

Результаты наблюдения туманности Бумеранг с помощью установки TAIGA-HiSCORE

© В.С. Самолига^{1,2}

¹ Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: vladimir.samoliga@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 18 июля 2025 г.

Принято к публикации 19 июля 2025 г.

Проведен анализ данных установки TAIGA-HiSCORE по оценке сигнала в окрестностях туманности Бумеранг. Выполнено сравнение результатов без применения и с применением гамма-адронной сепарации. Распределение значимости соответствует нормальному закону, что свидетельствует о преобладании фоновых событий. Полученные результаты подтверждают необходимость улучшения методов гамма-адронной сепарации, в частности, за счет ввода в строй новых компонент комплекса TAIGA (сцинтилляционных и водных черенковских детекторов), что позволит повысить чувствительность к источникам гамма-излучения с энергиями выше 100 TeV.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, гамма-астрономия, оценка фона, значимость сигнала.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61794.238-25

Одним из важных направлений астрофизики является поиск ускорителей космических лучей, так называемых ПэВатронов, путем регистрации их гамма-излучения с энергией выше 100 TeV. Поиск и исследование таких источников ведется в том числе с помощью черенковской установки TAIGA-HiSCORE [1] астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [2]. Это массив из распределенных на площади 1.1 km² 120 детекторов, регистрирующих черенковское излучение широких атмосферных ливней (ШАЛ). Детекторы представляют собой широкоугольные оптические станции с четырьмя фотозлектронными умножителями, оснащенными концентраторами света — конусами Уинстона с характерным углом 30°.

Комплекс TAIGA расположен на широте 51.8° N. Оптические станции установки TAIGA-HiSCORE могут иметь два рабочих положения: направлены в зенит или наклонены на зенитный угол 25° в сторону юга. Наклон на юг требуется для наблюдения Крабовидной туманности, имеющей склонение +22° 00' 52.1", и других источников со склонениями +2° — +52°. Вертикальное положение позволяет наблюдать небо в диапазоне склонений +27° — +77°. По данным эксперимента LHAASO [3] в этом диапазоне существует несколько источников гамма-излучения с энергиями выше 100 TeV. Особый интерес представляет остаток сверхновой SNR G106.3+02.7 в области туманности Бумеранг, которая имеет склонение +61° 10' 00". Этот источник относится к классу протяженных, имеет кометообразную форму, которую можно разделить на головную и хвостовую области. Поэтому гамма-излучение от этого источника было зарегистрировано рядом экспе-

риментов в диапазонах координат $RA = 336.3^\circ - 337.6^\circ$, $Dec = 60.6^\circ - 61.3^\circ$ [4–8]. SNR G106.3+02.7 доступен для наблюдений на установке TAIGA-HiSCORE преимущественно с сентября по декабрь. С учетом площади установки TAIGA-HiSCORE в $\sim 1 \text{ km}^2$ и работы в безлунные ночи, источник SNR G106.3+02.7 можно наблюдать до 250 h за сезон и регистрировать до 30 гамма-квантов с $E > 100 \text{ TeV}$ и до 110 гамма-квантов с $E > 50 \text{ TeV}$.

Поток гамма-квантов чрезвычайно мал по сравнению с фоновым адронным космическим излучением. Поэтому для выделения сигнала важно правильно оценивать фон. В работе [9] описаны четыре метода оценки фона при работе с данными установок наземной гамма-астрономии. Чувствительность установок может иметь пространственную и временную зависимость. Это ограничивает применимость методов, в которых для оценки фона требуются его набор из обширной области неба или за продолжительное время. Так, в работе [10] было показано влияние погодных условий во время измерений на оценку значимости сигнала. Кроме того, для метода равных зенитных углов существует ограничение на рабочие зенитные углы $\geq 11.6^\circ$, в то время как источник SNR G106.3+02.7 поднимается до зенитного угла 9.2°.

В настоящей работе проводится анализ экспериментальных данных, полученных за периоды октябрь–декабрь 2022 г. и сентябрь–октябрь 2023 г., когда оптические станции TAIGA-HiSCORE были направлены в зенит. Всего за эти два сезона источник SNR G106.3+02.7 наблюдался 143 h. Согласно нашим расчетам с использованием спектра источника из работы [3], за это время можно было зарегистри-

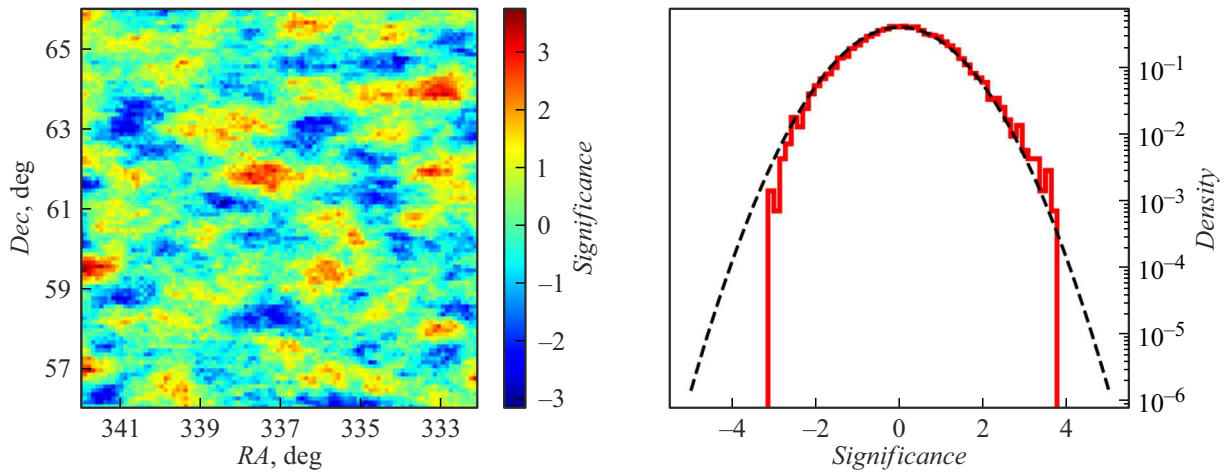


Рис. 1. Слева — карта значимости сигнала в регионе туманности Бумеранг для событий без классификации. Справа — распределение значимости (красная линия) и стандартное нормальное распределение (черная штриховая линия).

стрировать до 62 гамма-квантов с $E > 50$ TeV. Выборка событий ограничена областью неба в пределах $RA = RA_0 - 5^\circ - RA_0 + 5^\circ$, $Dec = Dec_0 - 5^\circ - Dec_0 + 5^\circ$, где $RA_0 = 337^\circ$, $Dec_0 = 61.17^\circ$ — координаты источника гамма-излучения с $E > 100$ TeV по данным эксперимента LHAASO. Также применены критерии ≥ 6 сработавших станций при регистрации ШАЛ и положение оси ШАЛ внутри периметра установки, что обеспечивает угловое разрешение детектора около 0.16° .

Для оценки фона применяется так называемый рамочный метод. Этот метод устойчив к вариациям угловой чувствительности установки и не зависит от зенитного угла наблюдений. Суть метода заключается в следующем.

Сначала исследуемый участок неба разделяется на ячейки $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ во второй экваториальной системе координат. Каждой ячейке присваивается сумма зарегистрированных событий из окрестности, обусловленной угловым разрешением установки. Так, в настоящей работе принимается угловое разрешение $R_{68} = 0.16^\circ$, что означает, что 68 % событий, исходящих из точечного источника, восстанавливаются с угловой ошибкой не более 0.16° . Принимая модель двумерного нормального распределения для угловой ошибки, мы находим, что в $2 \cdot R_{68}$ -окрестности источника содержится 98.96 % событий, что можно считать полным сигналом источника.

Затем уровень фона в каждой исследуемой ячейке неба определяется как среднее значение фона на участке неба в виде прямоугольной рамки вокруг исследуемой ячейки. Рамка имеет толщину $0.1^\circ RA$ для вертикальных сторон и $0.1^\circ Dec$ для горизонтальных сторон. Размер рамки задается, исходя из углового разрешения установки. Для того чтобы при оценке фона в исследуемой ячейке события из ее окрестности не попадали в рамку, расстояние между этой ячейкой и рамкой должно составлять не менее $4 \cdot R_{68} = 0.64^\circ$. Ширина рамки в координатах RA пропорциональна

$1/\cos(Dec)$. Так, при склонении $Dec = 61.17^\circ$ в окрестность точки RA_i с радиусом 0.64° попадают значения $RA = RA_i - 1.33 - RA_i + 1.33$. Для работы на указанном выше участке неба были взяты максимальные размеры рамки, соответствующие склонению на верхнем краю участка $Dec = 66.17^\circ$ с охватом $RA_i - 1.58 - RA_i + 1.58$. Округляя до десятых долей градуса и делая отступы от исследуемой ячейки 1.5° и 0.6° по RA и Dec соответственно, получаем, что вокруг исследуемой ячейки формируется рамка из 92 ячеек.

Для оценки значимости сигнала в исследуемой ячейке используется классическая формула Ли–Ма [6]:

$$S = \sqrt{2} \cdot \left\{ N_{on} \cdot \ln \left(\frac{(1+k) \cdot N_{on}}{k \cdot (N_{on} + N_{off})} \right) + N_{off} \cdot \ln \left(\frac{(1+k) \cdot N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где N_{on} — число событий в некотором окне наблюдения, в котором предполагается источник; N_{off} — число событий в таком же окне наблюдения без источника, т.е. фоновых событий; $k = T_{on}/T_{off}$, а T_{on} и T_{off} — время наблюдения источника и фона соответственно. В случае рамочного метода N_{on} — число событий в исследуемой ячейке, N_{off} — число событий в рамке. Ячейка и рамка наблюдаются одновременно, но, так как рамка состоит из 92 ячеек, $k = 1/92$.

На рис. 1 показаны результаты анализа данных без применения гамма-адронной сепарации. Распределение значимости сигнала соответствует нормальному закону ($\mu = 0.06$, $\sigma = 0.98$), что ожидаемо при слабом сигнале от источника и без подавления фона. Так, в точке $RA_0 = 337^\circ$, $Dec_0 = 61.17^\circ$ зарегистрировано 1941 событие при среднем фоне 1938.7, и превышение уровня полного сигнала над средним уровнем фона составляет 2.3 события, что соответствует 0.05σ . При этом в 1941 событие входят ожидаемые 62 гамма-кванта.

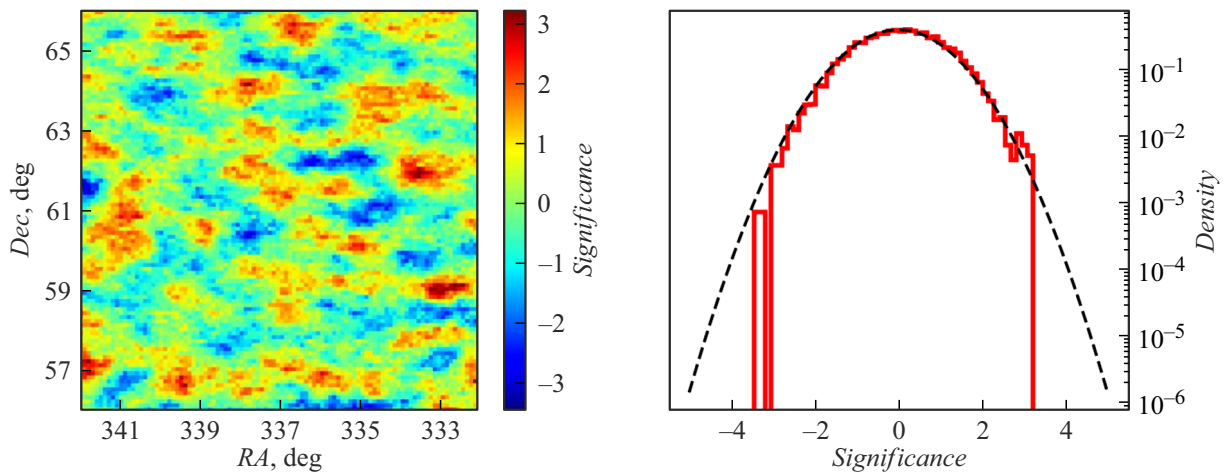


Рис. 2. Слева — карта значимости сигнала в регионе туманности Бумеранг для событий с классификацией по параметру dH . Справа — распределение значимости (красная линия) и стандартное нормальное распределение (черная штриховая линия).

В качестве способа уменьшения адронного фона предлагается параметр dH , представляющий собой разницу между максимумом ШАЛ и уровнем наблюдения, выраженную в g/cm^2 , т.е. $dH = (X_{\max} - X_{\text{obs}}) / \cos(Ze)$. По экспериментальным данным dH можно выразить через параметр $P_{80/200}$, описанный в работе [12], который равен отношению плотности зарегистрированных черенковских фотонов на расстоянии 80 и 200 м от оси ШАЛ: $dH = 30 + (9.8 - P_{80/200}) / 0.013$. По результатам моделирования получено, что ШАЛ от тяжелых ядер (кислород, железо) имеют значение $dH > 450 \text{ g/cm}^2$. Ниже этого порога находятся $\sim 30\%$ протонных ШАЛ и $\sim 60\%$ гамма-индуцированных ШАЛ. На рис. 2 показаны результаты с применением такого критерия к набору данных. В точке $RA_0 = 337^\circ$, $Dec_0 = 61.17^\circ$ содержится 615 событий при среднем фоне 607, что составляет 0.32σ . Уровень фона после применения критерия $dH < 450 \text{ g/cm}^2$ составляет 31.2% от изначального уровня, что согласуется с результатами моделирования. Тогда ожидается, что сигнал от источника уменьшается до ~ 37 гамма-квантов. Таким образом, предложенный метод не является достаточно сильным способом гамма-адронной сепарации, что, как и в случае без нее, дает нормальное распределение значимости сигнала.

Проведенный анализ не выявил статистически значимого сигнала от SNR G106.3+02.7 в данных TAIGA-HiSCORE, что согласуется с ожиданиями для слабых источников в условиях высокого адронного фона. Полученные результаты демонстрируют необходимость дальнейшего совершенствования методов гамма-адронной сепарации и накопления данных. Так, в 2019 г. в составе комплекса TAIGA началось развертывание сцинтилляционной установки TAIGA-Muon [13] — сети детекторов электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ. Также планируется дополнить комплекс сетью водных черенковских детекторов объемом 50 m^3 на глубине 2.5 м. В перспективе с увеличением статистики и применением

более жестких критериев отбора совместная работа указанных установок сможет внести вклад в исследование ПэВатронов, в особенности источников со склонением $+27^\circ - +77^\circ$.

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016 (раздел 3), 23-72-00019 (раздел 4)) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2025-0008).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brückner, N. Budnev, A. Chiavassa, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, A. Grinyuk, D. Horns, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, V. Kiryuhin, P. Kirilenko, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, A. Lagutin, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakharukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, Yu. Semenev, A. Silaev, A. Silaev Jr., A. Sidorenkov, A. Skurikhin, M. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, V. Zurbanov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **952**, 161830 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.01.056

- [2] I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, A. Borodin, N. Budnev, A. Bulan, D. Chernov, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, M. Iliushin, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, D. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. *Phys. Atom. Nucl.*, **86** (4), 471 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823040051
- [3] Zhen Cao, F. Aharonian, Q. An, Axikegu, Y.X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X.J. Bi, Y.J. Bi, J.T. Cai, Q. Cao, W.Y. Cao, Zhe Cao, J. Chang, J.F. Chang, A.M. Chen, E.S. Chen, Liang Chen, Lin Chen, Long Chen, M.J. Chen, M.L. Chen, Q.H. Chen, S.H. Chen, S.Z. Chen, T.L. Chen, Y. Chen, N. Cheng, Y. D. Cheng, M.Y. Cui, S.W. Cui, X.H. Cui, Y.D. Cui, B.Z. Dai, H.L. Dai, Z.G. Dai, Danzengluobu, D. della Volpe, X.Q. Dong, K.K. Duan, J.H. Fan, Y. Z. Fan, J. Fang, K. Fang, C.F. Feng, L. Feng, S.H. Feng, X.T. Feng, Y.L. Feng, S. Gabici, B. Gao, C.D. Gao, L.Q. Gao, Q. Gao, W. Gao, W.K. Gao, M.M. Ge, L.S. Geng, G. Giacinti, G.H. Gong, Q.B. Gou, M.H. Gu, F.L. Guo, X.L. Guo, Y.Q. Guo, Y.Y. Guo, Y.A. Han, H.H. He, H.N. He, J.Y. He, X.B. He, Y. He, M. Heller, Y.K. Hor, B.W. Hou, C. Hou, X. Hou, H.B. Hu, Q. Hu, S.C. Hu, D.H. Huang, T.Q. Huang, W.J. Huang, X.T. Huang, X.Y. Huang, Y. Huang, Z.C. Huang, X.L. Ji, H.Y. Jia, K. Jia, K. Jiang, X.W. Jiang, Z.J. Jiang, M. Jin, M.M. Kang, T. Ke, D. Kuleshov, K. Kurinov, B.B. Li, Cheng Li, Cong Li, D. Li, F. Li, H.B. Li, H.C. Li, H.Y. Li, J. Li, Jian Li, Jie Li, K. Li, W.L. Li, W.L. Li, X.R. Li, Xin Li, Y.Z. Li, Zhe Li, Zhuo Li, E.W. Liang, Y.F. Liang, S.J. Lin, B. Liu, C. Liu, D. Liu, H. Liu, H.D. Liu, J. Liu, J.L. Liu, J.Y. Liu, M.Y. Liu, R.Y. Liu, S. M. Liu, W. Liu, Y. Liu, Y.N. Liu, R.Lu, Q. Luo, H.K. Lv, B.Q. Ma, L.L. Ma, X.H. Ma, J.R. Mao, Z. Min, W. Mitthumsiri, H.J. Mu, Y.C. Nan, A. Neronov, Z.W. Ou, B.Y. Pang, P. Pattarakijwanich, Z.Y. Pei, M.Y. Qi, Y.Q. Qi, B.Q. Qiao, J.J. Qin, D. Ruffolo, A. Sáiz, D. Semikoz, C.Y. Shao, L. Shao, O. Shchegolev, X.D. Sheng, F.W. Shu, H.C. Song, Yu.V. Stenkin, V. Stepanov, Y. Su, Q.N. Sun, X.N. Sun, Z.B. Sun, P.H.T. Tam, Q.W. Tang, Z.B. Tang, W.W. Tian, C. Wang, C.B. Wang, G.W. Wang, H.G. Wang, H.H. Wang, J.C. Wang, K. Wang, L.P. Wang, L.Y. Wang, P.H. Wang, R. Wang, W. Wang, X.G. Wang, X.Y. Wang, Y. Wang, Y.D. Wang, Y.J. Wang, Z.H. Wang, Z.X. Wang, Zhen Wang, Zheng Wang, D.M. Wei, J.J. Wei, Y.J. Wei, T. Wen, C.Y. Wu, H.R. Wu, S. Wu, X.F. Wu, Y.S. Wu, S.Q. Xi, J. Xia, J.J. Xia, G.M. Xiang, D.X. Xiao, G. Xiao, G.G. Xin, Y.L. Xin, Y. Xing, Z. Xiong, D.L. Xu, R.F. Xu, R.X. Xu, W.L. Xu, L. Xue, D.H. Yan, J.Z. Yan, T. Yan, C.W. Yang, F. Yang, F.F. Yang, H.W. Yang, J.Y. Yang, L.L. Yang, M.J. Yang, R.Z. Yang, S.B. Yang, Y.H. Yao, Z.G. Yao, Y.M. Ye, L.Q. Yin, N. Yin, X.H. You, Z.Y. You, Y. H. Yu, Q. Yuan, H. Yue, H.D. Zeng, T.X. Zeng, W. Zeng, M. Zha, B.B. Zhang, F. Zhang, H.M. Zhang, H.Y. Zhang, J.L. Zhang, L.X. Zhang, Li Zhang, P.F. Zhang, P.P. Zhang, R. Zhang, S.B. Zhang, S.R. Zhang, S.S. Zhang, X. Zhang, X.P. Zhang, Y.F. Zhang, Yi Zhang, Yong Zhang, B. Zhao, J. Zhao, L. Zhao, L.Z. Zhao, S.P. Zhao, F. Zheng, B. Zhou, H. Zhou, J.N. Zhou, M. Zhou, P. Zhou, R. Zhou, X.X. Zhou, C.G. Zhu, F.R. Zhu, H. Zhu, K.J. Zhu, X. Zuo. *ApJS*, **271**, 25 (2024). DOI: 10.3847/1538-4365/acfd29
- [4] Yu. Xin, H. Zeng, S. Liu, Yi. Fan, D. Wei. *Astrophys. J.*, **885**, 162 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab48ee
- [5] Zhen Cao, F.A. Aharonian, Q. An, Axikegu, L.X. Bai, Y.X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X.J. Bi, Y.J. Bi, H. Cai, J.T. Cai, Zhe Cao, J. Chang, J.F. Chang, X.C. Chang, B.M. Chen, J. Chen, L. Chen, Liang Chen, Long Chen, M.J. Chen, M.L. Chen, Q. H. Chen, S.H. Chen, S.Z. Chen, T.L. Chen, X.L. Chen, Y. Chen, N. Cheng, Y.D. Cheng, S.W. Cui, X.H. Cui, Y.D. Cui, B.Z. Dai, H.L. Dai, Z.G. Dai, Danzengluobu, D. della Volpe, B. D’Ettorre Piazzoli, X.J. Dong, J.H. Fan, Y.Z. Fan, Z.X. Fan, J. Fang, K. Fang, C.F. Feng, L. Feng, S.H. Feng, Y.L. Feng, B. Gao, C.D. Gao, Q. Gao, W. Gao, M.M. Ge, L.S. Geng, G.H. Gong, Q.B. Gou, M.H. Gu, J.G. Guo, X.L. Guo, Y.Q. Guo, Y.Y. Guo, Y.A. Han, H.H. He, H.N. He, J.C. He, S.L. He, X.B. He, Y. He, M. Heller, Y.K. Hor, C. Hou, X. Hou, H.B. Hu, S. Hu, S.C. Hu, X.J. Hu, D.H. Huang, Q.L. Huang, W.H. Huang, X.T. Huang, Z.C. Huang, F. Ji, X.L. Ji, H.Y. Jia, K. Jiang, Z.J. Jiang, C. Jin, D. Kuleshov, K. Levochkin, B.B. Li, Cong Li, Cheng Li, F. Li, H.B. Li, H.C. Li, H.Y. Li, J. Li, K. Li, W.L. Li, X. Li, Xin Li, X.R. Li, Y. Li, Y.Z. Li, Zhe Li, Zhuo Li, E.W. Liang, Y.F. Liang, S.J. Lin, B. Liu, C. Liu, D. Liu, H. Liu, H.D. Liu, J. Liu, J.L. Liu, J.S. Liu, J.Y. Liu, M.Y. Liu, R.Y. Liu, S.M. Liu, W. Liu, Y. N. Liu, Z.X. Liu, W.J. Long, R. Lu, H.K. Lv, B.Q. Ma, L.L. Ma, X.H. Ma, J.R. Mao, A. Masood, W. Mitthumsiri, T. Montaruli, Y.C. Nan, B.Y. Pang, P. Pattarakijwanich, Z.Y. Pei, M.Y. Qi, D. Ruffolo, V. Rulev, A. Sáiz, L. Shao, O. Shchegolev, X.D. Sheng, J.R. Shi, H.C. Song, Yu.V. Stenkin, V. Stepanov, Q.N. Sun, X.N. Sun, Z.B. Sun, P.H.T. Tam, Z.B. Tang, W.W. Tian, B.D. Wang, C. Wang, H. Wang, H.G. Wang, J.C. Wang, J.S. Wang, L.P. Wang, L.Y. Wang, R.N. Wang, W. Wang, W. Wang, X.G. Wang, X.J. Wang, X.Y. Wang, Y.D. Wang, Y.J. Wang, Y.P. Wang, Zheng Wang, Zhen Wang, Z.H. Wang, Z.X. Wang, D.M. Wei, J.J. Wei, Y.J. Wei, T. Wen, C.Y. Wu, H.R. Wu, S. Wu, W. X. Wu, X.F. Wu, S.Q. Xi, J. Xia, J.J. Xia, G.M. Xiang, G. Xiao, H.B. Xiao, G.G. Xin, Y.L. Xin, Y. Xing, D.L. Xu, R.X. Xu, L. Xue, D.H. Yan, C.W. Yang, F.F. Yang, J.Y. Yang, L.L. Yang, M.J. Yang, R.Z. Yang, S.B. Yang, Y.H. Yao, Z.G. Yao, Y.M. Ye, L.Q. Yin, N. Yin, X.H. You, Z.Y. You, Y.H. Yu, Q. Yuan, H.D. Zeng, T.X. Zeng, W. Zeng, Z.K. Zeng, M. Zha, X.X. Zhai, B.B. Zhang, H.M. Zhang, H.Y. Zhang, J.L. Zhang, J.W. Zhang, L. Zhang, Li Zhang, L.X. Zhang, P.F. Zhang, P.P. Zhang, R. Zhang, S.R. Zhang, S.S. Zhang, X. Zhang, X.P. Zhang, Yong Zhang, Yi Zhang, Y.F. Zhang, Y.L. Zhang, B. Zhao, J. Zhao, L. Zhao, L.Z. Zhao, S.P. Zhao, F. Zheng, Y. Zheng, B. Zhou, H. Zhou, J.N. Zhou, P. Zhou, R. Zhou, X.X. Zhou, C.G. Zhu, F.R. Zhu, H. Zhu, K.J. Zhu, X. Zuo. *Nature*, **594**, 33 (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03498-z
- [6] K. Fang, M. Kerr, R. Blandford, H. Fleischhack, E. Charles. *Phys. Rev. Lett.*, **129**, P071101 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.071101

- [7] H. Abe, S. Abe, V.A. Acciari, I. Agudo, T. Aniello, S. Ansoldi, L.A. Antonelli, A. Arbet Engels, C. Arcaro, M. Artero, K. Asano, D. Baack, A. Babić, A. Baquero, U. Barres de Almeida, J.A. Barrio, I. Batković, J. Baxter, J. Becerra González, W. Bednarek, E. Bernardini, M. Bernardos, A. Berti, J. Besenrieder, W. Bhattacharyya, C. Bigongiari⁴, A. Biland, O. Blanch, G. Bonnoli, Ž. Bošnjak, I. Burelli, G. Busetto, R. Carosi, M. Carretero-Castrillo, A.J. Castro-Tirado, G. Ceribella, Y. Chai, A. Chilingarian, S. Cikota, E. Colombo, J.L. Contreras, J. Cortina, S. Covino, G. D’Amico, V. D’Elia, P. Da Vela, F. Dazzi, A. De Angelis, B. De Lotto, A. Del Popolo, M. Delfino, J. Delgado, C. Delgado Mendez, D. Depaoli, F. Di Pierro, L. Di Venere, E. Do Souto Espiñeira, D. Dominis Prester, A. Donini, D. Dorner, M. Doro, D. Elsaesser, G. Emery, J. Escudero, V. Fallah Ramazani, L. Fariña, A. Fattorini, L. Font, C. Fruck, S. Fukami, Y. Fukazawa, R.J. García López, M. Garczarzyk, S. Gasparyan, M. Gaug, J.G. Giesbrecht Paiva, N. Giglietto, F. Giordano, P. Gliwny, N. Godinović, R. Grau, D. Green, J.G. Green, D. Hadasch, A. Hahn, T. Hassan, L. Heckmann, J. Herrera, D. Hrupec, M. Hütten, R. Imazawa, T. Inada, R. Iotov, K. Ishio, I. Jiménez Martínez, J. Jormanainen, D. Kerszberg, Y. Kobayashi, H. Kubo, J. Kushida, A. Lamastra, D. Lelas, F. Leone, E. Lindfors, L. Linhoff, S. Lombardi, F. Longo, R. López-Coto, M. López-Moya, A. López-Oramas, S. Loporchio, A. Lorini, E. Lyard, B. Machado de Oliveira Fraga, P. Majumdar, M. Makariev, G. Maneva, N. Mang, M. Manganaro, S. Mangano, K. Mannheim, M. Mariotti, M. Martínez, A. Mas Aguilar, D. Mazin, S. Menchiari, S. Mender, S. Mićanović, D. Miceli, T. Miener, J.M. Miranda, R. Mirzoyan, E. Molina, H.A. Mondal, A. Moralejo, D. Morcuende, V. Moreno, T. Nakamori, C. Nanci, L. Nava, V. Neustroev, M. Nievas Rosillo, C. Nigro, K. Nilsson, K. Nishijima, T. Njoh Ekoume, K. Noda, S. Nozaki, Y. Ohtani, T. Oka, A. Okumura, J. Otero-Santos, S. Paiano, M. Palatiello, D. Paneque, R. Paoletti, J.M. Paredes, L. Pavletić, M. Persic, M. Pihet, G. Pirola, F. Podobnik, P.G. Prada Moroni, E. Prandini, G. Principe, C. Priyadarshi, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, C. Righi, A. Rugliancich, N. Sahakyan, T. Saito, S. Sakurai, K. Satalecka, F.G. Saturni, B. Schleicher, K. Schmidt, F. Schmuckermaier, J.L. Schubert, T. Schweizer, J. Sitarek, V. Sliusar, D. Sobczynska, A. Spolon, A. Stammera, J. Striško, D. Strom, M. Strzys, Y. Suda, T. Surić, H. Tajima, M. Takahashi, R. Takeishi, F. Tavecchio, P. Temnikov, K. Terauchi, T. Terzić, M. Teshima, L. Tosti, S. Truzzi, A. Tutone, S. Ubach, J. van Scherpenberg, M. Vazquez Acosta, S. Ventura, V. Verguilov, I. Viale, C.F. Vigorito, V. Vitale, I. Vovk¹, R. Walter, M. Will, C. Wunderlich, T. Yamamoto, D. Zarić. *A&A*, **671**, A12 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202244931
- [8] Yi. Bao, R.-Yu. Liu, Ch. Ge, Ya. Chen. *MNRAS*, **528** (4), 5487 (2024). DOI: 10.1093/mnras/stae058
- [9] Ya.-J. Wang, M. Zha, Sh.-C. Hu, Ch.-D. Gao, J.-L. Zhang, Xi. Zhang. *JINST*, **17**, P12003 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/12/P12003
- [10] B.C. Самолига. *ЖТФ*, **93** (12), 1787 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56822.f215-23
- [11] T.P. Li, Y.Q. Ma. *Astrophys. J.*, **272**, 317 (1983). DOI: 10.1086/161295
- [12] В.В. Просин, И.И. Астапов, П.А. Безязыков, Artur Borodin, М. Брюкнер, Н.М. Буднев, А. Булан, А. Вайдянатан, А.Вишнеvский, П. Волчугов, Д. Воронин, А.Р. Гафаров, А.Ю. Гармаш, В.М. Гребенюк, О.А. Гресс, Т.И. Гресс, А.А. Гринюк, О.Г. Гришин, А.Н. Дячок, Д.П. Жу-ров, А.В. Загородников, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, В.В. Киндин, С.Н. Кирюхин, В.А. Кожин, Р.П. Кок-улин, К.Г. Компаниец, Е.Е. Коростелева, Е.А. Кравченко, А.П. Крюков, Л.А. Кузьмичев, А. Кьявасса, М. Лав-рова, А.А. Лагутин, Ю. Лемешев, Б.К. Лубсандоржи-ев, Н.Б. Лубсандоржиев, Р.Р. Миргазов, Р. Мирзоян, Р.Д. Монхоев, Э.А. Осипова, А. Пан, М.И. Панасюк, Л.В. Паньков, А.Л. Пахоруков, А.А. Петрухин, В.А. Поле-щук, М. Попеску, Е.Г. Попова, А. Порелли, Е.Б. Постни-ков, В.С. Птускин, А.А. Пушнин, Р.И. Райкин, Г.И. Рубцов, Е.В. Рябов, Я.И. Сагань, В.С. Самолига, Л.Г. Свешнико-ва, А.Ю. Сидоренков, А.А. Силаев, А.А. Силаев (мл.), А.В. Скурихин, М. Слунечка, А.В. Соколов, Я. Суворкин, В.А. Таболенко, А. Танаев, Б.А. Таращанский, М. Терно-вой, Л.Г. Ткачев, М. Тлужиконт, Н. Ушаков, Д. Хорнс, И.И. Яшин. *Изв. РАН, сер. физ.*, **85** (4), 525 (2021). DOI: 10.31857/S036767652104030X
- [13] A.L. Ivanova, I. Astapov, P. Bezzyazekov, E. Bonvech, A. Borodin, N. Budnev, A. Bulan, D. Chernov, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, M. Iliushin, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, M. Lavrova, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, D. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev (junior), A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. *Phys. Atom. Nucl.*, **86** (4), 478 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823040221