

О ВОЗМОЖНОМ ОБНАРУЖЕНИИ НОВЫХ ЧАСТИЦ — КАНДИДАТОВ НА РОЛЬ ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

*А. Т. Дьяченко **

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Предлагается провести улучшение согласия с экспериментальными данными по сравнению с предыдущими работами для спектра мягких фотонов по поперечному импульсу в pp -столкновениях при импульсе налетающих протонов 450 ГэВ/с с целью явно выраженного выделения сигнала об обнаружении бозона X17. Предложена интерпретация обнаружения бозона с массой 38 МэВ в спектрах фотонов, испускаемых в реакциях протонов с ядрами углерода при импульсе налетающих протонов 5,5 ГэВ/с.

It is proposed to improve the agreement with experimental data in comparison with the previous works for the spectrum of soft photons from the transverse momentum in pp collisions with an incident proton momentum of 450 GeV/c in order to clearly isolate the signal about the detection of the X17 boson. An interpretation has been proposed for the detection of a boson with a mass of 38 MeV in the spectra of photons emitted in reactions of protons with carbon nuclei at an incident proton momentum of 5.5 GeV/c

PACS: 25.75.Dw; 95.35.+d

... важно сконцентрировать имеющиеся ресурсы на основных прорывных направлениях...

В. В. Путин

ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых частиц вне рамок Стандартной модели на ускорителях является несомненно одной из главных задач современной ядерной физики. С другой стороны, интерпретация спектров мягких фотонов в столкновениях элементарных частиц высокой энергии является также загадкой для физики элементарных частиц.

* E-mail: dyachenko_a@mail.ru

Опираясь на работы Ферми [1], Померанчука [2] и Ландау [3], посвященные статистической модели множественного рождения частиц, мы использовали здесь термодинамическую модель [4–8], в которой нами предложена интерпретация [5] спектров мягких фотонов по поперечному импульсу в pp -столкновениях при импульсе налетающих протонов 450 ГэВ/с [9]. При этом мы учли вклад бозона X_{17} с массой 17 МэВ — новой частицы, возможного кандидата на роль частиц темной материи, обнаруженного в эксперименте [10]. Как указано в работе [9], спектр мягких фотонов не удается объяснить традиционным механизмом *bremsstrahlung*. А обнаруженный в эксперименте [10] бозон X_{17} в атомных переходах с Ве нуждается в независимом подтверждении. Впервые на это указал Вонг в работе [11], подбирая температуры невозмущенного спектра фотонов и вклада бозона X_{17} , который может быть кандидатом на роль частиц темной материи.

Мы нашли температуру и вычислили вклад при этой температуре от распада бозона X_{17} на два фотона. Также мы выяснили еще влияние на спектр фотонов бозона X_{38} с массой 38 МэВ, который был обнаружен в реакциях протонов с ядрами углерода при импульсе налетающих протонов 5,5 ГэВ/с [12]. Много различных объяснений существования этих частиц было предложено: существование пятой силы [13–15], темной материи [16–18], аксиона [19–25], инстантона [26], КЭД мезона [11, 27], тетракварка [28]. В наших работах [4–8] предлагалось интерпретировать новые бозоны в модели электромагнитной трубки при объединении двумерных КЭД₂ × КХД₂. Таким путем получают массы бозонов X_{17} и X_{38} .

МОДЕЛЬ

Для колеблющейся прямолинейной струны-трубки получаем [4, 5] массу M :

$$M^2 = 2\pi\rho n, \quad (1)$$

где n — квантовое число; ρ — плотность энергии трубки. Для электромагнитной трубки при $n = 1$ получаем массу бозона X_{17} $M \approx 17$ МэВ, для сложенной струны с вращением при $n = 4$ получаем $M \approx 34$ МэВ, что близко к массе бозона X_{38} .

В отличие от использованного в [4] распределения по поперечному импульсу для безмассовых и массивных частиц более правильно использовать соответственно

$$\frac{dN}{dp_T} = C p_T \sqrt{p_T} \exp\left(-\frac{p_T}{T}\right), \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dp_T} = C p_T \sqrt{p_T} \exp\left(-\frac{\sqrt{m^2 + p_T^2} - m}{T}\right), \quad (3)$$

где p_T — поперечный импульс; m — масса частицы; C — нормировочный множитель. Для нахождения температуры T надо использовать ультрарелятивистскую гидродинамику. Добавочный перед экспонентой множитель $\sqrt{p_T}$ по сравнению с предыдущим рассмотрением возникает при переходе от распределения Бозе–Эйнштейна к больцмановскому распределению. Можно включить в рассмотрение микроканоническое распределение, или неэкстенсивную статистику Tsallis, но здесь пока мы этого не делаем.

Здесь мы упрощаем описание. Считаем, что за счет перераспределения начальной энергии по трем направлениям в тепловую энергию переходит треть энергии, а другая часть переходит в кинетическую энергию продольного расширения лоренцевски сжатой системы. Действительно, поскольку у нас, вообще говоря, выполняется закон Паскаля, то средние квадраты проекций импульсов частиц

$$\langle p_x^2 \rangle = \langle p_y^2 \rangle = \langle p_z^2 \rangle = p^2/9 \quad (4)$$

могут быть выражены через полный импульс p . Здесь учтено, что в одном направлении движется $1/3$ полного числа частиц. Но давление P есть среднее значение потока проекции импульса через единицу поверхности $P = \sqrt{\langle p_x^2 \rangle} nc$, а плотность энергии $e = ncp$, где n — концентрация числа частиц, c — скорость света. Следовательно, получается ультрарелятивистское уравнение состояния

$$P = \frac{e}{3}. \quad (5)$$

При релятивистских энергиях число частиц не сохраняется, но оно может быть определено из соображений равновесия. Так, термодинамический потенциал

$$\Phi = E + PV - TS \quad (6)$$

выражается через энергию E , давление P , энтропию S , объем V и температуру T . Поскольку $\Phi = \mu N$, в равновесии химический потенциал μ обращается в нуль $d\Phi/dN = 0$. Поэтому для плотностей энергии e и энтропии s можно написать соотношение

$$e + P = Ts. \quad (7)$$

Используя известные соотношения

$$dE = -PdV + TdS, \quad dP = sdT, \quad (8)$$

с учетом (5) находим

$$s = s_0(T/T_0)^3, \quad e = e_0(T/T_0)^4, \quad (9)$$

где постоянные s_0 и e_0 находятся из начальных условий. Отсюда определяется температура безмассовых частиц:

$$T = \left(\frac{E_0}{g_Q V_R} 10^9 \right)^{1/4}, \quad (10)$$

где E_0 — кинетическая энергия в системе центра масс в ГэВ; $g_Q = (2 \times \times 8 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3) = 47$ — статистический вес 6 кварков и 8 глюонов; $V_R = (1,3)^3$ — объемный фактор, учитывающий увеличение объема при расширении системы на стадии формирования вторичных частиц. Так можно описать распределение по поперечному импульсу для образующейся плазмы с сильным взаимодействием [4].

Наша интерпретация импульсных спектров фотонов заключается в использовании формулы (2) с температурой для фотонов согласно формуле (9), где за счет малости константы связи для электромагнитного взаимодействия энергия E_0 была уменьшена в соответствующее число раз, т. е. в $137 \times 14,7$ раз. Соответствующая температура $T = 3,8$ МэВ. В отличие от [5] здесь нами учтено согласно формуле (9) изэнтропическое уменьшение температуры по формуле

$$T^3 V = T_0^3 V_0, \quad (11)$$

где T_0 — начальная температура до расширения; $V_0/V = G$ — лоренцевское сокращение объема.

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для вклада испускания фотонов при распаде бозона X17 можно более точно учесть, что при распаде частицы X17 на 2 фотона их угловое распределение в системе покоя частицы изотропно по углам. Это распределение можно представить в инвариантной форме [5], но с учетом множителя $\sqrt{p_T}$ и температуры согласно (10), (11):

$$\frac{dN}{dp_T} = C p_T \sqrt{p_T} \left((E_- + T) \exp \left(-\frac{\mu - E_-}{T} \right) - (E_+ + T) \exp \left(\frac{\mu - E_+}{T} \right) \right), \quad (12)$$

где $E_{\pm} = \pm p_1 + m$, p_1 — импульс фотона, химический потенциал $\mu = 0$. Нормирующий коэффициент C в (12) тот же, что и в формуле (2), что и приведено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что без учета вклада от бозона X17 расчет недооценивает экспериментальные данные, а с учетом этого вклада воспроизводит их, кривая 4 описывает вклад от бозона X38 с массой 38 МэВ.

На рис. 2 приведены для большей наглядности те же экспериментальные данные — точки [9], что и на рис. 1, но с вычтенными из них

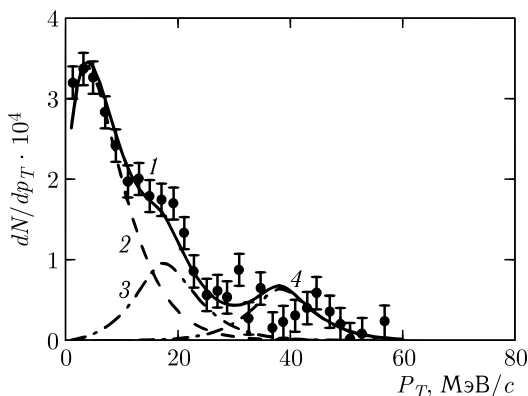


Рис. 1. Экспериментальный спектр мягких фотонов (точки [9]), а также расчет с учетом бозона X17 (сплошная линия 1) и без него (штриховая линия 2), штрихпунктирная линия 3 — вклад от бозона X17, штрихпунктирная линия 4 — вклад от бозона X38 массой 38 МэВ

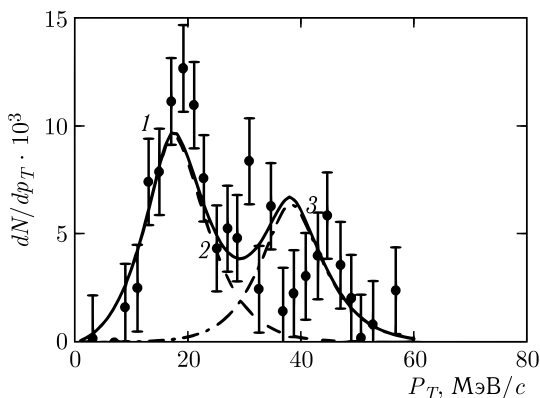


Рис. 2. Точки [9] — экспериментальные данные, что и на рис. 1, но с вычтенными из них значениями вклада согласно формуле (2), который на рис.1 приведен штриховой линией 2. Общий вклад бозонов X17 и X38 изображен сплошной линией 1, вклад бозона X17 — штриховой линией 2, вклад бозона X38 — штрихпунктирной линией 3

значениями вклада согласно формуле (2), который на рис.1 отмечен штриховой линией 2.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные (гистограмма 1) [12] недавнего дубненского эксперимента для столкновений протонов с ядрами углерода при импульсе протонов 5,5 ГэВ/с и наши расчеты (штриховая линия 2) с учетом вкладов бозонов X17 и X38 в распады на 2 фотона согласно формуле (12) при найденной нами температуре 1,7 МэВ.

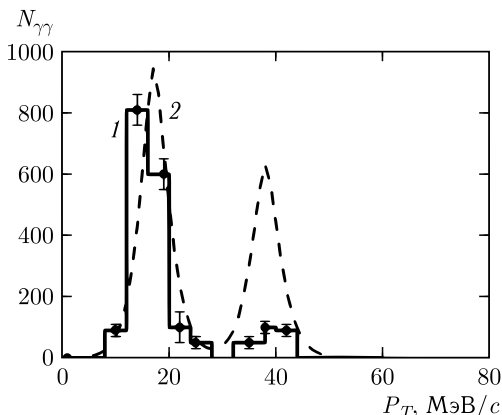


Рис. 3. Экспериментальные данные (гистограмма 1) [12] недавнего дубненского эксперимента для столкновений протонов с ядрами углерода при импульсе протонов 5,5 ГэВ/с и наши расчеты (штриховая линия 2) с учетом вкладов бозонов X17 и X38 в распады на 2 фотона согласно формуле (12) при температуре 1,7 МэВ

То есть такая интерпретация спектра мягких фотонов (его ужесточение) может служить еще одним свидетельством в пользу существования новой частицы — бозона X17. Вклад бозона X38, предсказанного в проведенных в Дубне экспериментах [12], также совместим с этими экспериментальными данными.

И на основе температурного анализа для столкновений частиц высокой энергии, оценивая вклад распада бозонов X17 и X38 на два фотона по релятивистской кинематике, можно видеть их влияние на спектр испускаемых фотонов.

Дело за последующими экспериментами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь мы провели необходимое уточнение описания экспериментальных данных [9, 12] за счет более правильного выбора температуры по сравнению с предыдущими работами по выявлению сигналов образования бозонов X17 и X38, которые могут быть кандидатами на роль частиц темной материи.

Эти новые частицы, возможно, проявляются в космических лучах сверхвысоких энергий порядка 10^{11} ГэВ, недостижимых на современных ускорителях. Нам удалось воспроизвести всплеск [29], обнаруженный в экспериментах [30, 31], за счет бозонов X17 и X38. В соответствующих формулах использовалась аппроксимация экспериментального спектра космических лучей, пропорциональная E^{-3} , и вклад распада X-бозонов на фотоны по формулам излучения черного тела.

В данной работе мы предложили простую термодинамическую модель испускания мягких фотонов, которые играют значительную роль в космологии и могут иметь прямое отношение к распадам темной материи [32].

Благодарности. Автор благодарен В.В.Вечернину, М.Б.Жалову и О.Л.Федину за полезные обсуждения.

Конфликт интересов. Автор заявляет, что не имеет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fermi E.* High Energy Nuclear Events // *Prog. Theor. Phys.* 1950. V.5. P.570–579.
2. *Pomeranchuk I. Y.* On the Theory of Multiple Particle Production in a Single Collision // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 1951. V.78. P.889–896.
3. *Landau L. D.* On Multiple Production of Particles During Collisions of Fast Particles // *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Fiz.* 1953. V.17. P.51–67.
4. *D'yachenko A. T.* Spectra of Secondary Particles in High-Energy Proton–Proton Collisions in the Thermodynamic Model and the Possibility of Detection of Particles of Dark Matter // *Phys. At. Nucl.* 2020. V.83. P.1597–1604.
5. *D'yachenko A. T.* Detection of New Particles — Possible Candidates for the Role of Dark Matter Particles in Collisions of Protons and Nuclei from Spectra of Soft Photons // *Phys. At. Nucl.* 2022. V.85. P.1028–1033.
6. *D'yachenko A. T., Gromova E. S.* Detection of Particles of Dark Matter from the Spectrum of Secondary Particles in High-Energy Proton–Proton Collisions in a Thermodynamic Model // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V.2131. P.022054.
7. *D'yachenko A. T., Verisokina A. A., Verisokina M. A.* High-Energy Collisions of Protons and Nuclei and the Possibility of Detecting Dark Matter Particles in the Spectra of Soft Photons // *Acta Phys. Polon. B. Proc. Suppl.* 2021. V.14. P.761–766.
8. *D'yachenko A. T., Verisokina A. A., Verisokina M. A.* Transverse Momentum Distribution of Secondary Particles in High-Energy Collisions of Protons and Nuclei and the Possibility of Detecting Dark Matter Particles in the Spectra of Soft Photons // *Phys. Part. Nucl.* 2023. V.54. P.462–467.
9. *Belogianni A. et al.* Observation of a Soft Photon Signal in Excess of QED Expectations in pp Interactions // *Phys. Lett. B.* 2002. V.548. P.129–139.
10. *Krasznahorkay A. J., Csatlós M., Csige L. et al.* Observation of Anomalous Internal Pair Creation in ^8Be : A Possible Signature of a Light Neutral Boson // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V.116. P.042501.
11. *Wong C. Y.* Open String QED Meson Description of the X17 Particle and Dark Matter // *JHEP.* 2020. V.08. P.08165.
12. *Abraamyan K., Austin C., Baznat M., Gudima K., Kozhin M., Reznikov S., Sorin A.* Check of the Structure in Photon Pairs Spectra at the Invariant Mass of about $38 \text{ MeV}/c^2$ // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V.204. P.08004; arXiv:2311.18632v1 [hep-ex].
13. *Feng J. et al.* Protophobic Fifth-Force Interpretation of the Observed Anomaly in ^8Be Nuclear Transitions // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V.117. P.071803.
14. *Feng J. et al.* Particle Physics Models for the 17 MeV Anomaly in Beryllium Nuclear Decays // *Phys. Rev. D.* 2017. V.95. P.035017.

15. *Gu P. H., He X. G.* Realistic Model for a Fifth Force Explaining Anomaly in ${}^8\text{Be}$ e^+e^- Decay // Nucl. Phys. B. 2017. V. 919. P. 209–217.
16. *Fayet P.* The Light U Boson as the Mediator of a New Force, Coupled to a Combination of Q, B, L and Dark Matter // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 53–65.
17. *Liang Y., Chen L. B., Qiao C. F.* X(16.7) as the Solution of the NuTeV Anomaly // Chin. Phys. C. 2017. V. 41. P. 063105.
18. *Jia L. B., Li X. Q.* The New Interaction Suggested by the Anomalous ${}^8\text{Be}$ Transition Sets a Rigorous Constraint on the Mass Range of Dark Matter // Eur. Phys. J. C. 2016. V. 76. P. 706–718.
19. *Ellwanger U., Moretti S.* Possible Explanation of the Electron–Positron Anomaly at 17 MeV in ${}^8\text{Be}$ Transitions through a Light Pseudoscalar // JHEP. 2016. V. 11. P. 039.
20. *Kozaczuk J., Morrissey D. E., Stroberg S. R.* Light Axial Vector Bosons, Nuclear Transitions, and the ${}^8\text{Be}$ Anomaly // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 115024.
21. *Dror J. A., Lasenby R., Pospelov M.* New Constraints on Light Vectors Coupled to Anomalous Currents // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 141803.
22. *Bauer M., Neubert M., Thamm A.* Collider Probes of Axion-Like Particles // JHEP. 2017. V. 12. P. 044.
23. *Alves D. S. M., Weiner N.* A Viable QCD Axion in the MeV Mass Range // JHEP. 2018. V. 07. P. 092.
24. *Kirpichnikov D. V., Lyubovitskij V. E., Zhevlakov A. S.* Implication of Hidden Sub-GeV Bosons for the $(g-2)_\mu$, ${}^8\text{Be}$ – ${}^4\text{He}$ Anomaly, Proton Charge Radius, EDM of Fermions, and Dark Axion Portal // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P. 095024.
25. *Dusaev R. R., Kirpichnikov D. V., Kirsanov M. M.* Photoproduction of Axion-Like Particles in the NA64 Experiment // Ibid. P. 055018.
26. *Veselsky M., Petousis V., Leja V. J.* Anomaly in the Decay of ${}^8\text{Be}$ and ${}^4\text{He}$ — Can an Observed Light Boson Mediate Low-Energy Nucleon–Nucleon Interactions? // J. Phys. G. 2021. V. 48. P. 105103.
27. *Wong C. Y., Kosheikin A. V.* Dynamics of Quarks and Gauge Fields in the Lowest-Energy States in QCD and QED // Eur. Phys. J. A. 2023. V. 59. P. 285–318.
28. *Chen H. X.* QCD Sum Rule Studies on the Possible Double-Peak Structure of the X17 Particle // Mod. Phys. Lett. A. 2024. V. 39. P. 2450057; arXiv: 2312.02763v1 [hep-ph].
29. *D'yachenko A. T.* On the Issue of Detection of Dark Matter Particles // Bull. Moscow Univ. Phys. Suppl. 1. 2024. V. 79. P. S436–S439.
30. *Takeda M. et al.* Extension of the Cosmic-Ray Energy Spectrum beyond the Predicted Greisen–Zatsepin–Kuz'min Cutoff // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 1163–1168.
31. *Bird D. et al.* Evidence for Correlated Changes in the Spectrum and Composition of Cosmic Rays at Extremely High Energies // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 3401–3404.
32. *Acharya S. K., Cyr B., Chluba J.* The Role of Soft Photon Injection and Heating in 21 cm Cosmology // Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 528. P. 1908–1918.