

МАГНИТОРОТАЦИОННЫЕ СВЕРХНОВЫЕ



БИСНОВАТЫЙ-КОГАН Геннадий Семенович,

доктор физико-математических наук, профессор

КОНДРАТЬЕВ Илья Алексеевич,

кандидат физико-математических наук

МОИСЕЕНКО Сергей Григорьевич,

доктор физико-математических наук

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/50044394825030053

Поступила в редакцию: 09.06.2025

Принята к публикации: 09.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

Одно из самых мощных и ярких явлений во Вселенной – вспышка (взрыв) сверхновой – для наблюдателя выглядит как резкий (в 10^8 – 10^{10} раз) рост светимости звезды. Сильное свечение продолжается от нескольких до десятков дней, а затем яркость звезды убывает. Сверхновые представляют собой финальную стадию эволюции некоторых звезд. Как показывают наблюдения, энергия взрыва сверхновой, выделяемая в виде излучения и энергии движения выброшенного вещества, составляет $\sim 10^{50}$ – 10^{52} эрг с «каноническим»

значением в 10^{51} эрг (10^{44} Дж). Исторически сложившаяся классификация этих звезд по типам I и II – по отсутствию или наличию в их спектрах линий водорода – довольно формальна. Более содержательно их разделение на две больших группы по физическому механизму вспышки: термоядерные сверхновые (тип Ia) и сверхновые с коллапсирующим ядром (типы II и Ib, c). Взрыв первых представляет собой термоядерный взрыв углеродно-кислородного белого карлика с массой, превышающей предел их устойчивости, так называемый предел Чандрасекара. Теоретические модели для этого случая позволяют получить количественные характеристики, более

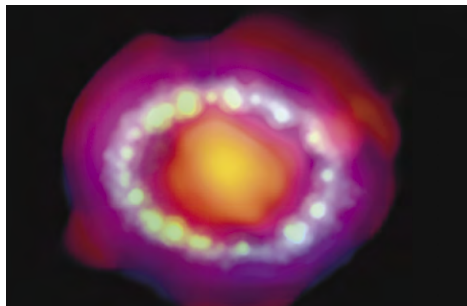


Рис. 1. Остаток сверхновой SN1054 (Крабовидная туманность), полученный в рентгеновском диапазоне телескопом Chandra (слева). Снимок ударной волны от сверхновой SN1987a, полученный путем наложения наблюдений в различных диапазонах телескопами Chandra (рентген), ALMA (радио) и HST (ИК/оптика) (справа)

или менее соответствующие наблюдательным данным. Природа же взрывов сверхновых с коллапсирующим ядром до конца все еще не ясна. Другой важной особенностью взрывов сверхновых с коллапсирующим ядром является рождение ультракомпактных объектов – нейтронных звезд и черных дыр, формирующихся в результате сильного сжатия (коллапса) ядра массивной звезды. Нейтронные звезды имеют большое количество интересных свойств и наблюдаются в широком диапазоне длин волн и даже могут «убегать» из мест, где они сформировались.

В статье в популярной форме представлены некоторые результаты нашей многолетней работы по теории и численному моделированию коллапсирующих сверхновых в ИКИ РАН.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Описание всех стадий жизни даже самой обычной, как наше Солнце, звезды является очень трудной и объемной научной задачей, поскольку оно требует сложного численного счета, хорошего понимания и учета большого числа физических процессов, многие из которых недоступны прямому наблюдению

или моделированию в лаборатории (см. книгу И.С. Шкловского, 1984). Однако в общих чертах эволюцию любой звезды можно предсказать по одному основному параметру – ее массе.

Зарождение звезды начинается в темных холодных (температура $T \sim 10\text{--}30\text{ К}$) скоплениях межзвездного газа и пыли, называемых молекулярными облаками. Из-за возможных неоднородностей в облаке более плотные участки могут коллапсировать под действием собственной гравитации, порождая протозвезды. Протозвезда – это пока еще недостаточно нагретый сжимающийся центральный зародыш, окруженный аккреционным диском. Время жизни протозвезды сильно зависит от ее массы. Например, массивная звезда с массой $M \sim 10M_{\odot}$ (здесь и далее $M_{\odot}$ – масса Солнца) может существовать в такой фазе лишь сотни тысяч лет, в то время как звезды малой массы $M \leq M_{\odot}$ могут медленно сжиматься на протяжении десятков и сотен миллионов лет. На этом этапе энергия выделяется за счет сжатия, а не термоядерных реакций. По мере дальнейшего сжатия температура и давление в центре протозвезды растут. При достижении центральной температуры $\approx 10^6\text{ К}$ начинают пробуждаться первые

реакции ядерного синтеза: образование дейтерия, слияние дейтерия и протонов, что несколько замедляет дальнейшее сжатие и дает некоторый вклад в тепловое излучение.

Когда центральная температура превышает $\approx 10^7$ К, стартуют основные цепочки ядерных превращений, и на Главной последовательности (ГП) появляется молодая звезда. На этой стадии в звездах разной массы происходит превращение водорода в гелий-4.

Из-за большой калорийности реакции образования гелия-4, а также сравнительно небольшой светимости, большую часть своей «взрослой» жизни ($\geq 90\%$) звезда проводит именно на стадии ГП. На этой стадии в ядре звезды сливаются четыре ядра водорода (протона) с образованием ядра гелия-4, двух позитронов и двух электронных нейтрино. Звезда светит за счет колоссальной энергии, выделяемой при этой реакции. Давление, создаваемое нагретой плазмой и излучением в недрах звезды, уравнивает силу тяжести. Во время протекания реакции образования гелия-4 скорость выделения энергии слабо меняется (растет), и в результате звезда длительное время очень медленно увеличивает свои размер и светимость.

Цепочка ядерных реакций при превращении водорода в гелий на ГП зависит от массы звезды. В звездах с небольшими массами $M \lesssim 1.5M_{\odot}$, к которым относится и наше Солнце, идет цепочка реакций, называемая «pp»-циклом. В первой реакции этой цепочки два протона (отсюда и название) сливаются в дейтерий с образованием позитрона и электронного нейтрино. Затем дейтерий сливается еще с одним протоном, порождая гелий-3 и γ -квант. Два ядра гелия-3 при слиянии образуют гелий-4 и два энергичных протона, содержащих основную

долю выделяемой ядерной энергии. Данный процесс протекает сравнительно медленно из-за первой реакции слабого взаимодействия, ведущей к образованию дейтерия. Жизнь мало-массивной звезды на ГП продолжается миллиарды лет, в течение которых весь водород в ее ядре превращается в гелий.

В более массивных звездах ($M \gtrsim 1.5M_{\odot}$) термоядерные реакции «ускоряются» благодаря катализаторам, в качестве которых выступают углерод, азот и кислород. Эта цепочка реакций носит название CNO-цикла. Она начинается с реакции захвата протона ядром углерода C-12 с образованием ядра азота N-13. Кулоновский барьер этой реакции значительно выше, чем в «pp», поэтому начинает действовать при более высоких температурах в ядрах массивных звезд. Скорость выделения энергии в таком цикле сильно зависит от температуры, возрастая в десятки тысяч раз для наиболее массивных звезд. В силу этого они находятся на главной последовательности меньше, время жизни звезды на стадии горения CNO-цикла приблизительно пропорционально обратному квадрату массы. Внутри различных звезд вещество находится в различных состояниях: в самых легких звездах конвекцией (перемешиванием горячих и холодных слоев) охвачена вся масса, а более тяжелые, с «pp»-циклом, являются «лучистыми» в центре и имеют конвективную оболочку (наше Солнце). Массивные звезды, где водород горит по CNO-циклу, имеют конвективное ядро и лучистую оболочку.

После ГП звезда с массой менее $8M_{\odot}$ вступает в фазу красного гиганта, когда ее ядро вырабатывает свое водородное топливо. В результате сжатия внутренних слоев звезды выделяется много энергии. В окружающем ядро слое продолжается превращение водорода

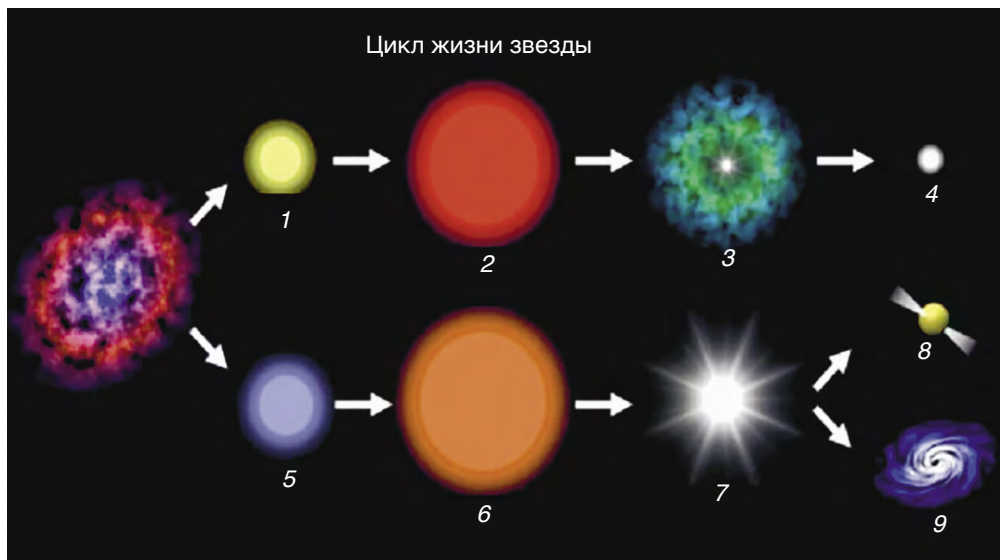


Рис. 2. Схематичное представление эволюции звезд малой и большой массы, возникающих из молекулярных облаков. Пункты 1–4 описывают эволюцию звезды с массой менее $8M_{\odot}$ (1 – ГП, 2 – красный гигант, 3 – образование белого карлика и планетарной туманности, 4 – остывающий белый карлик). Пункты 5–9 описывают стадии жизни массивной звезды с массой более $8M_{\odot}$ (5 – ГП, 6 – красный сверхгигант, 7 – взрыв сверхновой, 8, 9 – финальные стадии эволюции массивной звезды – нейтронная звезда (для масс остатка после коллапса меньше $M \lesssim 2.5M_{\odot}$) или черная дыра ($M \gtrsim 2.5M_{\odot}$)). Источник: портал «Простая физика» (<https://easy-physics.ru>)

в гелий, которое приводит к нагреву и расширению внешних слоев и увеличению светимости на 1–3 порядка. Со временем сброшенная внешняя оболочка остывает и формирует планетарную туманность. После того как весь водород в ядре сгорает, ядро сжимается и нагревается до температур $T \sim 10^8$ K, достаточных для начала горения гелия-4. В результате гелий превращается в углерод и кислород. После того как весь гелий в ядре выгорает, звезда выделяет энергию, плавно сжимаясь под действием собственной гравитации. Сжатие заканчивается, когда давление вырожденных электронов останавливает этот процесс, и образуется компактный, устойчивый и плотный белый карлик. Этот объект размером с Землю, но с массой порядка солнечной, будет

медленно остывать в течение миллиардов лет, постепенно превращаясь в темный, холодный остаток.

Намного более драматичной является судьба массивных звезд с массой больше $8M_{\odot}$. После выгорания водорода в ядре и стадии гравитационного сжатия также начинается реакция превращения гелия в углерод и кислород, но здесь высокая температура внутри ядра приводит к дальнейшим ядерным превращениям – синтезируются магний-24, кремний-28, сера-32 и так далее до тех пор, пока не образуется железо-56 – элемент с самой большой энергией связи. При этом удельная энергия, выделяющаяся при превращении гелия в железо, в несколько раз меньше, чем при синтезе гелия из водорода. На самых поздних этапах горения происходит огромная потеря

энергии за счет излучения нейтрино. Нейтрино уносят на много порядков больше энергии, чем фотоны. Внешняя оболочка так же, как и для звезд меньшей массы, может резко расширяться на этой стадии: о массивных звездах в этой фазе можно говорить как о красных сверхгигантах. После образования в центре звезды железного ядра энергия продолжает расходоваться на излучение фотонов и (большой частью) нейтрино. Ее источником на этом этапе служит гравитационное сжатие, при котором температура звездного ядра увеличивается. Когда она достигает величины $T \sim 5 \cdot 10^9$ К, начинается реакция распада железа на нейтроны, протоны и ядра гелия (n, p, ${}^4\text{He}$), при которой энергия, наоборот, поглощается. На этой стадии характерный радиус ядра равен 1000–3000 км, а его масса $M \sim M_{\odot} - 3M_{\odot}$. Рост внутреннего давления звезды при сжатии уже не может скомпенсировать роста сил гравитации, происходит потеря устойчивости, и начинается быстрое сжатие – коллапс ядра (Хойл и Фаулер, 1964). Коллапс железного ядра предсверхновой проходит за характерные времена порядка ~ 200 – 400 микросекунд, в результате чего формируется компактный объект – протонейтронная звезда с массой около солнечной, температурой порядка 10^{11} К и диаметром около 20 км. Впоследствии этот объект станет нейтронной звездой, если его масса меньше ~ 2 – $2.5M_{\odot}$, либо черной дырой. В результате коллапса характерная плотность в центре протонейтронной звезды составляет $\gtrsim 10^{14}$ г/см³, что сравнимо с плотностью внутри атомного ядра! На стадии коллапса высвобождается огромная энергия $\gtrsim 10^{53}$ эрг (10^{46} Дж), примерно равная энергии гравитационной связи сколлапсировавшего объекта. Практически вся она уносится нейтрино, которые образуются при сжатии звезды.

За время сжатия плотность растет настолько сильно, что электроны начинают поглощаться ядрами, делая вещество нейтронно-избыточным (т.н. «нейтронизация»). При плотностях порядка ядерной уравнение состояния вещества становится «жестким», т.е. для дальнейшего роста плотности требуется гораздо большее увеличение давления. Это приводит к тому, что коллапс центральной части ядра останавливается.

ФИЗИКА ВЗРЫВОВ СВЕРХНОВЫХ С КОЛЛАПСИРУЮЩИМ ЯДРОМ

Цепь событий, следующих после коллапса ядра и приводящих к взрыву сверхновой, уже около 60 лет остается не вполне ясной. Первые гидродинамические расчеты коллапса ядра и взрыва сверхновой появились в 1966 году в работах С. Колгейта и Р. Уайта. За эти годы было предложено несколько механизмов взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром, тем или иным образом объясняющих возникновение взрывной волны, ее энергетику, свойства компактного объекта, а также параметры нейтринного и гравитационного излучения. Рассмотренные ниже сценарии вспышек коллапсирующих сверхновых являются очень сложными для теоретического исследования, поскольку вещество ядра массивной звезды и сам взрыв описываются существенно нелинейными многомерными дифференциальными уравнениями. Помимо прочего, в процессах, протекающих в звездном ядре, участвуют все четыре фундаментальных взаимодействия: необходимо учитывать релятивистскую гравитацию, слабые процессы с участием нейтрино, плотное горячее вещество, в котором играет важную роль сильное взаимодействие между частицами, а также наличие сильных магнитных полей вблизи

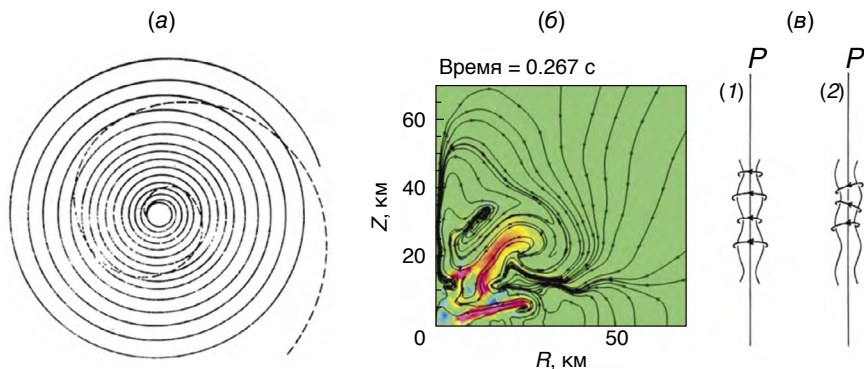


Рис. 3. Пример роста тороидальной компоненты магнитного поля за счет энергии дифференциального вращения из одномерных расчетов. Сплошная линия показывает накрученное магнитное поле для начального слабого полоидального поля (системе необходимо сделать много оборотов, чтобы поле усилилось до существенных значений), а штриховая кривая показывает силовые линии для сильного начального поля (всего 1–2 оборота достаточно для генерации выбросов) (а). Пример двумерного моделирования магниторотационной неустойчивости, возникающей вблизи дифференциально вращающейся протонейтронной звезды после коллапса (б). Схематичное представление неустойчивости тейлеровского типа: осесимметричный вариант (1), неосесимметричный вариант, который может реализовываться только в трех измерениях (2), данная неустойчивость также называется изгибной (kink) (в). Источники: Арделян, 1979; Моисеенко, 2008; Tayler, 1973

протонейтронной звезды. Все это делает данную проблему одной из самых сложных задач астрофизики. Для исследования различных сценариев, как правило, прибегают к численным моделям. Искомые дифференциальные уравнения переводятся в дискретную алгебраическую модель коллапсирующего ядра на расчетной сетке, которая далее переводится в компьютерный код. Данный код запускается на мощных компьютерах, и в результате его работы можно получить массивы данных для основных величин (плотность, температура, магнитное поле и пр.), приближенно описывающие эволюцию процессов при взрыве сверхновых. Сравнивая результаты расчетов с наблюдательными и модельными данными, можно накладывать ограничения на параметры механизма, приближая тем самым понимание того, как проис-

ходят взрывы звезд. Такой же подход используется для получения метеорологических прогнозов, что позволяет сказать, что моделирование сверхновых в некотором смысле напоминает предсказание погоды.

Среди наиболее разработанных вариантов современной теории коллапсирующих сверхновых можно выделить нейтринный и магниторотационный механизмы. Также можно выделить ряд более экзотических механизмов – вращательный сценарий В. С. Имшенника, механизм с фазовым переходом к кварковой материи (см. ниже), акустический механизм и ряд еще более экзотических сценариев.

Нейтринный механизм представляет собой группу сценариев, в которых гидродинамические неустойчивости совместно с нейтринным нагревом вещества приводят к взрыву сверхновой.

На финальных стадиях коллапса, когда формируется протонейтронная звезда, жесткость уравнения состояния приводит к тому, что центральная часть ядра становится почти несжимаемой, и вещество, падающее на центр с периферии звездного ядра, «ударяется» фактически о твердый шарообразный объект. При этом плазма отскакивает от центрального тела, и возникает т. н. «ударная волна отскока», распространяющаяся наружу. Интересно отметить, что в некоторых первых расчетах предполагалось, что именно волна отскока и является ударной волной взрыва сверхновой, однако взрыв получить не удавалось ввиду того, что ударная волна попросту останавливается! Происходит это из-за того, что вещество, падающее из внешних частей ядра и оболочки звезды, притягивается к центру силами гравитации, оказывая сопротивление ударной волне, распространяющейся наружу. Возникающая ударная волна в одномерных расчетах останавливается примерно в 100 км от центра и не распространяется наружу, за исключением очень легких звездных ядер.

Почти одновременно возникла идея о нейтринном нагреве вещества за фронтом ударной волны. Эти частицы в огромном количестве рождаются в протонейтронной звезде и не могут сразу вылететь из нее в силу очень большой плотности вещества, просачиваются (диффундируют) наружу и свободно вылетают из сколлапсировавшего ядра по достижении поверхности, называемой нейтриносферой (аналог фотосферы для обычной звезды). Небольшая часть нейтрино может поглотиться средой за фронтом ударной волны, нагревая ее, тем самым способствуя ускорению ударной волны. Однако все равно в одномерных моделях получить взрыв не удавалось.

В 1977 году Р. Эпштейн показал, что горячее вещество во внешних слоях ядра с мощным нейтринным потоком конвективно неустойчиво, и предложил при объяснении взрыва коллапсирующих сверхновых использовать конвекцию. В этом случае конвекция приводит к турбулентному перемешиванию вещества и переносу горячей плазмы из внутренних слоев во внешние, что может приводить к усиленному нейтринному нагреву вещества за фронтом ударной волны за счет быстрого роста сечения взаимодействия с веществом, при росте энергии нейтрино. Корректный учет данных процессов требует уже двумерных и трехмерных моделей. Наконец, уже в XXI веке было обнаружено, что различные гидродинамические неустойчивости за фронтом ударной волны могут привести к взрыву сверхновой. Одним из примеров является неустойчивость стоячей аккрецирующей ударной волны (SASI – Standing Accretion Shock Instability, Блондин, Фоглиццо, 2002), которая приводит к крупномасштабным колебаниям ударной волны, а также к спиральным течениям вещества, которые усиливают нагрев нейтрино и помогают ударной волне преодолеть сопротивление падающего потока. На сегодняшний день считается, что успешный взрыв сверхновой в рамках нейтринного механизма – это комбинация нейтринного нагрева, конвекции и SASI. Несмотря на большой прогресс в рамках многомерных гидродинамических моделей сверхновых с нейтринным нагревом, в настоящее время моделируемая энергия взрыва все еще остается достаточно низкой, примерно на порядок ниже канонического значения в 10^{51} эрг.

В качестве альтернативы, в 1992 году, для объяснения приходящего от сверхновой SN1987A нейтринного сигнала с двухпиковым распределением,

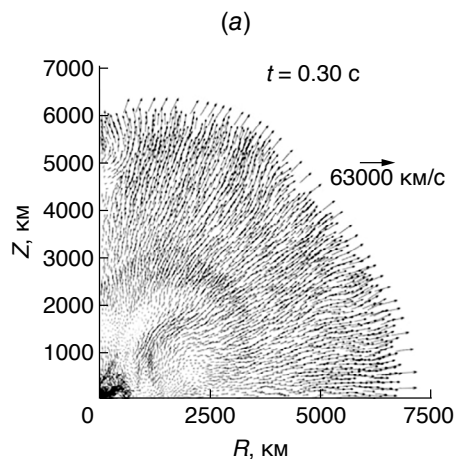
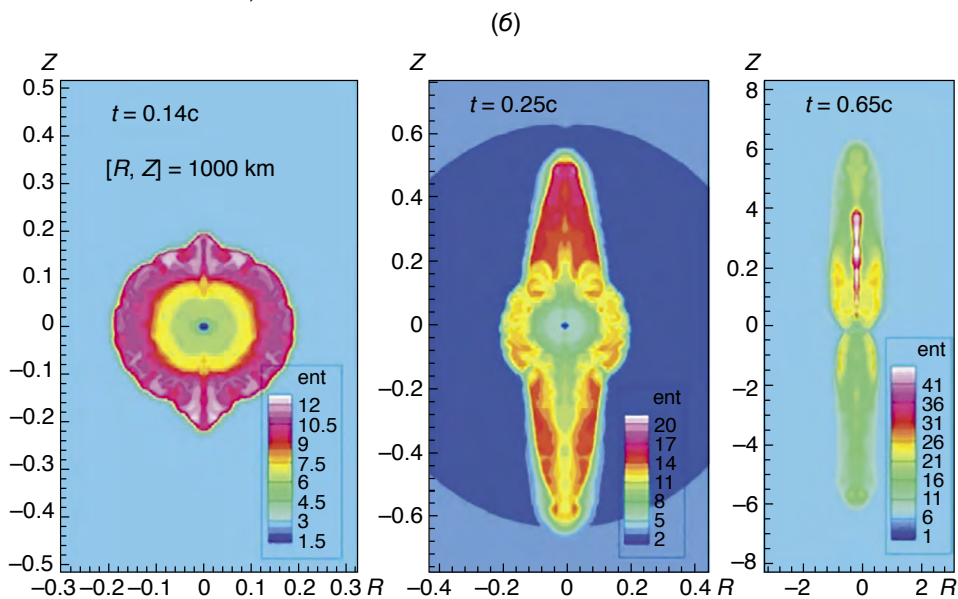


Рис. 4. Пример двумерных расчетов магниторотационного взрыва (показан вектор скорости) для начального квадрупольного магнитного поля (а). Пример эволюции выбросов (энтропия) при начальной комбинации дипольного и тороидального поля в звезде (б), в этом случае (см. последний график и следующий раздел) наблюдается асимметрия выбросов в форме джетов по отношению к экватору. Источники: Кондратьев, 2024; Моисеенко, 2006



В.С. Имшенник предложил механизм взрыва коллапсирующих сверхновых, основанный на делении вращающегося коллапсирующего ядра на две нейтронные звезды разных масс. Благодаря гравитационному излучению части разделившегося ядра сближаются, и возникает перетекание вещества с менее массивной компоненты на более массивную. Когда масса менее массивной компоненты достигнет нижнего предела масс нейтронной звезды, она может распасться с выделением энергии, которое может объяснить

взрыв сверхновой. Данная задача является очень сложной с точки зрения численного моделирования, и при наличии упрощающих предположений ее трехмерное численное моделирование может стать возможным только для следующего поколения суперкомпьютеров. Одно из ограничений данного механизма также заключается в том, что для его реализации требуется очень быстрое вращение ядра звезды перед коллапсом. Отметим, однако, что такой сценарий представляет и самостоятельный интерес: есть

предположения (Блинников, 2021), что в недавнем гравитационно-волновом событии GW170817 и связанном с ним гамма-всплеске GRB170817A имело место такое «обдирание» маломассивной нейтронной звезды.

В числе прочих – более экзотических сценариев взрыва сверхновой – можно выделить механизм вспышки ввиду наличия фазового перехода к кварковой материи в протонейтронной звезде после коллапса ядра, приводящего ко второму коллапсу уже самой протонейтронной звезды к кварковой с последующим образованием еще одной волны отскока, распространяющейся наружу.

Магниторотационный механизм, предложенный в 1970 году одним из авторов данной работы (Г. С. Бисноватым-Коганом), требует наличия в ядре звезды вращения и магнитного поля. Вращение – важная характеристика звезды. Твердотельная скорость вращения звезды не может превышать критической величины, при которой центробежная сила на экваторе звезды уравнивается гравитационной. Если вращательный момент звезды превышает критическое значение, то может образоваться система, состоящая из твердотельно вращающегося ядра, окруженного вращающимся диском, свойства которого зависят от различных параметров вещества.

Реально у наиболее быстро вращающихся звезд скорость на поверхности экватора не превышает $1/4$ от критической, а энергия вращения не больше нескольких процентов от гравитационной.

До коллапса ядра влияние вращения на структуру звезды остается малым. После потери устойчивости начинается быстрое сжатие, в ходе которого происходит рост энергии вращения при сохранении углового момента, и часть гравитационной энергии ядра переходит в энергию вращения. Согласно

расчетам, энергия твердотельно вращающейся с критической скоростью нейтронной звезды составляет примерно эрг, что достаточно для объяснения выхода энергии в самых мощных сверхновых. В случае дифференциального вращения эта энергия может быть существенно больше. Магнитное поле является передаточным механизмом для превращения энергии вращения в энергию взрыва. Таким образом, энергия взрыва при магниторотационном механизме берется из вращательной энергии ядра звезды. После коллапса железного ядра, ввиду его неоднородности, система представляет собой быстровращающуюся протонейтронную звезду с дифференциальным вращением. Электропроводность в горячем и плотном веществе является очень высокой, и магнитное поле можно считать «вмороженным» в плазму. По этой причине магнитные силовые линии сколлапсировавшего ядра увлекаются веществом, и магнитная индукция магнитного поля растет благодаря дифференциальному вращению, накручиваясь со временем.

Поведение силовых линий вмороженного магнитного поля в веществе напоминает натяжение упругих резиновых нитей, «встроенных» в вещество, и описывается аналогичными уравнениями. Данный эффект приводит к линейному росту тороидальной компоненты магнитного поля из полоидальной за счет энергии дифференциального вращения. Увеличение магнитного давления приводит к возникновению волны сжатия, которая распространяется наружу, превращаясь в магнитогидродинамическую ударную волну. Выход этой волны во внешние слои оболочки массивной звезды отождествляется со взрывом сверхновой. Полоидальное магнитное поле при наличии неоднородного (дифференциального) вращения генерирует тороидальное

поле, усиливающееся со временем. Таким образом, возникновение (накрутка) тороидального поля позволяет преобразовать часть кинетической энергии вращения в радиальную кинетическую энергию (энергию взрыва). Вид силовой линии накрученного магнитного поля, которое сформировалось из радиального поля посредством вращения, указывает на эффективность магниторотационного механизма для одномерной модели. В дальнейшем были рассмотрены двумерная и трехмерная постановки данной задачи, и исследования в этом направлении продолжают по сей день. При учете многомерности поле может усиливаться как регулярным (линейным) образом, так и нерегулярно ввиду того, что градиент угловой скорости является отрицательным, а это является необходимым условием для возникновения магниторотационной неустойчивости (MPH; MRI – magnetorotational instability). Данная неустойчивость приводит к турбулентности в веществе и быстрому (экспоненциальному) росту начального магнитного поля, даже если оно было слабым после коллапса ядра. В силу наличия накрученной за счет энергии вращения тороидальной компоненты магнитного поля, ее «натяжение» может привести к тому, что возникают полоидальные вихревые течения.

Развитие полоидальных вихревых течений, в свою очередь, приводит к росту полоидального поля, которое накручиваясь, ведет к росту тороидального поля, возникает положительная обратная связь, развивается неустойчивость, приводящая в итоге к быстрому росту всех компонент магнитного поля. Магниторотационная неустойчивость другого типа имеет место в аккреционных дисках, приводя к хаотизации движения вещества, возникновению турбулентной вязкости, что во много раз увеличивает вязкий поток момен-

та вращения наружу. При магниторотационном взрыве в результате усиления магнитного поля, при наличии замороженных в плазму полоидального и тороидального магнитных полей, выброшенное взрывной волной вещество канализуется в струйные выбросы – джеты (jets), распространяющиеся преимущественно вдоль оси вращения, генерируя взрыв в виде направленных замагниченных джетов. Такие струйные замагниченные выбросы наблюдаются во многих космических объектах – от протозвезд типа Т-Тельца до джетов из активных ядер галактик.

Недавно были построены также и трехмерные модели магниторотационных вспышек (Ф. Моста и др., 2014), которые, однако, внесли дополнительные загадки: в некоторых трехмерных моделях струйные выбросы подвержены особому типу «изгибной» неустойчивости. Из-за этого эффективность взрыва может понижаться, поскольку его импульс в направлении наружу от ядра ослабевает. Выяснение трехмерных особенностей взрыва является на сегодняшний день одной из самых актуальных проблем в теории сверхновых.

Дополнительно стоит сказать про последствия от таких событий, как сверхновая. Ударные волны от сверхновых распространяются по межзвездной среде сотни тысяч лет, обогащая Вселенную тяжелыми элементами, которые сформировались в звездах при высоких температурах и плотностях. Без этих вспышек не было бы и людей, поскольку большинство атомов в человеческом организме сформировалось при взрывах звезд. Отметим также, что ударные волны от сверхновых способствуют процессу звездообразования, достигая молекулярных облаков. Столкновение остатка сверхновой с таким облаком приведет к развитию неустойчивости в облаке, в результате

чего начнутся фрагментация и коллапс различных частей облака с рождением протозвезд. Таким образом, «смерть» одних звезд может приводить к рождению других.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ: ЧТО ЭТО И ПОЧЕМУ ОНИ «СБЕГАЮТ» ОТ ОСТАТКА РОДИТЕЛЬСКОЙ ЗВЕЗДЫ

Возникающие в результате взрыва сверхновой компактные объекты – нейтронные звезды и черные дыры – являются уникальными лабораториями для изучения физики экстремального состояния вещества. В то время как черные дыры звездных масс можно наблюдать лишь опосредованно по падающему (аккрецирующему) на них веществу в тесных двойных системах, нейтронные звезды – одиночные и в двойных системах – имеют огромный «зоопарк» наблюдательных проявлений во всех диапазонах электромагнитного спектра от радиоволн до гамма-излучения (см. книгу Г.С. Бисноватого-Когана, 2011). Их радиус уменьшается с ростом массы звезды и в среднем находится в районе 10 км. Это сопоставимо с радиусом Большой кольцевой линии Московского метрополитена, но масса при этом составляет 1–2 солнечных (верхний предел массы тоже существует, он пока неизвестен, но вряд ли превышает $2.5M_{\odot}$ – $2.7M_{\odot}$). В этом случае чайная ложка вещества нейтронной звезды весит сотни миллионов тонн. В структуре нейтронных звезд различают плотное жидкое ядро, занимающее более 90% радиуса, с плотностью в центре в несколько раз больше, чем в атомном ядре, твердую оболочку ~ 1 км, называемую корой, а также более тонкий внешний слой («океан» и «атмосфера»).

Различают несколько наблюдательных проявлений нейтронных звезд. Исторически первыми в 1967 году были открыты радиопульсары – быстро вращающиеся (с периодом от нескольких миллисекунд до нескольких секунд) нейтронные звезды с сильными магнитными полями 10^8 – 10^{13} Гаусс (для сравнения, магнитное поле на поверхности Земли составляет около 1 Гаусса). Они испускают узкие пучки излучения (радио, рентген, гамма), которые из-за вращения таких объектов кажутся наблюдателю пульсирующими. Другой тип нейтронных звезд, получивший название магнитары, имеет предположительно самые большие значения магнитных полей во Вселенной, достигающих ~ 10^{15} Гаусс. Они составляют немногочисленную группу нейтронных звезд со вспышечной активностью в области рентгеновского и гамма-диапазона. Происхождение вспышечной активности не вполне ясно. Большинство теоретиков склоняется к идее о связи этой активности с поведением экстремально больших магнитных полей.

Среди рентгеновских объектов выделяют также остывающие одиночные нейтронные звезды, наблюдаемые с температурой порядка миллиона градусов, а также рентгеновские пульсары в двойных системах. В них вещество от звезды-компаньона перетекает (аккрецирует) на замагниченную нейтронную звезду, в область ее магнитных полюсов, приводя к их сильному нагреву. В результате наблюдаются рентгеновские пульсации от этих горячих полярных шапок.

Интересным эффектом, наблюдаемым у нейтронных звезд, является наличие у некоторых из них большой скорости собственного движения с величиной ~100–500 (а иногда и 1000!) км/сек, что более чем на порядок выше скорости движения обычных звезд.

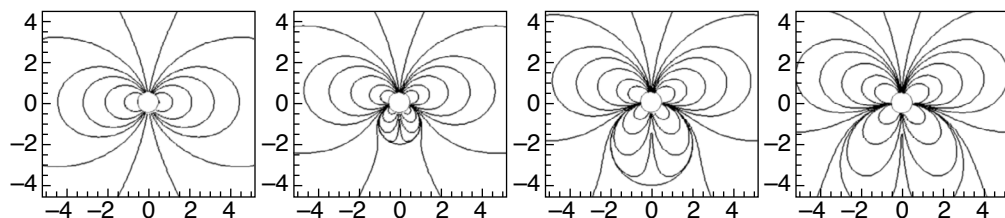


Рис. 5. На изображениях представлен пример дипольного магнитного поля (накрученное поле будет антисимметрично по отношению к плоскости экватора) с наложением квадрупольного поля (накрученное поле симметрично по отношению к экватору). На левом изображении поле квадрупольного намного слабее диполя, на правом изображении ситуация обратная. Результирующее магнитное поле, представленное суммой двух полей, уже не будет иметь симметрии. Источник: Лавлейс, 2010

Эти объекты могут за несколько миллионов лет пересечь нашу Галактику – Млечный Путь. Столь большая скорость обычно называется скоростью «пинка» (kick) нейтронной звезды. Приобретение нейтронной звездой высокой скорости представляет собой интересное явление, которое до сих пор не до конца изучено. Существует несколько возможных механизмов генерации скорости нейтронной звезды, и все они требуют наличия асимметрии некоторых физических процессов. Первый из них – механизм «электромагнитной ракеты» для пульсаров, чьи магнитные поля имеют асимметричную структуру относительно экватора (полюса находятся в этом случае на оси вращения пульсара). Это приводит к возникновению разности импульсов отдачи и ускорения нейтронной звезды из-за разной интенсивности излучения от магнитных полюсов нейтронной звезды. Такой механизм может работать в течение всего периода жизни пульсара. Другие механизмы могут действовать только во время формирования нейтронной звезды в результате коллапса ядра и взрыва сверхновой. Анизотропная форма ударной волны сверхновой может возникнуть из-за гидродинамических процессов типа кон-

векции, а также из-за наличия неоднородностей в коллапсирующем ядре. Выброшенное вещество будет иметь сильно несферичное распределение плотности в пространстве, ввиду чего после взрыва сверхновой будет возникать ненулевая равнодействующая сила, действующая на центральный компактный объект.

Другая возможность ускорения нейтронной звезды может быть связана с асимметрией нейтринного излучения при взрыве сверхновой с коллапсирующим ядром. При наличии достаточно сильного магнитного поля в протонейтронной звезде, которая образуется при магниторотационном взрыве, сечения процессов взаимодействия нейтрино с веществом становятся зависимыми от величины магнитного поля. При анизотропии магнитного поля и разности величин магнитного поля на полюсах нейтронной звезды возникает разность нейтринных потоков из двух полюсов, передавая компактному объекту импульс вдоль магнитного полюса. Как показывают наблюдения, направление движения быстролетающих пульсаров хорошо коррелирует с магнитными осями пульсаров.

Одной из вероятных возможностей получения скорости протонейтронной

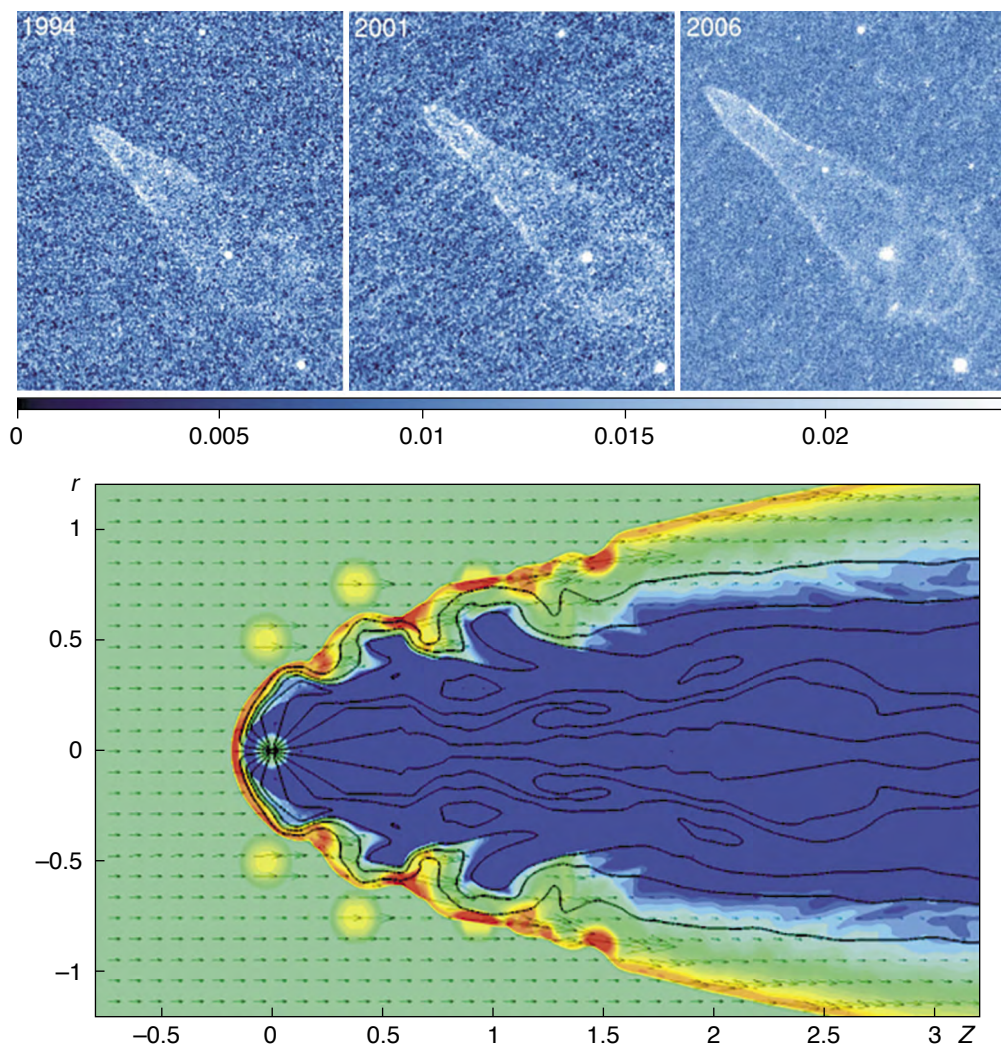


Рис. 6. Наблюдения Гитарной туманности телескопом HST, в центре которой находится нейтронная звезда-пульсар PSR B2224+65 (а). Пример магнитогиродинамических расчетов пульсарной туманности в неоднородной межзвездной среде (б). Источник: Торопина, 2018

звездой является асимметричный магниторотационный взрыв. Недавние расчеты авторов данной работы показывают, что в первые секунды после коллапса ядра существенная скорость (до 500 км/сек) может передаваться компактному объекту, если в начальном распределении магнитного поля звезды перед коллапсом присутствуют нарушения зеркальной симметрии.

Простейший пример такого нарушения – это наличие суммы дипольного и квадрупольного магнитных полей в ядре звезды перед коллапсом. В более общем случае говорят о комбинации мультиполей различной четности (диполь – нечетный, квадруполь – четный). В этом случае в одной из областей пространства сумма мультиполей будет иметь большую величину, а в другой

возникнет их разность с результирующим более слабым полем. Это приведет к тому, что после коллапса ядра в различных областях поле будет накручиваться по-разному: где-то более эффективно, а где-то менее. Из этого следует, что выброшенное в результате магниторотационного взрыва вещество сколламируется в различные по величине джеты, в которых будут уноситься разные импульсы. В силу сохранения полного импульса всей системы, разность импульсов в джетах будет передана центральному объекту. Таким образом, данный механизм работает схоже с реактивным двигателем, в котором магнитные «моторчики», заключенные в разных частях протонейтронной звезды, работают с различной интенсивностью. Такого же эффекта можно добиться, если исходно в ядре звезды присутствовали полоидальное и тороидальное поля с различными четностями (например, нечетный диполь и четное тороидальное поле). В этом случае накрученное нечетное поле складывается с четным, в результате чего магнитные силы, приводящие к взрыву, опять будут иметь различную величину в различных полушариях.

При движении быстрой нейтронной звезды по межзвездной среде наблюдаются так называемые туманности пульсарного ветра (pulsar wind nebulae – PWN). Они видны в виде вытянутых областей нагретого ударной волной газа в межзвездной среде. Вытянутая форма и ударная волна в PWN возникают из-за быстрого движения нейтронной звезды со скоростью, значительно превышающей локальную скорость звука в окружающей среде, что сравнимо с движением пули в воздухе. Такие «пули», наблюдаемые в телескоп, могут многое поведать нам о структуре межзвездной среды, а также косвенно указать на скорость нейтронной звезды и ее характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, взрывы сверхновых – это не просто грандиозные космические катастрофы, но очень важные события, которые меняют облик Вселенной. В результате этих мощных вспышек рождаются нейтронные звезды – невероятно плотные объекты, сжатые до нескольких ядерных плотностей. Взрывы сверхновых влияют на генерацию большого числа экстремальных характеристик нейтронных звезд: магнитного поля, температур, а также больших скоростей собственного движения. Эти космические странники несутся сквозь пространство, оставляя за собой следы в виде ударных волн и мощного излучения. Изучение взрывов сверхновых и рождения нейтронных звезд помогает нам лучше понять, как устроена материя в экстремальных условиях, как происходит перераспределение элементов во Вселенной и какие процессы формируют ее эволюцию. Каждый такой взрыв – это не только гибель старой звезды, но и рождение чего-то нового, будь то нейтронная звезда или даже черная дыра. Потенциальная возможность коллапса ядра массивной звезды и формирование плотного компактного остатка с большим числом нейтронов были предсказаны еще в 30-х годах прошлого века, и с тех пор была проделана большая работа для понимания физики этих явлений. Однако по сей день остается много неотвеченных вопросов, и многие загадки в этой области нам еще предстоит разгадать в будущем.

Литература

1. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука. 384 с. 1984.
2. Бисноватый-Коган Г.С. Релятивистская астрофизика и физическая космология. М.: КРАСАНД. 376 с. 2011.