

Моделирование пульсарной туманности PSR J0437-4715

как источника космических лучей

А.Е. Петров, А.М. Быков, С.М. Осипов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Аннотация

Представлены результаты моделирования ускорения лептонов космических лучей в туманности ближайшего пульсара PSR J0437-4715 и их распространения в местной межзвездной среде. Результаты моделирования сопоставлены с особенностями наблюдаемых у Земли спектров позитронов и электронов с энергиями до нескольких теравольт.

1. Введение

Эксперименты PAMELA и AMS-02 выявили избыток позитронов космических лучей (КЛ) относительно предсказаний сценария, в котором позитроны являются вторичными частицами, образуемыми в реакциях первичных ядер КЛ с межзвездным веществом (Adriani et al., 2009; Aguilar et al., 2014; Aguilar M. et al, 2019). Избыток может быть обусловлен аннигиляцией или распадом темной материи, либо вкладом близкого источника позитронов – например, пульсара. Поскольку природа темной материи остается загадкой, решение которой имеет фундаментальную важность для понимания физики Вселенной, ответ на вопрос о происхождении "лишних" позитронов является важной задачей.

Вычисление синхротронного излучения от модельного анизотропного распределения частиц позволило получить карты синхротронного излучения, воспроизводящие наблюдаемую структуру туманности в ДУФ и рентгеновском диапазонах, а также нормировать модельный поток уходящий частиц J_s .



3.7 мкГс для приведенных расчетов) и обратные комптоновские потери, вычисленные аналогично Tang and Piran (2019).

4. Результаты моделирования

На Рис. 5 сверху представлен поток позитронов от PSR J0437-4715 вблизи Земли в сравнении с данными AMS-02. Видно, что вклад рассматриваемого пульсара может объяснить весь наблюдаемый поток позитронов в диапазоне от нескольких десятков до ~ 1 ТэВ. При этом полный поток энергии, уносимой ускоренными частицами, составляет менее 15% Е.

PSR J0437-4715 (далее J0437) – ближайший к Земле старый миллисекундный пульсар (расстояние $d \approx 157$ пк), отличающийся чрезвычайной стабильностью вращения и имеющий темп потери вращательной энергии $\dot{E} = 3 \times 10^{33} I_{45}$ эрг с $^{-1}$ (I_{45} – момент инерции нейтронной звезды в единицах $10^{45}\,
m r\,cm^2$). Ј $0437\,
m движется$ со сверхзвуковой скоростью $u_{psr} pprox 104~$ км с $^{-1}$, формируя пульсарную туманность с головной ударной волной (УВ). Излучение окрестностей фронта головной УВ наблюдалось в H_{α} и в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (ДУФ, 1250-2000 Å, 6-10 эВ, см. Рис. 1), в рентгеновском диапазоне видна лишь слабая пульсарная туманность без головной УВ.



Рис. 1: Изображения источника, связанного с пульсаром J0437-4715. Слева: в дальнем УФ (наблюдения с телескопа им. Хаббла). Справа: наблюдения ACIS-S3 обсерватории Chandra. Источник: Rangelov et al. (2016)

Кинетическое моделирование переноса частиц в сходящихся течениях между УВ торможения пульсарного ветра и головной УВ позволяет объяснить наблюдаемое излучение туманности Ј0437 и вычислить поток производимых им ускоренных частиц.

Рис. 3: Сверху: Модельные синхротронные изображения J0437 в дальнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Снизу: модельные спектры лептонов, ускоренных на УВ торможения (TS) и в сходящихся течениях пульсарной туманности с головной УВ (BSPWN) PSR J0437-4715

3. Анизотропная диффузия в межзвездной среде

Распространение позитронов и электронов в радиусе порядка сотни парсек от стационарного источника – пульсара J0437 может быть описано конвекционно-диффузионным уравнением, включающим потери лептонов на излучение

 $\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD_{\perp}\left(p\right)\frac{\partial F}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{\parallel}\left(p\right)\frac{\partial F}{\partial z}\right) + \frac{1}{p^{2}}\frac{\partial}{\partial p}\left(p^{2}b\left(p\right)F\right) = -Q \quad (1)$

где F – функция распределения частиц с концентрацией $n_0 =$



Рис. 5: Сверху: модельный спектр позитронов, рожденных PSR J0437-4715, вблизи Земли, в сравнении с потоком позитронов, детектируемым AMS-02. Снизу: модельный спектр лептонов КЛ с учетом вклада PSR J0437-4715, в сравнении с данными различных экспериментов.

В нижней части Рис. 5 изображен модельный поток лепто-

2. Моделирование методом Монте-Карло

Моделирование с помощью численного кода, основанного на методе Монте-Карло, детально описанного в Bykov et al. (2017), позволяет получить функцию распределения электронов и позитронов пульсарного ветра по импульсам и координатам на трехмерной сетке в объеме источника. В ходе моделирования частицы пульсарного ветра, прошедшие ускорение на ударной волне торможения и имеющие степенное распределение $f(E) \propto E^{-s}$ с $s \sim 2.1 - 2.3$, инжектируются в пульсарную туманность с головной УВ на фронте УВ торможения. Инжектированные частицы диффузно распространяются в модельном источнике с заданными параметрами диффузии, магнитными полями и моделью течений.



 Fd^3p ; p – импульс частицы; r, z – цилиндрические координаты рассматриваемой точки **r**, положение пульсара **r** = 0; D_{\parallel} , *D*₁ – коэффициенты диффузии вдоль и поперек однородного магнитного поля направленного по r = 0; b(p) – скорость радиационных потерь. Точечный источник задается функцией $Q\left(\mathbf{r},p\right) = J_{s}\left(p\right)\delta\left(\mathbf{r}\right).$

Предполагая одинаковую энергетическую зависимость коэффициентов диффузии $g\left(p
ight) = D_{\parallel}/D_{\parallel,0} = D_{\perp}/D_{\perp,0}$, следуя Ginzburg and Syrovatskii (1964), можно получить решение для функции распределения в точке с координатами $r=R_0
ho$, $z=Z_0\zeta$:

$$F(p) = \int_{0}^{+\infty} \frac{d\gamma_0 \cdot p_0^2 J_s(p_0) \Theta\left[\chi\left(\gamma,\gamma_0\right)\right] \exp\left[-\left(\rho^2 + \zeta^2\right)/4\lambda\left(\gamma,\gamma_0\right)\right]}{cD_{\perp,0}\sqrt{D_{\parallel,0}T_0} \left(4\pi\lambda\left(\gamma,\gamma_0\right)\right)^{3/2} \left|\tilde{b}\left(\gamma\right)\right|}$$
(2)

где нормировочные длины $R_0 = \sqrt{D_{\perp,0}T_0}$, $Z_0 = \sqrt{D_{\parallel,0}T_0}$, T_0 – прозвольный временной масштаб, $\gamma = p/mc$ – лоренц-фактор, m– масса электрона, с – скорость света, Θ – функция Хевисайда, $b(\gamma) = -T_0 b(mc\gamma)/mc$, $\tilde{g}(\gamma) = g(mc\gamma)$,

$$\chi(\gamma,\gamma_0) = \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{d\gamma'}{\tilde{b}(\gamma')}; \qquad \lambda(\gamma,\gamma_0) = \int_{\gamma_0}^{\gamma} \frac{\tilde{g}(\gamma')}{\tilde{b}(\gamma')} d\gamma'.$$
(3)

нов КЛ, состоящий из двух компонент: фоновой и вклада от PSR J0437-4715. Фоновые спектры лептонов – степенные спектры с индексами и нормировками низкоэнергичных ветвей моделей спектров позитронов и электронов из Aguilar et al. (2014). Авторы приближали детектируемые AMS-02 спектры лептонов степенными спектрами с изломом. В данной работе мы взяли в качестве фона низкоэнергичную компоненту (индексы 2.94 и 3.25 для позитронов и электронов), а ужесточение спектра естественным образом обусловлено вкладом ближнего источника. Видно, что результаты нашего моделирования не противоречат наблюдательным данным большого количества экспериментов.

5. Выводы

Таким образом, вклад от PSR J0437-4715 может объяснять весь наблюдаемый поток позитронов космических лучей в диапазоне от десятков ГэВ до 1 ТэВ, не противореча при этом данным по полному наблюдаемому потоку лептонов. Вклад в реальный наблюдаемый поток позитронов также могут вносить другие близкие пульсары – например, Геминга. Это может означать, что избыток позитронов определяется вкладом ближайших пульсаров, а не аннигиляцией или распадом темной материи.

Подробнее о представленной работе – см. Bykov et al. (2019)

6. Благодарности

Авторы доклада поддержаны грантом РНФ 21-72-20020.

Рис. 2: Пространственная структура модели. Цифрами обозначены зоны с различными режимами диффузии: 0 – холодный пульсарный ветер, 1 – пульсарный ветер, прошедший нагрев на ударной волне торможения, 4 – невозмущенная межзвездная среда, 3 – межзвездное вещество, нагретое на головной УВ, 2 – область вблизи контактного разрыва. Стрелки обозначают направление течений

Многократно пересекая область вблизи контактного разрыва, частицы ускоряются по механизму Ферми I рода, формируя жесткую компоненту спектра с s < 2. Ускоренные частицы покидают источник через границу с условием свободного ухода, позволяя получить спектральное распределение потока производимых J0437 лептонов КЛ, $J_{s}(E)$. Особенность модели состоит в корректном учете пространственной структуры туманности с головной УВ, что важно для корректного моделирования ускорения, в частности, для корректного учета ухода частиц из ускорителя.



Рис. 4: Схема направления локального магнитного поля, измеренного Frisch et al. (2015) и направления на PSR J0437-4715 в проекции на галактическую плоскость

В расчетах локальное направление магнитного поля задавалось в соответствии с результатами Frisch et al. (2015), получившими в галактических координатах $l, b = 36^{\circ}.2, 49^{\circ}.0 \pm 16^{\circ}.0$. Глобальная диффузия ядер с жесткостью R в Галактике хорошо описывается коэффициентом $D \sim 3 \times 10^{28} (R/1 \text{ GV})^{1/3}$ см² с⁻¹ с Колмогоровской зависимостью от энергии Strong et al. (2007). Коэффициент диффузии вдоль магнитного поля в Местном пузыре, согласно результатам Yüksel et al. (2009); López-Coto et al. (2018); Tang and Piran (2019), несколько меньше, $D_{\parallel} \sim$ $2 \times 10^{27} (R/1 \text{ GV})^{1/3} \text{ см}^2 \text{ c}^{-1}$. Мы использовали $D_{\perp} = 0.03 D_{\parallel}$ в соответствии с результатами Casse et al. (2002). Выражение для потерь на излучение включало синхротронные (в магнитном поле

Список литературы

- Adriani O., Barbarino G. C., Bazilevskaya G. A. et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100GeV // Nature. - 2009. - Vol. 458. - P. 607-609.
- Aguilar M., Aisa D., Alvino A. et al. Electron and Positron Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // Physical Review Letters. - 2014. - Vol. 113, no. 12. – P. 121102.
- Aguilar M. et al. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons // Phys. Rev. Lett., 2019. Vol. 122, no. 4. – P. 041102.
- Rangelov B., Pavlov G. G., Kargaltsev O. et al. First Detection of a Pulsar Bow Shock Nebula in Far-UV: PSR J0437-4715 // ApJ. – 2016. – Vol. 831. – P. 129.
- Bykov A. M., Amato E., Petrov A. E. et al. Pulsar Wind Nebulae with Bow Shocks: Non-thermal Radiation and Cosmic Ray Leptons // Space Sci. Rev. - 2017. - Vol. 207. - P. 235-290.
- Ginzburg V. L., Syrovatskii S. I. The Origin of Cosmic Rays. Macmillan, New York, 1964.
- Frisch P. C., Berdyugin A., Piirola V. et al. Charting the Interstellar Magnetic Field causing the Interstellar Boundary Explorer (IBEX) Ribbon of Energetic Neutral Atoms // ApJ. – 2015. – Vol. 814, no. 2. – P. 112.
- Strong A. W., Moskalenko I. V., Ptuskin V. S. Cosmic-Ray Propagation and Interactions in the Galaxy // Annual Review of Nuclear and Particle Science. - 2007. - Vol. 57. - P. 285-327.
- Yüksel Hasan, Kistler Matthew D., Stanev Todor. TeV Gamma Rays from Geminga and the Origin of the GeV Positron Excess // Phys. Rev. Lett. - 2009. - Vol. 103, no. 5. - P. 051101.
- López-Coto R., Hahn J., BenZvi S. et al. Effect of the diffusion parameters on the observed γ -ray spectrum of sources and their contribution to the local all-electron spectrum: The EDGE code // Astroparticle Physics. - 2018. - Vol. 102. – P. 1–11.
- Tang Xiaping, Piran Tsvi. Positron flux and γ -ray emission from Geminga pulsar and pulsar wind nebula // MNRAS. 2019. – Apr. – Vol. 484, no. 3. – P. 3491–3501.
- Casse F., Lemoine M., Pelletier G. Transport of cosmic rays in chaotic magnetic fields // Phys. Rev. D. 2002. -Vol. 65, no. 2. – P. 023002.
- Bykov A. M., Petrov A. E., Krassilchtchikov A. M. et al. GeV-TeV Cosmic-Ray Leptons in the Solar System from the Bow Shock Wind Nebula of the Nearest Millisecond Pulsar J0437-4715 // ApJ. - 2019. - May. - Vol. 876, no. 1. – P. L8.