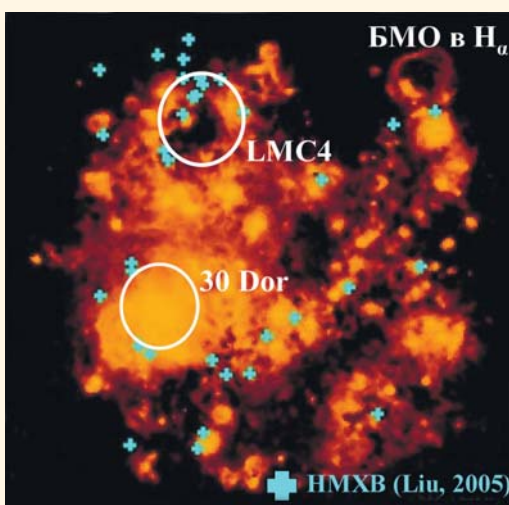
из Института астрофизики общества имени Макса Планка, доктор физико-математических наук Марат Гильфанов и профессор, академик РАН Рашид Сюняев (ИКИ РАН) исследовали массивные двойные рентгеновские объекты в различных звездообразующих галактиках и продемонстрировали, что их

число и полная светимость прямо пропорциональны темпу звездообразования в галактике.

С одной стороны, такое открытие дает возможность измерять темп звездообразования, в том числе и в далеких галактиках, по их рентгеновскому излучению. С другой, оно несколько неожиданно, так как из простейших теоретических соображений следует, что число массивных двойных рентгеновских объектов должно определяться не текущим темпом звездообразования в галактике, а всей его предысторией за последние 100 млн лет.

Предположим, в галактике в течение очень короткого времени шло интенсивное звездообразование. Отметим, что большинство ▶

МАССИВНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ В МАГЕЛЛАНОВОМ ОБЛАКЕ

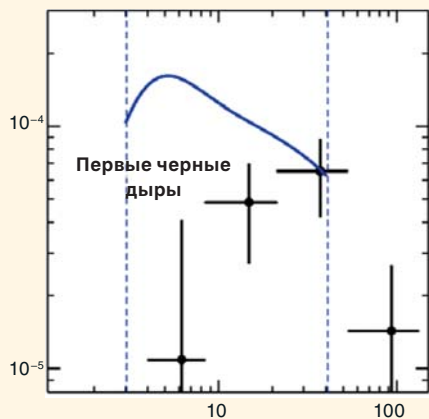


Гигантская оболочка ионизованного водорода LMC 4. Массивных рентгеновских двойных звезд много, а звездообразование в этой области завершилось 10—30 млн лет назад

Область 30 Золотой рыбы: Идет интенсивное звездообразование, но оно длится менее 10 млн лет, поэтому еще нет ни одного массивного рентгеновского источника

ЭВОЛЮЦИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МАССИВНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД, ПОСТРОЕННАЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Максимум численности массивных рентгеновских источников наступает через 20—50 млн. лет после начала звездообразования.



По горизонтальной оси отложен возраст в миллионах лет после начала звездообразования (логарифмическая шкала)

По вертикальной — относительное число массивных рентгеновских источников (черные точки, а длина черных линий показывает возможную погрешность) и взорвавшихся звезд (синяя кривая, она получена на основании теоретических расчетов).

Левая вертикальная пунктирная линия отмечает момент взрыва самых массивных звезд. В это время образуются первые черные дыры. Правая отмечает момент образования последних нейтронных звезд.

массивных звезд рождаются не поодиночке, а входят в состав двойных звездных систем и, таким образом, в перспективе, они могут стать рентгеновскими источниками. Однако ясно, что некоторое время ни одного такого источника в этой области не будет. Они появятся только через несколько миллионов лет, когда начнут взрываться первые наиболее массивные звезды. Затем произойдет взрыв менее массивных, и появятся новые, менее яркие рентгеновские источники. Примерно через 20—40 млн лет их количество достигнет максимума, после чего наступит спад, и уже через 50—100 млн лет число массивных рентгеновских двойных звезд упадет до нуля. Таким образом, очевидно, что более точная связь между числом рентгеновских источников и темпом звездообразования должна учитывать возраст звездного населения.

Этот вывод наглядно иллюстрируется изображением Большого Магелланова Облака, полученно-

го в излучении линии $H\alpha$ водорода (рис. на с. 73), на котором указаны массивные рентгеновские двойные, обнаруженные телескопом «ХММ-Ньютон».

Эволюция

В области 30 Золотой Рыбы активно идет процесс рождения массивных звезд, о чем свидетельствует

Большинство массивных звезд рождаются не поодиночке, а входят в состав двойных звездных систем и становятся потенциальными рентгеновскими двойными

интенсивное излучение в линии водорода $H\alpha$, но там практически отсутствуют рентгеновские двойные. В то же время в гигантской оболочке ионизованного водорода $LMC 4$ ситуация прямо противоположная — рентгеновских источников много, а звездообразование происходит гораздо медленнее. Это объясняется

тем, что всплеск звездообразования в области $LMC 4$ завершился примерно 10—30 млн лет назад, а число массивных рентгеновских двойных к настоящему времени достигло своего максимума. Было бы интересно, основываясь на теории звездной эволюции, рассчитать, как будет изменяться количество рентгеновских источников с момента начала звездообразования. Однако сделать это крайне сложно, так как теория эволюции двойных систем значительно сложнее, чем одиночных звезд.

В 2006 г. ведущий научный сотрудник ИКИ РАН Марат Гильфанов и научный сотрудник ИКИ РАН Павел Штыковский предприняли попытку ответить на этот вопрос, основываясь исключительно на наблюдениях. Для этого они, используя оптические каталоги звезд, исследовали небольшие участки Малого Магелланова Облака и восстановили для каждого из них историю звездообразования. Затем, уже применяя данные обсерватории «ХММ-Ньютон», определили местоположение всех массивных рентгеновских двойных. Сравнивая, как зависит плотность этих

источников от возраста окружающего их звездного населения, они определили зависимость числа рентгеновских источников от времени, прошедшего с момента звездообразования. Малое Магелланово Облако было выбрано не случайно. Эта небольшая галактика неправильной формы — спутник Млечного Пути и расположена сравнительно близко, на расстоянии около 200 тыс. световых лет.

Результаты, полученные М. Гильфановым и П. Штыковским, оказались несколько неожиданными (рис. вверху). Их можно сравнить

НАУЧНЫЕ КОНСУЛЬТАНТЫ

Марат Равильевич Гильфанов — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН.

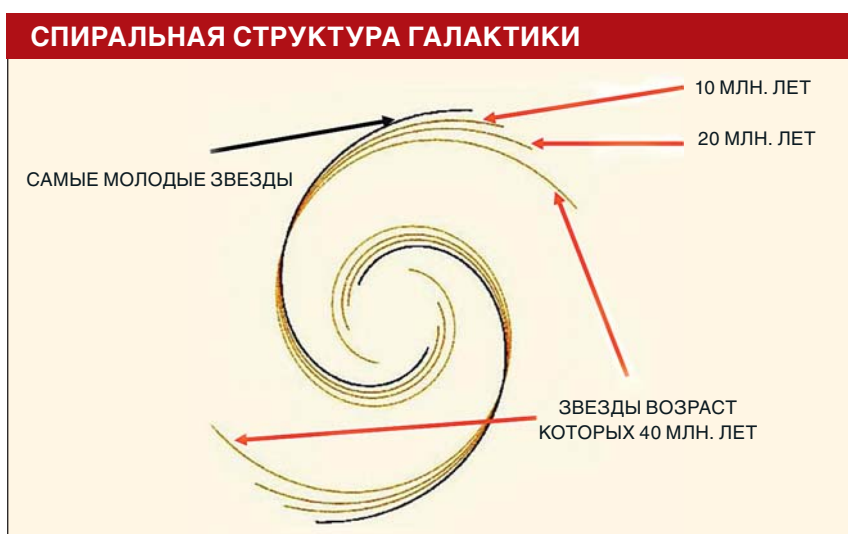
Павел Евгеньевич Штыковский — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института космических исследований РАН.

с кривой темпа вспышек сверхновых II типа, полученной на основании теоретических расчетов.

Через 3 млн лет после всплеска звездообразования первыми начинают взрываться самые массивные звезды (левая пунктирная линия). Спустя 5 млн лет темп вспышек сверхновых достигает своего максимума, а затем начинает постепенно спадать. Через 40 млн лет образуются последние нейтронные звезды в результате взрывов звезд массой около восьми солнечных. Предполагается, что менее массивные объекты не взрываются. Таким образом, напрашивается вывод, что к этому времени уже не должно остаться ни одной массивной рентгеновской двойной, но, согласно наблюдениям, их количество наоборот, достигает своего максимума. Почему экспериментальная кривая численности рентгеновских источников хотя бы в общих чертах не совпадает с кривой взрывов сверхновых? Может, теоретическая кривая все же ошибочна?

Ученые считают, что оснований для подобного вывода нет. Экспериментальная кривая и не должна повторять кривую темпа вспышек сверхновых, потому что между возникновением нейтронной звезды и появлением на небе рентгеновского источника пройдет некоторое время. В зависимости от светимости источника, это время может достигать 20—30 млн лет. Полученная кривая поможет теоретикам проверить и откалибровать теорию эволюции двойных систем и кроме того уточнить новый индикатор звездообразования, который удалось разработать благодаря космическим рентгеновским телескопам «Чандра» и «ХММ-Ньютон». Возможно, что наблюдение галактик в рентгеновском диапазоне раскроет дополнительные возможности для диагностики звездообразования в далеких галактиках, даже там, где классические методы порой дают сбой.

Полученная зависимость важна не только с точки зрения теории эволюции двойных систем



и диагностики звездообразования в далеких галактиках. Она также позволяет предсказать ряд интересных эффектов, поддающихся экспериментальной проверке. Одно из таких предсказаний, сделанных М. Гильфановым и П. Штыковским, касается особенностей проявления спиральной структуры галактик в рентгеновском диапазоне. Для его проверки они исследовали расположение массивных рентгеновских источников в спиральной галактике М51, находящейся на расстоянии 30 млн световых лет, в рукавах которой происходит интенсивное звездообразование. Спиральную структуру рукавов можно достаточно хорошо определить по пику излучения водородной линии $H\alpha$, расположение которого совпадает с местонахождением самых молодых звезд. Если максимум численности массивных рентгеновских двойных наступает через 30—40 млн лет после всплеска звездообразования, то их распределение будет смещено относительно спиральной структуры, наблюдаемой в линии $H\alpha$ (рис. *вверху*).

Наблюдения подтвердили правильность этого вывода, хотя и поставили новые вопросы. Схожие результаты были получены при исследовании массивных рентгеновских двойных звезд в спиральных рукавах нашей Галактики.

Можно надеяться, что открытие, сделанное в Институте космических исследований, привлечет к новой проблеме астрономов-наблюдателей и даст толчок к более глубокому изучению популяций массивных рентгеновских двойных в галактиках. Это позволит в будущем уточнить ряд спорных моментов в теории эволюции двойных систем. В то же время применение нового метода для исследования звездообразования в далеких галактиках поможет воссоздать историю образования звезд во Вселенной. ■

Беседовал Василий Янчилин

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Джиакони Р. У истоков рентгеновской астрономии (Нобелевская лекция по физике — 2002) // УФН, 2004, т. 174, № 4, с. 427—438.
- Попов С.Б., Прохоров М.Е. Популяционный синтез в астрофизике // УФН, 2007, т. 177, № 11, с. 1179—1206.
- Гурский Г., Ван ден Хевел Э. Рентгеновские источники — двойные звезды (перевод из *Scientific American*) // УФН, 1976, т. 118, № 4, с. 673—691.
- Шноппер Г., Делвай Дж. Рентгеновское небо (перевод из *Scientific American*) // УФН, 1973, т. 110, № 8, с. 607—620.
- Шкловский И.С. Звезды: их рождение жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.
- Тейлер Р. Строение и эволюция звезд. М.: Мир, 1973.