

## СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ МАТЕРИЯ И ГАЛАКТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

С. Б. Шаулов, Е. А. Куприянова, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов

*Детальное изучение стволов широких атмосферных ливней при энергиях 1–100 ПэВ в гибридном эксперименте с рентгеноэмульсионной камерой позволяет выдвинуть гипотезу о неядерной природе космических лучей в области колена. Рассмотрение в качестве такой компоненты стабильных заряженных частиц странной кварковой материи (странглетов) объясняет происхождение колена в спектре ШАЛ и позволяет сформулировать альтернативную галактическую модель происхождения спектра космических лучей, включая объяснение его обреза. Модель ограничивает энергию космических лучей значениями  $E_0 \approx 10^{17} - 10^{18}$  эВ.*

**Ключевые слова:** спектр космических лучей, широкие атмосферные ливни, странглеты.

Модель космических лучей (КЛ), предложенная в этой статье, возникла как результат экспериментального изучения состава КЛ на Тянь–Шане (3330 м.н.у.м.) с помощью гибридной установки, объединявшей рентгеноэмульсионную камеру с установкой по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) [1]. Целью этих исследований являлось желание добиться некоторой ясности в причинах излома (колена) в спектре КЛ при энергиях 3–4 ПэВ [2]. По поводу природы колена приводятся противоречивые мнения. При изучении электромагнитной компоненты ШАЛ [3] утверждается, что колена возникает в связи с изломом спектра наиболее легкой ядерной компоненты КЛ – протонов. Тогда как из данных о стволах ШАЛ скорее следует, что его причина в изломе наиболее тяжелой компоненты – ядер группы железа [4]. С точки зрения теории ускорения КЛ на ударных волнах остатков сверхновых оба варианта имеют обоснование, предложенное в работах [5, 6], поэтому требуется экспериментальное разрешение проблемы.

В работах [1, 7, 8, 9] показано, что в области колена наблюдаются два новых эффекта: нарушение скейлинга в спектрах вторичных адронов, приводящее к увеличению их энергии (проникающая компонента), и избыток мюонов в ШАЛ, образованных протонами. Объяснение этим эффектам лежит в астрофизической области [10]. Однако в рамках модели ядерного состава КЛ возникает очевидное противоречие между этими двумя результатами, поэтому в указанных работах была предложена гипотеза неядерного происхождения КЛ, образующих колено.

Популярность представлений об исключительно ядерном составе КЛ основана на требовании стабильности частиц КЛ и результатах экспериментов в открытом космосе на спутниках, выполненных при энергиях ниже колена. В то же время недавние теоретические исследования кварковых структур показывают, что ситуация в области КЛ более сложная. Виттен установил, что в первую минуту существования Вселенная разделилась на две фазы – ядерную и кварковую [11]. Поэтому наряду с ядрами в КЛ могут присутствовать стабильные частицы странной кварковой материи (СКМ), представляющие собой кварковые мешки  $u$ ,  $d$ ,  $s$  кварков, которые можно рассматривать как тяжелые квази-ядра.

В данной статье предложена СКМ модель, основанная на возможном присутствии в КЛ квази-ядер и следствия такой модели. Спектр космических лучей измерен в широком диапазоне энергий  $E_0 = 10^{10} - 10^{20}$  эВ. В традиционных моделях считается, что источниками КЛ являются сверхновые, поэтому КЛ состоят в основном из пяти групп ядер от протонов до железа. В экспериментальном спектре КЛ присутствуют две особые области, которые привлекают наибольшее внимание. Это излом спектра, так называемое колено, при энергиях  $E_0 \approx 3$  ПэВ и обрезание спектра при энергиях выше  $10^{19}$  эВ (лодыжка).

Колено обычно объясняют предельной энергией ускорения. Максимальная энергия ускорения ядер на ударных волнах остатков сверхновых зависит от магнитной жесткости  $R \approx E_0/Z$ , где  $E_0$  – энергия и  $Z$  – электрический заряд ядра. При этих данных излом спектра можно объяснять либо изломом наиболее легкой компоненты КЛ (протонов), либо наиболее тяжелой (Fe). В первом случае магнитная жесткость максимальной энергии ускорения ядер  $R_{\max} \approx 3$  ПВ, во втором  $R_{\max} \approx 0.1$  ПВ. Однако при  $R_{\max} \approx 0.1$  ПВ галактический спектр ядер должен заканчиваться при энергиях порядка 3 ПэВ, что в рамках ядерной модели не позволяет объяснить спектр КЛ при больших энергиях. В случае  $R_{\max} \approx 3$  ПВ галактический ядерный спектр может быть продлен до энергий  $E_0 = 10^{17} - 10^{18}$  эВ. Для объяснения спектра КЛ в области ультравысоких энергий

(КЛУВЭ)  $E_0 = 10^{18} - 10^{20}$  эВ предлагается гипотеза их внегалактического происхождения. Обрезание спектра КЛ при  $E_0 = 10^{20}$  эВ объясняется потерями энергии протонов и ядер на реликтовом микроволновом излучении в межгалактическом пространстве (ГЗК-эффект) [12, 13].

Введение внегалактической гипотезы является практически единственным выходом из создавшегося положения в ядерной модели КЛУВЭ в связи с тем, что в результате многолетних усилий различных коллективов не удалось обнаружить в нашей Галактике процессы, позволяющие ускорять КЛ до энергий выше  $10^{18}$  эВ. На этом основании эти проблемы были перенесены в метагалактику. Основная сложность такой модели заключается в удивительно хорошем согласии интенсивности галактической и внегалактической компонент при энергиях  $\sim 10^{18}$  эВ. Дифференциальный энергетический спектр КЛ приведен на рис. 1.

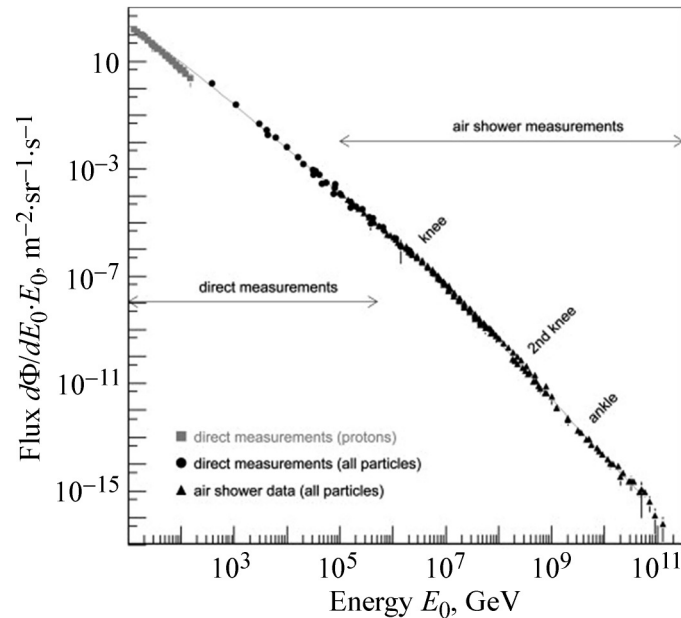


Рис. 1: Энергетический спектр всех частиц [14].

Спектр имеет гладкий степенной характер в области объединения галактической и внегалактической компонент. Такое согласие надежного объяснения не имеет. Расстояние от Земли до ближайших галактик местной группы составляет более  $5 \cdot 10^7$  световых лет. При этом телесный угол, под которым видна оттуда Земля, имеет значение  $\Omega < 10^{-17}$  рад. Это практически исключает из рассмотрения источники с изотропным излучением КЛ, т. к. их интенсивность должна, условно говоря, в  $10^{18}$  раз превышать по интенсивности источники нашей галактики и при этом невероятным образом их излу-

чение в окрестности Земли совпадает по интенсивности с галактической компонентой КЛ внутри галактики Млечный Путь. Ситуация несколько меняется в случае блазаров и квазаров, однако и для них совпадение интенсивности является маловероятным событием.

В данной статье предлагается альтернатива гипотезе внегалактического происхождения КЛУВЭ. Показано, что если в КЛ присутствует неядерная компонента, состоящая из частиц странной кварковой материи (СКМ), так называемых странглетов, то спектр КЛУВЭ отсутствует и, что наиболее важно, спектр КЛ полностью можно объяснить галактическим происхождением.

Изучение особенностей спектра КЛ сводится к изучению состава КЛ в этих областях. Основная информация о типе первичной частицы содержится в характеристиках вторичных частиц вблизи оси ШАЛ, т.е. в области стволов ШАЛ. Уникальную возможность изучения стволов ШАЛ представляют гибридные эксперименты с применением рентгеноэмульсионных камер (РЭК). Пространственное разрешение РЭК (100 мкм) позволяет регистрировать отдельные адроны стволов ШАЛ и определять их индивидуальную энергию. Эта информация является наиболее полной и по сути, исчерпывающей в методе ШАЛ [15]. В высокогорном эксперименте на Тибете [4] приводятся данные о спектре протонов с изломом при энергии  $\sim 100$  ТэВ, что соответствует магнитной жесткости излома в спектре ядер  $R \approx 0.1$  ПВ.

Кроме того в области выше колена в спектре ШАЛ при энергиях 1–100 ПэВ наблюдается ряд аномальных эффектов, таких как увеличение длины поглощения адронных ливней, нарушение скейлинга в спектрах вторичных адронов, избыток мюонов в ШАЛ с гамма-адронными семействами, нарушение изотопической инвариантности во вторичных адронах, появление гало и выстроенность энергетических центров вдоль прямой, наблюдаемые в рентгеноэмульсионных камерах (РЭК). Анализ этих данных в работе [16] показывает, что они противоречат ядерным моделям, и приходится предполагать, что колено в спектре КЛ формируется неядерной компонентой КЛ.

Существенным моментом в такой интерпретации является проверка отсутствия противоречия с ускорительными данными. По данным коллайдеров LHC и RHIC в указанной области энергий должен наблюдаться скейлинг во взаимодействии протонов и ядер, поэтому объяснение аномальных эффектов в КЛ ядерными взаимодействиями практически исключено. Остается вариант неядерной компоненты. Гипотетическая неядерная компонента КЛ должна быть стабильной, поэтому практически единственный вариант ее состава – это положительно заряженные частицы странной кварковой материи

при барионных числах  $A \geq 10^3$ , так называемые странглеты [11]. Модель странглетов меняет как состав, так и характеристики взаимодействия КЛ. Причем получение странглетов и наблюдение характеристик их взаимодействия на ускорителях невозможно по простой причине: в силу своей стабильности, странглеты состоят из сотен  $u$ ,  $d$ ,  $s$  кварков. Вероятность образования  $s$  кварка при взаимодействии  $u$ ,  $d$  кварков (ядра)  $P = 0.2$ , поэтому вероятность образования сотен  $s$  кварков в одном взаимодействии практически равна нулю ( $P < 10^{-100}$ ).

Таким образом, мы приходим к модели спектра КЛ, в которой до энергий 3 ПэВ присутствуют ядра, а при больших энергиях странглеты. Под странглетами мы понимаем стабильные, положительно заряженные тяжелые адроны СКМ с барионными числами  $A \approx 10^3 - 10^8$ , состоящие из  $u$ ,  $d$ ,  $s$  кварков. Виттен показал, что частицы СКМ могут иметь энергию на барион меньше, чем ядра и тогда именно они являются основным состоянием КХД [11]. Исследованию свойств СКМ было посвящено много работ (см. библиографию в [17]), где было показано, что она может быть абсолютно стабильной при барионных числах в диапазоне  $A \approx 10^3 - 10^7$ , т.е. вплоть до кварковой звезды. Странглеты в КЛ образуются при столкновении кварковых звезд в двойных системах. В области  $A = 10^3 - 10^7$  положительный заряд странглетов увеличивается от  $Z = 30$  до нескольких тысяч. Радиус странглета так же, как и ядра определяется выражением  $R_s = R_0 \cdot A^{1/3}$ , где  $R_0 \approx 1$  Фм на 15% меньше ядерного. Основной размер странглетов составляет 5–200 Фм, что меньше комптоновской длины волны электрона ( $\lambda_e = 386$  Фм). Поэтому странглеты напоминают ядра, окруженные электронами с одним отличием, отношение  $Z/A$  для них намного меньше, чем для ядер. Оценки показывают, что при барионных числах  $A = 10^6$  электрический заряд  $Z$  достигает значений  $Z \approx 1000$  с облаком из 1000 электронов, расположенных очень близко к странглету. При  $A > 10^7$  размеры странглета превышают комптоновскую длину волны  $\lambda_e$ . Электроны при этом могут проникать внутрь и нейтрализовать заряд странглета. Поэтому с ростом  $A$  электрический заряд странглетов  $Z$  сначала увеличивается до нескольких тысяч, а затем при  $A \approx 10^7 - 10^8$  уменьшается до нуля. Используя оценки характеристик странглетов, можно сформулировать модель спектра КЛ в предположении, что они состоят из ядер и квазиядер (странглетов).

В СКМ модели предполагается, что ускорение ядер и странглетов происходит одинаковым образом на ударных волнах остатков сверхновых. Максимальная энергия ускорения определяется магнитной жесткостью  $R \approx 0.1$  ПВ. Ядерные спектры ограничены энергиями 3 ПэВ (Fe). Колено образуется странглетами при электрическом заряде

$Z \geq 30$ , незначительно отличающемся от заряда Fe. Заряд странглетов  $Z$  может достигать значений в тысячи, поэтому их максимальная энергия может составлять более  $E = R_{\max} \cdot Z \approx 10^{14} \cdot 10^3 = 10^{17}$  эВ. Казалось бы, выигрыш по сравнению с ядерной моделью отсутствует, где постулируется  $R_{\max} = 3$  ПВ и галактический ядерный спектр продлевается до тех же энергий. Однако взаимодействие странглетов существенно отличается от ядерного, что может приводить к отличию характеристик каскада в атмосфере.

В системе отсчета, связанной со странглетом, ядро воздуха, пролетая через него, передает кваркам примерно половину своей энергии. Дальнейший переход странглета в равновесие происходит в результате излучения этой энергии, но для этого кварки должны сформировать бесцветные объекты. Это либо фотоны, либо адроны. При энергиях ниже массы пиона (140 МэВ) излучаются только фотоны, при больших энергиях могут излучаться и адроны, и фотоны. Минимальная энергия фотонов определяется размером странглета из соотношения  $\lambda_e = 2R$ . Используя распределение Больцмана можно грубо оценить, что вероятность излучения фотонов с энергиями 10–140 МэВ в три раза больше чем адронов и фотонов больших энергий. Поэтому, в отличие от ядерных взаимодействий, странглеты более интенсивно излучают электромагнитную компоненту и число электронов ( $N_e$ ) в ливне с данной энергией для странглетов может быть существенно больше чем для ядер. Основным предположением в данной модели является то, что странглеты с максимальными барионными числами  $10^7 - 10^8$  при энергии  $E_0 \approx 10^{17} - 10^{18}$  эВ способны генерировать ШАЛ с  $N_e \approx 10^{10} - 10^{11}$ , соответствующих по ядерной модели максимальным энергиям КЛ порядка  $10^{20}$  эВ. Предположение не кажется фантастическим, учитывая огромное геометрическое сечение взаимодействия странглетов, достигающее значений в тысячи барн. Кроме того, указанное предположение допускает проверку. Для этого надо методом М.-К. рассчитать ШАЛ, генерируемый в атмосфере странглетами.

Таким образом в СКМ модели КЛУВЭ отсутствуют, а спектр КЛ достигает значений  $N_e \approx 10^{11}$  за счет более интенсивной генерации электромагнитной компоненты ШАЛ. При больших значениях  $N_e$  спектр КЛ обрывается из-за того, что для странглетов с барионными числами  $A \geq 10^8$  значение их электрического заряда  $Z = 0$  и они перестают ускоряться в космическом пространстве Галактики.

Существует по крайней мере два вопроса, на которые СКМ модель должна иметь ответ. Важный для модели момент связан с вопросом почему странглеты отсутствуют при энергиях ниже колена? Ответ может быть найден в рамках модели Ерлыкина и

Волфиндейла близкого одиночного источника [18]. Если таким близким источником является странная кварковая звезда, то, как это следует из расчетов [18], ее излучение может иметь спектр в виде колена.

Другой вопрос возникает из-за обнаружения в обсерватории Пьера Оже анизотропии КЛ [19], которая рассматривается как доказательство наличия внегалактической компоненты КЛ. Однако близких источников в виде кварковых звезд может быть не один и они могут находиться в области гало галактики. Если они отличаются энергией излучения, то это может приводить к появлению анизотропии. При этом надо учитывать, что сами странные звезды могут быть не видны. За время существования они могли остыть до температуры реликтового излучения и, как отмечал Виттен [11], формировать темное вещество. В этом случае, учитывая методику идентификации источника лишь по направлению, кажущееся направление анизотропии на источник в метагалактике реально может быть направлением на невидимый источник в нашей галактике.

Экспериментальные исследования на ТШВНС ФИАН привели к гипотезе о возможном формировании колена в спектре ШАЛ стабильными частицами странной кварковой материи – странглетами. Виттен обосновал возможность существования странных кварковых звезд, являющихся источниками странглетов. Существование стабильных странглетов в КЛ позволило сформулировать СКМ модель, в которой все КЛ имеют галактическое происхождение. В этом случае ядра и странглеты (квазидра), имеют одинаковый механизм ускорения на ударных волнах. Обрезание спектра КЛ при  $N_e \approx 10^{10} - 10^{11}$  объясняется уменьшением их электрического заряда до нуля. Энергия КЛ в рамках СКМ модели ограничена значениями  $E_0 \approx 10^{17} - 10^{18}$  эВ, т.е. КЛУВЭ отсутствуют в спектре КЛ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. B. Shaulov, Evidences for Strangelet Presence in Primary Cosmic Rays, APH N.S., Heavy Ion Physics **4**, 403 (1996).
- [2] Г. В. Куликов, Г. Б. Христиансен, ЖЭТФ **35**, 3(9), 635 (1958).
- [3] A. Chiavassa, W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez et al., Summary of the main results of the KASCADE and KASCADE-Grande experiments, EPJ Web of Conferences 208, 03002 (2019) ISVHECRI 2018, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920803002>.

- [4] Tibet AS $\gamma$  Collaboration, M. Amenomori a, S. Ayabe b, D. Chen et al., Physics Letters B **632**, 58 (2006).
- [5] Е. Г. Бережко, В. К. Елшин, Л. Т. Ксенофонтов, ЖЭТФ **109**(1), 3 (1996).
- [6] E. G. Berezhko, H. J. Volk, The Astrophysical Journal, 661: L175–L178, 2007 June 1; DOI: 10.1086/518737; arXiv:0704.1715 [astro-ph].
- [7] S. B. Shaulov, V. A. Ryabov, A. L. Shepetov, et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **48**(125202), 28 (2021). ArXiv 2111.09929.
- [8] A. L. Shepetov, S. B. Shaulov, V. A. Ryabov, et al., Astroparticle Physics **133**, 102642, (2021). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2021.102642.
- [9] А. Л. Щепетов, К. А. Аргынова, Л. И. Вильданова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(1), 28 (2023). <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=49881655>.
- [10] А. Д. Ерлыкин, С. К. Мачавариани, Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(2), 3 (2021). <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=48112160>.
- [11] Edward Witten, Phys. Rev. D **30**, 2 (1984).
- [12] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
- [13] Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма ЖЭТФ **4**, 114 (1966).
- [14] Johannes Blumer, Ralph Engel, and Jorg R. Horandel, Cosmic Rays from the Knee to the Highest Energies, arXiv:0904.0725v1 [astro-ph.HE] 4 Apr 2009.
- [15] S. B. Shaulov, S. P. Besshapov, K. V. Cherdintseva, EC+EAS data, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **196**, 191 (2009).
- [16] С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов и др., Письма в ЖЭТФ **116**(1), 3 (2022).
- [17] XIA Cheng Jun, CHEN ShiWu, PENG GuangXiong, SCIENCE CHINA, Physics, Mechanics & Astronomy, July 2014 Vol. 57 No. 7: 1304–1310. DOI: 10.1007/s11433-014-5452-y.
- [18] A. D. Erlykin, A. W. Wolfendale, Astroparticle Physics **23**(1), p. 1-9.
- [19] The Pierre Auger Collaboration, A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al., and F. Zuccarello, Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \cdot 10^{18}$ , **357**, Issue 6357, Sep 2017.

Поступила в редакцию 15 июня 2023 г.

После доработки 5 июля 2023 г.

Принята к публикации 6 июля 2023 г.