

Звезды: от неподвижности до сверхскоростей

Г.Н. ДРЁМОВА,
кандидат физико-математических наук
В.В. ДРЁМОВ,
доктор физико-математических наук
Российский федеральный ядерный центр
А.В. ТУТУКОВ,
доктор физико-математических наук
Институт астрономии РАН

*Посвящается 300-летию открытия
Э. Галлеем собственного движения звезд*

С глубокой древности – назовем ее “эпохой первобытной астрономии” – звезды считались неподвижными. Безусловно, человек видел, что звезды восходят и заходят, “перемещаясь” по звездному небу, но расстояние между ними не меняется. В этом смысле у первых созерцателей ночного неба сформировалось представление о неподвижности звезд, что, возможно, и послужило эволюционным гарантом человечеству как виду в его стремлении научиться ориентироваться в пространстве и во времени.

Наиболее ранними свидетельствами об успешном решении поставленной задачи можно считать фрагменты наскальной живописи, изображающие сцены охоты на животных; они датируются 30–60 тыс. лет до н.э. По мнению некоторых антропологов, их можно трактовать как зооморфные символы для обозначения частей света. В каких действительных представлениях жил человек в каменном веке мы, к сожалению, достоверно не знаем, но воображение рисует величественную картину ночного усеянного звездами неба, которым восхищается первый

человек. Кто бы он ни был – он был первый астроном...

Фон неподвижных звезд служил очень удобной “привязкой” для выделения периодически повторяющихся небесных явлений: видимого движения Луны с чередованием ее фаз, изменения положения Солнца и нескольких известных тогда планет. Такой вывод мы можем сделать, опираясь на многочисленные археологические находки, обнаруженные на территории Закавказья, Северной Америки, Африки, Индии, Китая; их датируют эпохой позднего неолита (6–8 тыс. до нашей эры). Эти находки представляют собой календари, выбитые на камне, с изображениями меток, обозначающих месяцы и даты солнцестояния, а также созвездий, рядом с которыми приводилась схема, указывающая, какие звезды видны в каждый час ночи.

Уже с третьего тысячелетия до н.э. археологической аргументацией стали служить не отдельные каменные “послания”, а целые мегалитические комплексы. Как не назвать величественный храм Стоунхендж, посвященный Луне и Солнцу, построенный вблизи го-



Млечный Путь. Первой книгой пещерного человека было, по всей видимости, ночное небо, алфавитный звездный узор которого еще предстояло научиться читать. Рисунок с интернет-сайта: nationalgeographic.com.

рода Солсбери в юго-западной Англии, и обнаруженный еще в XVII в. английским писателем и антикваром Джоном Обри; или крупнейший храмовый комплекс Древнего Египта в Карнаке, посвященный верховному богу Солнца. Можно также добавить многоступенчатое культовое сооружение Зиккурат в Уре, возведенное в честь бога Луны Нанна в древней Месопотамии, в междуречье Тигра и Евфрата (территория современного Ирака). Все эти сооружения предназначались для проведения долговременных наблюдений за светилами, что, в свою очередь, было вызвано нуждами сезонного земледелия, задачами навигации и религиозного культа.

Так, в Вавилонии были найдены астрономические таблицы, известные как халдейские, датируемые VIII–VII вв. до н.э. Они содержали

эфемериды Луны и планет очень высокой точности. Сегодня непросто объяснить их появление – настоящая историческая загадка. Опираясь на эти таблицы, древнегреческие астрономы пытались создавать первые кинематические теории движения Солнца, Луны и планет; что же касается звезд, то тезис об их неподвижности рассматривался античными философами по-разному. В труде Архимеда (216 г. до н.э.) “Исчисление песчинок” цитируется знаменитый древнегреческий ученый Аристарх Самосский (310–230 гг. до н.э.), который считал, что Земля обращается вокруг Солнца, а звезды неподвижны и находятся на сфере очень большого радиуса, по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца.

Со временем растущие ряды наблюдений за звездами систематизировали,



Каменные календари древних государств Месопотамии, основанные на долговременных наблюдениях жрецов; еще не имеют научной составляющей, но предшествуют ее возникновению (интернет-сайт: janto.ru).



Древнейший храмовый комплекс Стоунхендж эпохи неолита в юго-западной Англии. По сути, это первая мегалитическая астролябия, построенная для измерения положений Луны и Солнца, определения моментов их восходов и заходов, а также лунных и солнечных затмений. Фото с интернет-сайта: www.davidrowan.co.uk.

что привело к созданию каталогов. Наибольшую известность, начиная с античной эпохи, снискал каталог Гиппарха (185–126 гг. до н.э.); он составил его на острове Родос, по итогам многолетних наблюдений, позволивших ученому систематизировать данные о 850 звездах, с описанием их эклиптических координат и звездных величин.

Надо сказать, что Гиппарх был очень смелым человеком своего времени, поскольку впервые нарушил существовавший принцип устойчивого положения Земли в центре окружности, по которой вокруг нее равномерно движется Солнце, и, “придав Земле эксцентричное положение”, объяснил наблюдаемые неравенства в движении Солнца.

Каталог Гиппарха дошел до нас благодаря сочинению Клавдия Птолемея “Альмагест” (середина II в. н.э.; Земля и Вселенная, 1987, № 2), дополненному сведениями о еще 170 звездах с поправками долгот за прецессию. Термин “прецессия”, кстати, также был предложен Гиппархом. На протяжении почти полутора тысячи лет каталог Гиппарха оставался незыблемым стандартом в позиционной астрометрии.

На 2000 лет растянулось изучение неравномерности движения Луны, Солнца и пяти тогда известных планет – Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. За это время астрономия обогатилась изощренными геометрическими моделями устройства Солнечной системы. Например: модели с эксцентром, с эквантом (выравнивающей точкой), а также созданной Птолемеем теорией эпициклов и деферентов, описывающих траекторию движения планет и их центров соответственно. Такие построения как-то объясняли “петлевое” движение планет и неравномерность их движения в различных частях эклиптики.

Не понимая природу сил, вынуждающих небесные тела двигаться, человек все время стремился математически обобщить их видимое движение. Идеи Николая Кузанского (XV в.) об относительности движения, подхваченные великим польским астрономом Николаем Коперником (Земля и Вселенная, 1973, №№ 1,3), привели к качественно новому анализу данных прежних наблюдений; они позволили прийти к гелиоцентрической концепции мира. Коперник объяснил кажущееся движение звезд движением самой Земли, ее суточным вращением, годичным обращением вокруг Солнца, прецессионным движением. Упорядочив планеты по их расстояниям от Солнца, Коперник “освободил” Солнечную систему от громоздкого аристотелевского описания 55-ю хрустальными сферами, но в отношении звезд ученый остался верен идее “Sphaera Stellarum Fixarum”,

то есть сфере неподвижных звезд. В своем знаменитом труде “О вращении небесных сфер” он пишет: “...между крайней планетой Сатурн и сферой неподвижных звезд существует громадное пространство”.

Кульминационной попыткой поиска мирового порядка стала работа Иоганна Кеплера “Гармония мира” (1620 г.). Опираясь на богатейшее научное наследие, накопленное непревзойденным наблюдателем дотелескопической эры датским астрономом Тихо Браге (1546–1601; Земля и Вселенная, 1996, № 6), Кеплер смог выйти за рамки “голых” кинематических моделей и связать движение планет с воздействием Солнца. Правда, он ошибся, посчитав, что воздействие связано с природой магнитных сил, но главное: Кеплер поднял проблему взаимодействия тел на расстоянии. Найденные ученым общие закономерности в движении всех планет были сформулированы потом в знаменитых трех законах Кеплера (Земля и Вселенная, 1994, № 1).

С началом телескопической эры, связанной с именем легендарного итальянского ученого Галилео Галилея (1564–1642; Земля и Вселенная, 1965, № 1), ничего не поменялось в отношении тезиса о неподвижности звезд, который сохранялся еще добрых сто лет. Галилей, опираясь на собственные наблюдения звезд Млечного Пути, впервые высказал мысль о том, что звезды по размерам подобны Солнцу, а различия в их блеске связаны с разным их удалением от Земли. Так разрушилась последняя сфера Аристотеля, и звезды “разъехались” на произвольные расстояния, что создало качественную основу для такого фундаментального понятия в космологии, как “бесконечность”.

Теперь стало ясно, что звезды находятся на разных расстояниях от Земли, но по-прежнему неподвижны. Почему? – Фатально не хватало инструментальной точности для измерения положений звезд? (Птолемеевские данные

не раз исправлялись астрономами.) Вспомнить хотя бы, каких успехов достигли в IX–XIII вв. астрономы Востока, разработав новый математический аппарат, основанный на таблице хорд Птолемея, который получил название сферическая тригонометрия. Кроме того, была серьезно усовершенствована астролябия: она позволила производить по ходу измерений преобразование эклиптических координат в горизонтальные (Земля и Вселенная, 2016, № 3). Эти два изобретения оказали заметную помощь в улучшении точности и качестве наблюдений, о чем свидетельствуют дошедшие до нас астрономические таблицы “Зиджи” крупнейших арабских астрономов Аль-Баттани, Ас-Суфи, Бируни, Ат-Туси, Улугбека (1394–1449; Земля и Вселенная, 1994, № 6). Но все это не зародило сомнений в тезисе



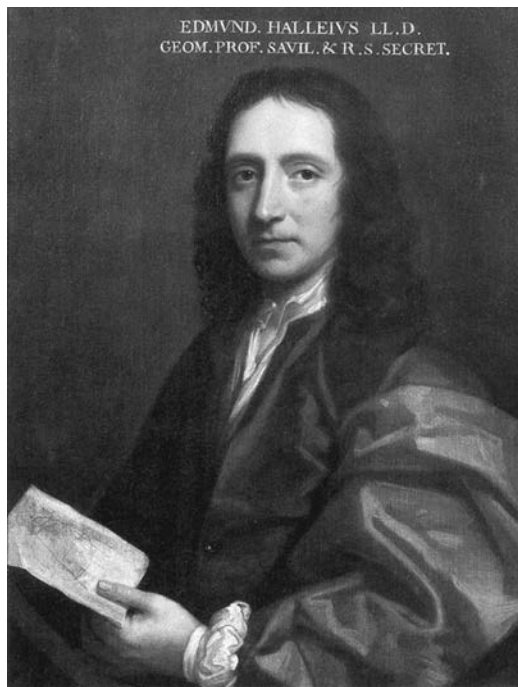
Астролябия средневековья уже тогда умещалась на ладони. Чем не портативный гаджет для измерения координат светил? Фото с интернет-сайта: www.christies.com.

о неподвижности звезд – наверное, не хватило смелости...

Но зато ее хватило королевскому астроному Гринвичской обсерватории Эдмонду Галлею (1656–1742; Земля и Вселенная, 1982, № 4): сравнивая положения звезд из каталога Птолемея с данными, полученными его современниками, он обнаружил, что для трех ярких звезд Северного полушария – Арктура, Сириуса и Альдебарана – остаются, за вычетом всех поправок, разности в положениях. В 1718 г. Э. Галлей сделал однозначный вывод о том, что звезды имеют собственное движение.

За следующие полвека собственные движения были измерены всего у 14 звезд. Но даже эти малочисленные измерения оченьгодились английскому астроному Вильяму Гершелю (1738–1822; Земля и Вселенная, 2008, № 6), который сообразил, что движение Солнца должно “отражаться” на видимых смещениях звезд, и нашел точку, куда направлено движение Солнца, – положение апекса вблизи звезды λ Her.

С изобретением фотографии во второй половине XIX в. положение дел



Английский королевский астроном Эдмонд Галлей, открывший движение звезд. Портрет художника Томаса Мюррея, 1687 г.



“Ковш” Большой Медведицы: а – 50 тыс. лет назад; б – сейчас; в – через 50 тыс. лет; г – через 100 тыс. лет. Эволюция узоров созвездий наглядно демонстрирует собственное движение звезд. Но вековые изменения положений звезд столь незначительны, что человечество на долгие тысячелетия оказалось в плену идеи о неподвижности звезд (интернет-сайт: www.pikabu.ru).

в астрометрии качественно улучшилось: определение собственных движений и относительных параллаксов звезд стало массовым. Данные по собственным движениям впервые позволили оценить тангенциальную (вдоль траектории движения) компоненту скорости звезды. Очень скоро стало возможным не только фотографирование звездного неба, Луны и Солнца, но и спектров звезд, из которых можно извлечь информацию о второй компоненте скорости, радиальной или лучевой, что одно и то же. Эта методика стала развиваться благодаря важному эффекту, открытому в 1842 г. австрийским математиком, физиком Христианом Доплером и состоявшему в том, что смещение частоты (длины) волны, излучаемой движущимся источником, зависит от лучевой скорости его движения.

С 1888 г. все обсерватории мира включились в программу систематических измерений скоростей звезд. Анализ собственных движений объектов и их пространственных скоростей позволил развивать качественно новые методы изучения строения нашей Галактики, описание которой до сих пор велось путем арифметического подсчета звезд внутри площадок, на которые разбивалась небесная сфера. Так, например, голландский астроном Якобус Каптейн обнаружил, что распределение собственных движений различных звезд не является случайным, а, наоборот, имеет хорошо выделенную структуру в виде двух звездных потоков, движущихся почти в противоположных направлениях. Выявленная асимметрия в движении звезд получила название “двух потоков” и нашло свое объяснение в 1926 г.

благодаря модели дифференциального вращения Галактики (каждая галактическая подсистема вращается со своей скоростью), идею которого предложил шведский астроном Бертиль Линдблад, а наблюдательное обоснование придумал нидерландский астроном Ян Оорт (1900–1992; Земля и Вселенная, 1965, № 2). Линдблад ввел две подсистемы в Галактике: медленно вращающуюся сферическую подсистему с шаровыми скоплениями и плоскую быстро вращающуюся подсистему, названную диском (куда входит Солнце, звезды в окрестности Солнца, рассеянные скопления). Ян Оорт постарался организовать наблюдения так, чтобы в результате их анализа явно проявилось бы вращение Галактики. Определяя лучевые скорости звезд в двух противоположных направлениях от Солнца вдоль плоскости Галактики, на примере O – В-звезд и цефеид Оорт показал, что зависимость лучевой скорости от расстояния имеет вид двойной волны – два максимума и два минимума. Воспроизведение волны неоспоримо доказало, что Галактика вращается! С этого момента крылатые слова Галилео Галилея “E pur si muove!” (“И все-таки она вертится!”) можно понимать в глобальном контексте, то есть отнести ко всей нашей Галактике в целом.

Дальнейшее изучение различий звезд по их кинематическим свойствам и особенностям распределения в пространстве привело немецкого астрофизика Вальтера Бааде (1893–1960; Земля и Вселенная, 1969, № 1) к открытию различных населений нашей Галактики, звезды которых отличаются возрастом и химическим составом. К середине XX в. благодаря ряду теоретических работ С. Чандрасекара, В. Амбарцумяна и других ученых был создан “кинематический портрет” Галактики, но некоторые звезды “упорно не встраивались” в общую картину движения. Это послужило толчком, к введению термина *звезды с аномальной*

кинематикой; их природа оказалась много богаче, чем предполагалось сначала, что и потребовало отдельной классификации.

Исторически объектами первого класса здесь оказались “высокоскоростные звезды”: самые первые кандидаты в эту группу были обнаружены на рубеже XVIII–XIX вв. – звезда Лакайля 9352, звезды 61 Лебедя, Грумбридж 1830, Каптейна (VZ Живописца, HD33793) и Барнарда. Они получили поэтическое название “летающие” и оказались маломассивными звездами поздних спектральных типов, движущимися с пространственными скоростями 60–300 км/с, что в несколько раз превосходит пекулярные скорости звезд диска (~20–30 км/с). Идея Б. Линдблада о дифференциальном вращении Галактики, состоящей из различных взаимопроникающих звездных подсистем, обращающихся вокруг общего центра, хорошо подошла для объяснения природы “летающих” – имеющих высокие эксцентриситеты. Такие звезды, населяющие медленно вращающуюся подсистему (гало), пересекают галактический диск перпендикулярно его плоскости (как бы “падают” из гало в диск) и создают наблюдательный эффект мнимого быстрого движения – по сравнению с окружающими нас звездами действительно быстровращающегося диска. К ним относится и наше Солнце.

Второй класс звезд с аномальной кинематикой был выделен в 1960-е гг. и по предложению голландского физика и астронома А. Блаау назван “убегающими”. В отличие от звезд первой группы, они участвуют в обратном движении – “убегают” из диска в гало. Как правило, это молодые ранних спектральных типов массивные звезды, с пространственными скоростями до 100–300 км/с. Их природа, по-видимому, связана с двумя разными сценариями: в первом рассматривается динамический выброс одной или нескольких звезд, обусловленный



Участок неба размером около 12 св. лет в созвездии Змееносца. Фронтальные дуги убегающих звезд – прямые свидетельства взрывных процессов в тесных двойных звездах. В центре – голубоватая звезда ζ Змееносца массой $20 M_{\odot}$. Сверху вниз простирается белая дуга – это ударная волна, созданная в межзвездном газе убегающей звездой ζ Змееносца. Инфракрасный снимок сделан в 2012 г. космической обсерваторией “WISE”. Фото NASA.

столкновениями в молодых рассеянных скоплениях, а также в звездных O – B-ассоциациях диска. Во втором сценарии, предложенном в 1957 г. американским астрономом Фрицем Цвикки, рассматривается распад тесной двойной системы вследствие взрыва сверхновой, в результате которого могла родиться убегающая звезда. Сегодня этот сценарий имеет многочисленные наблюдательные подтверждения в виде головных ударных волн сжатого вещества межзвездной среды, которые и вызываются убегающими звездами, получившими импульс при взрыве своего компаньона. Такие ударно-волновые “дуги” наблюдаются у нескольких десятков убегающих звезд. Важно отметить, что и высокоскоростные, и убегающие звезды – объекты, связанные с нашей Галактикой; их полная энергия (гравитационная плюс

кинетическая) строго отрицательна, то есть такие звезды не покидают пределов Галактики.

Третий класс звезд с аномальной кинематикой был выделен в 2008 г. Р. Напивацким и М. Силвой в результате анализа статистической диаграммы, построенной для 96 известных убегающих звезд. Диаграмма представляет собой распределение звезд в зависимости от их массы и скорости, рассчитанной в момент выброса. Точка выброса звезды находилась путем реконструкции траектории звезды, то есть интегрированием “назад во времени” уравнений движения. Таким образом, было выявлено 10 систем, скорости которых в реконструированной “точке выброса” составили 350–500 км/с, что превосходит галактическую “скорость освобождения” в точке их наблюдения. Объекты получили название “быстро убегающих” звезд, поскольку реконструкция направления их выброса указывала на верхние слои диска, делая их родственными убегающим звездам; а также потому, что скорость их выброса больше второй космической. Возможно, передача более мощного импульса звезде при взрыве сверхновой объясняется стадией общей оболочки, которую могла проходить звезда Вольфа–Райе вместе с обычной звездой Главной Последовательности.

Если звезды первых трех классов были сначала открыты (а потом теоретически осмыслены и интерпретированы), то объекты четвертого класса были сначала предсказаны. В 1988 г. в журнале “Nature” была опубликована статья Джека Хиллза из Лос-Аламосской национальной лаборатории, в которой рассматривался тривиальный сценарий, построенный на принципе перераспределения момента импульса в классической постановке задачи трех тел, который приводил к рождению нетривиальных объектов, получивших название “сверхскоростные звезды”. Приставка “сверх”

отражала новый, ранее не известный уровень кинематической аномальности пространственного движения звезды, достигавший около 4000 км/с по сравнению с пекулярными скоростями звезд диска (20–30 км/с).

Правда, в классической задаче трех тел рассматривался один неклассический объект – сверхмассивная черная дыра (СМЧД; Земля и Вселенная, 2010, № 1; 2016, № 5). Разгадке такого объекта были посвящены численные расчеты Дж. Хиллза. Тесная двойная система (ТДС), состоящая из пары звезд, случайно попавшая в окрестность СМЧД, может быть “разорвана” приливными силами; тогда один из ее компонентов стал бы спутником СМЧД, а другой (из-за перераспределения импульса) мог быть “выброшен” из галактического центра с высокой скоростью. Расчеты Дж. Хиллза, учитывающие варьирование пространственной ориентации трех тел, расстояние в звездной паре и прицельный параметр, показали, что существует не нулевая вероятность выброса звезды как сверхскоростной – то есть со скоростью, превышающей вторую космическую скорость для галактического центра – 750 км/с.

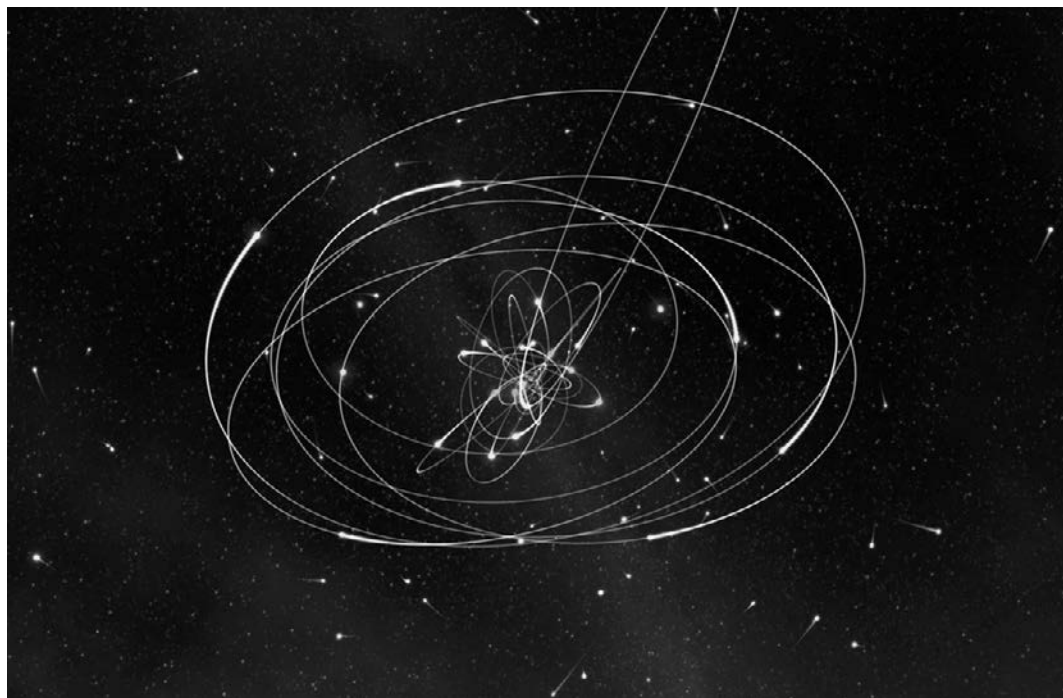
Обнаружение сверхскоростных звезд можно было бы рассматривать как одно из убедительных свидетельств в пользу существования СМЧД в нашей Галактике. Дело в том, что прогноз Дж. Хиллза был сделан за несколько лет до старта двух проектов, нацеленных на глубокий обзор звезд внутри области радиусом в одну угловую секунду с центром в Sgr A* (радиоисточник в галактическом центре) и долгосрочный мониторинг их движения.

Проект Европейской Южной Обсерватории в Ла Силлья с использованием нового 4-м технологического телескопа (позже – на VLT) начался в 1989 г., а с помощью 10-м телескопа “Кек” на Гавайях – в 1992 г. Открытие центральных звезд Галактики внутри области

размером в 1" (отсюда и название S-звезды “arcSecond”) могло бы также послужить свидетельством существования СМЧД. Результаты не заставили себя долго ждать: в 2002 г. для нескольких S-звезд были собраны и обработаны цифровые изображения высокого разрешения, полученные с использованием специальных возможностей адаптивной оптики в ближнем инфракрасном диапазоне.

Изучение траектории движения S-звезд позволило оценить их орбитальные параметры, восстановить трехмерную структуру звездных орбит и (в дополнение к спектральным данным) собрать информацию о гравитационном потенциале, в котором они движутся как пробные частицы. Гравитационный потенциал, оцененный в двух независимых проектах, указывал на массу невидимого центрального тела, вокруг которого движутся S-звезды, порядка $4,5 \times 10^6 M_{\odot}$. Что, как ни СМЧД, может “претендовать” на такую массу, заключенную в крохотном объеме, и при этом оставаться невидимой? После 2002 г. число S-звезд с хорошо определенными орбитами возросло до 28; в настоящее время продолжается мониторинг еще более 100 S-звезд.

В процессе спектрального изучения S-звезд возникла новая проблема – парадокс молодости галактического центра: поскольку здесь оказались массивные звезды (3–4 M_{\odot}) ранних спектральных классов (B0–B8). В 2005 г. появилось сообщение об открытии американским астрономом Уорреном Брауном и его коллегами первой сверхскоростной звезды SDSS J090745.0+024507. Эта звезда спектрального типа B9 была обнаружена на удалении (71 кпк) от галактического центра; лучевая скорость ее движения относительно центра составляла 709 км/с. По определению, звезда, скорость пространственного движения которой в несколько раз превосходит скорость “убегания” из Галактики на



Компьютерная модель S-звезд, захваченных “в плен” сверхмассивной черной дырой нашей Галактики. Видны траектории движения S-звезд. NCSA UCLA/Кеск.

данном галактоцентрическом радиусе, называется “сверхскоростной”. SDSS J090745.0+024507 была обнаружена на далекой галактической периферии, где вторая космическая скорость оценивается в 200–250 км/с. Таким образом, сверхскоростные звезды – это больше не связанные с Галактикой объекты; их полная энергия положительна.

К настоящему времени открыты два десятка сверхскоростных звезд. Их поиск осуществляется в обзорном режиме с помощью 6,5-м многозеркального телескопа MMT в США (штат Аризона). Благодаря высокоточным спектроскопическим методам сегодня известно, что сверхскоростные звезды – это быстрые ротаторы; скорость их осевого вращения может достигать 300 км/с, что косвенно указывает на их эволюционный статус – звезд Главной последовательности (область на диаграмме Герцшпрунга–Рассела). Анализ

звездных атмосфер дает возможность оценить температуры и ускорение свободного падения на их поверхности, что, в свою очередь, позволяет перейти к оценке спектрального класса (B0–B8), а также светимости звезды и выполнить оценку расстояния до нее. Затем, используя теоретические эволюционные модели, можно вычислить массы и радиусы сверхскоростных звезд ($\sim 3\text{--}4 M_{\odot}$).

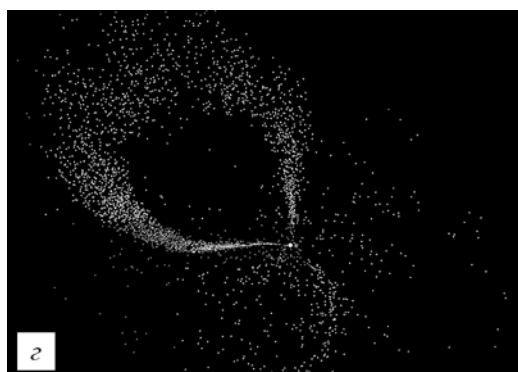
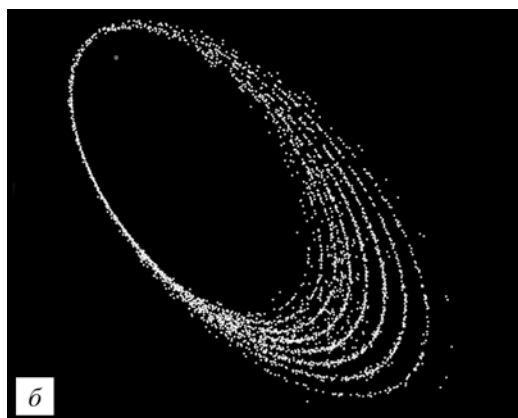
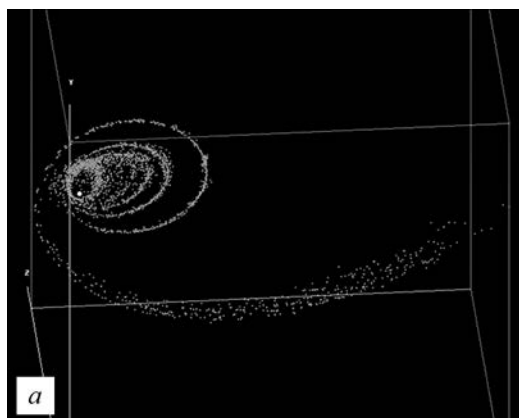
Удивительно совпадение статистики сверхскоростных звезд и S-звезд, а также сходство их спектральных характеристик и масс. (Они могли бы быть компонентами некогда одной и той же родительской двойной системы). Действительно – откуда взялись молодые массивные звезды на окраине Галактики, типичное население которой представляют старые шаровые скопления?

Таким образом, сценарий Дж. Хиллза мог отчасти объяснить парадокс

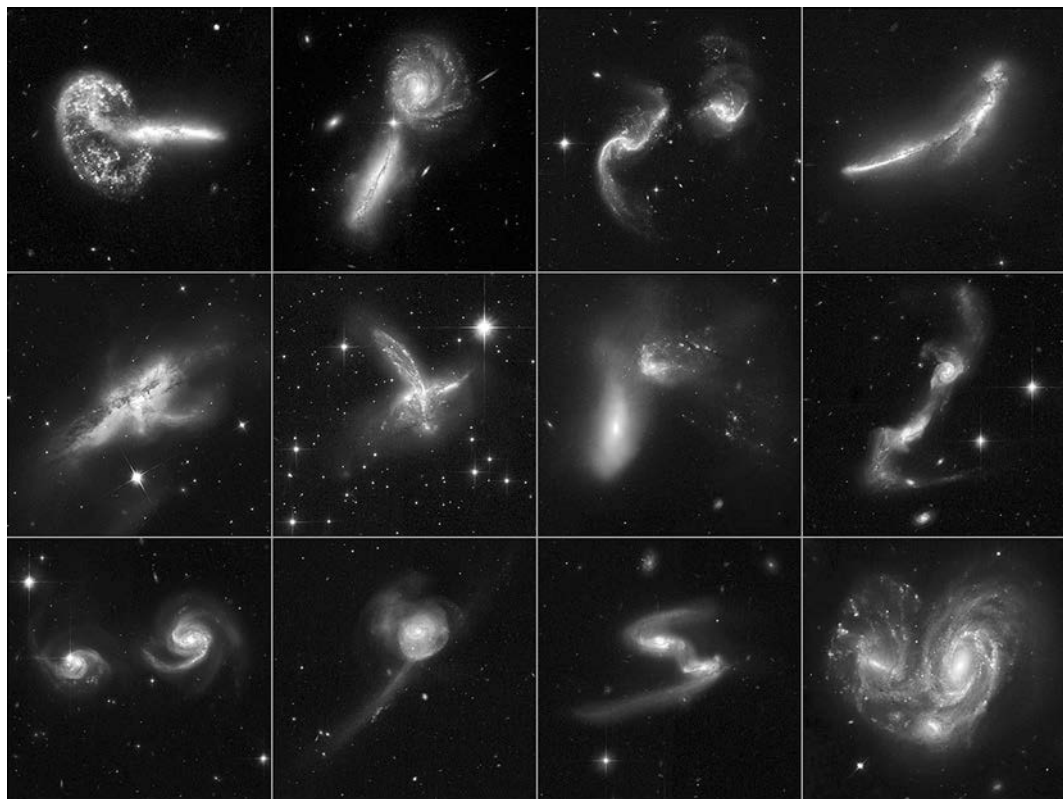
молодости звезд, как в центре Галактики, так и на ее периферии. Конечно, наиболее важный фактор парадокса молодости звезд связан с эффектом наблюдательной селекции – в первую очередь астрономы открывают самые яркие объекты.

Главная трудность в наблюдении сверхскоростных звезд – их удаленность, что создает проблему в прямом измерении их собственного движения. Вспомним хотя бы жаркую дискуссию вокруг кандидата в сверхскоростные звезды – HE0437–5437 в созвездии Золотая Рыба, открытого в 2005 г. немецким астрономом Хайнцем Эдельманом с помощью 8,2-м телескопа VLT. Скорость этого объекта оценивалась как

более 700 км/с, что указывало на время, требуемое для преодоления им расстояния от центра до места, где объект обнаружен (порядка 100 млн лет), что не соответствовало возрасту звезды. Он оценивался как порядка 20 млн лет! Полученное расхождение способствовало рождению гипотезы о внегалактическом происхождении объекта. Например, выброс из Большого Магелланова Облака мог бы “снять” противоречие с разновременностью, но для выброса “нужна” черная дыра с массой в тысячу масс Солнца, которая не имеет наблюдательных подтверждений. Поэтому вопрос о происхождении HE0437–5437 по-прежнему открыт. Привлекаются и другие сценарии:



Компьютерные модели приливного разрушения сверхскоростных звезд, имитирующие процессы, происходящие в “задаче N-тел” и описывающие звезду как структурированный объект: а – “спираль”, б – “ожерелье”, в – “сигара”, г – “веер”. Рисунки авторов.



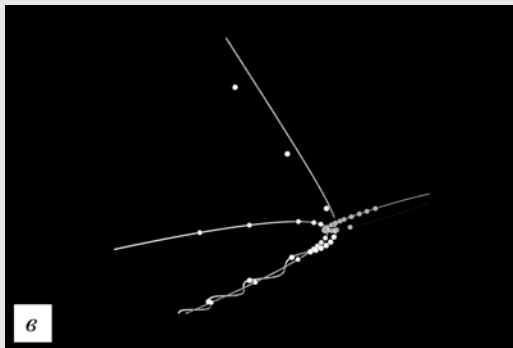
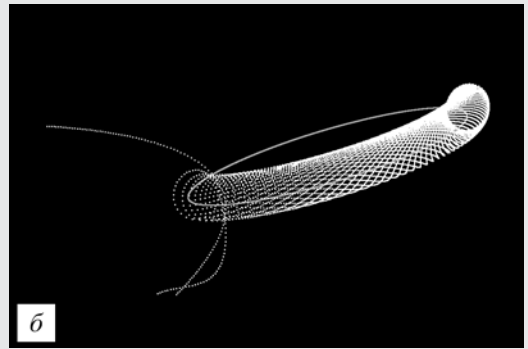
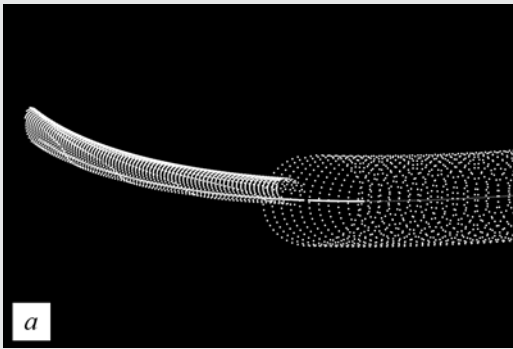
Сливающиеся и взаимодействующие галактики. В их центральных частях содержатся сверхмассивные черные дыры. Снимки получены в 2008 г. с помощью Космического телескопа Хаббла (www.skyimagerlab.com). Фото NASA.

например, с выбросом двойной сверхскоростной звезды, компоненты которой “по пути” “сливаются” в одиночную массивную звезду.

Основная проблема в изучении сверхскоростных звезд – это прямые измерения их собственных движений. Для более чем половины всех известных сегодня сверхскоростных звезд невозможно измерить собственное движение наземными средствами. Мы испытываем те же трудности, что во времена Э. Галлея, только тогда это касалось звезд солнечной окрестности, а теперь – самых удаленных звезд нашей Галактики. По данным европейской космической обсерватории “Гайя” (“GAIA”, Global Astrometric Interferometer for Astrophysics – глобальный астроме-

трический интерферометр для астрофизических исследований; запущена 19 декабря 2013 г.), уже сейчас создаются тестовые каталоги с указанием координат и направлением движения около миллиарда звезд с точностью до 10^{-4} угловой секунды в год (Земля и Вселенная, 2014, № 3). Такие измерения помогут выяснить, откуда выброшены сверхскоростные звезды: из центра или из диска нашей Галактики, а, может, вообще из других галактик?

За 12 лет непрерывного изучения сверхскоростных звезд были смоделированы десятки всевозможных сценариев, объясняющих их рождение. Наибольший кинетический ресурс достигался в сценариях “с участием черных дыр”, массы которых

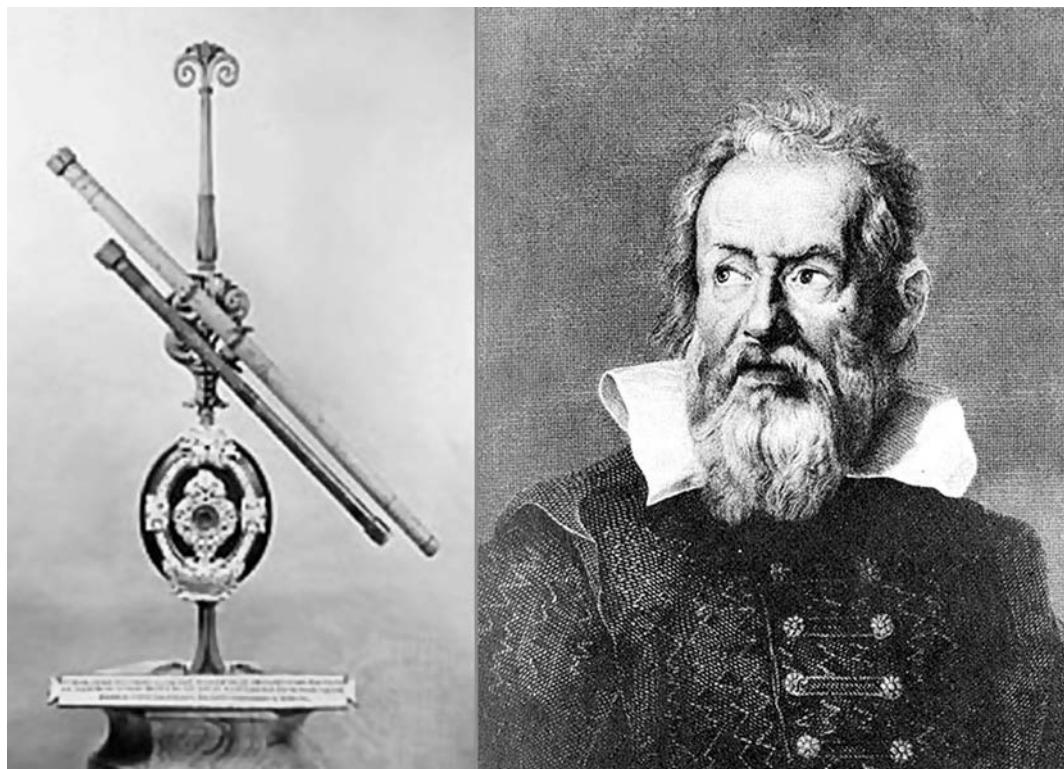


Компьютерные модели орбитальных “историй” звезд в перекрестном поле двух сверхмассивных черных дыр: а – сохранение стабильной орбиты вокруг родительской СМЧД, б – динамический перехват звезды с орбиты вокруг родительской СМЧД на орбиту вокруг центральной СМЧД, в – выброс сверхскоростной звезды. Рисунки авторов.

варьировались в широком диапазоне – от звездных до миллиардов солнечных. Но в первом варианте требовалась плотная “заселенность” галактического центра, тогда как современные наблюдения показывают, что галактический центр внутри области радиусом 1 мпк (0,00326 св. лет) пуст. Во втором варианте возникало “ограничение” на массу СМЧД. Казалось бы – чем больше масса СМЧД, тем дальше от нее проходит граница приливного радиуса, обозначающая то безопасное расстояние, на котором звезда, избегая разрушений, может получить максимальное ускорение при выбросе. Но у черной дыры есть собственный размер, который с ростом массы СМЧД начинает превосходить размеры приливного радиуса: в таких обстоятельствах звезда просто будет “проглочена” СМЧД.

Так что сценарий Дж. Хиллза для объяснения феномена сверхскоростных звезд оказался самым реалистичным. В его рамках уже получены ответы на интригующие вопросы: какова максимально возможная скорость выброса звезды, способны ли “широкие” звездные пары (расстояние между ними в сотни раз превосходит их размеры) рожать сверхскоростные звезды; при каком минимально возможном сближении с черной дырой звезда выживает, избегая приливного разрушения?

Ответы на эти вопросы мы получили, выйдя за рамки “задачи трех тел”. Звезды рассматривались как структурированные объекты, состоящие из большого числа элементов. Такой подход известен как “задача N-тел”, в рамках которого была оценена вероятность рождения сверхскоростной звезды: одной за 700 тыс. лет. В нашей



От телескопа Галилея... до телескопа "WFIRST". Рисунок с интернет-сайта: astronet.ru.

Галактике таких звезд чуть больше сотни, поскольку через каждые 100 млн лет сверхскоростные достигают границы Галактики и устремляются дальше, в межгалактическое путешествие, "прячась" в глубинах космоса от любопытствующего наблюдателя.

Поиск альтернативных сценариев, объясняющих происхождение сверхскоростных звезд, привел к заключению о возможном существовании звезд с релятивистскими скоростями. До недавнего времени обладателями таких скоростей считались объекты микромира: фотоны, нейтрино, релятивистские электроны и т.д.

Впервые такая идея была высказана в 2008 г. профессором А.В. Тутуковым, а уже в 2015 г. появилось ее подтверждение, полученное американскими учеными Джеймсом Гилошоном

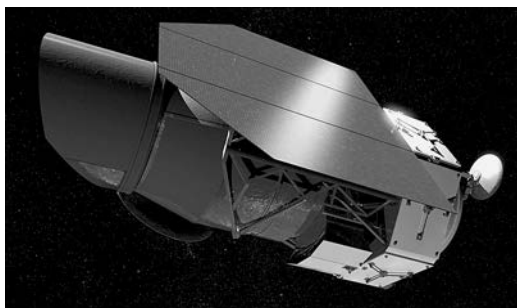
и Абрахамом Лоебом. Оставаясь в сценарии Хиллза – "захвата двойной системы", проходящей по почти параболической орбите вблизи центральной СМЧД – Д. Гилошон и А. Лоеб произвели замену одного из звездных компонентов на еще одну СМЧД, менее массивную. Такой сценарий надежно обоснован многочисленными наблюдаемыми примерами сливающихся галактик, а вместе с ними и их центральных частей, населенных СМЧД.

Кинетический ресурс в модифицированном сценарии Дж. Хиллза может обеспечить выбросы звезд из окрестности сливающихся галактик со скоростями порядка релятивистских. Расчеты Д. Гилошона и А. Лоеба, проведенные в постановке задачи трех тел, не учитывающей размеров звезд, показали, что менее чем в 1% случаев

может реализоваться выброс звезды со скоростью порядка трети от скорости света. Вероятно, скорость может быть еще больше – до половины скорости света и даже выше – если речь пойдет о выбросе нейтронных звезд или белых карликов.

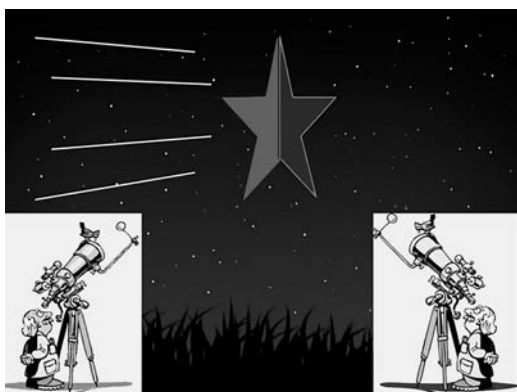
И вновь потребовалась методика “N-тел”, представляющая своего рода “лупу”, которая дает нам возможность разглядеть разрушительные последствия релятивистского выброса звезды, возникающие при близком прохождении ее родительской двойной системы к СМЧД. Предельное ускорение, которое звезда испытывает при максимальном сближении с СМЧД (в периферии) не должно быть больше ускорения свободного падения на ее (звезде) поверхности – вот надежный критерий “выживаемости” звезды. Очень малое время, которое “звезда проводит” в периферии СМЧД, позволяет ей уцелеть даже при некотором нарушении границы приливного радиуса. Звезда как бы “подныривает” под приливную волну на очень короткое время, получая максимальный разгон, и уносится с небольшими потерями массы, сохранив при этом свою структурную целостность и приобретая релятивистскую скорость. Вы скажете: “Звездный серфинг!”. Нет, так действует приливная гравитация, и попытка ее прямого учета сокращает в десятки раз и без того всего один процент успешных случаев генерации релятивистских выбросов, предсказываемых в “модели трех тел” как минимум в десятки раз.

Что и говорить, события рождения сверхскоростных звезд описываются законами малой статистики, а вероятность рождения звезды с релятивистской скоростью – непостижимо мала. Попытки оценить ее, учитывая статистику галактических скоплений, а также звездное население типичных галактик, “участвующее” в сценарии Хиллза, оказываются неутешительными – возможно несколько



Космическая инфракрасная обсерватория “WFIRST”. Запуск запланирован на середину 2020-х гг. Возможно, с помощью этого телескопа будут открыты звезды с релятивистскими скоростями. Рисунок NASA.

релятивистских звезд за всю историю Вселенной. Это далеко не окончательные выводы, ведь мы еще много не знаем: возможно, есть и другие механизмы, генерирующие рождение релятивистских звезд, которые мы еще просто не учли. Вероятно, уже в скором времени появится новый, пятый класс звезд с аномальной релятивистской кинематикой; его сегодня пока прогнозируют – как и 20 лет назад предсказывали существование сверхскоростных звезд; а будущие космические инфракрасные обсерватории “WFIRST” (Wide Field Infrared Survey Telescope – инфракрасный телескоп



Коллаж автора на тему: “звезды с релятивистскими скоростями...”.

с широким полем обзора неба (NASA; запуск намечен на середину 2020-х гг.) и “Евклид” (“Euclid”; ESA, NASA; запуск – в 2020 г.) смогут их обнаружить.

Было бы интересно, если бы релятивистская звезда смогла образовать вокруг себя планетарную систему, да еще с развитой цивилизацией на одной из ее

планет... Что бы увидели инопланетяне со своей планеты? – Согласно принципу относительности, сами бы они не замечали высокой скорости своей планеты, но зато все остальные звезды классифицировали бы как релятивистские, изрекая: “Этот безумный, безумный, безумный, мир”.

Информация

Пыльные Плеяды

На впечатляющей фотографии (см. 3-ю стр. обложки, сверху), полученной в конце 2017 г. Хуаном Карлосом Касадо (Испания), представлено знаменитое звездное скопление Плеяды – астеризм в созвездии Тельца (M45; 440 св. лет от нас). Оно медленно

разрушает пролетающее мимо молодое газопылевое облако, которое, скорее всего, является частью пояса Гулда – необычного кольца из областей звездообразования, расположенного вокруг Солнца, в местной части нашей Галактики. В течение последних 100 тыс. лет часть пояса Гулда движется сквозь более старое скопление Плеяд, вызывая бурные реакции между звездами и пылью. Световое давление от излучения звезд “отталкивает” пыль, находящуюся в небольшой

голубоватой отражательной туманности вокруг скопления; причем более мелкие частицы пыли разлетаются быстрее. В результате некоторые части газопылевого облака приобрели форму волокон и расслоились. На снимке внизу слева видна также комета C/2015 ER₆₁ (PanSTARRS). Она 4 апреля 2017 г. достигла точки максимального сближения с Землей – 1,42 а.е., а ее блеск увеличился до 14,8^m.

*По материалам
интернет-сайта
“Астронет”,
14 ноября 2017 г.*

Туманность Вуаль

Снимок Туманности Вуаль (известной также как Петля в Лебеде; находится на расстоянии в 1500 св. лет от нас) получен 12 ноября 2017 г. астрономом Сарой Мегер (см. 4-ю стр. обложки); он охватывает область неба около 20 св. лет. Фотография сделана с экспозицией 3 ч 30 мин в искусственных цветах: крас-

ным обозначен ионизованный водород H_α, голубым и зеленым – молекулы ионизованного O III. На фото хаотически расположились волокна газа, они светятся под действием ударных волн.

Туманность Вуаль (открыта 5 сентября 1784 г. В. Гершелем) – это большой остаток сверхновой, образовавшейся после взрыва массивной звезды; вероятно, свет от ее вспышки достиг Земли более 5 тыс. лет назад. В результате взрыва возникли ударные волны, распространяющиеся по окружающему простран-

ству, “сгребая” и “возбуждая” межзвездное вещество. Светящийся комплекс волокон на самом деле больше похож на длинные волны, его часто называют Треугольником Пикеринга (NGC6979) – назван так в честь директора обсерватории Гарвардского колледжа; его открыла, однако, в 1904 г. астроном Вильямина Флеминг, поэтому его можно назвать Волоконным треугольником Флеминг.

*По материалам
интернет-сайта
“Астронет”,
10 ноября 2017 г.*