

Ускорение частиц пульсарного ветра в области сходящихся течений в пульсарной туманности с головной ударной волной (ГУВ) формирует жесткие спектры частиц $f(E) \propto E^{-s}$ с показателем $s < 2$. Синхротронное излучение ускоренных частиц может достигать дальнего ультрафиолетового диапазона (ДУФ, $\sim 6 - 10$ эВ), приводя к высокой светимости в данном диапазоне. К таким объектам могут относиться туманности быстро движущихся пульсаров PSR J1741-2054, B1929+10, B0823+26, B1133+16. Ниже представлены результаты моделирования структуры течений пульсарной туманности с ГУВ, кинетического моделирования спектров частиц и синхротронного излучения туманностей этих пульсаров, даны оценки на их светимости в ДУФ и рассмотрен возможный вклад PSR J1741-2054 в позитронную компоненту космических лучей.

1. Введение

Жесткие спектры рентгеновского излучения пульсарных туманностей с головными ударными волнами с фотонными индексами $\Gamma \sim 1$ (Posselt et al., 2017; Kargaltsev and Pavlov, 2008) могут быть результатом ускорения электронов и позитронов пульсарного ветра (ПВ) по механизму Ферми I рода в сходящихся потоках между ударной волной (УВ) торможения ветра и ГУВ (Вуков et al., 2017). Моделирование туманности PSR J0437-4715 (см. Вуков et al., 2017) показало, что ее излучение от ДУФ ($\sim 6 - 10$ эВ, $1250 - 2000$ Å) до рентгеновского диапазона может быть обусловлено синхротронным излучением электронов и позитронов, ускоренных в сходящихся потоках. Ультрафиолетовое излучение также может испускаться нагретым на ГУВ межзвездным газом (Вуков et al., 2013). Выбор в пользу одного из сценариев требует наблюдательных тестов. Ниже представлены результаты кинетического моделирования излучения туманностей ряда быстро движущихся пульсаров и рассмотрены перспективы их детектирования в ДУФ.

2. Оценки

Параметры источников, отобранных для моделирования, сведены в таблице 1.

Таблица 1: Скорость потери вращательной энергии \dot{E} , собственная скорость u_{psr} , расстояние до источника d , колонкообразная плотность по водороду N_H (Auchettl K. et al., 2015; Hui and Becker, 2008; Becker et al., 2004; Daszuta et al., 2013; Szary et al., 2017; Zharikov and Mignani, 2013)

	J1741-2054	B1929+10	B0823+26	B1133+16
\dot{E} , эрг с ⁻¹	9.5×10^{33}	3.9×10^{33}	4.6×10^{32}	8.8×10^{31}
u_{psr} , км с ⁻¹	196 ± 18	177^{+4}_{-5}	194 ± 41	631 ± 30
d , пк	380	361^{+10}_{-8}	340	360 ± 19
N_H , см ⁻²	1.2×10^{21}	1.7×10^{21}	6×10^{20}	1.5×10^{20}

Максимальная энергия электрона, достижимая в ускорении по механизму Ферми I рода в сходящихся потоках, может быть оценена (см. Вуков et al., 2017), как

$$E_{max} = \frac{1}{2} e B_{bow} \sqrt{\frac{u_{psr}}{c}} R_{cd} \approx 6 \times 10^{11} \sqrt{\xi_K \xi_B \dot{E}_{33} u_{100}} \text{ эВ}$$

$$R_{cd} = \sqrt{\frac{\xi_K \dot{E}}{6\pi \rho_{ism} u_{psr}^2}} \approx 3 \times 10^{15} \left(\frac{\xi_K \dot{E}_{33}}{n_{ism} u_{100}^2} \right)^{1/2} \text{ см} \quad (1)$$

$$B_{bow} = \sqrt{8\pi \xi_B \rho_{ism} u_{psr}^2} \approx 80 u_{100} \sqrt{\xi_B n_{ism}} \text{ мкГс} \quad (2)$$

Здесь B_{bow} — магнитное поле вблизи фронта ГУВ, ρ_{ism} , n_{ism} — плотность и концентрация частиц межзвездной среды (МЗС), u_{psr} — собственная скорость пульсара, $u_{100} = u_{psr}/(100 \text{ км/с})$, $\dot{E}_{33} = \dot{E}/(10^{33} \text{ эрг/с})$, R_{cd} — характерный размер аперкса ГУВ (1), факторы $\xi_K, \xi_B < 1$.

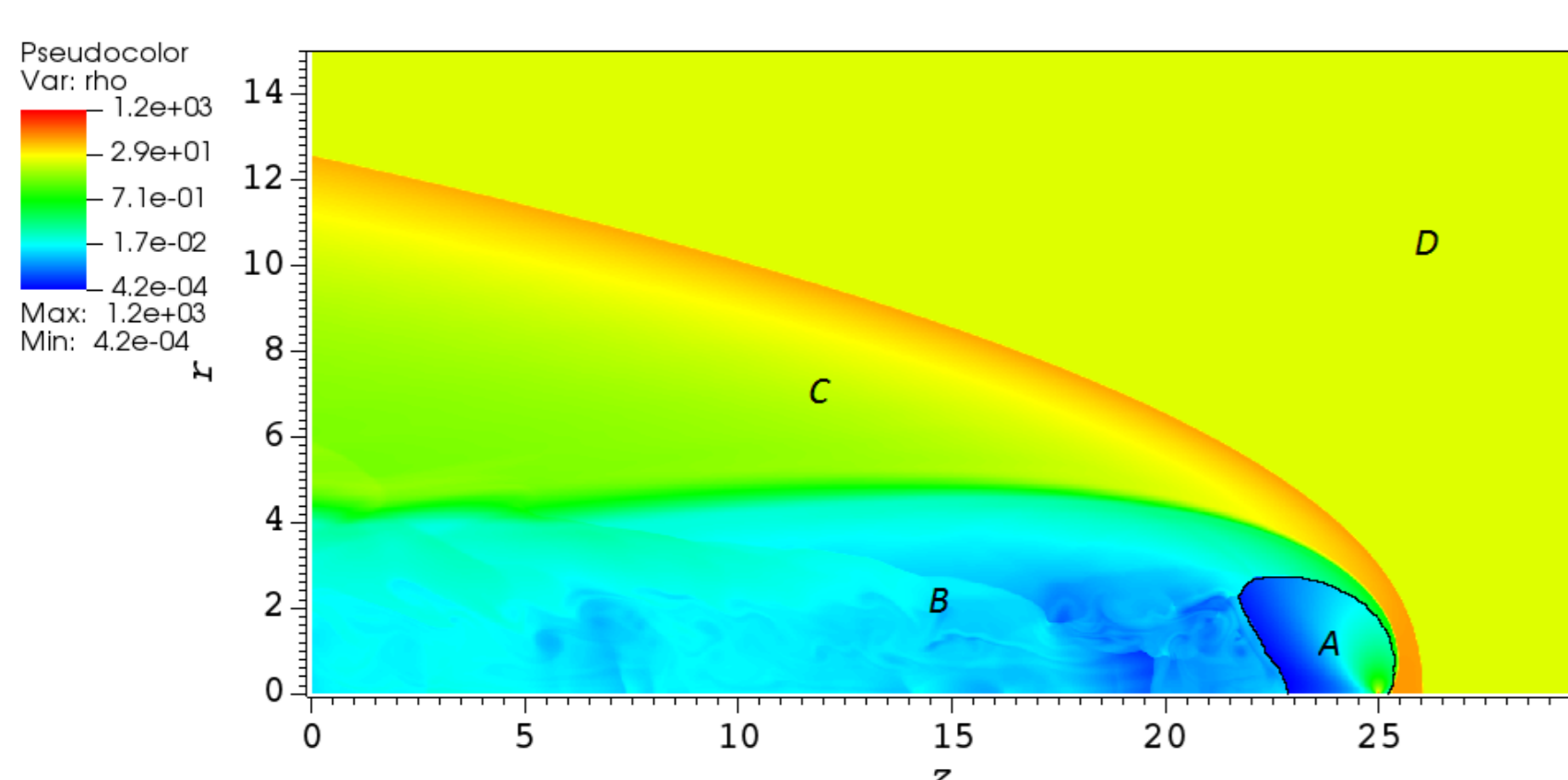


Рис. 1: Модельная карта плотности течений в пульсарной туманности с головной УВ для параметров PSR J1741-2054. Контур — УВ торможения. А-Д: холодный пульсарный ветер, замедленный и нагретый на УВ ветер, нагретая межзвездная среда, невозмущенная межзвездная среда

Магнитное поле пульсарной туманности может быть оценено по формулам Kennel and Coroniti (1984)

$$B_{pwn} = B_{pw} \frac{\gamma_2}{u_2} = \frac{\gamma_2}{u_2} \sqrt{\frac{\sigma \dot{E}}{1 + \sigma \gamma_{ts}^2 c}} \quad (3)$$

$$u_2^2 = \frac{8\sigma^2 + 10\sigma + 1}{16(\sigma + 1)} + \frac{1}{16(\sigma + 1)} \left[64\sigma^2(\sigma + 1)^2 + 20\sigma(\sigma + 1) + 1 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где $\gamma_2^2 = 1 + u_2^2$, B_{pw} — магнитное поле в холодном ветре в системе наблюдателя, замагничность $\sigma = B_{pw}^2 / (4\pi n_w \gamma_w m_e c^2)$ — отношение электромагнитного потока энергии, переносимого ветром, к кинетическому, γ_w — лоренц-фактор пульсарного ветра, n_w — концентрация частиц в ПВ, m_e — масса электрона. Как показывает моделирование структуры течений туманности PSR J1741-2054 (см. Рис. 1), осуществленное с помощью релятивистского магнитогидродинамического модуля кода PLUTO (Mignone et al., 2012), характерный радиус ударной волны торможения одного порядка с характерным масштабом (1).

B_{pwn} можно оценить по \dot{E} , σ и $r_{ts} \sim R_{cd}$, которое как и B_{bow} зависит от u_{psr} и $\rho_{ism} = \zeta m_p n_{ism}$, где m_p — масса протона, $\zeta \approx 1.4$. Неопределенными параметрами являются σ и n_{ism} .

Фиксируя $\sigma = 0.1$ в согласии с современными моделями ПВ (Bühler and Giomi, 2016) мы оценили энергию максимума ϵ_{max} спектра νF_ν для синхротронного излучения источников, варьируя n_{ism} (см. Рис. 2). Для J1741-2054 ГУВ наблюдалась в $\text{H}\alpha$, позволяя оценить $n_{ism} \approx 1.4 \text{ см}^{-3}$ (Brownsberger and Romani, 2014). Ниже представлены модельные спектры J1741-2054 для этого значения и остальных пульсаров для ряда концентраций.

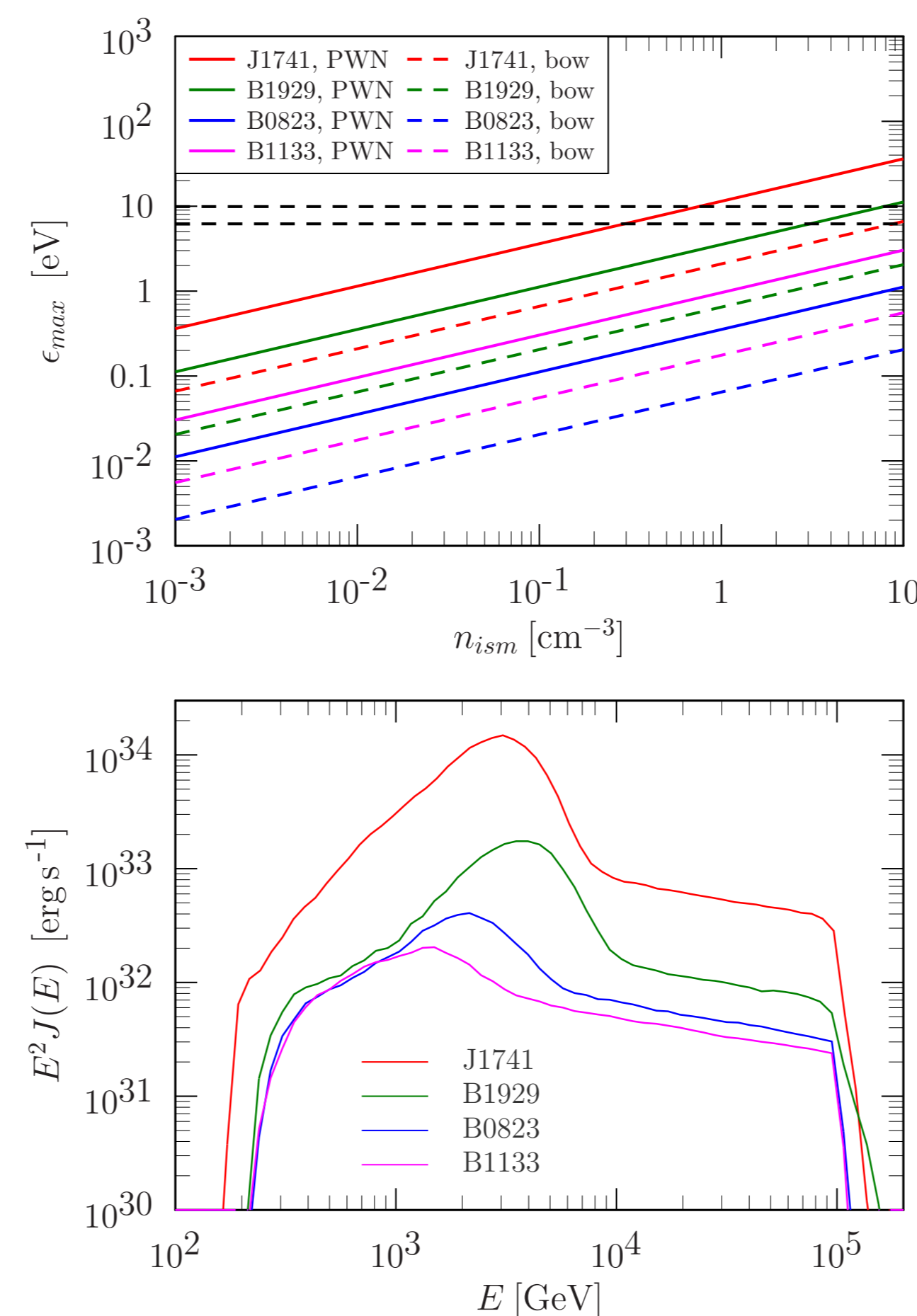


Рис. 2: Сверху: оценка энергии фотона, излученного частицами максимальной энергии, достигнутой в ускорении в сходящихся потоках в магнитном поле пульсарной туманности (сплошные) и возмущенной межзвездной среды (пунктирные), в зависимости от концентрации МЗС. Показаны границы ДУФ. Снизу: сглаженные спектры ускоренных частиц, покидающих туманности при $n_{ism} = 0.3 \text{ см}^{-3}$ для PSR B1929+10, B0823+26, B1133+16 и 1.4 см^{-3} для PSR J1741-2054.

3. Результаты моделирования спектров

Моделирование спектров электронов и позитронов пульсарного ветра и их синхротронного излучения проведено с помощью численной кинетической модели Вуков et al. (2017) на основе метода Монте-Карло.

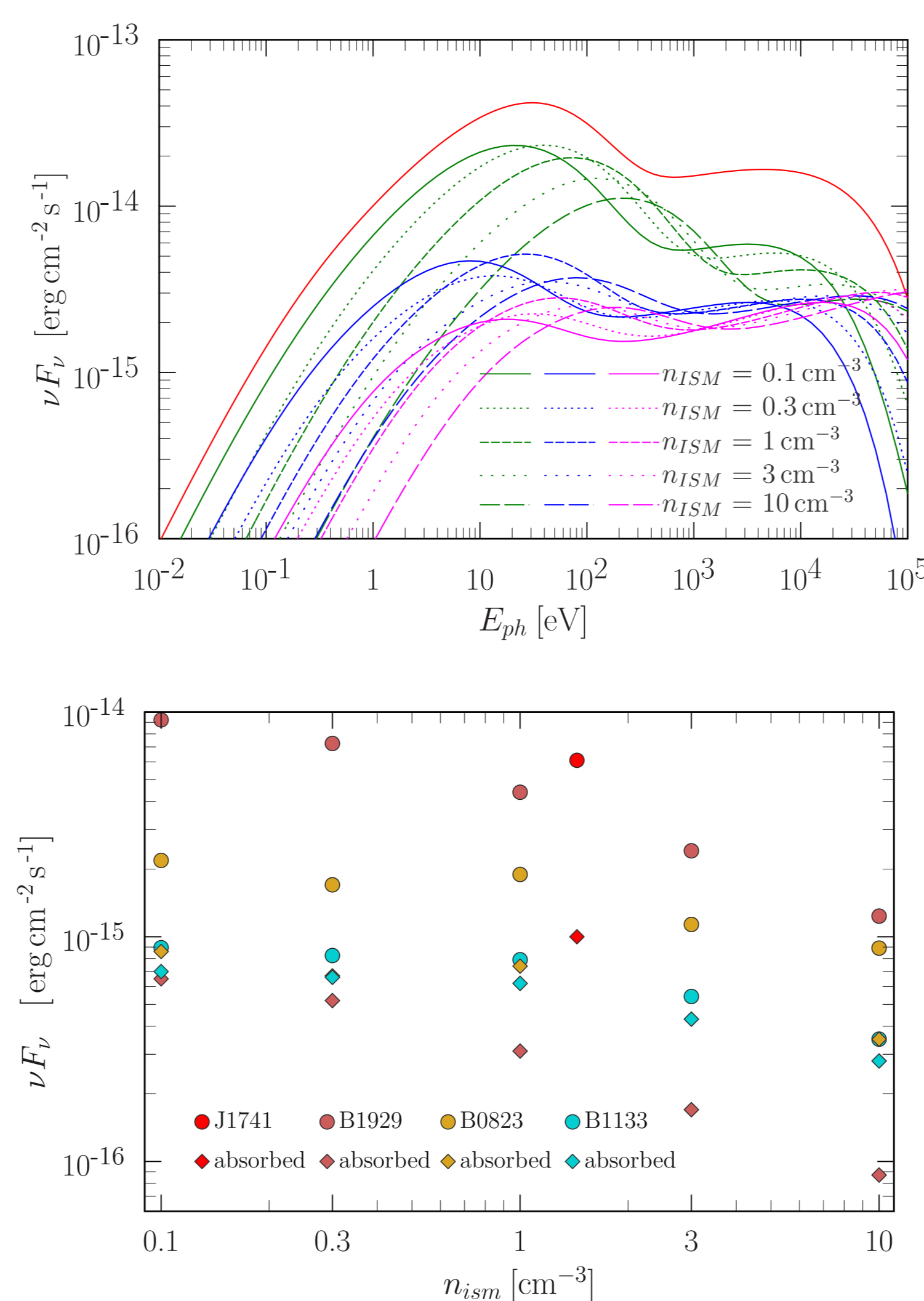


Рис. 3: Сверху: спектры непоглощенного синхротронного излучения туманностей PSR J1741-2054 (красный), B1929+10 (зеленые), B0823+26 (синие) и B1133+16 (лиловые). Для трех последних — при различных концентрациях МЗС. Снизу: ожидаемые потоки синхротронного ДУФ излучения этих источников (ромбы — с учетом межзвездного поглощения).

На Рис. 2 снизу приведены модельные потоки энергии, уносимые ускоренными частицами за пределы источников. В результате ускорения в сходящихся потоках в спектрах сформировались максимумы в тераэлектронвольтовом диапазоне. Модельные спектры синхротронного излучения представлены на Рис. 3 сверху. Жесткие спектры частиц проявляют себя в растущем $\nu F_\nu \propto \nu$, при приближении энергии фотона к ϵ_{max} спектр смягчается, затем выходит на наклон характерный для туманностей без ГУВ. На Рис. 3 снизу представлены ожидаемые потоки этих источников в ДУФ. По результатам моделирования, PSR J1741-2054

наиболее перспективен для детектирования в ДУФ. Видно, что синхротронная ДУФ светимость медленно меняется с n_{ism} в отличие от светимости нагретого газа пропорциональной n_{ism}^2 .

4. Позитроны

Туманности ряда ближайших пульсаров могут давать значимый вклад в поток позитронов космических лучей (КЛ), превышающий оцениваемый вклад от их вторичной компоненты (см. данные PAMELA (Adriani O. et al., 2009) и AMS-02 (Aguilar M. et al., 2019)). PSR J1741-2054 с большим $\dot{E} = 9.5 \times 10^{33} I_{45} \text{ эрг с}^{-1}$, где I_{45} момент инерции нейтронной звезды в единицах 10^{45} г см^2 , может дать значимый вклад на субтераэлектронных энергиях. Поток $F \approx 20 \text{ ГэВ}^2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ или $5 \times 10^{-9} \text{ эрг}^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ позитронов соответствует плотности энергии $n_E = 4\pi F/cE \approx 4 \times 10^{-18} \text{ эрг см}^{-3}$. Для сферически симметричной диффузии с коэффициентом D можно записать $\eta \dot{E}/4\pi r^2 = -D(\partial n_E/\partial r)$ где η — доля \dot{E} в потоке ускоренных субтэвных частиц. При $\eta = 2\%$ и $r = 380 \text{ пк}$, $D(0.35 \text{ ТэВ}) = 3.5 \times 10^{27} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ или $2 \times 10^{26} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ на 1 ГэВ, если $D(E) \propto E^{1/2}$, что согласуется с недавними моделями Abeyssekara A. U. et al. (2017); Fang et al. (2020).

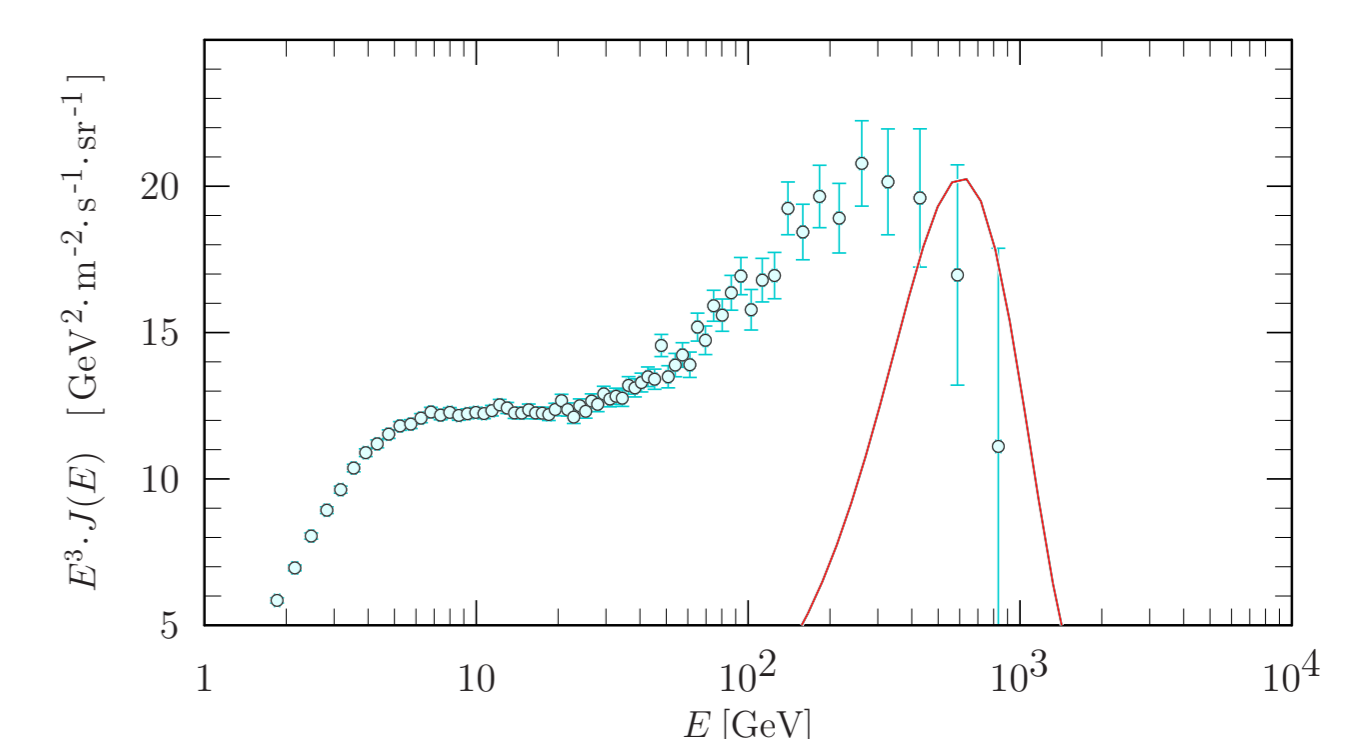


Рис. 4: Модельный поток позитронов ускоренных PSR J1741-2054 в сравнении с данными AMS-02 Aguilar M. et al (2019)

Моделируя стационарную диффузию от PSR J1741-2054 к Земле, взяв $D = 5.5 \times 10^{26} (E/1 \text{ ГэВ})^{1/2} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и учитывая синхротронные (при $B_{ISM} = 3.6 \text{ мкГс}$) и обратные комптоновские (см. Tang and Piran (2019)) потери энергии при распространении, мы получили спектр, показанный на Рис. 4. Таким образом, этот источник может дать значимый вклад в наблюдаемый поток позитронов на субтераэлектронных энергиях, затрачивая 50% своего \dot{E} на генерацию ускоренных частиц.

5. Выводы

Проведено моделирование спектров частиц и синхротронного излучения туманностей PSR J1741-2054, B1929+10, B0823+26 и B1133+16.

- Наиболее перспективной мишенью для детектирования в ДУФ (6-10 эВ) является туманность PSR J1741-2054.
- Поток синхротронного ДУФ излучения медленно меняется с ростом n_{ism} . Для определения природы ультрафиолетового излучения пульсарных туманностей с головными УВ (синхротрон или излучение нагретого газа) наиболее удобны туманности распространяющиеся в разреженной среде.

Показано, что PSR J1741-2054 может вносить существенный вклад в наблюдаемый поток позитронов КЛ в субтераэлектронвольтовом диапазоне.

Список литературы

Posselt B., Pavlov G. G., Slane P. O. et al. Geminga's Puzzling Pulsar Wind Nebula // *ApJ*. — 2017. — Vol. 835. — P. 66.

Kargaltsev O., Pavlov G. G. Pulsar Wind Nebulae in the Chandra Era // 40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More / Ed. by C. Bassa, Z. Wang, A. Cumming, V. M. Kaspi. — Vol. 983 of American Institute of Physics Conference Series. — 2008. — P. 171-185.

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.

Bykov A. M., Malkov M. A., Raymond J. C. et al. Collisionless Shocks in Partly Ionized Plasma with Cosmic Rays: Microphysics of Non-thermal Components // *Space Sci. Rev.* — 2013. — Vol. 178. — P. 599-632.

Auchettl K. et al. X-Ray Analysis of the Proper Motion and Pulsar Wind Nebula for PSR J1741-2054 // *ApJ*. — 2015. — Vol. 802. — P. 68.

Hui C. Y., Becker W. Resolving the bow-shock nebula around the old pulsar PSR B1929+10 with multi-epoch Chandra observations // *A&A*. — 2008. — Vol. 486. — P. 485-491.

Becker Werner, Weisskopf Martin C., Tennant Allyn F. et al. Revealing the X-Ray Emission Processes of Old Rotation-powered Pulsars: XMM-Newton Observations of PSR B0950+08, PSR B0823+26, and PSR J2043+2740 // *ApJ*. — 2004. — Vol. 615, no. 2. — P. 908-920.

Daszuta M., Lewandowski W., Kijak J. Scintillation observations of PSR B0823+26 // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 436, no. 3. — P. 2492-2499.

Szary Andrzej, Gil Janusz, Zhang Bing et al. XMM-Newton Observation of the nearby Pulsar B1133+16 // *ApJ*. — 2017. — Vol. 835, no. 2. — P. 178.

Zharikov Sergey, Mignani Roberto P. On the PSR B1133+16 optical counterpart // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 435, no. 3. — P. 2227-2233.

Kennel C. F., Coroniti F. V. Confinement of the Crab pulsar's wind by its supernova remnant // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 283. — P. 694-709.

Mignone A., Zanni C., Tzeferacos P. et al. The PLUTO Code for Adaptive Mesh Computations in Astrophysical Fluid Dynamics // *ApJS*. — 2012. — Vol. 198, no. 1. — P. 7.

Bühler R., Giomi M. The imprint of pulsar parameters on the morphology of Pulsar Wind Nebulae // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 462. — P. 2762-2776.

Brownsberger S., Romani R. W. A Survey for $\text{H}\alpha$ Pulsar Bow Shocks // *ApJ*. — 2014. — Vol. 784. — P. 154.

Adriani O. et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV // *Nature*. — 2009. — Vol. 458, no. 7238. — P. 607-609.

Aguilar M. et al. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons // *Phys. Rev. Lett.* — 2019. — Vol. 122, no. 4. — P. 041102.

Abeyssekara A. U. et al. Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth // *Science*. — 2017. — Nov. — Vol. 358, no. 6365. — P. 911-914.

Fang Kun, Bi Xiao-Jun, Yin Peng-Fei. DAMPE proton spectrum indicates a slow-diffusion zone in the nearby ISM // *arXiv e-prints*. — 2020. — P. arXiv:2003.13635.

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.

Авторы были поддержаны грантом РФФ 21-72-20020.