УДК 530.145.84

ПРОТОН-ПРОТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ В ЛАБОРАТОРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ, КАК ИСТОЧНИК СПЕКТРОВ ПРОТОНОВ, НЕЙТРИНО И ГАММА-ЧАСТИЦ В АСТРОФИЗИКЕ

О. И. Пискунова

Замечено подобие космических спектров протонов, нейтрино и гамма-фотонов в области сверхвысоких энергий. Спектры рождения протонов при протон-протонном столкновениях на коллайдерах имеют особенности, усиливающиеся с ростом энергии взаимодействия. При пересчете смоделированного ускорительного спектра из системы центра масс в лабораторную систему координат на месте центральной области быстрот появляется так называемое колено. В конце спектров космических нейтрино и гамма, которые являются продуктами распада вторичных тяжелых гиперонов и нейтральных пионов, имеется горб, что никак не ожидалось в бытующей сейчас модели ускорения протонов в космосе. Предполагая, что первичные протоны уже вылетают из источника с ультравысокой максимальной энергией и там же при разрыве кварк-глюонной струны образуются вторичные частицы, становится очевидным, что повышения в спектрах p, ν и γ есть результат дифракционного трехпомеронного рассеяния протона. Из энергии колена в протонном спектре получена оценка начальной энергии протонов вблизи космического источника $E_0 \sim 10^{12}$ GeV.

Ключевые слова: спектр образования протонов на высокоэнергетических коллайдерах, струнная кварк-глюонная модель, трехпомеронный пик рассеяния, особенности спектров нейтрино и гамма-фотонов в астрофизике, начальная энергия протонов из космических источников.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: piskunovaoi@lebedev.ru.

Введение. Целью этой работы является сравнение формы спектра протонов, рождающихся в протонных столкновениях на ускорителях и форм спектров частиц сверхвысоких энергий в космическом пространстве [1] . Как это было показано в моей предыдущей статье [2] на основе данных LHC при энергии 7 ТэВ, излом в спектре космических частиц не может возникнуть из-за драматических изменений в кинематике взаимодействий, поскольку выяснилось, что характеристики барионных взаимодействий при этой энергии существенно не меняются. Здесь мы будем исследовать, какую форму будет иметь спектр космических частиц в лабораторной системе координат после одного первого взаимодействия протона сверхвысокой энергии, излученного источником космических лучей.

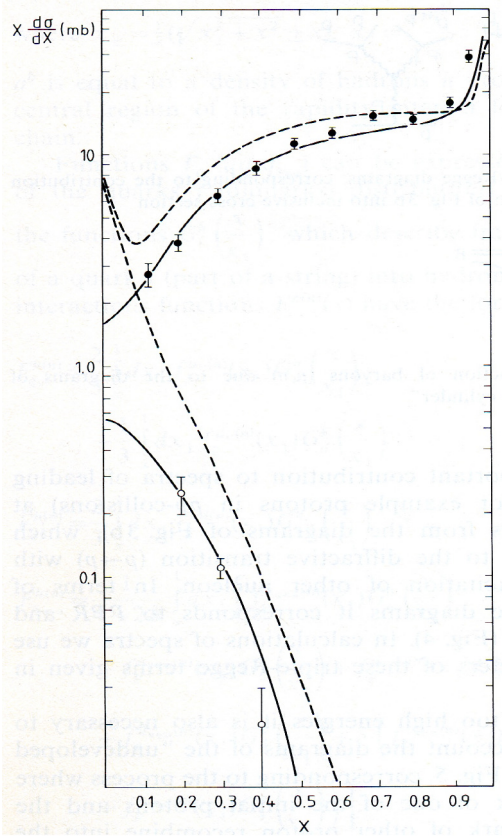


Рис. 1: *МКГС спектры протонов в p-p столкновениях* [3] *и экспериментальные данные при энергии* $p_{II} = 175$ *ГэВ/с* [4]*: протоны – черные кружки, антипротоны – белые. Предсказания модели для энергии* $\sqrt{s} = 540$ *ГэВ показаны сплошной линией.*

Спектр протонов в МКГС при энергии протонов 540 *ГэВ.* Ускорительный протонный спектр был рассчитан в Модели Кварк-Глюонных Струн (МКГС) в работе [3], см.

рис. 1, и описывает данные ускорительных экспериментов [4], доступных на то время. Также предсказан спектр для энергии взаимодействия протонов $\sqrt{s} = 540$ ГэВ.

Переменные y и x_F (быстрота и доля энергии, которую уносит родившийся протон) определены в системе центра масс и характерны для всех коллайдерных экспериментов. В центральной области быстрот $y = 0$ и $x_F = 0$ наблюдается рост спектра с энергией за счет образования протон-антипротонных пар. В области фрагментации протона $x_F \to 1$ виден трехпомеронный пик, предсказанный в статье [5], который неизменно возникает как усиленная дифракционная поправка в спектре.

Переход в лабораторную систему координат. Перевод спектров из системы центра масс в лабораторную систему рассчитывался мною ранее на примере подобия спектров фотонов от космических источников и ускорительного спектра рождения нейтральных пионов [6]. Спектр в лабораторной системе отличается тем, что все быстроты положительны, то есть нам необходимо сдвинуть вправо ускорительный спектр по быстротам на величину $y_{\max} = \ln(\sqrt{s}/(2m_p))$. Затем, учитывая соотношение между спектром по быстротам и спектром по x_F: $dN/dy_{\rm lab} = x_F \cdot (dN/dx_F)$, мы приходим к следующей форме лабораторного спектра по энергии $E_{\rm lab}$: $dN/dE_{\rm lab} = E_{\rm lab}^{-1} \cdot dN/dy_{\rm lab}$. Как видно, спектр в лабораторной системе приобретает степенной вид.

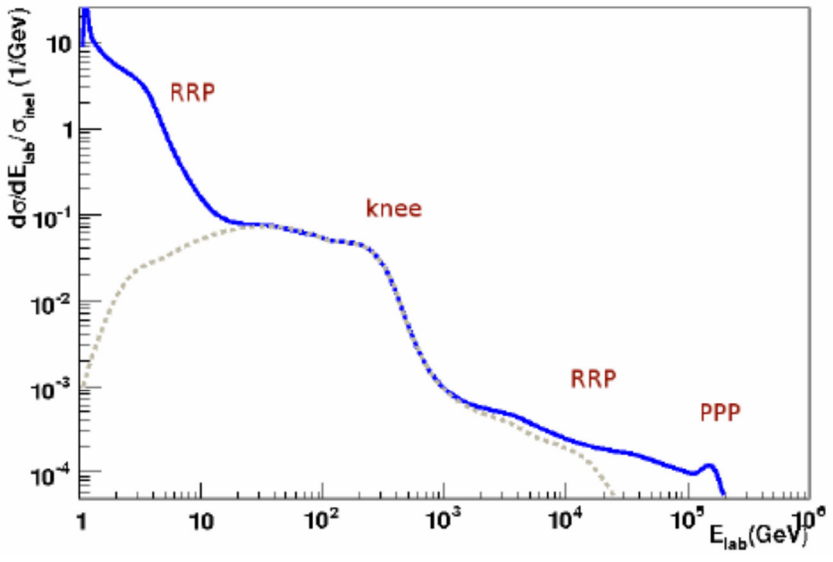


Рис. 2: *Спектр протонов при* $\sqrt{s} = 540$ *ГэВ, пересчитанный для лабораторной системы координат; спектр антипротонов приведен пунктиром.*

Теперь рассмотрим результирующий спектр космических протонов, см. рис. 2. Можно заметить, что “колено” представляет собой середину наклонившегося “колокола”,

что в системе центра масс отличает область центральных быстрот. А повышение вероятности рождения протонов на конце спектра есть не что иное как трехпомеронный вклад от дифракции первичного протона [5]. Трехпомеронный пик измерен на современных коллайдерах, и в том, что он должен существовать, сомнений нет. Таким образом, особенности квантового описания взаимодействия нуклонов приобретают значение для космических процессов, но первое взаимодействие первичного протона происходит сразу после выброса материи из источника. Некоторые идеи относительно формирования Темной Материи в Черных Дырах изложены в [7–9].

Заметим, что теоретический спектр рассчитывался при энергии ускорителя 540 ГэВ, что соответствует невысокой лабораторной энергии протона $E_{\rm lab} = 1.6 \cdot 10^5$ ГэВ, поэтому полученный спектр нельзя сравнивать с космическим в реальных единицах энергии. Важно то, что энергию первичных протонов можно оценить по положению "колена" в реальном спектре космических протонов $E_{\rm knee} = 4 \cdot 10^6$ ГэВ. Таким образом, энергия первичного протона из источника должна быть приблизительно равна $E_0 \sim 10^{12}$ ГэВ. Важно отметить, что при рождении протонов в космическом источнике частиц при испускании джета нельзя сделать какой-либо вывод об отсутствии или наличии рассеяния протона на реликтовых фотонах (ГЗК эффект), т. к. спектр лидирующих протонов, образующийся в мощном КХД процессе, вблизи начальной энергии $E_0 \sim 10^{21}$ эВ дает дифракционный пик (см. [2]) с резким падением на конце. При этом излучение нейтрино и гамма-фотонов сверхвысокой энергии в таком процессе всегда ассоциируется с определенным источником на небе.

Спектры вторичных частиц: нейтрино и гамма-фотонов. Гамма-фотоны и нейтрино образуются во взаимодействии протона через распад промежуточных пионов и тяжелых барионов. Форма их спектров должна повторять протонные особенности. И, как мы видим, в спектре фотонов есть дополнительный пик при самых высоких энергиях [10]. Нейтринный спектр плохо измерен при максимальных энергиях, но относительно недавно появился обзор измерений IceCube коллаборации, где приведены спектры протонов, нейтрино и гамма высоких энергий, похожие друг на друга в области лидирующих частиц [11]. Описанные особенности протонного спектра проявляются также при анализе стратосферного взаимодействия [12], что позволило сделать предположение о столкновении частицы сильносвязанной Темной Материи с ядром атома атмосферы.

Заключение. Из всего вышесказанного можно сделать выводы:

1. Протоны (а также антипротоны) играют ключевую роль в образовании спектров космических частиц в источниках космических лучей, они формируют спектры нейтрино, фотонов, космических протонов при сверхвысоких энергиях, а также, могу предположить, и позитронов.

2. Первичное взаимодействие протона приводит к укручению спектров вторичных частиц в лабораторной системе пропорционально E^{-1}.

3. Спектры космических протонов, нейтрино и гамма-фотонов имеют одинаковый пик при самой высокой энергии, обусловленный трехпомеронной особенностью протонного спектра.

4. Положение излома в спектре космических протонов говорит о том, что они образовались во взаимодействии протона сверхвысокой энергии $E_0 \sim 10^{12}$ ГэВ.

Таким образом, исследование приводит к появлению альтернативной точки зрения на причину формирования спектров космических лучей: протоны не ускоряются до энергии 10^{22} эВ случайными магнитными полями в космосе, а вылетают из сгустка темной материи, выброшенной из Сверхмассивной Черной Дыры, уже имея определенную долю энергии за счет колоссальной скрытой массы Барионной Темной Материи (максимальная энергия протона или антипротона, надо полагать, может доходить до $M_{\text{Планка}}$). Высвобождаясь из тороидальной структуры Темной Материи, быстрые протоны (или антипротоны) образуют кварк-глюонную струну, как в обычном взаимодействии высокой энергии. Фрагментация струны приводит к множественному рождению пионов и тяжелых гиперонов, которые и формируют спектры нейтрино и гамма-фотонов. Спектры этих частиц являются производными от спектра протонов, возникающих при вылете первичного протона ультравысокой энергии из источника космических лучей, поэтому они повторяют особенности протонного спектра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] M. Tanabashi and Particle Data Group, Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001.

[2] O. I. Piskounova, Int. Jou. of Mod. Phys. A **35**(13), 2050067 (2020). arXiv:1706.07648, https://doi.org/10.1142/S0217751X20500670.

[3] A. Kaidalov, O. Piskunova, Z. Phys. C **30**, 145 (1986). https://doi.org/10.1007/BF01560688.

[4] A. E. Brenner, D. C. Carey, J. E. Elias, E118 Collaboration Fermilab, Phys. Rev. D **26**(7), 1497 (1982). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.26.1497.
[5] V. N. Gribov, I. Ya. Pomeranchuk, K. A. Ter-Martirosyan, Phys. Lett. **9**, 269 (1964).
[6] О. Пискунова, Ядерная физика **51**, 1332 (1990). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.023022.
[7] O. I. Piskounova, Baryon Charge asymmetry at LHC: String Junction transfer in proton reactions and SJ torus as DM candidate, arXiv: 1812.02691.
[8] O. I. Piskounova, PHEP, 2025, arXiv: 2211.07649, https://doi.org/10.31526/PHEP.2025.02.
[9] O. I. Piskounova, Journal of Physics: Conference Series **3027**, 012019 (2025). arXiv: 2309.14933, https://doi.org/10.1088/1742-6596/3027/1/012019.
[10] F. A. Aharonian, *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation: Crucial Window on the Extreme Universe* (World Scientific Publishing, 2004). – P. 512 (book cover), https://doi.org/10.1142/4657.
[11] M. S. Muzio, G. R. Farrar, M. Unger in Ice Cube Collaboration, Phys. Rev. D **105**, 023022 (2022). arXiv: 2108.05512.
[12] O. I. Piskounova, K. A. Kotelnikov, Proceedings of ICHEP, PoS ICHEP22, 911 (2022). arXiv: 1907.00176, https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00176.

Поступила в редакцию 27 марта 2026 г.
После доработки 9 июня 2026 г.
Принята к публикации 10 июня 2026 г.