

# Магнитный «мотор» сверхновых

Г.С.Бисноватый-Коган, С.Г.Моисеенко

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. Сам термин «сверхновая» может ввести в заблуждение, поскольку с физической точки зрения взрыв такой звезды представляет собой конечную стадию ее эволюции. Как показывают наблюдения, энергия взрыва сверхновой, выделяемая в виде излучения и (в основном) в виде кинетической энергии выброшенного вещества, составляет  $\sim 10^{50}$ – $10^{52}$  эрг. 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 белого карлика с массой, превышающей чандрасекаровский предел. Многомерные численные расчеты для этого случая позволяют получить количественные характеристики, более или менее соответствующие наблюдательным данным. Природа же взры-



**Геннадий Семенович Бисноватый-Коган**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии ИКИ РАН. Область научных интересов — сверхновые, аккреция, нейтронные звезды и черные дыры, астрофизика высоких энергий, темная материя.



**Сергей Григорьевич Моисеенко**, доктор физико-математических наук, заведующий тем же отделом. Занимается физикой сверхновых, магнитной гидродинамикой, численным моделированием.

вов сверхновых с коллапсирующим ядром все еще до конца не ясна. В попытках объяснить ее современная астрофизика предлагает несколько механизмов, однако, как показывают многомерные численные расчеты, большинство из них либо вообще не приводят к взрыву, либо дают слишком малую его энергию. Какие идеи здесь наиболее перспективны?

## Эволюция в цифрах

Вещество во Вселенной состоит в основном из водорода (~70% по массе) и гелия (~30%). Когда звезда конденсируется из межзвездного вещества, она начинает интенсивно излучать энергию, черпая ее в реакции превращения водорода в гелий  $^4\text{He}$ , при которой выделяется  $6 \cdot 10^{18}$  эрг/г. Процесс горения водорода занимает основную долю времени эволюции звезды. После его выгорания начинается реакция превращения гелия в углерод  $^{12}\text{C}$  и кислород  $^{16}\text{O}$ , затем — образование

магния  $^{24}\text{Mg}$ , кремния  $^{28}\text{Si}$ , серы  $^{32}\text{S}$  и т.д., пока не образуется железо  $^{56}\text{Fe}$  — элемент с самой большой энергией связи. Энергия, выделяющаяся при превращении  $^4\text{He}$  в  $^{56}\text{Fe}$ , в четыре раза меньше, чем при реакции, порождающей гелий ( $1.6 \cdot 10^{18}$  эрг/г). После истощения водородных ресурсов звезда продолжает сжатие, что приводит к росту температуры и давления, светимость увеличивается на 1–3 порядка. Термоядерные реакции с участием гелия начинаются при температуре  $\sim 10^8$  К. На самых поздних этапах горения происходит огромная потеря энергии за счет излучения нейтрино. Последняя может на много порядков превышать обусловленную фотонной светимостью.

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 в центре звезды увеличивается. Когда та достигает величины  $\sim 5 \cdot 10^9$  К, начинается реакция распада железа на нейтроны, протоны и ядра гелия ( $n$ ,  $p$ ,  $^4\text{He}$ ), при которой энергия, наоборот, поглощается. Теперь уже рост внутреннего давления звезды при сжатии не может скомпенсировать роста сил гравитации — происходит потеря устойчивости, и начинается быстрое сжатие со скоростью свободного падения (коллапс). Коллапс останавливается, когда плотность вещества в центральных областях сжимающегося ядра достигает значений  $\sim 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>. При таких параметрах уравнение состояния вещества становится «жестким», т.е. для дальнейшего роста плотности требуется гораздо большее увеличение давления. В результате коллапса, как правило, происходит формирование нейтронной звезды. При коллапсе более массивных ядер должна образоваться черная дыра, но возможность взрыва сверхновой при этом остается под вопросом. Почти вся энергия связи образующейся нейтронной звезды, достигающая 20% ее массы, передается слабо взаимодействующим

нейтрино. Последние уносят энергию  $\sim 6 \cdot 10^{53}$  эрг, значительно превышающую наблюдаемую кинетическую энергию выброса и тем более энергию электромагнитного излучения.

Такая схема эволюции звезды, вплоть до вспышки сверхновой, была предложена в 1960 г. английским астрофизиком Ф.Хойлом и американским физиком У.Фаулером. После коллапса происходит расширение внешней оболочки с огромным увеличением светимости. Это и есть вспышка (т.е. взрыв) сверхновой, пример которой представлен на рис. 1.

### Возможные механизмы взрыва

Одним из первых механизмов взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром был нейтринный механизм, предложенный С.Колгейтом и Р.Уайтом в 1966 г. [1]. Идея состояла в том, что при коллапсе происходит переход части гравитационной энергии связи в энергию нейтрино, поток которых вылетает, проходя через внешние слои падающего и выбрасываемого вещества. При образовании нейтронной звезды после остановки коллапса ядра на некотором расстоянии от него формируется ударная волна, встречая которую, падающее вещество звезды останавливается. При больших плотностях ( $\sim 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>) вещество практически непрозрачно для нейтрино, но, если плотность немного меньше, нейтрино уходят почти свободно, покидая поверхность нейтриносферы (аналог фотосферы звезды для излучения). Происходит нагревание вещества за счет взаимодействия с ним нейтрино (так называемая депозиция нейтрино). Предполагалось, что нейтринная вспышка должна привести к «выталкиванию» ударной волны наружу и взрыву сверхновой. Однако дальнейшие более точные расчеты показали низкую эффективность такого взрыва, энергия которого оказалась существенно меньше наблюдаемой.

В 1977 г. Р.Эпштейн показал, что горячее вещество в ядре с мощным нейтринным потоком конвективно неустойчиво, и предложил для объяснения взрыва коллапсирующих сверхновых использовать «нейтринную конвекцию» [2]. Конвекция будет выносить высокоэнергичные нейтрино из внутренних областей и (за счет роста сечения взаимодействия с энергией) усилит процесс «выталкивания» вещества наружу, что могло бы привести к взрыву сверхновой. Но, когда были проведены одномерные, а затем двух- и трехмерные численные расчеты, выяснилось, что учет нейтринной конвекции не решает проблему. В результате коллапса железного ядра происходит формирование ударной волны на расстоянии 10–20 км от центра звезды. Нейтринная вспышка продвигает ударную волну наружу, однако волна либо останавливается на расстоянии 100–200 км от центра (и взрыва сверхновой вообще не происходит), либо продолжает

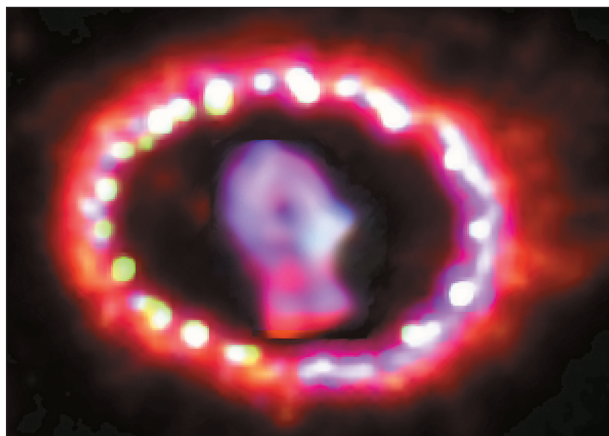


Рис. 1. Сверхновая 1987А, вспыхнувшая 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке.

двигаться наружу, что приводит к выбросу энергии, но опять недостаточной для объяснения взрыва — не более  $10^{49}$  эрг.

Разработка представлений о нейтринном механизме взрыва сверхновых продолжается с привлечением различных дополнительных эффектов, чему посвящены публикации В.М.Чечеткина с коллегами, Т.Янки и др.

Другой возможный механизм взрыва сверхновой связан с неустойчивостью стоячей аккреционной ударной волны (Standing Accretion Shock Instability, SASI). Впервые SASI применили в физике коллапсирующих сверхновых Дж.Блондин, А.Мецакаппа и С.ДеМарино, затем ее использовал Т.Фоглиццо. Подход предполагает развитие нерадиальных возмущений аккрецирующей ударной волны, что может привести к выходу ударной волны во внешние слои звезды и взрыву сверхновой. Но увы — многомерные численные расчеты механизма SASI также не позволяют получить взрыв сверхновой с достаточной энергией.

В 1992 г. В.С.Имшенник предложил механизм взрыва коллапсирующих сверхновых, основанный на делении коллапсирующего ядра на две части, одна из которых — нейтронная звезда [3]. Благодаря гравитационному излучению части разделившегося ядра сближаются, возникает перетекание вещества. Когда масса менее массивной компоненты достигнет нижнего предела масс нейтронных звезд, может произойти выделение энергии, связанное с бета-распадами нейтронов и ядер маломассивной нейтронной звезды. Прямое трехмерное численное моделирование такого процесса осуществить в настоящее время сложно. Упомянем лишь, что для реализации этого механизма требуется очень быстрое вращение звезды перед вспышкой (предсверхновой).

## Магниторотационные сверхновые

В 1970 г. один из авторов настоящей статьи (Г.С.Бисноватый-Коган) выдвинул идею, что при анализе механизма взрыва сверхновых надо учитывать начальное магнитное поле и вращение предсверхновой [4].

Вращение — важная характеристика звезды. Скорость вращения звезды не может превышать критической величины, при которой центробежная сила уравновешивает гравитационную; в противном случае вещество «прессуется» в диск. Реально у наиболее быстро вращающихся звезд скорость на поверхности не превышает 1/4 от критической, а энергия вращения не больше 1% от гравитационной. При медленном сжатии момент вращения успевает передаваться наружу, например, за счет истечения вещества, и влияние вращения остается малым. После потери устойчивости начинается быстрое сжатие, в процессе которого обмен моментом вращения между различны-

ми слоями звезды произойти не успевает. В ходе сжатия еще и часть гравитационной энергии переходит в энергию вращения (в основном в энергию вращения ядра).

Во вращающейся звезде есть большой запас энергии, который нейтрино в силу закона сохранения момента вращения унести не могут — это как раз энергия вращения. Ее запас (в звезде, вращающейся твердотельно с критической скоростью) равен примерно  $3 \cdot 10^{52}$  эрг и вполне достаточен для объяснения выхода энергии в сверхновой.

Итак, энергия взрыва при магниторотационном его механизме берется из вращательной энергии предсверхновой. Магнитное поле позволяет трансформировать энергию вращения в радиальную кинетическую энергию. Неоднородный коллапс железного ядра приводит к дифференциальному вращению. Если есть полоидальное магнитное поле, то в условиях такого неоднородного вращения должно возникнуть и тороидальное поле, усиливающееся со временем. Сильное тороидальное поле позволяет преобразовать часть кинетической энергии вращения в радиальную кинетическую энергию (энергию взрыва).

Результаты одномерного численного моделирования магниторотационного механизма взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром были представлены уже в работе [5]. Звезда рассматривалась там как вращающийся гравитирующий бесконечный цилиндр (рис.2). Центральная часть цилиндра, соответствующая нейтронной звезде (вплоть до радиуса  $R_0$ ), предполагалась несжимаемой.

Как показали дальнейшие одномерные расчеты, дифференциальное вращение при наличии начального полоидального магнитного поля действительно приводит к возникновению и линейному росту со временем тороидальной компонен-

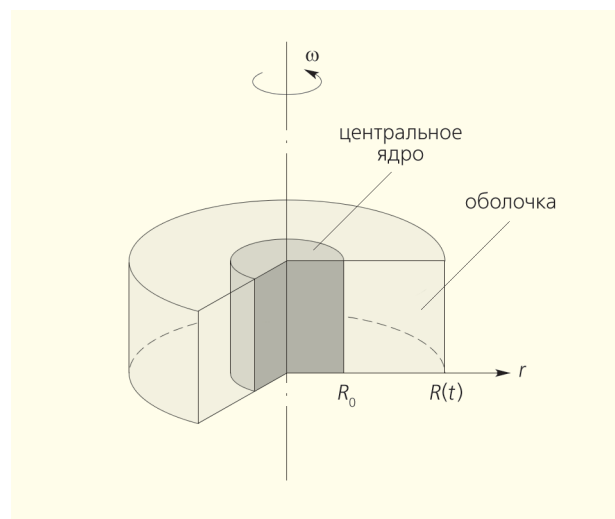


Рис.2. Одномерная модель магниторотационной сверхновой в виде цилиндра, вращающегося вокруг оси с угловой скоростью  $\omega$  [4].

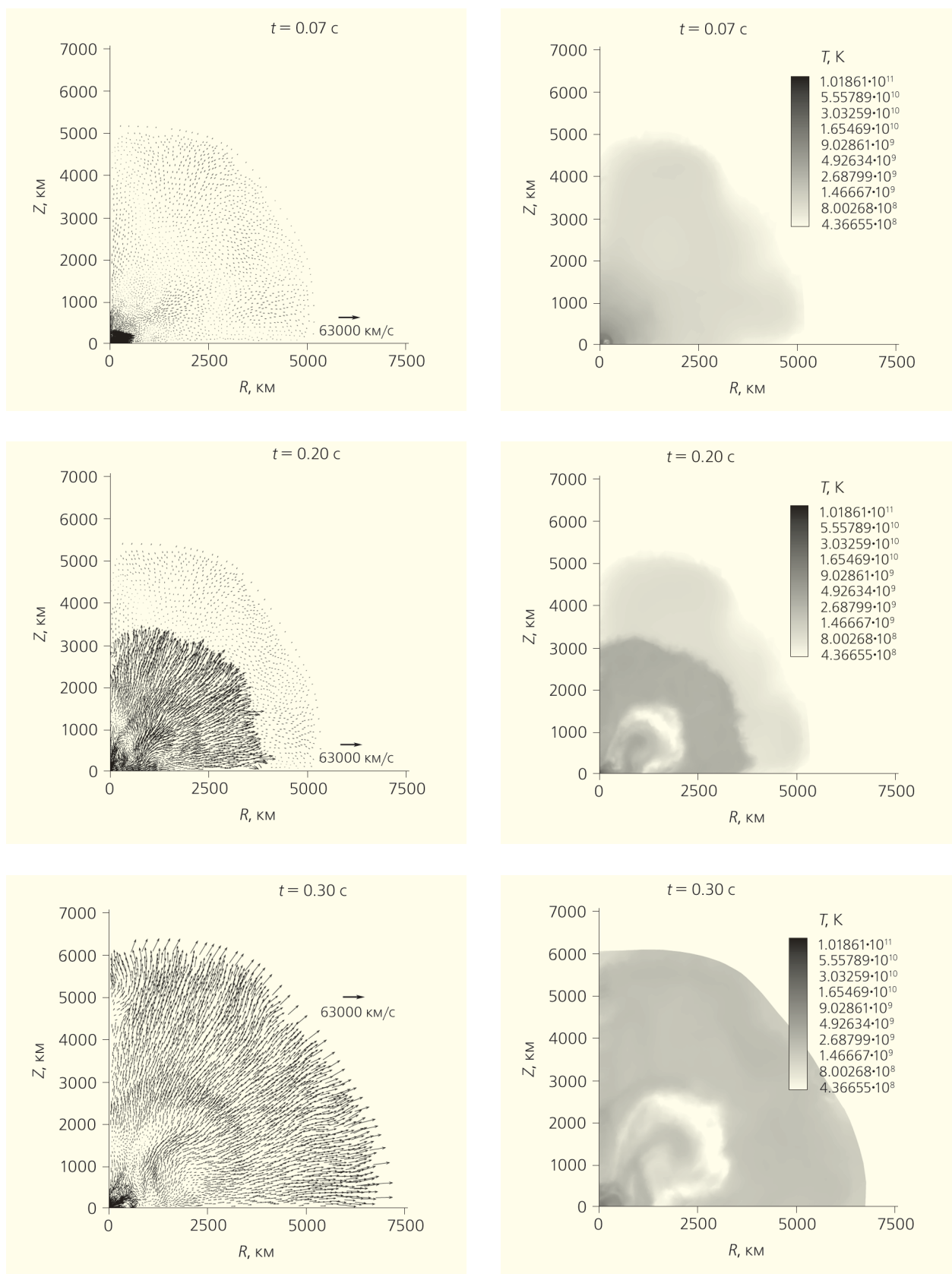


Рис.3. Результаты двумерных расчетов магниторотационной сверхновой. Временная эволюция поля скоростей (левый столбец) и поля температур (правый столбец) для указанных моментов времени  $t$ . Начальное магнитное поле — квадруполь.

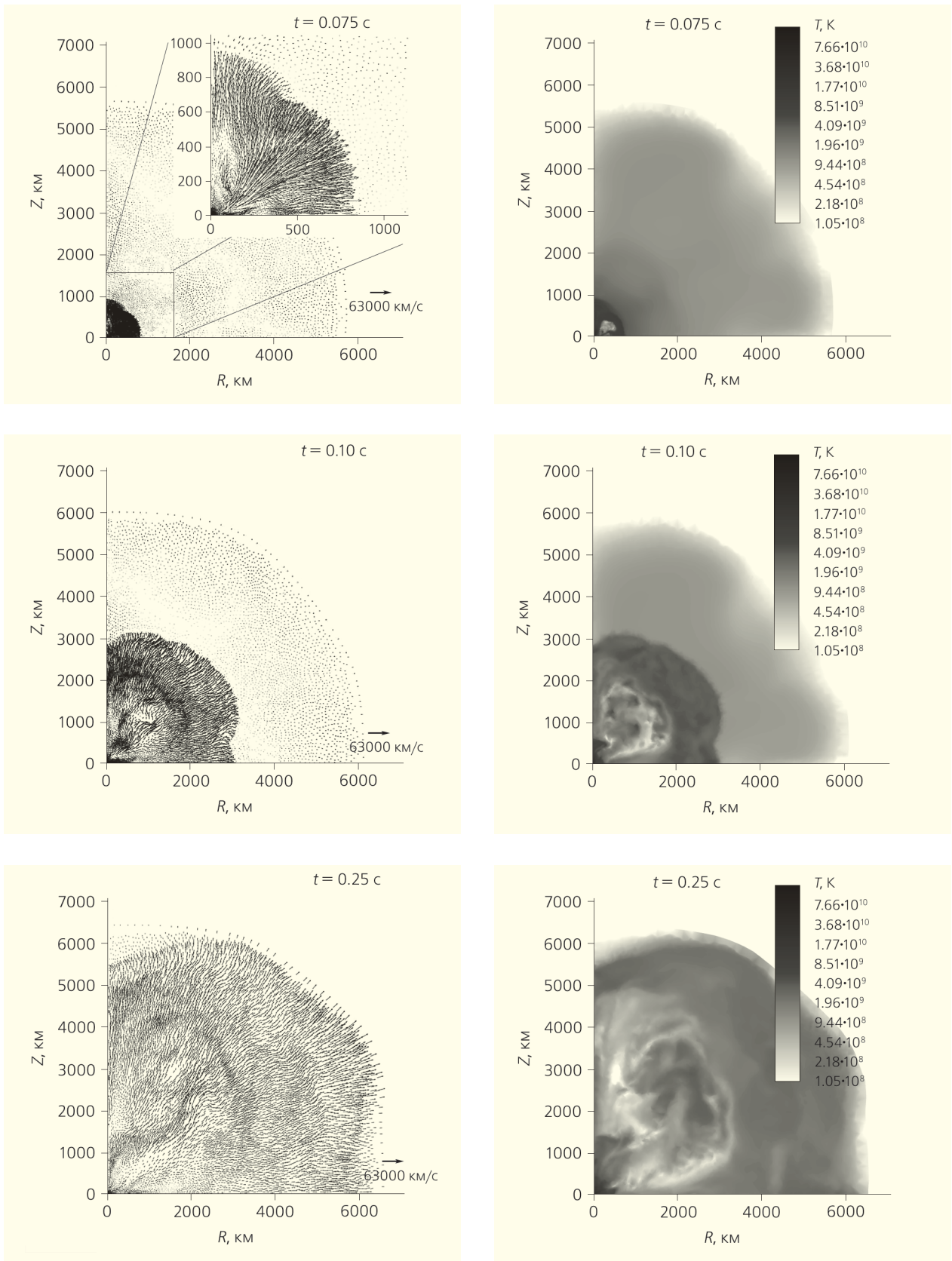


Рис.4. Результаты двумерных расчетов магниторотационной сверхновой. Временная эволюция поля скоростей (левый столбец) и поля температур (правый столбец) для указанных моментов времени  $t$ . Начальное магнитное поле — диполь.

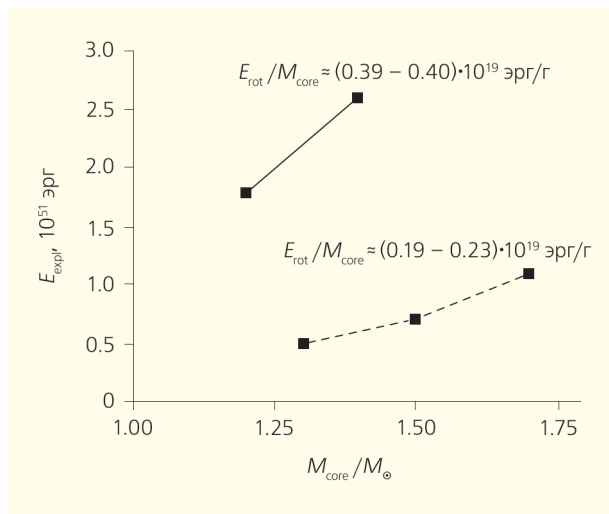


Рис.5. Зависимость энергии взрыва магниторотационной сверхновой от массы ядра при различных значениях удельной энергии вращения перед началом эволюции магнитного поля  $E_{\text{rot}}/M_{\text{core}}$  (т.е. перед коллапсом).

ты магнитного поля [6]. Возникает волна уплотнения, движущаяся по спадающему фону плотности. Амплитуда этой волны растет со временем. Волна трансформируется в ударную магнитогидродинамическую волну. Выход ударной волны в наружные слои оболочки предсверхновой и приводит к взрыву сверхновой. Время развития процесса зависит от отношения начальной магнитной энергии к начальной гравитационной. Из данных наблюдений следует, что отношение этих энергий в предсверхновой составляет  $10^{-6} - 10^{-8}$ . Наличие такого малого параметра в магнитогидродинамических уравнениях, описывающих магниторотационный механизм взрыва сверхновой, представляет трудность для численного моделирования этой задачи.

## Литература

1. Calgate S.A., White R.H. The hydrodynamic behavior of supernovae explosions // *Astrophysical Journal*. 1966. V.143. P.626—681.
2. Epstein R.I. Mechanisms for supernova explosions // *Astrophysics and Space Science Library*. 1977. V.66. P.183.
3. Имшенник В.С. Возможный сценарий взрыва сверхновой в условиях гравитационного коллапса массивного звездного ядра // *Письма в «Астрономический журнал»*. 1992. Т.18. С.489—504.
4. Бисноватый-Коган Г.С. О механизме взрыва вращающейся звезды как сверхновой // *Астрономический журнал*. 1970. Т.47. С.813—816.
5. Бисноватый-Коган Г.С., Попов Ю.П., Самохин А.А. Магнитогидродинамическая ротационная модель взрыва сверхновой // *Astrophysics and Space Science*. 1976. V.41. P.321—356.
6. Арделян Н.В., Бисноватый-Коган Г.С., Попов Ю.П. Исследование магниторотационного взрыва в цилиндрической модели // *Астрономический журнал*. 1979. Т.56. С.1244—1255.
7. Ardeljan N.V., Bisnovatyi-Kogan G.S., Moiseenko S.G. Magnetorotational supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. V.359. P.333—344.
8. Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G.S., Ardeljan N.V. A magnetorotational core-collapse model with jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V.370. P.501—512.
9. Бисноватый-Коган Г.С., Моисеенко С.Г., Арделян Н.В. Различные магниторотационные сверхновые // *Астрономический журнал*. 2008. Т.85. С.1109—1121.

Как впервые показали наши двумерные численные расчеты, форма взрыва магниторотационной сверхновой существенно зависит от начальной конфигурации магнитного поля [7, 8] (рис.3, 4). Для начального магнитного поля дипольного типа взрыв происходит преимущественно вдоль оси вращения, что может в процессе его развития привести к формированию слабоколлимированного направленного струйного выброса — джета. В случае когда начальное магнитное поле представляет собой квадруполь, подобный взрыв распространяется в основном вблизи экваториальной плоскости. Из наших расчетов следует, что энергия взрыва сверхновой зависит от массы ядра и начальной энергии вращения и может достигать  $2.6 \cdot 10^{51}$  эрг [9] (рис.5).

На начальной стадии эволюции магнитного поля его тороидальная компонента увеличивается линейно, затем происходит экспоненциальный рост тороидальной и полоидальной компонент магнитного поля. Возникает магниторотационная неустойчивость, что приводит к сокращению времени развития такого взрыва.

Как видим, магниторотационный механизм взрыва сверхновой позволяет получить в расчетах энергию вспышки, соответствующую наблюдениям. Форма взрыва качественно зависит от начальной конфигурации магнитного поля.

\* \* \*

Несмотря на наличие нескольких возможных механизмов взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром, пока при многомерном численном моделировании лишь магниторотационный дает энергию взрыва, сопоставимую с наблюдениями. Кроме того, у этого механизма есть еще один «бонус» — при подобном взрыве сверхновых возможно формирование узконаправленных струйных выбросов — коллимированных джетов, которые могут быть причиной гамма-всплесков. ■