

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СТАТИСТИКА МЯГКИХ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ГАММА(МПП)-ВСПЛЕСКОВ

В. Н. Кондратьев^{1,2,*}, *Ю. В. Коровина*³

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Киев

³ Московский институт открытого образования, Москва

Мягкие повторяющиеся гамма(МПП)-всплески рассмотрены как результат выхода магнитной энергии, запасенной в барионных степенях свободы коры магнитаров. Показано, что такая интерпретация МПП-активности позволяет систематизировать все наблюдения подобных всплесков, извлечь и объяснить универсальные статистические свойства.

Soft gamma-ray repeating (SGR) bursts are considered as a release of magnetic energy stored in the baryon degrees of freedom of magnetar crust. It is shown that such an interpretation allows one to systemize all the observations of such bursts, reveal and explain the universal statistical properties.

PACS: 07.85.-m; 26.30.+k; 95.85.Pw; 98.58.M

ВВЕДЕНИЕ

Одно из первых наблюдений источников мягких повторяющихся гамма-всплесков (МПП или soft-gamma repeaters, SGR) связано с открытием 5 марта 1979 г. суперинтенсивного выброса гамма-лучей (гигантская вспышка) от SGR 0526-66 [1]. Достоверная интерпретация такой активности достигнута в модели ультрамагнитных компактных астрофизических объектов (магнитаров) (см. [2]). Продолжительный мониторинг подобных астрономических явлений в значительной степени подтверждает реалистичность концепции магнитаров. Например, МПП-всплески переживают активную фазу квазипериодически, с интервалом в несколько лет, и излучают десятки гамма-всплесков продолжительностью 0,1 с и интенсивностью 10^{38} – 10^{42} эрг, значительно превышающей предел Эдингтона (см., например, [2] и ссылки в ней). Наблюдаемые свойства мягких гамма-всплесков указывают [2–6] на значительный вклад

*E-mail: vkondrat@i.ua

высших мультипольностей и тороидального магнитного поля, существенно сильнее соответствующих дипольных компонент $H_{\text{дип}} \approx 10^{15}$ Гс, определенных по замедлению периода вращения пульсаров. Существенное превышение напряженности поля по сравнению с типичными величинами для большинства пульсаров 10^{12} Гс, т. е. терагаусс (ТГс), подтверждается недавними теоретическими исследованиями [3–6], указывающими на возможность появления ультранамагниченной астрофизической плазмы, возникающей, например, в результате динамо-процессов и/или магниторотационной неустойчивости при взрывах сверхновых (СН). Такие поля играют существенную роль в развитии ударной волны в звезде [4–6]. Предполагая заметный вклад компоненты магнитного давления в энергию ударной волны E_S , для напряженности поля H получаем

$$\langle H^2 \rangle R^2 \Delta R \sim 2E_S, \quad (1)$$

где $\langle \ \rangle$ обозначает усреднение по области фронта волны ΔR на расстоянии R от центра взрыва. Усредненная сила поля $\langle H \rangle \approx 14$ ТТл ($10 \text{ км}/R$) $\{(\text{км}/\Delta R)(E_S/10^{51} \text{ эрг})\}^{1/2}$. Учитывая, что 1% от полной энергии, выделяемой в событии СН типа II, вносит вклад в развитие ударной волны, и полагая $R \sim 40$ км, а $\Delta R \sim 1$ км, находим $H \sim 10^{17}$ Гс = 10 ТТл. Таким образом, магнитные поля с напряженностью в десятки тератесла (ТТл) представляют важную особенность такого яркого астрономического явления. Для случайного распределения зерен магниторотационной неустойчивости (см. [6]) в области фронта ударной волны при толщине коры НЗ $\Delta R_{\text{кора}} \sim 0,1$ км можно ожидать появление магнитаров в 10% остатков СН типа II. Заметим, что полученная величина напряженности поля согласуется с оценкой [7], если исходить из предположения заметного вклада магнитного давления в баланс сил для коры нейтронной звезды (НЗ).

Такие поля (т. е. превышающие 10^{15} Гс) могут изменять структуру и свойства атомных ядер (см. [3–7] и ссылки там), что приводит к необходимости рассмотрения возможного влияния магнетизма на структуру, преобразования и трансмутацию нуклидов. В настоящей работе рассмотрены особенности формирования магнитного отклика и магнитодинамики коры НЗ с применением термодинамического формализма в приближении метода среднего самосогласованного поля. Учет квантования пространственного движения приводит к значительным изменениям магнитной восприимчивости, вызывая скачкообразные разрывы в зависимости магнитных моментов ядер от напряженности поля. Такое ступенчатое поведение магнитного отклика в совокупности с ферромагнитным межъядерным взаимодействием вызывает резкое аномальное изменение намагниченности в коре НЗ. Эти аномалии, обусловленные распространением лавин перескоков ядерных моментов при изменении магнитной индукции, вызывают резкие выбросы энергии в магнитосферу и приводят к взрывной активности МПГ-всплесков. Для описания таких шумов

в магнитодинамике коры магнитаров развита модель беспорядочно перескакивающих взаимодействующих моментов (БПВМ), включающая квантовые флуктуации дискретных уровней, межъядерное взаимодействие, беспорядок и энергию размагничивания [2, 8]. В разд. 1 описаны основные положения модели БПВМ применительно к коре НЗ. Систематика наблюдений МПГ с использованием БПВМ представлена в разд. 2. Выводы — в заключении.

1. МАГНИТОДИНАМИКА КОРЫ МАГНИТАРОВ

Модель беспорядочно перескакивающих взаимодействующих моментов (БПВМ) для численных моделирований магнитодинамики в коре НЗ уже описывалась в [2, 8] и цитированной там литературе. Напомним, что при моделировании динамики размагничивания рядов атомных ядер для магнитного момента ядер используем очень общую формулу $m = \mu \sum_n \nu_n \theta(b - b_n) = \mu I g$ с нуклонным магнетонном μ для ядерной материи, спином I и g -фактором g ядер решетки и ступенчатой функции $\theta(b)$, зависящей от локального магнитного поля b . Здесь величина ν_n представляет амплитуду ступенеобразного изменения спина ядра I для пересечения уровней при поле b_n . Расположенные в узлах плотно упакованной решетки с периодом 15–20 фм атомные ядра дают вклад в намагничивание $M = m/V_{\text{occ}}$, определяемое также объемом V_{occ} на одно ядро. Принимая $g = 3$, т. е. g -фактор нуклона, для ядерной компоненты магнитной индукции получаем

$$M \approx 1,5 \text{ ТГц } In / (10^{13} \text{ г/см}^3), \quad (2)$$

где плотность коры НЗ n . Для случая сопоставимых размеров ядра V_N и занятого объема V_{occ} (или $n \sim 10^{12,5} \text{ г/см}^3$) межъядерное взаимодействие в системе проявляет обычно ферромагнитные свойства [2, 8]. С учетом магнитной связи силы J между ближайшими соседними (nn) элементами полный гамильтониан H ряда атомных ядер в поле H может быть выражен следующим образом: $H = - \sum_i b_i m_i$, через взаимодействие магнитного момента m_i ядра с локальным полем

$$b_i = H(t) + J \sum_{j=nn} m_j + h_i. \quad (3)$$

Здесь сумма пробегает nn -элементы и случайные поля h_i позволяют учесть неоднородность и беспорядок в форме дефектов, границ зерен, примесей, ведущих к случайной кристаллической анизотропии и меняющимся силам взаимодействия в суперкристаллической гетероструктуре. Укажем также на динамические компоненты h_i из-за неточности приближенного описания с nn -взаимодействием. Центральная предельная теорема предлагает, таким образом, гауссово распределение для случайных полей, $W(h) = \exp\{-h^2/R^2\}/R\sqrt{\pi}$, с шириной R , называемой беспорядком [2, 7–9].

2. ЭПОХА МПГ-АКТИВНОСТИ В МОДЕЛИ БПВМ

Рассмотрим адиабатическое изменение во времени внешнего магнитного поля H . Когда локальное поле некоторого домена коры НЗ, т. е. элемента решетки, переходит величину пересечения уровней b_n , момент m изменяется ступенеобразно. Из-за ферромагнитного взаимодействия перескакивающий момент может *вызвать* перескок у некоторых из ближайших соседей, которые, в свою очередь, могут включить скачок момента некоторых из их соседей и так далее, производя, таким образом, лавины размагничивания. Такие лавины приводят к разрывам на соответствующих кривых петли гистерезиса. При этом резкое изменение магнитной индукции приводит к *скачку* давления P :

$$\Delta P = H \Delta M \approx 10^{23} \text{ атм} (H/\text{ТТл}) (\Delta I n / 10^{13} \text{ г/см}^3) \quad (4)$$

(здесь учтено уравнение (2)) и, соответственно, к эмиссии магнитной энергии (процесс, аналогичный эффекту Баркхаузена, см. [2, 8] и ссылки там). Выделенная магнитная энергия определяется объемом лавины $V_l \sim S$, где S обозначает число перескочивших спин-домен. Для напряженности поля $H \sim 3$ ТТл, типичной для коры магнитаров, плотности $n \sim 10^{12,5}$ г/см³ и линейного размера лавины порядка толщины внешней коры НЗ 100 м, т. е. $V_l \sim 10^6$ м³, полученная величина энергии $E \approx \Delta P V_l \sim 10^{41}$ эрг согласуется с энергией мягких гамма-всплесков, см. выше. В дальнейшем ограничимся случаем единственного скачка в изменении момента ядер, учитывая значительный интервал поля между сингулярными аномалиями в отклике. Для уменьшения статистической ошибки рассмотрим кумулятивные распределения размеров $D(S)$, пропорциональные числу лавин с числом перескочивших элементов системы, превышающих величину S . Кумулятивное распределение размеров лавин для окрестности критической точки сравнивается на рис. 1 с кумулятивным распределением энергии всплесков, т. е. числом всплесков с интенсивностью, превышающей определенное значение. Приведенные данные наблюдений различными миссиями хорошо согласуются с расчетами при учете масштабного фактора высвобожденной энергии (см. формулу (4) и обсуждение там), различной удаленности и изотропных выбросов из источников (см. [2]). Полученная зависимость числа событий достоверно описывается степенным законом с показателем 0,67, соответствующим значению 1,67 для дифференциального распределения. Такое свойство обеспечивает сигнал самоорганизации критичности в статистике всплесков.

Как видно на рис. 2, для различных МПГ распределение приведенного времени ожидания, т. е. времени, деленного на соответствующую величину t_m максимума, отображается универсальной функцией. Данные наблюдений хорошо воспроизводятся моделированием БПВМ и описываются в непосред-

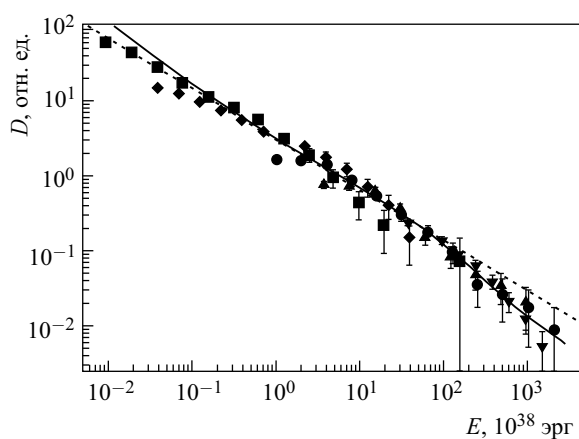


Рис. 1. Нормированные кумулятивные распределения интенсивности МПГ-всплесков в произвольных (относительных) единицах. Результаты наблюдений RXTE и BATSE для SGR 1900+14 из [10] показаны квадратами и кружками соответственно. RXTE (ромбы), BATSE (перевернутые треугольники) и ICE (треугольники) представляют данные для SGR 1806-20 (взяты из [11]). Сплошная линия показывает распределение размеров лавин из БПВМ-модели для кубической решетки размером 150^3 . Пунктирная линия обозначает распределение по степенному закону

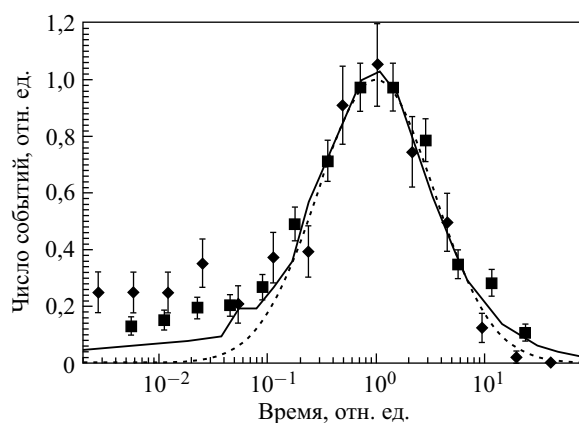


Рис. 2. Распределения приведенного времени ожидания между последовательными МПГ-всплесками. Данные RXTE-PCA для SGR 1900+14 (квадраты) [10] и SGR 1806-20 (ромбы) [11] показаны в сравнении с распределением времени ожидания между лавинами (сплошная кривая). Пунктирная кривая изображает логнормальное распределение (см. текст)

ственной близости от максимума логнормальной функцией распределения

$$LN(t) = \left(\theta(t) / \sqrt{2\pi t \ln(\sigma)} \right) \exp \left\{ -(\ln(t/t_m))^2 / (\ln(\sigma))^2 \right\}$$

с шириной $\sigma \approx 3,6$. Такое свойство указывает на единую шкалу времени для процессов включения МПГ-всплесков. В модели БПВМ такой масштаб времени определяется соотношением параметра беспорядка R и скорости изменения поля. Таким образом, масштабирование с соответствующим временем приводит к универсальной функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мягкие повторяющиеся гамма(МПГ)-всплески рассмотрены как магнитоэмиссия коры магнитаров (ультранамагнитных нейтронных звезд). Показано, что все наблюдения подобных всплесков можно описать и систематизировать в модели беспорядочно перескакивающих взаимодействующих моментов, включающей квантовые флуктуации и межъядерное магнитное взаимодействие в неоднородной среде. Предсказанные моделью БПВМ универсальные свойства нормированных распределений интенсивности и времени ожидания всплесков находятся в хорошем согласии с данными наблюдений МПГ, подтверждая, таким образом, достоверность модели БПВМ. Дальнейшие применения развитого магнитного механизма эмиссии при анализе активности МПГ могут обеспечивать лучшее понимание возникновения и эволюции нейтронных звезд, в частности, напряженности магнитных полей. Тепловые эффекты также могут влиять на структурные, динамические и коллективные свойства ядерной материи [12].

Работа частично поддержана центром научных данных миссии Integral и грантом SCOPES IZ73Z0-152485.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mazets E. P., Golentskii S. V., Ilinskii V. N. et al.* Observations of a Flaring X-Ray Pulsar in Dorado // *Nature (London)*. 1979. V. 282. P. 587–589.
2. *Kondratyev V. N.* Statistics of Magnetic Noise in Neutron Star Crusts // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. 221101; Magnetization of Neutron Star Matter and Implications in Physics of Soft Gamma Repeaters. JAERI Res. Ser. 2001-057. JAERI-Press, Japan, 2002.
3. *Svinkin D. S. et al.* A Search for Giant Flares from Soft Gamma-Ray Repeaters in Nearby Galaxies in the Konus-WIND Short Burst Sample // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015. V. 447. P. 1028–1032.

4. *Кондратьев В. Н.* Магические ультрамагнитные ядра во взрывном нуклеосинтезе // *ЯФ.* 2012. Т. 75. С. 1442–1446 (*Kondratyev V. N.* // *Phys. At. Nucl.* 2012. V. 75. P. 1368–1471); *Nuclear Magics at Explosive Magnetization* // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2016. V. 117. 09007.
5. *Kondratyev V. N.* Explosive Nucleosynthesis at Strong Magnetic Field // *Eur. Phys. J. A.* 2014. V. 50. P. 7–13; *Magic Nuclei at Explosive Dynamo Activity* // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2016. V. 107. 10006.
6. *Кондратьев В. Н., Коровина Ю. В.* Синтез химических элементов в динамо активных сверхновых // *Письма в ЖЭТФ.* 2015. Т. 102. С. 155–158 (*Kondratyev V. N., Korovina Yu. V.* // *JETP Lett.* 2015. V. 102. P. 131).
7. *Kondratyev V. N., Korovina Yu. V.* Statistics of Magnetar Crusts Magnetoemission // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2016. V. 117. 09014.
8. *Kondratyev V. N. et al.* Interdot Exchange Coupling in Superferromagnetism // *Eur. Phys. J. D.* 1999. V. 9. P. 483–485; *Dynamics of Magnetic Nanoparticle Assembly* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010. V. 248. 012027.
9. *Kondratyev V. N.* Multipole Moments of Electronic Vacancies Produced by Fast Particles in Atomic Clusters // *Phys. Lett. A.* 1993. V. 179. P. 209–213; *Strong Valence Electron Excitation due to Internal Conversion or K-Capture* // *Phys. Lett. A.* 1994. V. 190. P. 465–468.
10. *Gogus E. et al.* Statistical Properties of SGR 1900+14 Bursts // *Astrophys. J. Lett.* 1999. V. 526. P. L93–L96.
11. *Gogus E. et al.* Statistical Properties of SGR 1806-20 Bursts // *Astrophys. J. Lett.* 2000. V. 532. P. L121–L124.
12. *Kondratyev V. N., Di Toro M.* Higher Order Long Range Correlations in Nuclear Structure and Dynamics // *Phys. Rev. C.* 1996. V. 53. P. 2176.