



Астрофизика

Аккреционные процессы в двойных звездах

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



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

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

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

ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Более половины звезд в Галактике входит в состав двойных и кратных

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

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

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

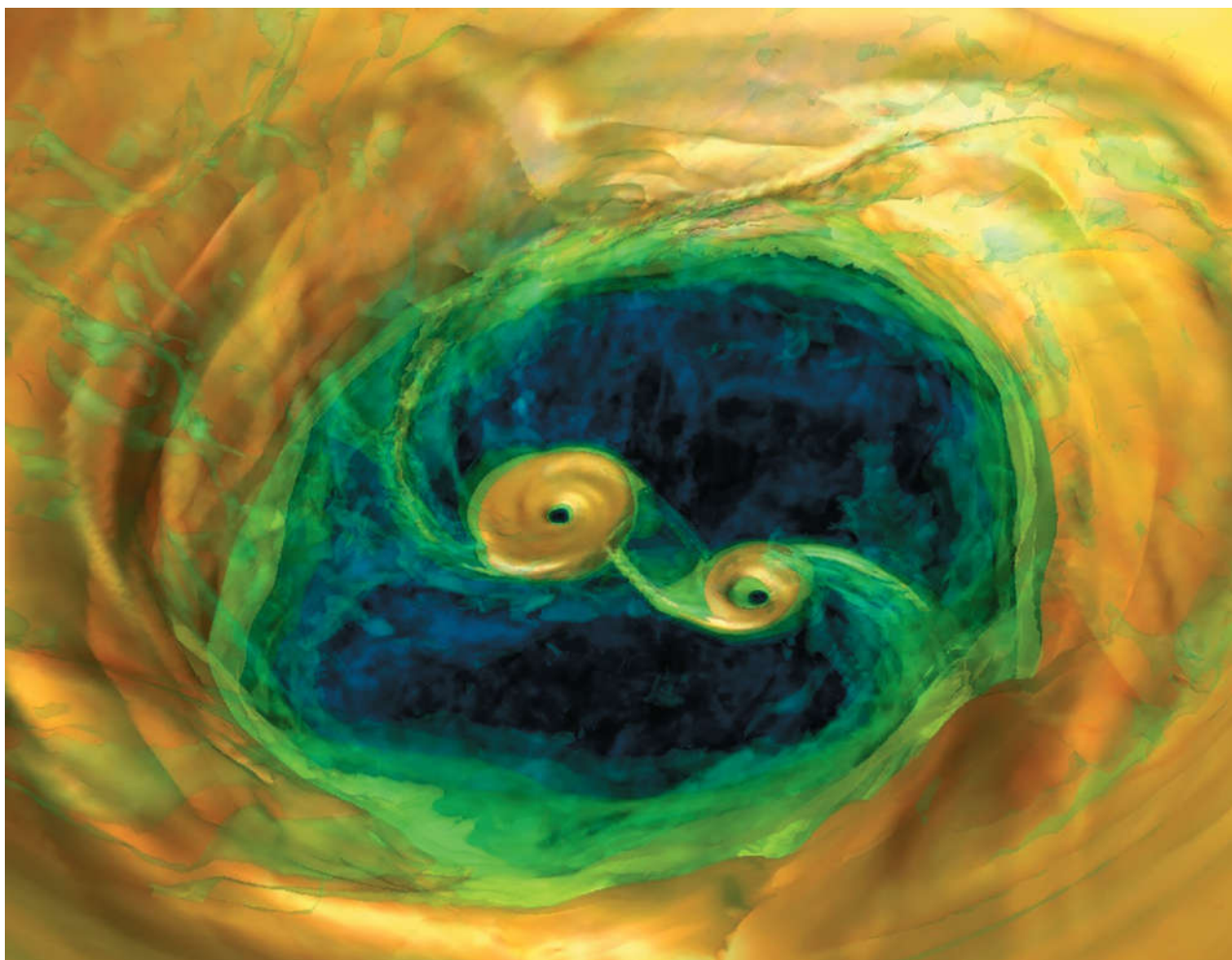
В тесных двойных системах есть ограничение на максимальный радиус компонентов – радиус полости Роша – внутри которой вещество гравитационно связано со звездой. Увеличение радиуса звезды в результате эволюции останавливается, когда она заполняет свою полость Роша: после этого начинается перетекание вещества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

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

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

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

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



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

в условиях, принципиально недостижимых в настоящий момент на Земле.

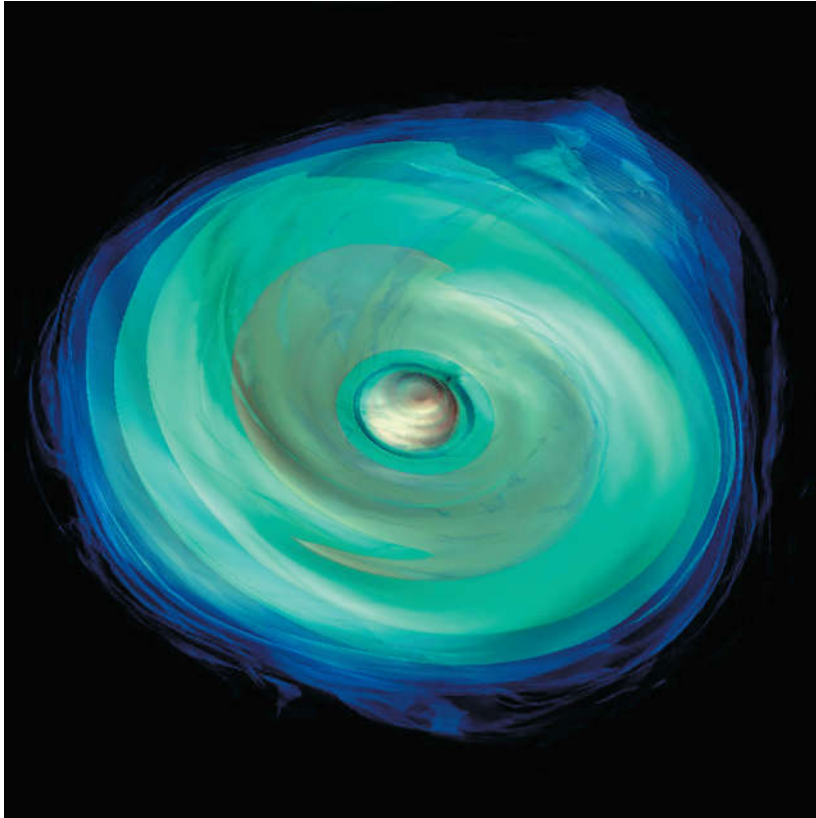
В небольшой статье невозможно описать все явления, сопровождающие аккрецию на компактные звезды в двойных системах. Мы лишь кратко обозначим направления исследований двойных

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

НЕМАГНИТНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

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

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



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

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

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

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

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

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

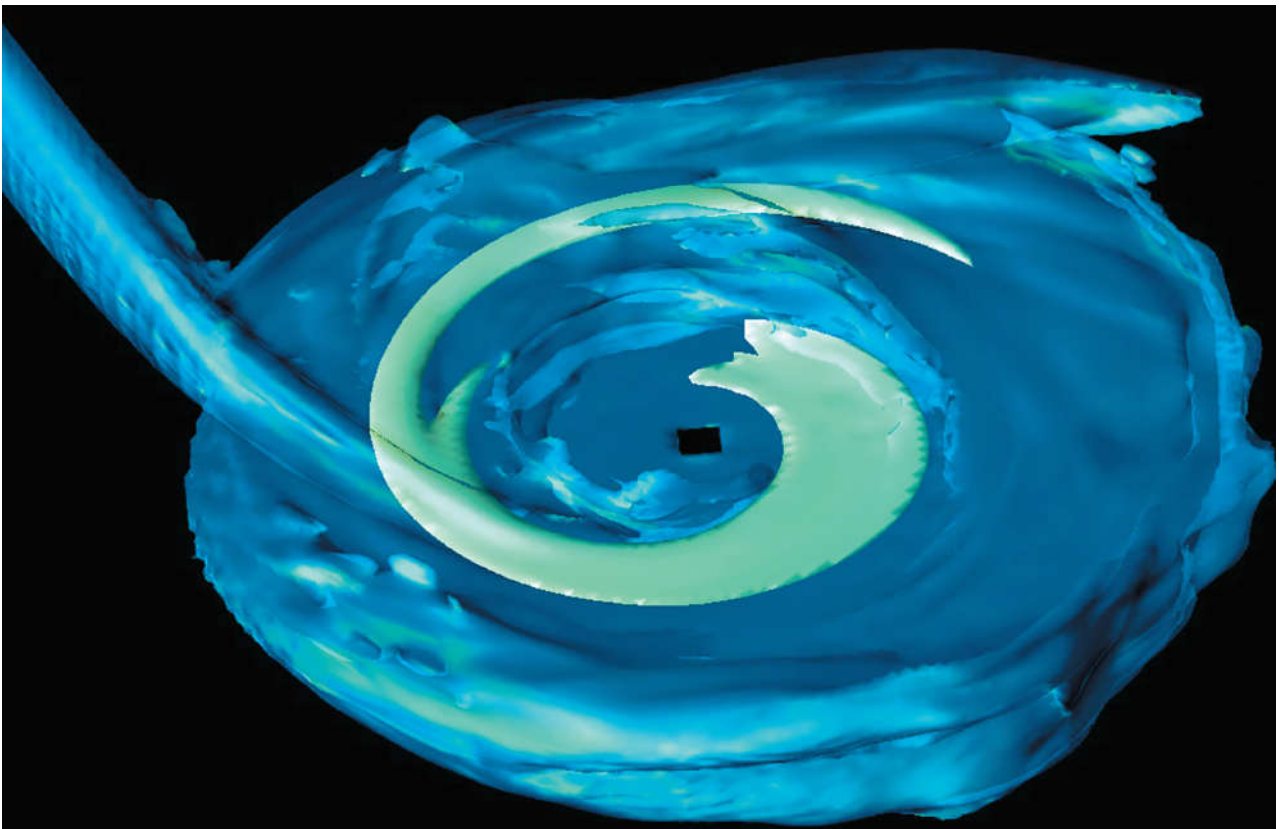
со скоростью вращения меньше критической, поскольку дополнительные силы, существующие в двойной системе, облегчают “срыв” вещества с поверхности звезды. В 2012 г. нам удалось косвенно подтвердить эту модель: профиль плотности оболочек, возникающих в результате этого механизма, может объяснить наблюдаемую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

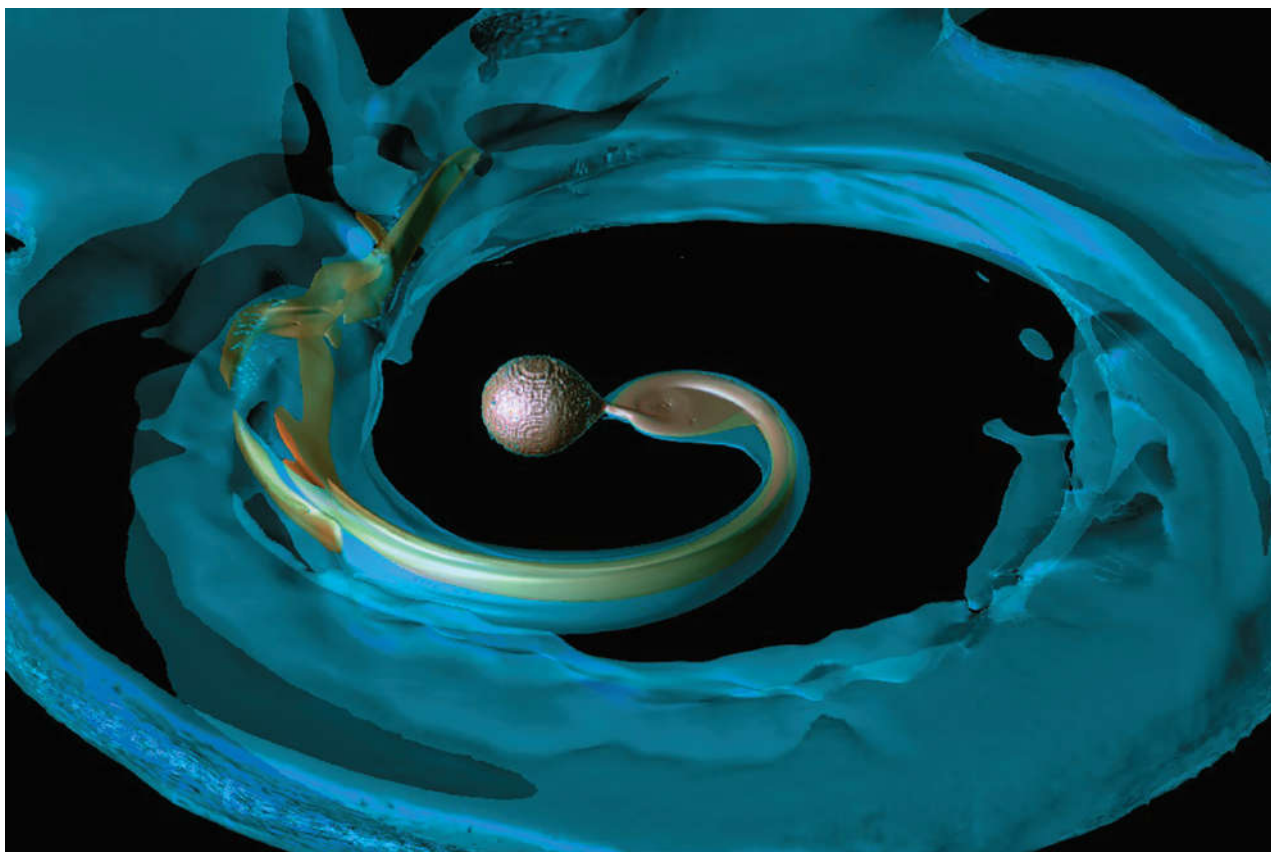
Прецессионная волна плотности в аккреционном диске катаклизмической переменной звезды. По результатам численного моделирования.

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

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

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





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

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

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

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

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

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

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

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

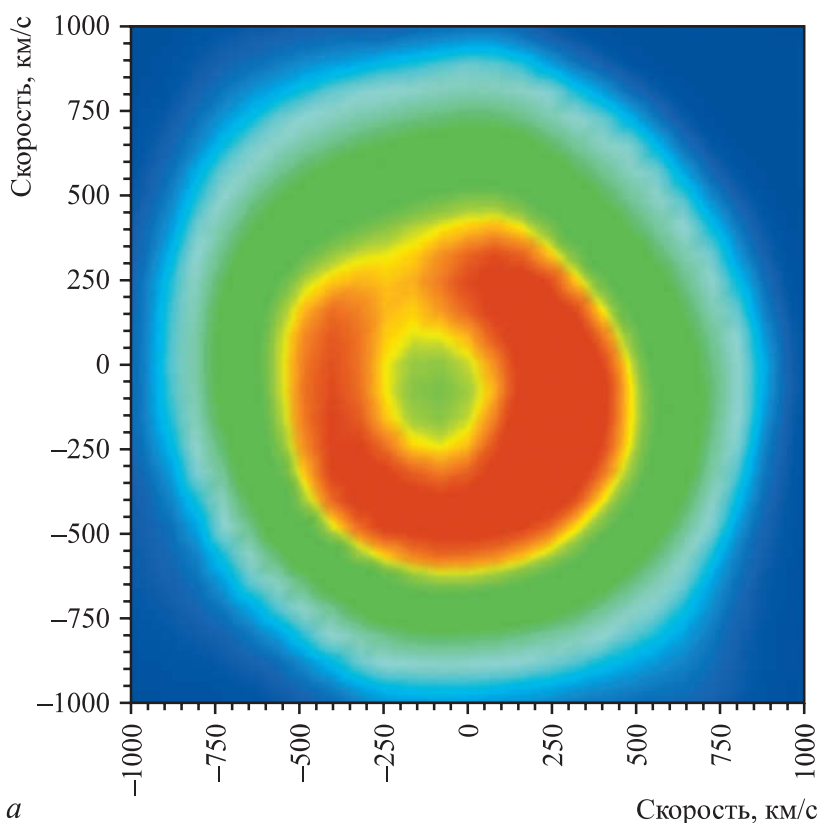
обычно не превышает нескольких радиусов Солнца. Соответственно разрешение современных телескопов недостаточно для того, чтобы различить отдельные детали течения в таких звездах. Тем не менее существует метод получения изображений отдельных деталей течения – доплеровская томография. Она родственна томографии,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

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

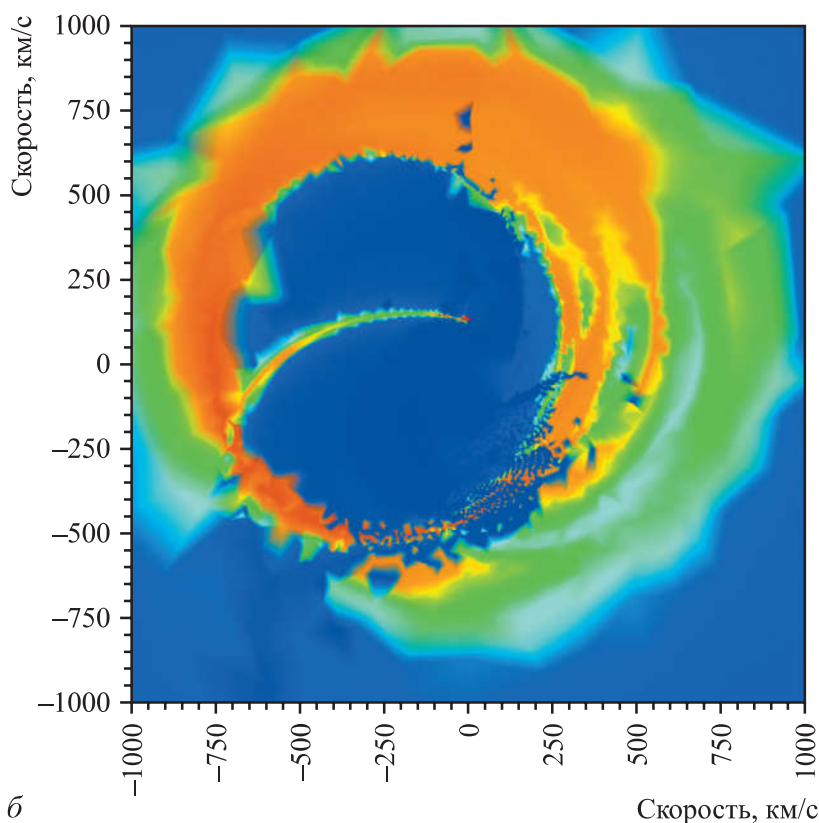
ЗВЕЗДЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

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

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



а



б

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

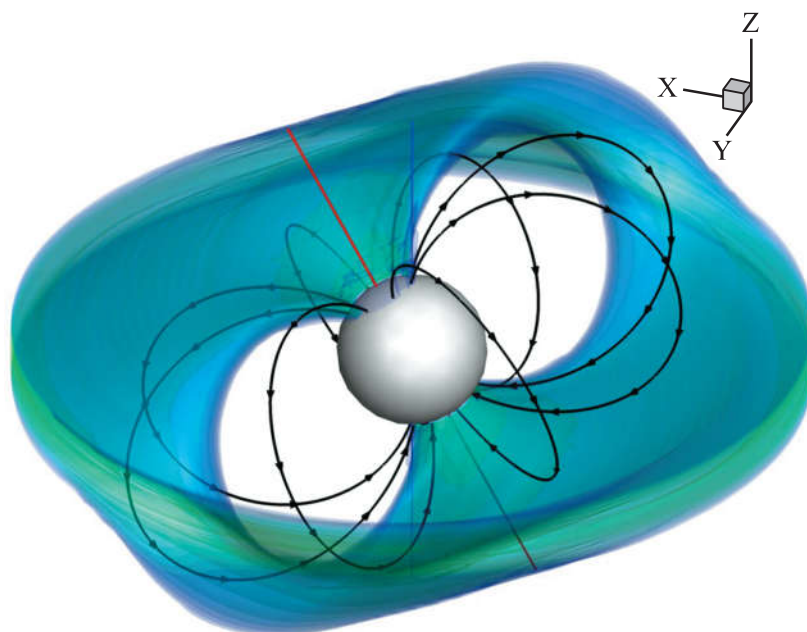
в аккреционных дисках промежуточных полярных протекают сложные процессы генерации и затухания магнитного поля; в результате чего образуется три зоны – внутренняя (где поле интенсивно генерируется) и внешняя (где поле диссипирует и образуется переходная зона токовых слоев). Поле во внутренней зоне периодически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

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

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

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

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



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

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

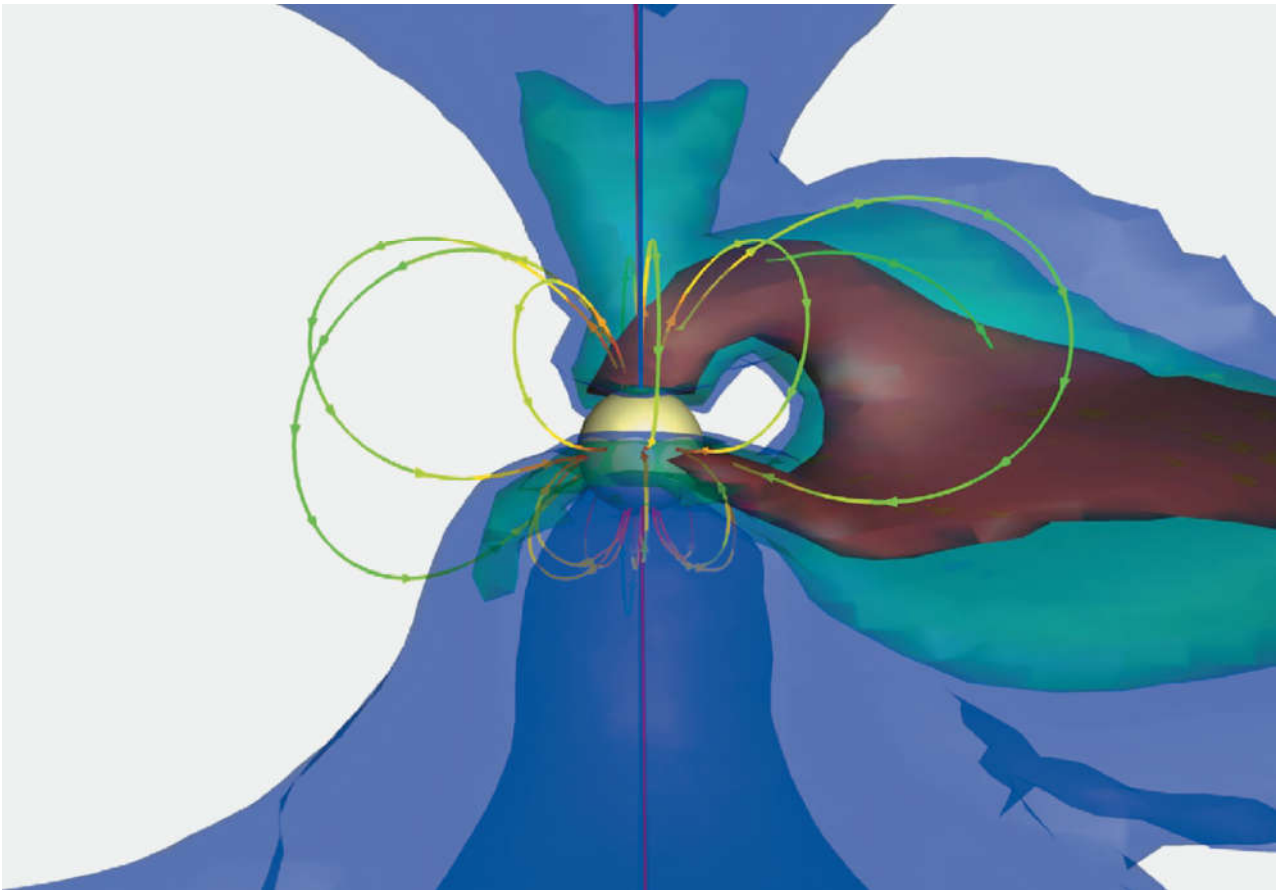
квадрупольной компоненты. Сравнение с наблюдениями показало, что разработанная модель верно описывает процессы, происходящие в звездах со сложными конфигурациями полей.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ ЗВЕЗД

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

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

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



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

ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Отметим, что математические методы, используемые для изучения

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

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

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

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

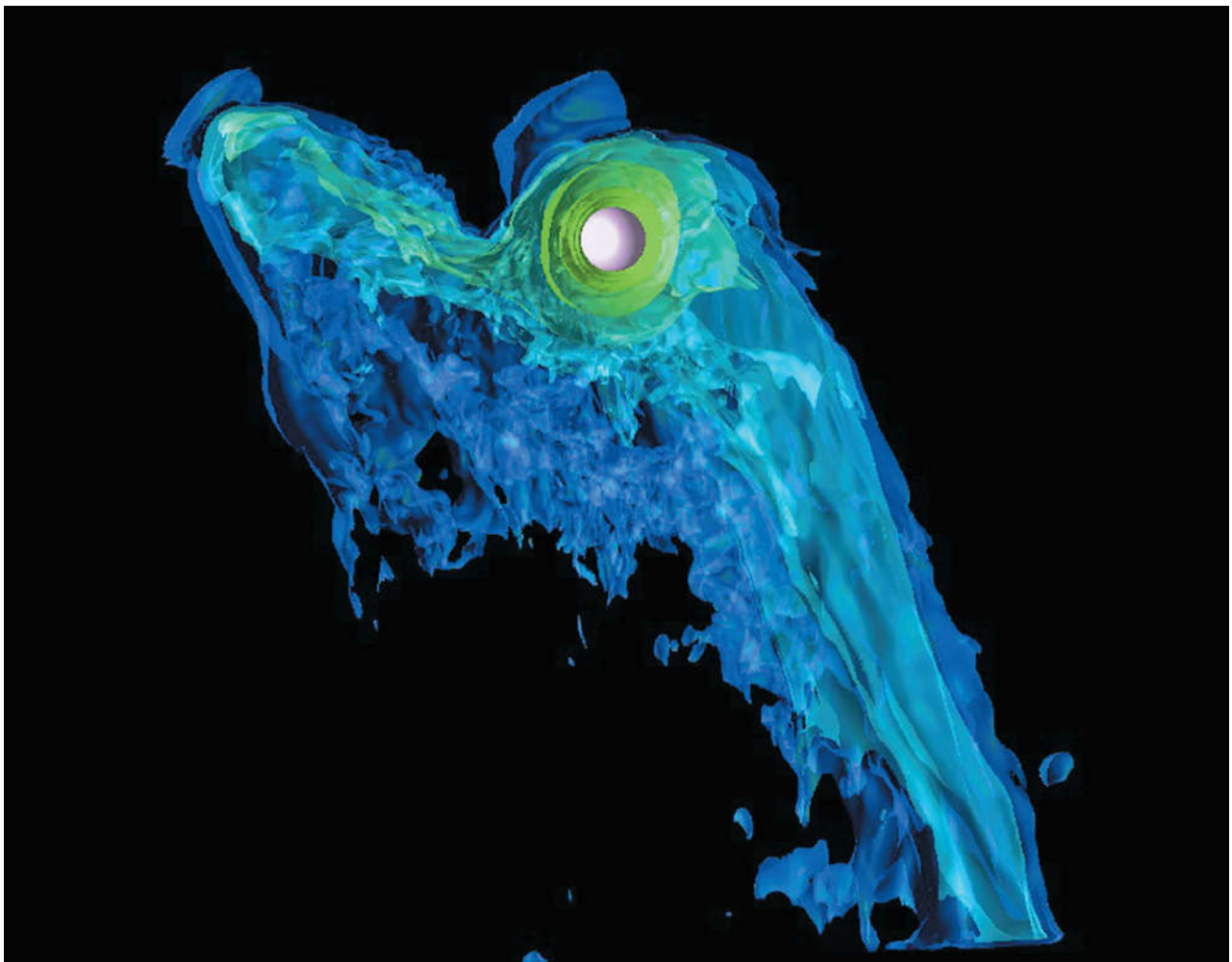
Дальнейшие расчеты показали, что квазистационарные оболочки “горячих юпитеров” слабо связаны с планетами и, следовательно,

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

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

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

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



Межгалактический газ “падает” на черную дыру

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

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

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

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

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

Пресс-релиз ESO,
8 июня 2016 г.