

1) Список авторов

Илья Алексеевич Кондратьев

2) Название

цикл работ, выполненный молодым ученым «**Эффект отдачи нейтронных звезд в магниторотационных сверхновых**»

(Номинация: «Лучшая научная работа молодого ученого»)

3) Ссылки на публикации

1. Илья А. Kondratyev and Sergey G. Moiseenko “A Semi-Implicit Numerical Method for Differentially Rotating Compressible Flows”, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, **44** (1), 44–56 (2023) DOI: 10.1134/S1995080223010225 **(Q2)**

2. Илья А. Kondratyev, Sergey G. Moiseenko and Gennady S. Bisnovatyi-Kogan “*Magnetorotational Supernova Explosions: Jets and Mirror Symmetry Violation*”, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, **45** (1), 50–59 (2024) DOI: 10.1134/S1995080224010268 **(Q2)**

3. Илья А. Kondratyev, Sergey G. Moiseenko and Gennady S. Bisnovatyi-Kogan “*Magnetorotational Neutron Star Kicks*”, *Physical Review D*, **110** (8), 083025 (2024) DOI: 10.1103/PhysRevD.110.083025 **(Q1)**

4. Илья А. Kondratyev, Sergey G. Moiseenko and Gennady S. Bisnovatyi-Kogan “*Asymmetric Magnetorotational Supernovae for Various Stellar Masses*”, *Fluid Dynamics*, **59** (8), 2458-2467 (2024) DOI: 10.1134/S0015462824605060 **(Q3)**

4) Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Многие нейтронные звезды обладают большими скоростями движения (~100-500 километров в секунду, т.н. «кики», *kicks*), что хорошо известно из наблюдений [A. G. Lyne and D.R. Lorimer, *Nature*, 369, 6476, 127 (1994)]. Обычно предполагается, что нейтронные звезды получают ускорения во время взрыва сверхновой за счет эффекта отдачи – из-за угловой асимметрии выброшенного взрывом вещества и/или нейтринной вспышки [D. Lai, D.F. Chernoff and J.M. Cordes, *Astrophys. J.*, 549, 1111 (2001)]. Природа генерации больших скоростей компактных объектов остается не вполне ясной в настоящее время, и исследование этого вопроса является одним из самых актуальных в теории коллапсирующих сверхновых [см., напр., A. Burrows, *et al.*, *Astrophys. J.*, 963, 63 (2024)]. В рамках цикла работ были проведены исследования возникновения асимметрии взрыва коллапсирующей сверхновой и приобретения скорости протонейтронной звездой (ПНЗ) в рамках магниторотационного (МР) механизма. В МР механизме взрыва сверхновой энергия выброса генерируется путем накрутки тороидального магнитного поля за счет энергии дифференциального вращения ПНЗ и окружающей ее оболочки [Г.С. Бисноватый-Коган, *Астрономический Журнал*, 47, 813 (1970)], рост магнитного давления приводит к формированию волны сжатия, которая в дальнейшем переходит в магнитогидродинамическую (МГД) ударную волну взрыва. Одним из способов генерации экваториальной асимметрии взрыва сверхновой может

быть нарушение зеркальной симметрии поля в ядре массивной звезды-прародителя [см., напр., *G.S. Bisnovatyi-Kogan and S.G. Moiseenko, Astron. Rep.*, 69, 563 (1992); *H. Sawai, et al, Astrophys. J.*, 672, 465 (2008)]. Различие магнитных давлений над экваториальной плоскостью и под ней приводят к формированию различных выбросов вещества в виде джетов в северном и южных полушариях. Это приводит к генерации асимметрии взрыва и возникновению эффекта отдачи ПНЗ. Многомерные МГД модели коллапса ядра массивной звезды и взрыва МР сверхновой с различными предположениями о нарушении зеркальной симметрии магнитного поля помогут лучше понимать механизмы генерации скоростей нейтронных звезд.

5) *Конкретная решаемая в работе задача и ее значение*

А) Разработка численного кода для моделирования самогравитирующих многомерных астрофизических МГД течений с учетом уравнения состояния произвольного вида и нейтринных потерь

Б) Исследование эффекта отдачи для протонейтронной звезды и экваториальной асимметрии магниторотационного взрыва сверхновой при наличии магнитных полей с различными нарушениями зеркальной симметрии в ядре звезды перед коллапсом

В) Исследование эффекта отдачи в магниторотационных сверхновых в зависимости от массы звезды

Значимость данной задачи определяется тем, что ее решение позволит углубить понимание о формировании быстро движущихся нейтронных звезд. Разработанный комплекс программ позволяет моделировать широкий класс замагниченных течений астрофизической и лабораторной плазмы в задачах с различными геометрией, размерностью и физическими параметрами.

6) *Используемый подход, его новизна и оригинальность*

Для численного решения задачи о коллапсе ядра звезды и МР взрыве сверхновой нами был разработан многомерный комплекс программ с реализацией решения уравнений идеальной магнитной гидродинамики с произвольно (таблично) заданным уравнением состояния вещества. Данный комплекс программ основан на использовании явной схемы Годуновского типа для моделирования сжимаемых МГД-течений в форме законов сохранения совместно с уточнением расчетных величин до пятого порядка аппроксимации по пространству и третьего – по времени на основе схемы PPM5 и метода Рунге-Кутты RK3, соответственно, см. [*A. Mignone, J. Comp. Phys.*, 270, 784 (2014)]. Для адаптации кода к решению задачи о коллапсе и взрыве МР сверхновой нами была использована схема нейтринных потерь, в которой отдельно рассматриваются области нейтринной диффузии и свободного разлета. Нагрев вещества за счёт поглощения вылетающих из ядра нейтрино нуклонами учитывается в областях свободного разлета [*E. O'Connor and C.D. Ott, Classical Quantum Gravity* 27, 114103 (2010)]. Используемая схема приводит к результатам в согласии с более громоздкими подходами, основанными на решении уравнения переноса нейтрино. Для

ускорения расчетов течений с самогравитацией на многопроцессорных системах был реализован метод приближенного решения уравнения Пуассона для гравитационного потенциала посредством разложения потенциала в ряд по сферическим функциям. В дополнение, разработаны Галилеево-инвариантные модули для очистки дивергенции магнитного поля, позволяющие эффективно уменьшить паразитные процессы, связанные с наличием численных магнитных монополей в методах Годуновского типа. Схема очистки основана на методе обобщенного множителя Лагранжа [P.F. Hopkins and M.J. Raives, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 455, 51 (2016)]. Для моделирования МГД-течений в сферической геометрии использовались т.н. древовидные сетки [M.A. Skinner, et al, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 241, 7 (2019)] с реализацией процедуры уменьшения углового разрешения вблизи координатных особенностей. Это позволяет в десятки раз ускорить расчеты в двумерных сферических координатах по сравнению со стандартными структурированными сетками. Комбинация данных подходов позволила написать оригинальный комплекс программ, при помощи которого возможно эффективно и с высокой точностью моделировать замагниченные течения, возникающие при взрывах сверхновых.

7) Полученные результаты и их значимость

Проведено исследование генерации асимметрии МР взрыва сверхновой для различных асимметричных конфигураций магнитного поля в ядре массивной звезды перед коллапсом. При помощи глобальной двумерной осесимметричной МГД модели впервые рассмотрены и сравнены между собой различные способы генерации линейной скорости компактного объекта для различных начальных конфигураций магнитного поля звезды в рамках МР механизма вспышек коллапсирующих сверхновых. Для начальной структуры звезды-предсверхновой использовались данные одномерных расчетов звездной эволюции для вращающейся замагниченной массивной звезды 35 масс Солнца [S. Woosley and A. Heger, *Astrophys. J.*, 637, 914 (2006)], часто использующиеся в МР расчетах. Рассмотрены три семейства моделей с конфигурациями поля в виде (1) суперпозиции дипольной и квадрупольной компонент, (2) смещенного дипольного поля, а также (3) суперпозиции дипольного и симметричного тороидального полей. На основе численных МГД моделей с нарушенной зеркальной симметрией магнитного поля получены МР взрывы в форме струйных истечений с джетами различной интенсивности в северном и южном полушариях. Получено, что из-за эффекта отдачи при МР взрыве может генерироваться линейная скорость сколлапсировавшего компактного объекта – протонейтронной звезды (ПНЗ) – до 500 километров в секунду за времена порядка одной секунды после коллапса ядра и формирования ударной волны отскока. Оценки скорости ПНЗ и энергетики МР взрыва получены для широкого диапазона индукций начальных магнитных полей (10^{10} - 10^{12} Гс).

Данные результаты находятся в согласии с данными наблюдений быстролетающих нейтронных звезд [см., напр., *R.N. Manchester, et al, Astronom. J., 129, 1993 (2005)*]. Получено, что для суперпозиции дипольного и квадрупольного магнитных полей асимметрия струйных выбросов является максимальной.

Впервые рассмотрен процесс генерации асимметрии МР взрыва сверхновой для различных масс массивных звезд с магнитным полем в форме смещенного в северное полушарие диполя в ядре в двух пределах – слабого и сильного магнитного поля, $3 \cdot 10^{10}$ и 10^{12} Гс, соответственно. Рассмотрены модели предсверхновых для звезд начальной массы на главной последовательности в 20 и 35 масс Солнца. Получено, что при слабом начальном магнитном поле для моделей звезд обеих масс после коллапса ядра магнитное поле в окрестности ПНЗ усиливается пропорционально начальной конфигурации, приводя к качественно схожим эффектам по анизотропии взрыва. При наличии в ядре сильного начального магнитного поля эволюция МР взрыва происходит по-разному для звезд различной массы. Для звезды с массой в $20M_{\odot}$ скорость направлена к югу при более мощном струйном выбросе в северном полушарии, а для звезды в $35 M_{\odot}$ имеет место обратная ситуация. Это связано с тем, что в более массивной звезде накрученное магнитное поле практически сразу запускает джет в северном полушарии и далее там не растет, а в южном полушарии изначально слабое магнитное поле усиливается за счет магниторотационной неустойчивости и сильного темпа аккреции замагниченного вещества с периферии коллапсирующего ядра, в результате чего поле на юге со временем становится больше, чем в аналогичной области над экватором, и возникающий там выброс становится доминирующим в энергетике взрыва. В случае звезды меньшей массы градиент угловой скорости и темп аккреции ниже, в результате чего не наблюдался быстрый рост поля под экватором, и магнитное поле сохраняет свою структуру с доминированием в северном полушарии, в согласии с работой [*H. Sawai et al, Astrophys. J., 672, 465 (2008)*]. Таким образом, было показано, что процесс генерации асимметрии МР взрыва сверхновой и формирования эффекта отдачи ПНЗ может происходить качественно по-разному для звезд различной массы. При этом с уменьшением массы звезды эффект отдачи компактного объекта также убывает.

Полученные нами результаты позволяют лучше понять механизмы ускорения компактных объектов при взрывах сверхновых до наблюдаемых значений скорости, а разработанный комплекс программ для астрофизических МГД-расчетов может быть использован в самых разных приложениях, где возникает необходимость численного исследования многомерной эволюции плазменного течения.