

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА
Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга

На правах рукописи

МОИСЕЕНКО СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

Моделирование коллапса вращающихся
астрофизических объектов и магниторотационных
процессов в протозвездных облаках и
коллапсирующих сверхновых

01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2006 г

Работа выполнена в отделе физики космической плазмы Института космических исследований РАН

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор Г.С.Бисноватый-Коган

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.М.Чечеткин
(Институт прикладной математики РАН
им. М.В.Келдыша)

доктор физико-математических наук, профессор Н.И. Шакура
(Государственный астрономический институт
им. П.К.Штернберга МГУ)

доктор физико-математических наук, профессор Ю.Д. Шевелев
(Институт автоматизации проектирования РАН)

Ведущая организация: Институт астрономии РАН

Защита диссертации состоится "09"ноября 2006г. в 14⁰⁰часов на заседании диссертационного совета No. Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Университетский проспект, дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ

Автореферат разослан "30"сентября 2006г.

Ученый секретарь диссертационного
совета кандидат физико-математических наук



С.О. Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Процессы коллапса вращающихся замагниченных и немагниченных объектов в астрофизике в настоящее время активно исследуются теоретически в связи с появлением значительного числа наблюдательных данных. Явление коллапса имеет место как на начальной стадии звездной эволюции (звздообразование), так и на конечной стадии эволюции звезд (взрывы сверхновых с коллапсирующим ядром).

Несмотря на ряд работ, посвященных исследованию коллапса вращающихся протозвездных облаков [1], [2], [3] до настоящего времени оставался открытым вопрос: каким будет распределение плотности в экваториальной плоскости облака в результате коллапса. Проведенное ранее численное моделирование этой задачи приводило к различным результатам. При использовании численных методов, основанных на разностных схемах в Эйлеровых переменных, имеющих даже небольшой искусственный перенос углового момента к центру облака, в результате коллапса в экваториальной плоскости формировалось распределение плотности в виде кольца (тора). Как было показано в работе [5], искусственный перенос момента вращения внутрь в разностной схеме, используемой в работе [1], приводит к решению в виде кольца, а разностная схема, используемая в работе [2], обладающая искусственным переносом углового момента наружу, приводит к решению в виде диска.

Исследование эволюции замагниченного протозвездного облака представляет особый интерес в связи с наблюдаемыми выбросами вещества у молодых звезд. Наличие дифференциального вращения и магнитного поля приводит к возникновению и усилению его тороидальной компоненты, формированию ударной МГД-волны, движущейся наружу и приводящей к выбросу части вещества облака.

Проблема объяснения механизма взрыва сверхновой с

коллапсирующим ядром является одной из актуальных и не решенных до конца в настоящее время. На начальной стадии исследования было выдвинуто предположение, что в процессе коллапса железного ядра массивной звезды формируется ударная волна отскока, которая, как предполагалось, отходя от центральных областей звезды, позволит получить взрыв сверхновой. Однако ни одномерные (сферически- симметричные), ни двумерные и трехмерные модели сверхновых, основанные на действии ударной волны отскока, не позволяют получить взрыв сверхновой с коллапсирующим ядром. Модель сверхновой, основанная на использовании механизма нейтринной конвекции, также не приводит к взрыву сверхновой [4]. Для получения взрыва коллапсирующей сверхновой необходимо учесть вращение и наличие магнитного поля.

Наблюдения коллапсирующих сверхновых показывают, что у подавляющего их большинства отсутствует не только сферическая симметрия, но даже симметрия относительно экваториальной плоскости (зеркальная симметрия). У ряда сверхновых наблюдаются односторонние выбросы. В связи с этим актуальной является разработка механизма нарушения зеркальной симметрии магнитного поля во вращающихся звездах и его применение к объяснению односторонних выбросов и формированию быстролетающих радиопульсаров.

Цель работы

Цель диссертационной работы:

- Исследование процессов коллапса немагнитных и намагнитных протозвездных облаков.
- Моделирование коллапса вращающегося железного ядра массивной звезды и формирование дифференциально вращающейся протонейтронной звезды.
- Исследование магниторотационного механизма взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром в двумерной постановке. Исследование зависимости характеристик

взрыва сверхновой от начального магнитного поля. Математическое моделирование взрыва сверхновой при начальных магнитных полях дипольного и квадрупольного типа симметрии, а также в широком диапазоне изменения интенсивности магнитного поля.

- Исследование магниторотационной неустойчивости, возникающей при магниторотационном взрыве сверхновой. Оценка влияния пересоединения магнитного поля на эффективность магниторотационного взрыва сверхновой.
- Создание механизма нарушения зеркальной симметрии магнитного поля и его проявление при формировании односторонних выбросов и быстролетающих радиопульсаров при взрывах коллапсирующих сверхновых.

Научная новизна

Большинство вошедших в диссертацию результатов обладает принципиальной научной новизной.

Были исследованы процессы, происходящие при коллапсе холодного быстровращающегося протозвездного облака, показано, что в результате коллапса распределение плотности в экваториальной плоскости представляет диск.

При эволюции замагниченного дифференциально вращающегося протозвездного облака получено возникновение и усиление со временем тороидального магнитного поля, приводящее к выбросу части вещества и энергии облака.

В результате моделирования коллапса вращающегося железного ядра получена дифференциально вращающаяся протонейтронная звезда, центральная часть которой вращается с периодом ~ 0.001 с.

Впервые получен магниторотационный взрыв сверхновой с коллапсирующим ядром в двумерной постановке. Энергия взрыва составляет $0.5\text{—}0.6 \cdot 10^{51}$ эрг, этого достаточно для объяснения взрыва коллапсирующей сверхновой.

Проведены расчеты магниторотационного взрыва сверхновой для начального магнитного поля квадрупольного и дипольного типа симметрии. Поле квадрупольного типа приводит к взрыву сверхновой, распространяющемуся преимущественно вблизи экваториальной плоскости. Начальное магнитное поле дипольного типа приводит к формированию слабо коллимированного направленного вдоль оси вращения струйного выброса (прото джета). Расчеты магниторотационного взрыва сверхновой были проведены для широкого диапазона начальных магнитных полей. Отношение начальной магнитной энергии к гравитационной энергии менялось от 10^{-2} до 10^{-12} .

При моделировании магниторотационного взрыва сверхновой были обнаружены и исследованы возникновение и характеристики магниторотационной неустойчивости. Было показано, что характерное время пересоединения магнитного поля существенно меньше (примерно на порядок), чем характерное время развития магниторотационного взрыва сверхновой.

Предложен механизм нарушения зеркальной симметрии магнитного поля во вращающихся звездах, позволяющий объяснить возникновение односторонних выбросов и образование быстролетающих радиопульсаров.

Практическая и научная значимость работы

Полученный в диссертации впервые магниторотационный взрыв коллапсирующей сверхновой в двумерной постановке дает качественное и количественное объяснение природы взрывов сверхновых с коллапсирующим ядром. Зависимость формы взрыва сверхновой от начальной конфигурации магнитного поля позволяет объяснить асимметрию и разнообразие форм коллапсирующих сверхновых. Полученное при моделировании магниторотационного взрыва сверхновой перемешивание вещества за ударной волной может быть использовано для количественной оценки и последующего сравнения с

результатами наблюдений выбрасываемых при взрыве сверхновой тяжелых элементов. Предложенный в диссертации механизм нарушения зеркальной симметрии магнитного поля позволяет объяснить возникновение односторонних струйных выбросов и образование быстролетающих радиопульсаров.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов диссертационной работы определяется четкой физической постановкой изучаемых задач, использованием современного аппарата различных областей вычислительной математики и теоретической физики. Все основные результаты опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. На работы автора имеется множество ссылок. Ряд результатов работ автора получил независимое подтверждение и международное признание.

Апробация результатов

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах Института космических исследований РАН, Института прикладной математики РАН им.М.В.Келдыша, Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга, Института им. Макса Планка по астрофизике (г.Гархинг, Германия), Университета г.Лидс (Великобритания), школе-семинаре "Космическая электродинамика и физика Солнца "(Пушино, 1995), на следующих конференциях: "The Local Bubble and Beyond"(IAU Colloquium No.166, г.Гархинг, Германия, 1997), "The Physics of Star Formation and Early Evolution "NATO advanced Study Institute (о.Крит, Греция, 1998), 3-е рабочее совещание по микроквазарам (г.Граната, Испания, 2000), 20th Texas Symposium Relativistic Astrophysics (г.Остин, США, 2000), "Численные методы для астрофизических течений"(г.Пусан, Южная Корея, 2001), "Winds, Bubbles and Explosions", (г.Патцкуаро, Мексика, 2002), "Астрофизика Высоких Энергий сегодня и завтра"(г.Москва,

2002, 2003, 2005), "Cosmic Explosions, On the 10th Anniversary of SN1993J"(IAU Colloquium No. 192, г.Валенсия, Испания, 2004), "1604-2004: Supernovae as cosmological lighthouses (г.Падуя, Испания, 2004), "International Workshop on Magnetohydrodynamic (MHD) Accretion Flows and Jets"(г.Киото, Япония, 2005), "Физика нейтронных звезд"(г.Санкт-Петербург, 2005), "Stellar End Products"(г.Гранада, Испания, 2005)

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, приложения, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 263 страницы. Она содержит 101 рисунок и 1 таблицу. Список литературы включает 138 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны основные цели работы, кратко изложена структура диссертации, охарактеризована ее научная новизна, а также научная и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, состоящей из трех параграфов, описаны результаты исследования коллапса вращающегося холодного газового облака.

В § 1 приведена постановка задачи о гравитационном коллапсе холодного быстровращающегося газового облака. Предполагается, что облако в начальный момент времени представляет собой однородный, твердотельно вращающийся шар со следующими основными параметрами:

$$\alpha = E_{in0}/|E_{gr0}| = 0.00425, \beta = E_{rot0}/|E_{gr0}| = 0.324,$$

где E_{in0} - внутренняя энергия облака; E_{rot0} - вращательная энергия облака; E_{gr0} - гравитационная энергия облака.

В § 2 описана процедура расчета гравитационного потенциала на внешней границе и значений гравитационной силы вблизи оси

вращения z . Предложен подход, позволяющий увеличить точность вычисления гравитационной силы вблизи оси вращения, что позволило предотвратить искажение течения вещества облака вблизи оси вращения.

В § 3 описаны результаты численного моделирования задачи о коллапсе холодного быстро вращающегося газового облака. В процессе коллапса облако сильно уплощается. Использование лагранжевых переменных позволяет провести расчет с необходимым пространственным разрешением. В момент максимального сжатия облако представляет собой эллипсоид с соотношением полуосей 1:10, однако внутренняя часть облака содержащая ~ 90% массы облака представляет собой довольно уплощенный эллипсоид с соотношением полуосей ~ 1:100. В процессе моделирования получен эффект возникновения неустойчивости за фронтом ударной волны, движущейся в гравитационном поле. После момента максимального сжатия происходит формирование ударной волны и отражение ее от экваториальной плоскости. Эта ударная волна выходит на поверхность облака и начинается расширение облака. Через некоторое время после начала разлета в центральной части облака происходит его вторичное сжатие. Показано, что в результате коллапса распределение плотности представляет собой диск. Оценено количество вещества облака, уносимое ударной волной от облака.

Во **второй главе**, состоящей из трех параграфов, представлены результаты моделирования задачи о коллапсе вращающегося замагниченного газового облака. Описаны постановка задачи, процедура задания начального бездивергентного магнитного поля, а также процедура вычисления граничных значений магнитного поля и результаты численных расчетов.

В § 1 выписана основная система уравнений, приведено ее обезразмеривание и приведена постановка задачи о коллапсе

вращающегося замагниченного газового облака.

В § 2 описывается процедура вычисления граничных значений магнитного поля. Начальные значения полоидальных компонент магнитного поля H_{r0} , H_{z0} в расчетной области и его граничные значения на внешней границе H_{rq} , H_{zq} рассчитываются при помощи закона Био-Савара. Выведен сеточный аналог формулы для вычисления граничных значений магнитного поля.

Для моделирования магниторотационных процессов, происходящих в замагниченном вращающемся протозвездном облаке, в качестве начального магнитного поля следует задавать "бездивергентное" магнитное поле. Наилучшим выбором конфигурации магнитного поля был бы диполь или квадруполь. Хотя такие конфигурации магнитного поля удовлетворяют граничным условиям, они имеют сингулярности в начале координат ($r = 0$, $z = 0$). Использование таких магнитных полей в численном моделировании может привести к потере точности в численных расчетах. Кроме того, начальное магнитное поле должно быть бессильным или сбалансированным с другими силами, действующими в облаке (гравитационная сила, сила газового давления и т.п.). Несбалансированность начального магнитного поля может привести к искажению течения в облаке из-за эффекта "включения" магнитного поля. Для получения сбалансированного начального магнитного поля применялся следующий прием: "включаются" уравнения эволюции полоидальных компонент магнитного поля H_{r0} , H_{z0} , но "выключается" уравнение для эволюции тороидальной компоненты магнитного поля H_{ϕ} в решаемой численно системе уравнений МГД. Это означает, что мы задаем $H_{\phi} \equiv 0$, $dH_{\phi}/dt \equiv 0$. С физической точки зрения это означает, что силовые линии магнитного поля могут проскальзывать через вещество облака в тороидальном направлении. После "включения" такого поля проводится расчет эволюции замагниченного облака до

достижения равновесной дифференциально вращающейся конфигурации при наличии полоидального магнитного поля, сбалансированного с другими силами в облаке.

В § 3 излагаются результаты двумерного численного моделирования задачи о коллапсе замагниченного вращающегося протозвездного облака. Показано, что из-за дифференциальности вращения облака в нем возникает тороидальная компонента магнитного поля, усиливающаяся со временем. При возрастании магнитного давления происходит выталкивание части вещества оболочки облака вблизи экваториальной плоскости наружу. Возникает волна уплотнения, движущаяся наружу. Распространяясь по быстро спадающему фону плотности она вскоре превращается в ударную МГД волну. Эта ударная волна, сформированная справа от максимума тороидальной компоненты магнитного поля в экваториальной плоскости, представляет собой быструю магнитогидродинамическую ударную волну, ее скорость больше быстрой магнитозвуковой скорости в газе, находящемся непосредственно перед фронтом этой ударной волны. Скорость этой МГД ударной волны меньше альфвеновской скорости в газе за ударной волной и больше медленной магнитозвуковой скорости в газе за этой ударной волной. Показано, что часть оболочки облака (7%) приобретает кинетическую энергию, большую, чем ее потенциальная энергия, и может улететь от облака, при этом уносится 3.3% конечной гравитационной энергии облака. Результаты моделирования магниторотационных процессов во вращающихся замагниченных протозвездных облаках имеют важное значения для объяснения процессов звездообразования и эволюции молодых звезд.

В **третьей главе**, состоящей из трех параграфов, описаны результаты двумерного расчета динамики коллапса вращающегося ядра с образованием нейтронной звезды на адаптивной треугольной сетке в лагранжевых переменных.

В § 1 приводится постановка задачи. Выписаны уравнения

состояния. Описывается методика учета нейтринных потерь при коллапсе.

В § 2 записана основная система уравнений гравитационной газовой динамики для моделирования коллапса вращающегося железного ядра и формирования быстровращающейся нейтронной звезды. Система уравнений записывается в безразмерном виде.

В § 3 описаны результаты моделирования. Показано, что в результате коллапса происходит формирование ударной волны отскока, которая выходит во внешние слои коллапсирующего ядра, однако уносимая ею энергия $2.960 \cdot 10^{48}$ эрг (0.001186% гравитационной энергии звезды) слишком мало для того, чтобы объяснить взрыв сверхновой с коллапсирующим ядром. С другой стороны, на конечной стадии коллапса звезда состоит из почти твердотельно быстровращающейся (с периодом ~ 0.0015 с) центральной части и дифференциально вращающейся оболочки. При отсутствии магнитного поля звезда может находиться в таком состоянии длительное время без существенного изменения ее параметров. Наличие в такой сколлапсировавшей звезде даже слабого начального полоидального магнитного поля приведет к генерации тороидальной компоненты магнитного поля, ее усилению со временем. Это вызывает увеличение магнитного давления и формирование волны сжатия, движущейся наружу. Двигаясь по быстро спадающему фону плотности, эта волна сжатия превращается в быструю МГД ударную волну и, продвигаясь от центра звезды наружу, приведет к магниторотационному взрыву сверхновой.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию магниторота-ционного взрыва сверхновой в двумерной постановке. Глава состоит из семи параграфов.

В § 1 приведены постановка задачи, начальные и граничные условия. Задается конфигурация тороидального тока, определяющего начальное полоидальное магнитное поле.

В § 2 описаны результаты двумерного моделирования магниторотационного взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром при начальном магнитном поле квадрупольного типа симметрии. Результаты расчетов показывают, что на начальном этапе эволюции магнитного поля происходит линейный рост тороидальной компоненты магнитного поля. На развитой стадии эволюции H_ϕ к моменту времени $t = 0.04\text{с}$ (после начала эволюции тороидального поля) тороидальная магнитная энергия растет со временем существенно более быстро, чем квадратичная функция благодаря развитию магниторотационной неустойчивости [6]. Быстрый рост тороидального магнитного поля приводит, в свою очередь, через поле скоростей к быстрому росту полоидальных компонент магнитного поля.

Накручивание силовых линий магнитного поля приводит к передаче углового момента от протонейтронной звезды к оболочке. Вмороженное магнитное поле работает как "приводной ремень" для передачи углового момента. Оболочка звезды начинает медленно расширяться. На периферии прото нейтронной звезды вблизи экстремумов H_ϕ возникает волна сжатия. Эта волна движется по быстро спадающему фону плотности. Амплитуда волны растет со временем и довольно быстро эта волна сжатия превращается в быструю ударную МГД волну. Усиливающееся, благодаря дифференциальному вращению, магнитное поле действует как поршень для образовавшейся ударной МГД волны. Важно отметить, что такой "поршень" действует в течение конечного времени, поддерживая ударную МГД волну, в отличие от модели взрыва коллапсирующих сверхновых, связанную с ударной волной отскока, где такой "поршень" отсутствует. В силу квадрупольной симметрии начального магнитного поля ударная волна имеет большую амплитуду и движется быстрее вблизи экваториальной плоскости $z = 0$. В связи с этим вещество оболочки звезды при магниторотационном взрыве преимущественно выбрасывается

вблизи экваториальной плоскости. Максимальное значение H_ϕ в процессе генерации тороидального поля составляет $\sim 2.5 \cdot 10^{16}$ Гс. Следует отметить, что после взрыва сверхновой на поверхности нейтронной звезды напряженность магнитного поля составляет $\sim 10^{14}$ Гс. Результаты двумерного моделирования показали, что энергия взрыва магниторотационной сверхновой составляет $\sim 0.6 \cdot 10^{51}$ эрг, при этом выбрасываемая при взрыве масса составляет $\sim 0.14 M_\odot$. В настоящее время магниторотационный механизм взрыва сверхновой является практически единственным, позволяющим объяснить взрыв сверхновой с коллапсирующим ядром. Представлены результаты расчетов взрыва сверхновой для широкого диапазона энергий начального магнитного поля. Отношение начальной магнитной энергии к гравитационной энергии звезды составляло от 10^{-2} до 10^{-12} . В диссертации представлен график зависимости времени развития магниторотационного взрыва сверхновой от соотношения начальной магнитной и гравитационной энергий звезды.

В § 3 описано обнаруженное при расчетах явление магниторотационной неустойчивости, возникающей при магниторотационном взрыве сверхновой. Магниторотационная неустойчивость приводит к экспоненциальному росту тороидального и полоидального магнитных полей, существенно сокращая время развития магниторотационного взрыва сверхновой. Предложена качественная модель, объясняющая экспоненциальное усиление полоидального и тороидального магнитного поля.

В § 4 представлена постановка задачи о магниторотационном взрыве с начальным магнитным полем дипольного типа симметрии. Задаются начальные и граничные условия, выписана система уравнений гравитационной магнитной гидродинамики.

В § 5 приведены результаты исследования магниторотационного взрыва сверхновой с начальным

магнитным полем дипольного типа симметрии. Как показали результаты расчетов энергия взрыва сверхновой составляет $\sim 0.5 \cdot 10^{51}$ эрг. Выбрасываемая при взрыве сверхновой масса составляет $\sim 0.14 M_{\odot}$. Основным качественным отличием "дипольного" магниторотационного взрыва от "квадрупольного" является форма выброса. Начальное "дипольное" магнитное поле приводит к формированию слабо коллимированного направленного струйного выброса (джета) при взрыве сверхновой. Расчеты магниторотационного взрыва для начального поля дипольного типа проводились для широкого диапазона начальной энергии магнитного поля. Отношение начальной магнитной энергии звезды к ее гравитационной энергии менялось, как и в расчетах с начальным квадрупольным полем от 10^{-2} до 10^{-12} . Как показали расчеты, величина начальной магнитной энергии слабо влияет на энергию взрыва сверхновой. В процессе развития магниторотационного взрыва возможно возбуждение собственных колебаний нейтронной звезды, что и было обнаружено в расчетах.

В § 6 исследуется влияние численной диссипации на возникновение и развитие магниторотационной неустойчивости. Показано, что при проведении двумерных расчетов магниторотационного взрыва сверхновой на грубой сетке (с числом узлов сетки менее 15000) момент возникновения магниторотационной неустойчивости зависит от размерности сетки. Чем грубее сетка, тем позднее возникает магниторотационная неустойчивость. Зависимость времени взрыва t_{expl} от числа узлов сетки имеет численное происхождение и связана с численной диссипацией. Такая диссипация оказывает стабилизирующее влияние на магниторотационную неустойчивость и ее "включение" происходит при больших значениях отношения тороидальной и полоидальной магнитных энергий.

Пересоединение магнитного поля может оказать

существенное влияние на развитие магниторотационного взрыва. Для моделирования магниторотационного взрыва сверхновой мы предполагаем, что среда обладает бесконечной проводимостью. Однако, проводимость вещества звезды конечна, хоть и очень велика. Наличие хаотической структуры магнитного поля (формирующейся в процессе развития магниторотационной неустойчивости) и конечной проводимости может привести к тому, что пересоединение магнитного поля окажется существенным, приводя к реальной физической диссипации.

В диссертации оценивается характерное время пересоединения магнитного поля. Показано, что оно существенно (примерно в 10 раз) больше времени развития магниторотационного взрыва из чего следует, что пересоединение магнитного поля не оказывает существенного влияния на взрыв сверхновой.

§7 посвящен обсуждению результатов двумерного моделирования магниторотационного взрыва сверхновой. Отмечается, что форма взрыва сверхновой существенно зависит от начальной конфигурации магнитного поля. При начальном магнитном поле квадрупольного типа, взрыв происходит преимущественно вблизи экваториальной плоскости. При начальном "дипольном" поле магниторотационный взрыв сверхновой возможен в виде слабо коллимированного струйного выброса (джета) вдоль оси вращения. Энергия взрыва сверхновой, как показали расчеты, слабо зависит от конфигурации и начальной интенсивности магнитного поля.

Пятая глава, состоящая из двух параграфов, посвящена описанию предложенного механизма нарушения зеркальной симметрии магнитного поля во вращающихся звездах и возможным астрофизическим проявлениям этого эффекта.

В § 1 описана физическая картина нарушения зеркальной симметрии конфигурации магнитного поля, возникающая за счет взаимодействия полоидальной и тороидальной компонент поля

звезды. Возникающее зеркально несимметричное поле при дифференциальном вращении звезды усиливается и может привести к одностороннему выбросу и эффекту отдачи. Приводится оценка скорости движения пульсара при несимметричном магниторотационном взрыве.

В § 2 приведено описание конкретных примеров проявления механизма нарушения симметрии.

В **приложении** описывается применяемый в диссертации метод математического моделирования МГД процессов на основе операторно-разностной схемы в лагранжевых переменных на треугольной сетке переменной структуры. Выписываются уравнения идеальной гравитационной магнитной гидродинамики, описывается неявная полностью консервативная операторно-разностная схема в лагранжевых переменных на треугольной сетке переменной структуры, излагаются особенности перестройки сетки и пересчета значений ячеечных функций при моделировании астрофизических задач. Вводятся критерии перестройки сетки позволяющие производить пересчет ячеечных функций, которые удовлетворяют законам сохранения (консервативный пересчет). Описано тестирование применяемой методики.

Заключение

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты и выводы

1. Исследован гравитационный коллапс холодного быстровращающегося протозвездного газового облака. Показано, что в результате коллапса распределение плотности в экваториальной плоскости представляет собой диск. Получен эффект возникновения неустойчивости течения газа за фронтом ударной волны в гравитационном поле.

2. Исследованы магниторотационные процессы, происходящие в замагниченном дифференциально вращающемся протозвездном облаке. Усиление тороидальной компоненты магнитного поля и передача углового момента приводит к выбросу энергии (3.3% гравитационной энергии облака в конце расчетов).
3. Исследована задача о коллапсе железного ядра вращающейся массивной звезды. Показано, что в результате гравитационного коллапса формируется дифференциально вращающаяся протонейтронная звезда, возникает ударная волна отскока, а также всплеск нейтринного излучения. Однако энергии, выделяющейся при прохождении ударной волны отскока не достаточно для объяснения взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром.
4. Впервые получен магниторотационный взрыв сверхновой в двумерной постановке. Энергия взрыва сверхновой составляет $0.5-0.6 \cdot 10^{51}$ эрг. Форма взрыва сверхновой качественно зависит от начальной конфигурации магнитного поля. При начальном магнитном поле квадрупольного типа симметрии взрыв сверхновой происходит преимущественно вблизи экваториальной плоскости. При начальном поле дипольного типа - взрыв распространяется в виде слабо коллимированного, направленного вдоль оси вращения струйного выброса.
5. При численном моделировании магниторотационного взрыва сверхновой была обнаружена и исследована магниторотационная неустойчивость, приводящая к экспоненциальному росту полоидальной и тороидальной компонент магнитного поля и существенно уменьшающая время эволюции магнитного поля до магниторотационного взрыва сверхновой.

6. Предложен механизм нарушения симметрии магнитного поля в дифференциально вращающихся звездах, позволяющий объяснить возникновение односторонних выбросов и быстролетающих радиопульсаров.

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах. В ряде совместных работ роль автора является ведущей, в остальных работах участие соавторов в постановке задачи, проведении расчетов и анализе результатов равное.

1. Г.С. Бисноватый-Коган, С.Г. Моисеенко Нарушение зеркальной симметрии магнитного поля во вращающихся звездах и возможные астрофизические проявления. // АЖ 1992, т.69 с.563-571.
2. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovatyι-Kogan, K.V. Kosmachevskii, S.G. Moiseenko An implicit Lagrangian code for the treatment of nonstationary problems in rotating astrophysical bodies. // Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1996, v.115, p.573-594.
3. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovatyι-Kogan, K.V. Kosmachevskii, S.G. Moiseenko Simulation of the collapse of a rotating gas cloud on triangular restructuring Lagrangian grid. // Astronomical and Astrophysical transactions, 1996, v.10, p.341-355.
4. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovatyι-Kogan, S.G. Moiseenko 2D calculations of the collapse of rotating magnetized gas cloud. // Astrophysics and Space Science, 1996, v.239, p.1-13.
5. Н.В. Арделян, Г.С. Бисноватый-Коган, С.Г. Моисеенко Механизмы взрыва сверхновых: магниторотационный механизм. // Успехи физ. наук, 1998, т.168, с.1128-1131.
6. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovatyι-Kogan, S.G. Moiseenko Magnetorotational Mechanism: 2D Simulation. // Proc. of the IAU

- Colloquium No.166, "The local bubble and beyond", Lecture notes in physics, 1998, v.506 p.145-148.
7. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Nonstationary magnetorotational processes in a rotating magnetized cloud. // *Astronomy and Astrophysics*, 2000, v. 355, p.1181-1190.
 8. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Simulation of the magnetorotational supernova explosion mechanism // *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 80 (2000) CD-ROM 07/16.
 9. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Collapse of a magnetized rotating cloud. 2D numerical simulations. // *Astrophysics and Space Science* 2000, v.274, p.389-397.
 10. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Magneto-Rotational ejection. // *Astrophysics and Space Science* 2001, v.276 (suppl), p.295-296.
 11. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Magnetorotational explosion. Results of 2D simulations. // *Proc. of XX Texas Symposium of Relativistic astrophysics. Austin,AIP Conf. Proc*, 2001, v586, p.433-438.
 12. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Jet formation from rotating magnetized clouds. // *Proc. of XX Texas Symposium of Relativistic astrophysics. Austin,AIP Conf. Proc.* 2001, v586, p.439-445.
 13. G.S. Bisnovaty-Kogan, N.V. Ardeljan, S.G. Moiseenko, Magnetorotational explosions: supernovae and jet formation. // *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 2002, v.73, p.1134-1143.
 14. S.G. Moiseenko, N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, Supernovae type II: magnetorotational explosion. // *RevMexAA (Serie de conferencias)*,2003, v.15, p.231-233.
 15. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko,

- Magnetorotational mechanism: Supernova Explosions and Ejections. // Proc of IAU symposium No.214 High Energy Processes and Phenomena in Astrophysics, Suzhou, China 5-10 August 2003 p.117-120.
15. Н.В. Арделян, Г.С. Бисноватый-Коган, К.В. Космачевский, С.Г. Моисеенко Двумерный расчет динамики коллапса вращающегося ядра с образованием нейтронной звезды на адаптивной треугольной сетке в лагранжевых переменных. // Астрофизика, 2004 т.47 No.1, с47-64.
 16. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Magnetorotational mechanism of supernova type II explosion. // Proc of IAU Colloquium 192 Supernovae (10 years of 1993J) 22-26 April 2003 Valencia, Spain Cosmic Explosions, J.M.Mercaide, K.W.Weiler (Eds.), Springer, 2005, p.281-285.
 17. P.L. Biermann, S.G. Moiseenko, S. Ter-Antonyan, A. Vasile Cosmic rays from PeV to ZeV, Stellar Evolution, Supernova Physics and Gamma Ray Bursts. // "The early Universe and the Cosmic Microwave Background: Theory and Observations", eds. N.G.Sanchez and Y.N.Parijskij, Kluver, 2003, p.489- 516.
 18. N.V. Ardeljan, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Magnetorotational supernovae. // MNRAS 2005, v.359, p.333-344
 19. S.G. Moiseenko, G.S. Bisnovaty-Kogan, N.V. Ardeljan Magnetorotational supernova simulations. // Proc of the International Conference "1604-2004 Supernovae as Cosmological Lighthouses"(Padova, Italy, June 16-19, 2004), ASP Conference Series, 2005, v.342, p.190-193.
 20. P.L. Biermann, G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko Particle acceleration: from galaxies to large scale structure. // Proceedings of the conference "Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures"Angra dos Reis, Brazil, November

28 - December 3, 2004 AIP Conference Proceedings, 2005, v.784, p.385-395.

22. S.G. Moiseenko, G.S. Bisnovaty-Kogan, N.V. Ardeljan
Magnetorotational Supernovae - The Supernova Mechanism That Works. // Proceedings of the "Stellar end products" workshop, 13-15 April 2005, Granada, Spain, ed. M.A. Perez-Torres. Mem. S.A.It. 2005, Vol. 76, 575-579
23. G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko, N.V. Ardeljan
Magnetorotational Supernovae Explosions. // Gravitation and Cosmology (Гравитация и космология), 2005, v.11, 289-300
24. G.S. Bisnovaty-Kogan, S.G. Moiseenko, N.V. Ardeljan
Core collapse supernovae. Magnetorotational explosion. "Gravity, Astrophysics, and Strings at the Black Sea, Proc.3rd Advanced Research Workshop, P.P.Fiziev, M.D.Todorov (Eds.), 10-16 June 2005, Kiten, St.Kliment Ohridski University Press, Sofia, 2006", p. 1-23.
25. S.G. Moiseenko, G.S. Bisnovaty-Kogan, N.V. Ardeljan
Magnetorotational core collapse model with jets. // MNRAS, 2006, v.370, p.501-512.

Список литературы

- [1] Black D.C., Bodenheimer P. Evolution of rotating interstellar clouds. I -Numerical techniques. // ApJ., 1975, **199**, 619-632.
- [2] Bodenheimer P., Tscharnuter W., A comparison of two independent calculations of the axisymmetric collapse of a rotating protostar // A& A., 1979, **74**, 288-293.
- [3] Boss, A.P. Collapse and equilibrium of Rotating, Adiabatic Clouds. // ApJ, 1980, **242**, 699-709.
- [4] Mueller E., Janka H.-T., Multi-Dimensional Simulations of Neutrino-Driven Supernovae.// Reviews in Modern Astronomy, 1994, **7**, 103-128.
- [5] Norman, M.L., Wilson, J.R., Barton, R.T. A new calculation on rotating protostar collapse // ApJ, 1980, **239**, 968-981.
- [6] Akiyama S., Wheeler J.C., Meier D.L., Lichtenstadt I., The magnetorotational instability in core collapse supernova explosions. // ApJ, 2003, **584**, 954-970.

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН

Москва, 117997 ул.Пофсоюзная 84/32

Подписано к печати

Заказ

Формат 70x108x32

Тираж 100

1.0 уч.-изд.л.