

Ранее неизвестная рентгеновская особенность пульсарной туманности Вела

© А.Н. Фурсов, К.П. Левенфиш, Г.А. Пономарев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
19402 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.n.fursov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 4 июля 2025 г.

Принято к публикации 4 июля 2025 г.

Проведена проверка предсказательной способности недавно построенной релятивистской магнитогидродинамической модели компактных пульсарных туманностей с двойным рентгеновским тором. Эта модель предсказывает, что сильно-замагниченные потоки туманности должны быть квазиламинарными и расщепляться надвое с приближением к ее внешней границе. Подтверждение этого предсказания найдено в архивных данных рентгеновского телескопа Chandra, наблюдавшего двухторовую туманность Вела (Vela) пульсара PSR J0835–4510 в созвездии Парусов. Модель также объясняет происхождение части диффузного излучения Вели в рентгене.

Ключевые слова: МГД, пульсарные туманности, остатки сверхновых, рентгеновская астрофизика.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61796.243-25

Введение

Самая внутренняя область пульсарных туманностей обычно испускает особенно яркое рентгеновское излучение. Эта область начинается сразу за ударной волной торможения пульсарного ветра и называется „компактной туманностью“. Ее заполняет свежая, сильно-замагниченная электрон-позитронная (e^\pm) плазма пульсарного ветра, только что пересекшая ударный фронт. Рентгеновское излучение туманностей обязано синхротронному излучению высокoenергичных нетепловых (ускоренных) e^\pm в магнитных полях фоновой (тепловой) плазмы туманностей. Если скорость движения пульсара относительно внешней среды не сильно превышает скорость звука в среде, то его компактная туманность обычно имеет джет-торовую рентгеновскую морфологию, у которой есть два подтипа — с одним или с двумя торами. Первые магнитогидродинамические (МГД) модели одноторовых туманностей появились более 20 лет назад (см. [1] и ссылки в ней), а модели двухторовых были построены сравнительно недавно [2–4]. Прототипами МГД моделей послужили одноторовая туманность Краб пульсара PSR B0531 +21 и двухторовая туманность Вела пульсара PSR J0835–4510 в созвездии Парусов.

1. Расщепление потоков на границе компактной туманности

Среди пульсарных туманностей двухторовые встречаются нечасто: из почти сотни наблюдаемых в рентгене туманностей, к двухторовым относят лишь 3–4. Недавно построенная МГД модель двухторовых туманностей (Пономарев и др. 2019, 2021, 2023) выявила базовое условие их формирования — стабильность ударной вол-

ны торможения пульсарного ветра. Под стабильностью здесь следует понимать регулярность геометрии ударного фронта: он должен постоянно поддерживать сглаженные очертания и не испытывать резких изменений в размерах. Численное моделирование на основе идеальной магнитной гидродинамики показало, что стабилизация фронта возможна при определенной, довольно редкой комбинации параметров пульсара, пульсарного ветра, и внешней среды. Среда и пульсар должны двигаться относительно друг друга со слабо-сверхзвуковой скоростью, ветер пульсара должен быть слабозамагниченным, а сам пульсар должен иметь большой угол наклонения магнитной оси к оси вращения. Именно необходимость в слабосверхзвуковом относительном движении пульсара и среды делает такую комбинацию параметров редкой. При ней компактная туманность формирует особую структуру МГД потоков, благодаря которой рентгеновская морфология туманности приобретает черты двухторовой; к примеру такой, как на рентгеновском изображении Вели на рис. 1, f.

Структура МГД потоков хорошо видна на картах магнитного поля на полоидальном срезе двухторовой модельной туманности (рис. 1). На рис. 1, a показана упрощенная двухторовая МГД модель [2], а на рис. 1, b — реалистичная [3,4]. В упрощенной модели туманность покоятся относительно внешней среды, и стабильность ее ударной волны торможения приходится поддерживать искусственно. Искусственность состоит в применении грубой численной сетки на начальном этапе раздувания модельной туманности. Грубая сетка подавляет развитие мелкомасштабной турбулентности, не давая ей дестабилизировать ударный фронт. Упрощенная модель полезна тем, что выявляет базовую картину течений в двухторовых объектах. Знание этой картины необходимо для ин-

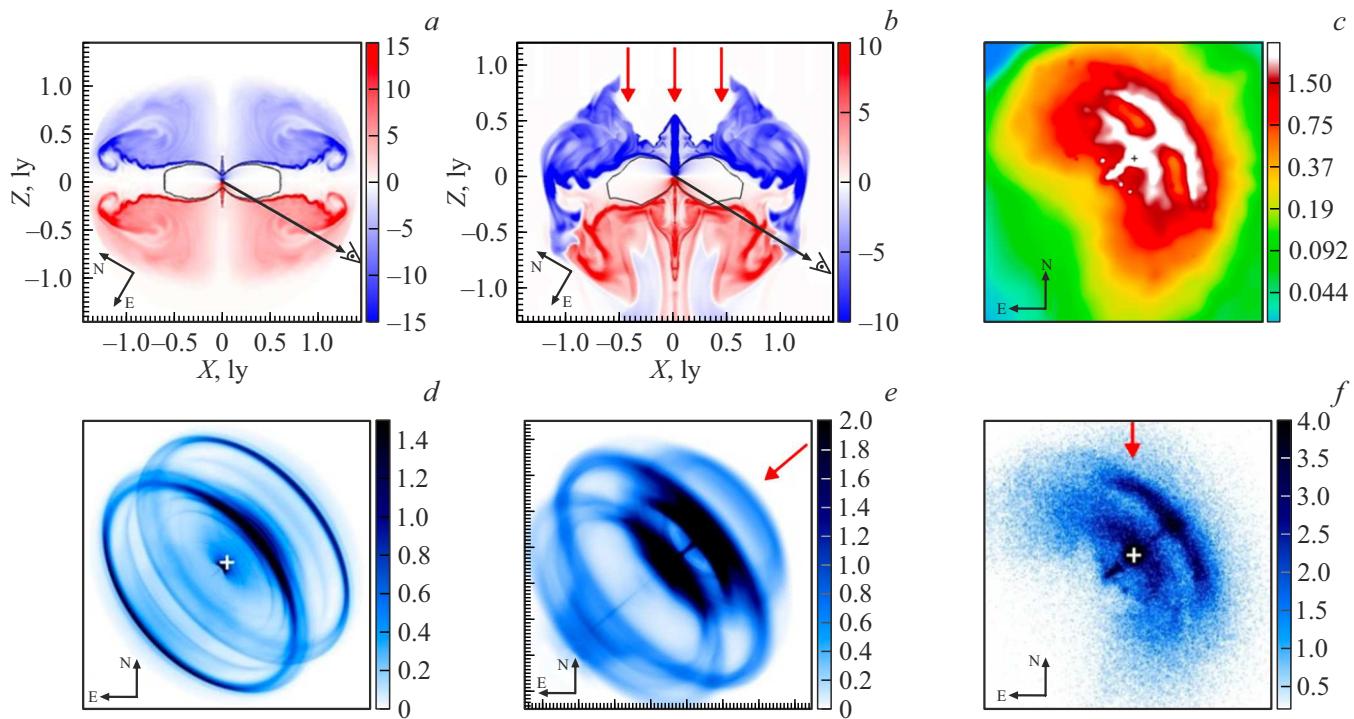


Рис. 1. *a, b* — карты тороидального магнитного поля (в единицах μG , или 0.1 нТ) упрощенной и реалистичной МГД моделей компактной двухторовой туманности, представленной в полоидальном разрезе. Пульсар расположен по центру. По осям отложено расстояние в световых годах (ly). Два цвета отвечают разной полярности МГД потоков, а их интенсивность — напряженности магнитного поля. Пределы цветовой шкалы выбраны так, чтобы подчеркнуть структуру МГД потоков туманности. Черный контур показывает положение фронта ударной волны торможения ветра. Красными стрелками показан слабосверхзвуковой поток внешней среды, натекающий на туманность вдоль ее полярной оси (направление которой задается осью вращения пульсара, и на рисунке вертикально). Черная стрелка совпадает с лучом зрения земного наблюдателя на пульсар Вельы. Стрелками *N* и *E* (north and east) показан наклон полярной оси Вельы к направлению на Галактический север. *d, e* — синтетические карты синхротронного излучения модельных туманностей (*a* и *b*) в рентгене. На этих картах модели показаны в той же проекции на небесную плоскость, в которой Вела видна с Земли. Крестик отмечает положение пульсара. Цветом показана интенсивность излучения модельных туманностей. Цветовая шкала (в произвольных единицах) — инверсная: чем глубже цвет, тем ярче излучение. *c* — рентгеновское изображение Вельы, полученное телескопом Chandra. *f* — адаптивно-сглаженное рентгеновское изображение Вельы. Цветовая шкала (в произвольных единицах) подчеркивает расщепление крыльев двух ярких арок Вельы (арки выделены белым цветом).

терпретации наблюдений реальных туманностей, у которых структура потоков может слегка видоизменяться из-за движения туманности относительно внешней среды. Пример подобного видоизменения дает реалистичная модель на рис. 1, *b*. В этой модели компактная туманность находится в слабо-сверхзвуковом потоке внешней среды. Этот умеренно-сильный поток мешает туманности аккумулировать магнитную турбулентность. В этом ему помогает особое свойство двухторовых моделей: турбулентность основного масштаба возбуждается в них на внешней границе. Оттуда внешний поток способен вытягивать крупные энергосодержащие турбулентные вихри, не давая им каскадировать в объеме компактной туманности.

Согласно магнитным картам на рис. 1, модельные туманности включают в себя ударную волну торможения ветра, два узких сильнозамагниченных течения на средних широтах, и широкое слабозамагниченное течение на экваторе. Последнее входит в туманность в

пересжатом и недорасширенном состоянии относительно смежных с ним сильнозамагниченных разнополярных течений на средних широтах туманности. Повышенное давление на экваторе не дает этим течениям (из разных полусфер) [5] встретиться и перемешаться сразу же за фронтом ударной волны торможения. Поэтому эти узкие течения остаются квазиламинарными, релятивистскими и сильнозамагниченными на всем своем протяжении. При подходе к границе раздела между компактной туманностью и внешней средой сильнозамагниченные истечения замедляются, и каждое из них расщепляется надвое. Снизу от магнитных карт показаны карты рентгеновского синхротронного излучения упрощенной и реалистичной моделей (рис. 1, *d, e*). На них модельные туманности представлены в той же проекции на небесную сферу, в которой туманность Вела видна наблюдателю с Земли. В этой проекции наиболее яркой рентгеновской деталью моделей являются два соосных тора, расположенные один над другим. Ближние к наблюдателю

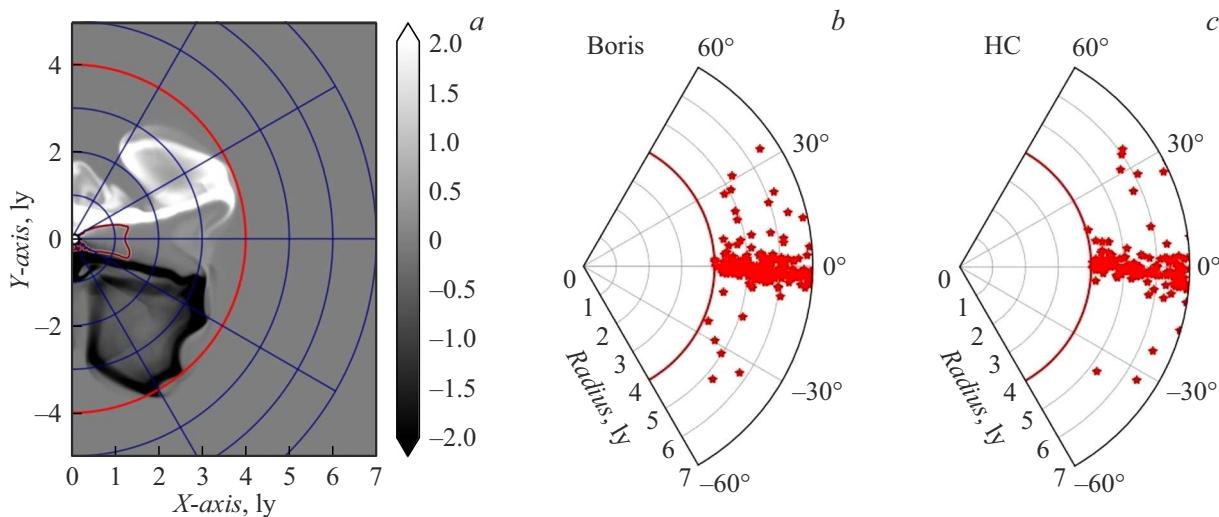


Рис. 2. *a* — карта магнитного поля (в μG , или в 0.1nT) реалистичной модели двухторовой туманности (показана половина полоидального среза осесимметричной модели). На карте помечены: белой точкой — положение пульсара, бордовым контуром — положение ударной волны торможения пульсарного ветра, черным и белым цветами — МГД потоки разной магнитной полярности, а красной линией на полярной сетке координат — область вброса тестовых e^- . Диапазон черно-белой шкалы отражает структуру потоков, а не диапазон их полей. *b, c* — рассчитанные методами Бориса и Хигуера-Кэри [12] угловые распределения тестовых e^- с Лоренц-факторами $\gamma \gtrsim 7 \cdot 10^8$ спустя 25 лет после вброса.

половинки этих торов уярчены из-за эффекта Доплера и видны как две параллельные арки. Этим аркам подлежат два вышеупомянутых сильнозамагнченных истечения (вернее, те их участки, где плазма движется с релятивистской скоростью в сторону наблюдателя).

В настоящей работе показано, что повторная обработка архивных данных рентгеновской обсерватории Чандра позволила выявить новую, ранее неизвестную рентгеновскую деталь Велы — расщепление ярких арок у внешней границы компактной туманности. Это расщепление предсказывается реалистичной МГД моделью двухторовых туманностей, но не упоминается в работах наблюдателей Велы [6–8]. На рис. 1, *c* приведено аддитивно сглаженное изображение Велы, где видно, что крылья ярких арок действительно расщепляются. Аддитивное сглаживание позволяет выявить подобное расщепление во всех 11-ти наблюдениях Велы Чандрай в 2009–2010 гг. (ObsID 10132–10139 и 12073–12075). Расщепление может наблюдаться не во всех крыльях одновременно, что неудивительно, так как потоки Велы динамичны и могут менять свою ориентацию относительно наблюдателя [6,8].

2. Слабое диффузное рентгеновское излучение Велы

Согласно Чандре, двойной тор Велы окружен слабым диффузным рентгеновским излучением [8]. Его морфология коррелирует с морфологией радиоизлучения Велы [8]. На радиокартах Велы видны два ярких асимметричных радиолепестка, раскинутые симметрич-

но относительно оси симметрии двойного тора [9]. Радиолепестки — это, вероятно, уярченные части толстого радиотора, окружающего двойной рентгеновский тор [9]. У нетепловых „рентгеновских“ e^\pm , синхротронное излучение которых в магнитных полях туманностей ($10 - 300 \mu\text{G}$ или $1 - 30 \text{nT}$) попадает в рентгеновский диапазон Чандры ($0.5 - 8 \text{ keV}$), энергия достигает десятков и сотен тераэлектронвольт (TeV), а Лоренц-факторы (γ) — $10^8 - 10^9$. Место и механизм ускорения столь энергичных e^\pm пока что неизвестны [1]. Одна из целей настоящей работы — показать, что реалистичная МГД модель двухторовых рентгеновских туманностей (рис. 1) указывает на их способность ускорять заряженные e^\pm до $\gamma \gtrsim 7 \cdot 10^8$. Напомним, что в двухторовых моделях МГД потоки туманности квазиламинарны, а магнитное поле тороидально и регулярно. На основе данных рентгеновского поляриметра IXPE Кси и др. (2022) подтвердили наличие этих свойств у Велы. В квазиламинарных потоках e^\pm могут ускоряться в сдвиговых течениях. Именно это мы наблюдали в нашей модельной двухторовой туманности, когда вбросили в нее тестовые нетепловые частицы (e^-) и проследили за их эволюцией в пространстве и по энергиям.

Динамика МГД потоков тепловой плазмы туманности моделировалась при помощи „RMHD“ модуля открытого численного кода PLUTO [10], основанного на системе уравнений идеальной релятивистской МГД. Динамика нетепловых тестовых e^- в МГД потоках отслеживалась с использованием алгоритма Бориса, встроенного в модуль „Cosmic Rays“ того же кода [11]. Одновременное моделирование динамики МГД потоков и тестовых e^- очень ресурсоемко, поэтому на начальном

этапе исследований мы применили упрощенный подход. Перед тем как вбросить тестовые частицы в модельную туманность, мы вывели ее на стадию автомодельного расширения, а затем „заморозили“ всю картину ее МГД потоков. С точки зрения тестовых частиц, эта картина стала выглядеть стационарной (т. е. магнитное поле, давление, и скорость фоновой плазмы в каждой точке модельной туманности не менялись в ходе всего процесса ускорения частиц). Подобное упрощение было бы неразумным в отношении одноторовых туманностей с их турбулентными МГД потоками, в которых e^- , скорее всего, ускоряются при рассеянии на случайных магнитных неоднородностях. Однако в отношении двухторовых туманностей с их квазиламинарными сдвиговыми МГД потоками и регулярными полями такое приближение вполне допустимо. В ходе моделирования популяция из 3.5 млн. частиц-электронов с $\gamma = 10^7$ была вброшена однократно, однородно и изотропно в полностью раздувшуюся туманность с „замороженной“ структурой МГД потоков. Рис. 2 показывает результат моделирования — угловое распределение тестовых e^- , которые смогли ускориться в МГД потоках туманности до $\gamma \gtrsim 7 \cdot 10^8$ (до $E \gtrsim 350$ TeV). В предполагаемых магнитных полях радиотора ($0.5 - 5 \mu\text{G}$, или $0.05 - 0.5 \text{nT}$) синхротронное излучение таких e^- попадает в диапазон чувствительности Чандры. Их угловое распределение сильно анизотропно — они вылетают за пределы компактной туманности преимущественно вдоль плоскости ее экватора (рис. 2). Сходное распределение формируют и тестовые радиоэлектроны, вброшенные в модельную туманность. Это указывает, что причиной схожести пространственных распределений диффузного рентгеновского и радиоизлучений Велы может быть схожесть угловых распределений нетепловых радио- и рентгеновских (с $E \gtrsim 350$ TeV) частиц, покидающих компактную туманность.

Финансирование работы

Моделирование ускорения частиц выполнено А.Н. Фурсовым при поддержке гранта РНФ 25-72-20007, анализ наблюдательных и численных данных сделан К.П. Левенфиш в рамках базового проекта ФТИ им. Иоффе 2024-0002.

Благодарности

Обработка данных телескопа Чандра сделана Г.А. Пономаревым. Авторы благодарны А.М. Быкову за консультации по механизмам ускорения частиц, и организаторам конференции Физика. А-СПб 2025.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Amato arXiv e-prints, arXiv:2001.04442. (2020). DOI: 10.48550/arXiv.2001.04442
- [2] G.A. Ponomaryov, K.P. Levenfish, A.E. Petrov. J. Physics: Conf. Ser., **1400**, 022027 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/2/022027
- [3] G.A. Ponomaryov, K.P. Levenfish, A.E. Petrov, Y.A. Kropotina. J. Physics: Conf. Ser., **1697**, 012022 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012022
- [4] G.A. Ponomaryov, A.N. Fursov, S.S. Fateeva, K.P. Levenfish, A.E. Petrov, A.M. Krassilchchikov. Astronomy Lett., **49**, 65 (2023). DOI: 10.1134/S1063773723020032
- [5] A. Petrov, K. Levenfish, G. Ponomaryov. Astronomy Lett., **49**, 12 (2023). DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023AstL...49..777P; doi:10.1134/S106377372312006X
- [6] G.G. Pavlov, O.Y. Kargaltsev, D. Sanwal, G.P. Garmire. Astrophys. J., **554**, L189 (2001). DOI: 10.1086/321721
- [7] D.J. Helfand, E.V. Gotthelf, J.P. Halpern. Astrophys. J., **556**, 380 (2001). DOI: 10.1086/321533
- [8] O. Kargaltsev, B. Cerutti, Y. Lyubarsky, E. Striani. Space Sci. Rev., **191**, 391 (2015). DOI: 10.1007/s11214-015-0171-x
- [9] R.A. Chevalier, S.P. Reynolds. Astrophys. J., **740**, L26 (2011). DOI: 10.1088/2041-8205/740/1/L26
- [10] A. Mignone, G. Bodo, S. Massaglia, T. Matsakos, O. Tesileanu, C. Zanni, A. Ferrari. Astrophys. J., **170**, 228 (2007). DOI: 10.1086/513316
- [11] A. Mignone, G. Bodo, B. Vaidya, G. Mattia. ApJ., **859**, 13 (2018). DOI: 10.3847/1538-4357/aabcccd
- [12] B. Ripperda, F. Bacchini, J. Teunissen, C. Xia, O. Porth, L. Sironi, G. Lapenta, R. Keppens. ApJS, **235**, 21 (2018). DOI: 10.3847/1538-4365/aab114

Приложение 1. Параметры МГД моделей двухторовой пульсарной туманности

В качестве параметров МГД моделей туманностей выбирают наклонение пульсара — α , начальную замагниченность пульсарного ветра — σ_0 , число Маха натекающей среды — M и плотность окружающей среды — ρ_{amb} . В реалистичной модели на рис. 1: $\alpha = 80^\circ$; $\sigma_0 = 0.1$; $\rho_{amb} = 10^{-28} \text{ g/cm}^3$; $M = 2.3$. В модели на рис. 2 $\alpha = 80^\circ$; $\sigma_0 = 0.1$; $\rho_{amb} = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$; $M = 1.3$. Принятая в расчетах модель пульсарного ветра описана в работе [4]; мощность ветра нормирована на мощность потерь вращательной энергии пульсара Вела ($6.9 \cdot 10^{36} \text{ erg/s}$).

Приложение 2. Описание параметров аддитивного сглаживания

Аддитивно сглаженные изображения были получены с помощью алгоритма „csmooth“, встроенного в программное обеспечение „CIAO“ рентгеновского телескопа Чандра. Параметры „csmooth“: метод — FFT (Fast Fourier Transformation); тип ядра — гауссовское; $(S/N)_{min} = 3$, $(S/N)_{max} = 5$; минимальный размер ядра — размер пикселя детектора ACIS, максимальный — размер всего изображения; начальный шаг увеличения размера ядра 0.01 пикселя ACIS.