

## ТЯЖЕЛЫЕ ЧАСТИЦЫ НА LHC И В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

*А. А. Петрухин*\*, *А. Г. Богданов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Рассматриваются результаты поиска и наблюдений тяжелых частиц или их проявлений в виде необычных явлений, зарегистрированных в различных экспериментах на установках LHC. Аналогичные аномальные события, при сопоставимых энергиях в системе центра масс, были зарегистрированы в космических лучах несколько десятилетий назад. Для объяснения всех наблюдаемых необычных явлений и процессов с единой точки зрения была предложена модель образования сгустков кварк-глюонной материи с большим орбитальным моментом, который затрудняет вылет легких кварков, но не препятствует вылету тяжелых, в том числе топ-кварков. Рассматриваются возможности проверки данной модели в экспериментах на LHC.

Results of the search and observations of heavy particles or their manifestations as unusual phenomena, detected in various LHC experiments, are considered. Similar anomalous events at the same energies in the center-of-mass system were detected in cosmic rays several decades ago. For explanation of all observed unusual phenomena and processes from a single point of view, the model of production of quark–gluon matter blobs with a large orbital momentum, which suppresses light quark escape but does not prevent escape of heavy particles including top-quarks, was proposed. Possibilities of the check of this model in LHC experiments are considered.

PACS: 13.85.Tr

### ВВЕДЕНИЕ

После обнаружения  $W$ - и  $Z$ -бозонов, а также бозона Хиггса с массами  $\sim 100$  ГэВ поиск новых тяжелых частиц сместился в ТэВ-ную область масс. Особые надежды возлагаются на эксперименты, проводимые на LHC. Однако ТэВ-ная область энергий (в системе центра масс) давно изучается в космических лучах при энергии первичных частиц выше 1 ПэВ. Естественно, ожидать появления стабильных частиц с такими массами не приходится, если, конечно, исключить из рассмотрения возможность существования частиц темной материи с такими массами. Скорее всего, частицы с ТэВ-ными массами

---

\*E-mail: AAPetrukhin@mephi.ru

будут представлять собой резонансные состояния материи, хотя и, возможно, с некоторыми необычными свойствами. Идентификация таких частиц проводится по продуктам их распада с использованием кинематических закономерностей. Особый интерес среди вторичных частиц представляют мюоны, которые благодаря своей проникающей способности легко идентифицируются и являются отличной сигнатурой. При этом в коллайдерных экспериментах мюоны имеют энергию, определяемую кинематикой распада; например, при распаде  $W$ -бозона энергия мюона составляет около 40 ГэВ. В космических лучах из-за закона сохранения импульса мюоны приобретают дополнительную энергию, которая может составлять десятки и сотни ТэВ. Такие мюоны можно достаточно легко выделить благодаря линейному росту их потерь с увеличением энергии.

В данной работе представлен краткий обзор экспериментов, проведенных на LHC и в космических лучах, в которых получены свидетельства образования новых состояний материи.

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА LHC И В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Среди последних результатов, полученных на LHC, можно отметить два, связанных с возможным образованием тяжелых частиц. Первый — обнаружение частицы с массой  $\sim 750$  ГэВ по распаду на два  $\gamma$ -кванта [1, 2]. Этот результат обсуждался во многих статьях и не требует дополнительных комментариев. Второй — дибозонный резонанс с массой 2 ТэВ, полученный при изучении парного рождения двух  $W$ -бозонов [3]. Хотя этот результат не нашел окончательного подтверждения, тем не менее оба результата хорошо иллюстрируют методы поиска тяжелых частиц в коллайдерных экспериментах.

При изучении космических лучей в области энергий выше  $10^{15}$  эВ получен целый ряд необычных результатов, объяснение которых возможно в рамках образования тяжелых короткоживущих частиц. В первую очередь, это явление выстроенности вторичных частиц [4], которое может быть объяснено распадом некоторого состояния материи с большим спиновым или орбитальным моментом. Другое явление — проникающие каскады, слабо убывающие при прохождении 0,5 м свинца. Для их объяснения требуются вторичные проникающие частицы, которые могут обеспечить постоянную подпитку развивающегося каскада. Еще одно необычное явление — образование так называемых кентавров, т. е. событий, в которых явно нарушается изотопическая инвариантность (много каскадов от заряженных вторичных частиц и существенно меньше от нейтральных [4]), что невозможно в сильных взаимодействиях, но вполне допустимо в слабых взаимодействиях при распаде некоторого резонансного состояния материи.

Целый ряд необычных явлений зарегистрирован в широких атмосферных ливнях (ШАЛ); наиболее серьезным и трудно объяснимым является избыток мюонов, которые образуются при развитии ШАЛ в атмосфере. Этот избыток зарегистрирован на ускорительных детекторах [5–7] и на установках для исследования космических лучей [8, 9]. В работе [8] приведены результаты измерений зависимости избытка мюонов от энергии и показано его увеличение с ростом энергии.

## 2. ОБЪЯСНЕНИЕ ВСЕХ НЕОБЫЧНЫХ СОБЫТИЙ С ЕДИНОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Происхождение необычных событий, зарегистрированных в экспериментах на ЛНС и в космических лучах, может быть объяснено в рамках различных подходов. Но, чтобы объяснить всю совокупность наблюдаемых явлений, необходима новая модель взаимодействия, удовлетворяющая следующим требованиям:

1) пороговое поведение, так как все обнаруженные события появляются в ТэВ-ной области энергий в системе центра масс (в ПэВ-ной — в космических лучах);

2) большое сечение, которое необходимо для регистрации необычных событий и явлений в космических лучах;

3) большой орбитальный момент, который необходим для объяснения явления выстроенности и увеличения времени жизни нового состояния материи;

4) увеличенный выход лептонов, в том числе мюонов, который необходим для объяснения избытка мюонов.

Всем перечисленным требованиям хорошо удовлетворяет модель образования сгустков кварк-глюонной материи (КГМ) с большим орбитальным моментом. Его появление и величина, пропорциональная энергии в системе центра масс (с. ц. м.) сталкивающихся частиц, были обоснованы в работе [10], а конкретные значения для различных моделей ядра рассчитаны в [11]. Модель сгустков КГМ обеспечивает их пороговое рождение и большую величину сечения, так как происходит переход от кварк-кваркового взаимодействия к коллективному взаимодействию кварков и глюонов. Соответственно, геометрическое сечение меняется от  $\sigma = \pi\lambda^2$  к  $\sigma = \pi R^2$ , где  $R$  — характерный размер сгустка КГМ. Существенно изменяется и формула для расчета энергии в с. ц. м. для взаимодействий космических лучей

$$\sqrt{S_{NN}} = \sqrt{2m_N E_1} \rightarrow \sqrt{2m_c E_1} = \sqrt{S_{AA}}, \quad (1)$$

где  $m_c \approx n_N m_N$  — некоторая компаунд-масса, величина которой зависит от размеров сталкивающихся ядер и степени их перекрытия (прицельного параметра).

Высота центростремительного барьера определяется величиной орбитального момента  $L$ , размером сгустка и массой частицы, находящейся или образующейся в сгустке КГМ:

$$V(L) = \frac{L^2}{2mR^2}. \quad (2)$$

Очевидно, что высота барьера будет большой для легких кварков и значительно меньшей для тяжелых частиц, например топ-кварков. Высокая температура сгустка и подавление вылета легких кварков обеспечивают необходи-

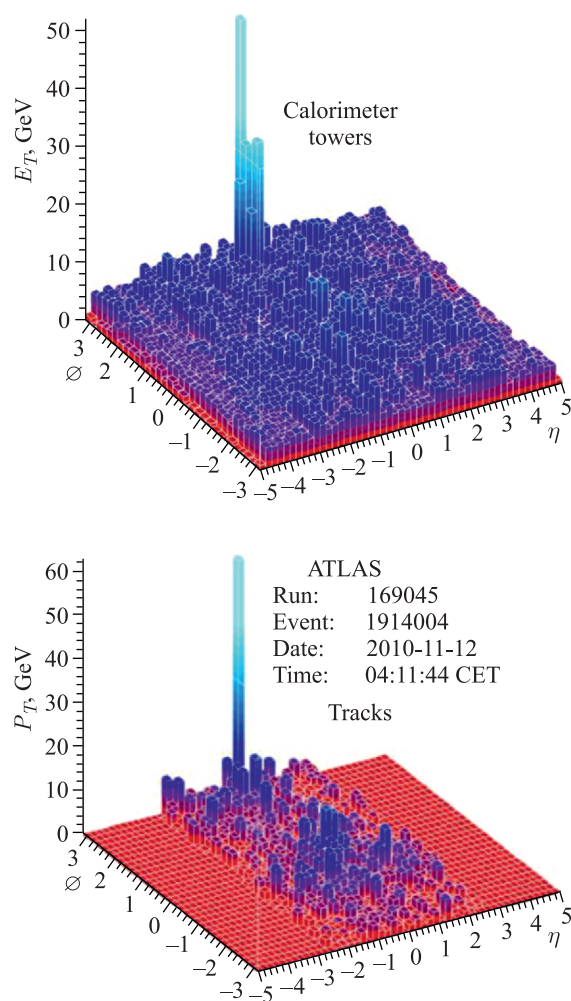


Рис. 1. Пример события с сильным дисбалансом поперечных импульсов двух струй [12]

мые условия и рождения, и, соответственно, вылета пар  $t\bar{t}$ , что существенно изменит характер ядро-ядерного взаимодействия.

Вылет  $t\bar{t}$ -пары резко уменьшает энергию сгустка (на величину  $\sim 4m_t$ ), после чего, соответственно, уменьшается величина центробежного барьера и остаток сгустка распадается на легкие кварки с образованием обычных частиц:  $\pi$ ,  $K$  и других мезонов.

Топ-кварки мгновенно ( $\tau_t \sim 10^{-25}$  с) распадаются на  $W$ -бозон и  $b$ -кварк, а  $W$  распадается на лептоны ( $\sim 30\%$ ) и адроны ( $\sim 70\%$ ). Лептонный канал распада обеспечивает появление высокоэнергетических мюонов и нейтрино, а адронный канал — высокую множественность вторичных частиц (в основном пионов), распад которых дает дополнительный поток мюонов, не учитываемый существующими моделями взаимодействия.

Рассматриваемая модель хорошо объясняет различные события и явления, наблюдаемые в космических лучах, и, по-видимому, находит подтверждение в экспериментах на ЛНС. В частности, она хорошо объясняет появление дисбаланса в адронных струях [12], в которых имеется всего один джет с энергией  $\sim 100$  ГэВ (рис. 1). При распаде топ-кварка энергия в с.ц.м. распределяется следующим образом:  $T_b \approx 65$  ГэВ и  $T_W \approx 25$  ГэВ. Если учесть энергию разлета, то полная энергия может быть  $\sim 100$  ГэВ. При образовании  $b$ -кварками струи и при распаде  $W$ -бозона на  $\sim 20$  пионов будет наблюдаться картина, зарегистрированная в эксперименте ATLAS.

Второй пример связан с зависимостью множественности вторичных частиц от энергии сталкивающихся частиц. Было отмечено [13], что в столкновениях ядер свинца множественность растет быстрее, чем в  $pp$ -взаимодей-

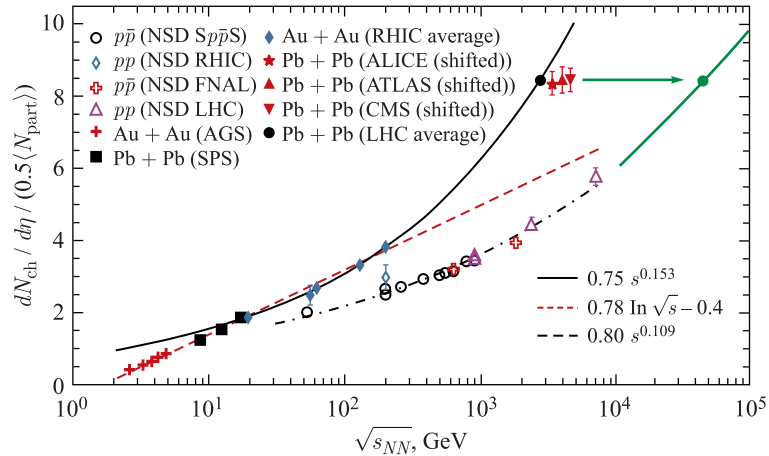


Рис. 2. Зависимость множественности заряженных частиц, образующихся в столкновениях ядро-ядро и протон-протон, от энергии [13]

виях, но при этом сопоставлялись значения энергии, приведенные к нуклон-нуклонному взаимодействию  $\sqrt{S_{NN}}$ . Если учесть, что в ядро-ядерных взаимодействиях мишенью не может быть нуклон, то энергия в с. ц. м. возрастает и экспериментальные точки должны быть сдвинуты вправо. Но так как множественность вторичных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях не может быть меньше, чем в  $pp$ -взаимодействиях, то это позволит оценить количество нуклонов, которые могут являться мишенью в ядро-ядерных взаимодействиях (рис. 2).

Сдвиг экспериментальных точек определяется величиной  $n_N$ , которую можно оценить по формуле

$$\sqrt{n_N} = \frac{\sqrt{S_{AA}}}{\sqrt{S_{NN}}} < \frac{40-45 \text{ ТэВ}}{3 \text{ ТэВ}} \approx 14. \quad (3)$$

Таким образом, в Pb–Pb-взаимодействиях до половины полного числа нуклонов двух ядер могут оказаться в сгустке КГМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если рассмотренный подход к объяснению результатов, полученных на ЛНС и в космических лучах, правильный, то новые тяжелые частицы, а точнее резонансные состояния кварк-глюонной материи, необходимо искать не в  $pp$ -взаимодействиях, а в столкновениях относительно легких ядер (азота, кислорода), для которых вероятность образования нового состояния материи достаточно большая, а множественность вторичных частиц не столь велика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Resonances in Diphoton Events with the ATLAS Detector at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. ATLAS-CONF-2016-018.
2. Khachatryan V. (CMS Collab.). Search for New Physics in High Mass Diphoton Events in  $3.3 \text{ fb}^{-1}$  of Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV and Combined Interpretation of Searches at 8 TeV and 13 TeV. CMS PAS EXO-16-018.
3. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for High-Mass Diboson Resonances with Boson-Tagged Jets in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2015. V. 2015, Iss. 12. Art. 55.
4. Slavatskiy S. A. Results of Emulsion Chamber Experiments with Very High-Energy Cosmic Rays Which Are Difficult to Explain in the Framework of the Standard Model // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2003. V. 122. P. 3–11.
5. Grupen C. et al. Cosmic Ray Results from the CosmoALEPH Experiment // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. V. 175–176. P. 286–293.

6. *Abdallah J. et al.* Study of Multi-Muon Bundles in Cosmic Ray Showers Detected with the DELPHI Detector at LEP // *Astropart. Phys.* 2007. V. 28. P. 273–286.
7. *Adam J. et al. (ALICE Collab.)*. Study of Cosmic Ray Events with High Muon Multiplicity Using the ALICE Detector at the CERN Large Hadron Collider // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2016. V. 2016, Iss. 1. Art. 32.
8. *Богданов А. Г. и др.* Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // *ЯФ.* 2010. Т. 73. С. 1904–1920.
9. *Aab A. et al. (Pierre Auger Collab.)*. Muons in Air Showers at the Pierre Auger Observatory: Mean Number in Highly Inclined Events // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 032003.
10. *Liang Z.-T., Wang X.-N.* Globally Polarized Quark–Gluon Plasma in Noncentral  $A+A$  Collisions // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. P. 102301.
11. *Gao J.-H. et al.* Global Quark Polarization in Noncentral  $A+A$  Collisions // *Phys. Rev. G.* 2008. V. 77. P. 044902.
12. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Observation of a Centrality-Dependent Dijet Asymmetry in Lead–Lead Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS Detector at the LHC // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. P. 252303.
13. *Aamodt K. et al. (ALICE Collab.)*. Charged-Particle Multiplicity Density at Midrapidity in Central Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // *Ibid.* P. 252301.