

УДК 524.354

РЕНТГЕНОВСКАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЯ МАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ

© 2019 г. А. М. Быков¹, *, Ю. А. Уваров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: byk@astro.ioffe.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Молодые остатки сверхновых (ОСН) являются эффективными ускорителями заряженных частиц. Процесс ускорения сопровождается усилением турбулентного магнитного поля. Структура синхротронных карт интенсивности и поляризации ОСН чувствительна к особенностям этого поля, особенно в рентгеновском диапазоне. В работе выполнено численное моделирование синхротронных изображений ОСН для различных моделей магнитной турбулентности. Обсуждаются возможности рентгеновского поляриметра нового поколения IXPE для изучения магнитной турбулентности в ОСН.

DOI: 10.1134/S036767651908012X

ВВЕДЕНИЕ

Ударные волны (УВ), формирующиеся при сверхзвуковом расширении оболочки ОСН в межзвездную среду, эффективно ускоряют заряженные частицы диффузионным механизмом [1], в результате чего в окрестности УВ формируется протяженный степенной спектр нетепловых частиц. Электроны также эффективно ускоряются этим механизмом до энергий в десятки и сотни ТэВ. Ускоренные электроны являются источниками синхротронного излучения, нетепловой спектр которого тянется вплоть до энергий порядка кэВ [2].

Рентгеновские изображения с высоким разрешением различных ОСН показывают, что на рентгеновских картах присутствует заметная мелкомасштабная структура. Она сформирована в форме нитей, сгустков и точечных образований. Нитевидная структура может быть объяснена геометрическим эффектом проекции с учетом того, что самые энергичные частицы сосредоточены в тонкой области вблизи фронта УВ из-за сильных синхротронных потерь [3, 4], или с учетом того, что ширина области излучения ограничивается быстрым распадом поля [5]. Структуру в виде сгустков можно естественным образом объяснить турбулентной природой магнитного поля вблизи ударного фронта. Авторы работ [6, 7] моделировали рентгеновские изображения молодых ОСН с учетом эффектов от стохастического турбулентного магнитного поля и воспроизвели подобную структуру. Оказалось, что синхротронные рентгеновские карты интенсивности и поляризации излучения ОСН чувствительны к спектру магнит-

ной турбулентности. В работах [6, 7] предполагалась изотропная магнитная турбулентность. В работе [8] авторы исследовали влияние на изображения ОСН анизотропной турбулентности, естественным образом образующейся из изотропной турбулентности при сжатии магнитного поля на фронте УВ. Было показано, что в данном случае степень поляризации может быть выше, чем в случае изотропной турбулентности, и эту поляризацию можно будет наблюдать с помощью нового поколения рентгеновских поляриметров, таких как XIPE [9] или IXPE [10].

В данной работе для построения карт интенсивности, поляризации и значимости детектируемого излучения используется пакет XIMPOL, предназначенный для моделирования рентгеновских поляризационных наблюдений. При моделировании используются общедоступные функции отклика детектора XIPE [9]. Характеристики детекторов IXPE [10] и XIPE схожи, основное отличие состоит в примерно в 2 раза меньшей эффективной площади зеркальной системы IXPE. Таким образом, полученные для одного детектора результаты моделирования легко могут быть пересчитаны для другого.

МОДЕЛЬ

Геометрия используемой нами модели показана на рис. 1а, на котором изображена часть ОСН вместе с прямоугольным боксом, в котором задавалось турбулентное магнитное поле и рассчитывалось синхротронное излучение. Для большей наглядности на рисунке изображена только половина

моделируемой области, ближайшая к наблюдателю. Параметры Стокса излучения нетепловых электронов из области моделирования рассчитываются с помощью формул синхротронного излучения [11]. Двумерная карта, схематически показанная на рисунке 1б, получается после интегрирования интенсивности по лучу зрения. Для моделирования использовались параметры ОСН Тихо, обладающего развитой мелкомасштабной структурой. Радиус остатка принимался равным 3 пк, расстояние до него 2.5 кпк, что соответствует угловому радиусу 4 мин дуги.

Магнитное поле моделировалось в прямоугольной области размером $(16 \times 8 \times 4) \cdot 10^{18}$ см путем суммирования большого числа гармоник со случайными волновым вектором и фазой. Подробно метод описан в [12, 6, 7] для изотропной магнитной турбулентности и в [8] для аксиально-симметричной магнитной турбулентности, удовлетворяющей условию $\langle B_{\perp}^2 \rangle = q \langle B_{\parallel}^2 \rangle = \langle B^2 \rangle q / (q + 1)$. Для изотропной турбулентности $q = 2$. В случае анизотропной турбулентности, образующейся в оттекающем потоке при сжатии на фронте УВ магнитного поля изначально изотропной турбулентности, $q > 2$. Характерные минимальные и максимальные масштабы турбулентности, используемые в моделировании, принимались равными $L_{min} \sim 2.5 \cdot 10^{15}$ см и $L_{max} \sim 1.2 \cdot 10^{18}$ см. В расчетах предполагалось турбулентное магнитное поле со средним квадратом, равным $\langle B^2 \rangle = 5.5 \cdot 10^{-5}$ Гс и различной степенью анизотропии q , а также различными спектрами мощности $W(k) \propto k^{-\delta}$. Функция распределения электронов рассчитывалась в рамках одномерной кинетической модели с учетом синхротронных потерь [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование показало, что карты интенсивности и поляризации синхротронного рентгеновского излучения ОСН, полученные с учетом магнитной турбулентности, имеют выраженную мелкомасштабную структуру, состоящую из сгусткообразных, точечных и нитевидных особенностей, которая чувствительна к диапазону энергии карты, к показателю спектра мощности δ и к степени анизотропии магнитной турбулентности q . Карта степени поляризации содержит дополнительную информацию о мелкомасштабной структуре. Важно, что в случае сильной аксиально-симметричной магнитной турбулентности при направлении луча зрения, существенно отличном от оси симметрии, степень поляризации излучения оказывается высокой и приближается к предельному значению степени поляризации синхротронного излучения в однородном магнитном поле. Высокая степень поляризации при этом сохраняется и на изображениях с угловым

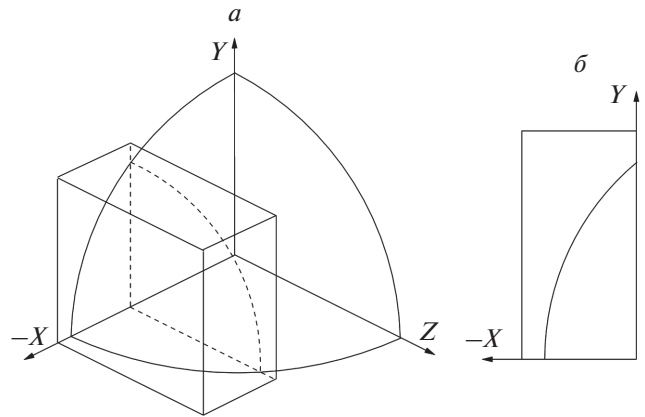


Рис. 1. а – Область оболочки ОСН, от которой моделировалось излучение: показаны часть оболочки ОСН и прямоугольный бокс, в котором задавалось турбулентное магнитное поле и рассчитывалось синхротронное излучение. Для большей наглядности на картинке изображена только половина моделированной области, ближайшая к наблюдателю. Направление на наблюдателя вдоль оси Oz . б – Схематически показана карта излучения от рассматриваемой области, построенная с учетом эффекта проекции после интегрирования по лучу зрения.

разрешением 20–30 угловых секунд, которое ожидается от нового поколения рентгеновских поляриметров.

На рис. 2 приведены карты интенсивности в зарегистрированных фотонах (ϵ , e), степени поляризации (a , ϵ) и значимости (δ , d), построенные на основе проведенного нами моделирования с помощью пакета XIMPOL для случаев изотропной турбулентности (a , δ , e) и анизотропной турбулентности (ϵ , d , e) при $q = 5$. Показатель спектра мощности в обоих случаях предполагался равным $\delta = 5/3$. Пакет XIMPOL позволяет на основе модели излучения источника строить его изображения с учетом эффектов статистики и реальных функций отклика детектора. Для данного моделирования использовались функции отклика XIRE и предполагалась экспозиция 1 Мс. С учетом различия эффективной площади зеркал XIRE и IXPE для детектора IXPE полученные величины значимости следует ожидать при времени экспозиции 2 Мс. Полученные результаты показывают, что рентгеновское поляризованное излучение от ОСН может быть зарегистрировано новым поколением рентгеновских поляриметров для определенных конфигураций турбулентного магнитного поля. Тем самым, рентгеновские поляриметрические наблюдения могут дать важную информацию о структуре и эволюции турбулентного магнитного поля в остатках сверхновых.

Исследование поддержано грантом РФФ № 16-12-10225. Большинство расчетов выполнено на компьютерах МСЦ РАН и Санкт-Петербургского отделения МСЦ РАН.

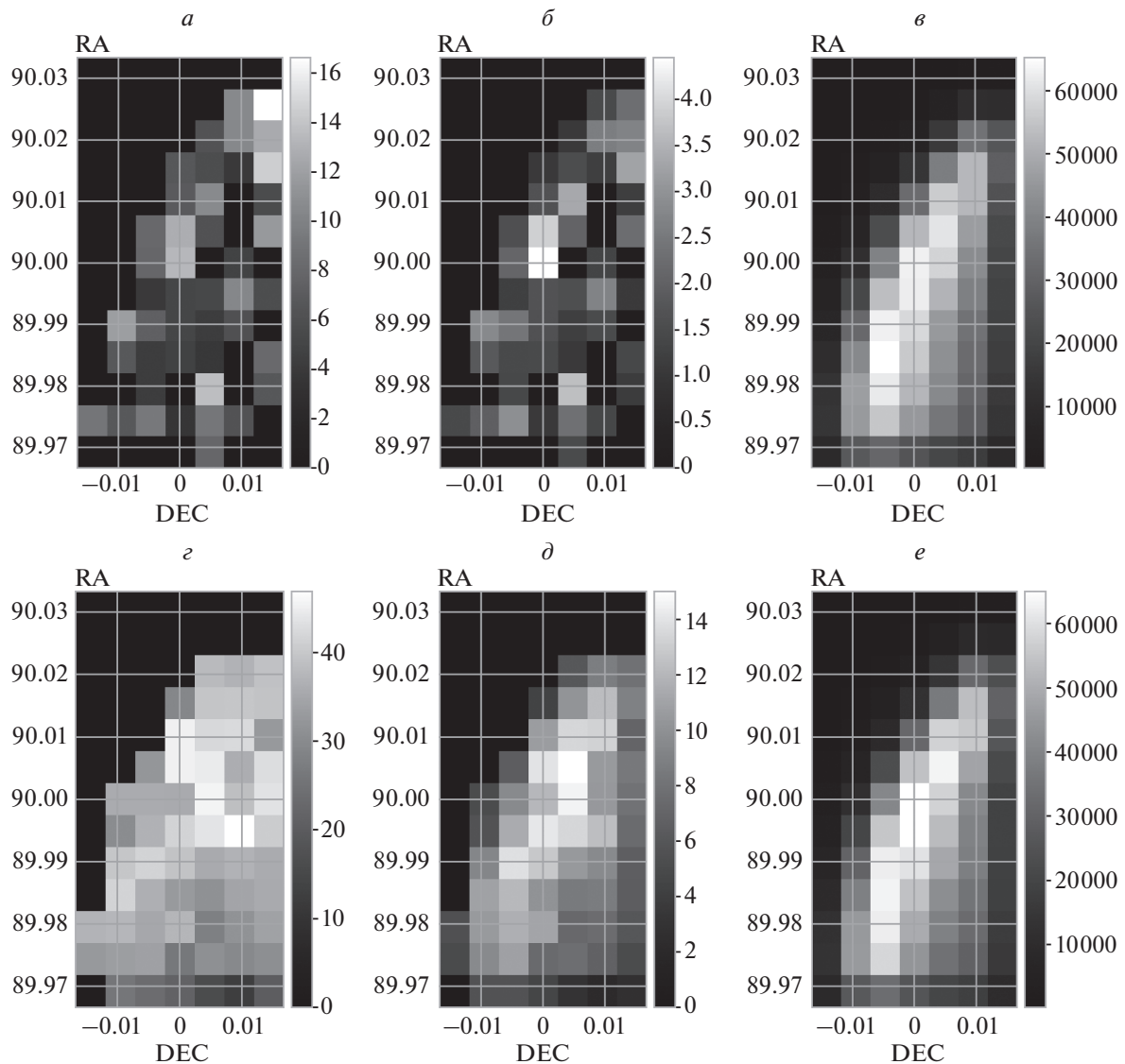


Рис. 2. *a, б, в* – Модельные карты степени поляризации, ее значимости и полной интенсивности в зарегистрированных фотонах в случае изотропной турбулентности; *г, д, е* – аналогичные карты в случае анизотропной турбулентности при $q = 5$. В обоих случаях предполагался колмогоровский спектр мощности турбулентности с показателем $\delta = 5/3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крымский Г.Ф.* // ДАН СССР. 1977. Т. 234. С. 1306; *Krymskii G.F.* // Sov. Phys. Dokl. 1977. V. 22. P. 327.
2. *Reynolds S.P., Chevalier R.A.* // Astrophys. J. 1981. V. 245. P. 912.
3. *Vink J., Laming J.M.* // Astrophys. J. 2003. V. 584. P. 758.
4. *Bamba A., Yamazaki R., Yoshida T. et al.* // Astrophys. J. 2005. V. 621 P. 793.
5. *Pohl M., Yan H., Lazarian A.* // Astrophys. J. 2005. V. 626. P. L101.
6. *Bykov A.M., Uvarov Y.A., Ellison D.C.* // Astrophys. J. 2008. V. 689. P. L133.
7. *Bykov A.M., Uvarov Y.A., Bloemen J.B.G.M. et al.* // MNRAS. 2009. V. 399. P. 1119.
8. *Bykov A.M., Uvarov Y.A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 932. № 1. Art. № 012051.
9. *Fabiani S., Costa E., Del Monte E. et al.* // Astrophys. J. 2014. V. 212. P. 25.
10. *Weisskopf M.C., Ramsey B., O'Dell S. et al.* // Proc. SPIE. 2016. V. 9905. Art. № 990517.
11. *Ginzburg V.L., Syrovatskii S.I.* // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1965. V. 3. P. 297.
12. *Giagalone J., Jokipii J.R.* // Astrophys. J. 1999. V. 520. P. 204.
13. *Быков А.М., Уваров Ю.А.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 3. С. 846.
14. *Bykov A.M., Chevalier R.A., Ellison D.C. et al.* // Astrophys. J. 2000. V. 538. P. 203.