

К вопросу об обнаружении новых частиц — возможных кандидатов на роль частиц темной материи

© М.В. Архипов¹, А.Т. Дьяченко^{1,2}

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр

“Курчатовский институт”, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: misha.arkhipoff2017@yandex.ru, dyachenko_a@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 3 сентября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

В развитие статистической модели для столкновений протонов и ядер на стадии расширения составной ядерной системы дополнительно учтены адиабатическое изменение температуры и поправка к больцмановскому распределению множественности испускаемых вторичных частиц. Получено улучшение согласия с экспериментальными данными по сравнению с предыдущими исследованиями. Проведена интерпретация спектра мягких фотонов по поперечному импульсу в pp -столкновениях при импульсе налетающих протонов $450 \text{ GeV}/c$ (c — скорость света) с целью выделения явно выраженного сигнала, указывающего на обнаружение бозона $X17$ с массой 17 MeV . Предложена интерпретация обнаружения бозона с массой 38 MeV в спектрах фотонов.

Ключевые слова: бозоны $X17$ и $X38$, столкновения протонов и ядер, мягкие фотоны, термодинамическая модель.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59390.6376k

Ужесточение спектра мягких фотонов в столкновениях элементарных частиц является загадкой для ядерной физики. С другой стороны, в отсутствие сигналов с Большого адронного коллайдера для новых частиц вне рамок Стандартной модели поиск таких частиц остается одной из главных задач современной физики. Опираясь на работы Ферми [1], Померанчука [2] и Ландау [3], посвященные статистической модели множественного рождения частиц, мы использовали здесь термодинамическую модель [4,5], в рамках которой была предложена интерпретация [5–8] спектров мягких фотонов по поперечному импульсу в pp -столкновениях при импульсе налетающих протонов $450 \text{ GeV}/c$ (c — скорость света) [9].

Целью настоящей работы является объяснение особенностей спектра мягких фотонов с помощью выделения явно выраженного вклада новых частиц при усовершенствовании статистической модели для адиабатического уменьшения температуры на стадии расширения составной системы, а также при учете поправки к больцмановскому распределению множественности испускаемых фотонов.

В работе [9] указано, что полученный спектр мягких фотонов не удастся объяснить традиционным механизмом *bremsstrahlung* (тормозное излучение). Его можно объяснить введением новой частицы — бозона $X17$ с массой 17 MeV , обнаруженного в эксперименте венгерской группы АТОМКИ [10], который нейтрален, не является барионом и поэтому может быть кандидатом на роль частиц темной материи, но нуждается в независимом подтверждении. Вонг в работе [11] для объяс-

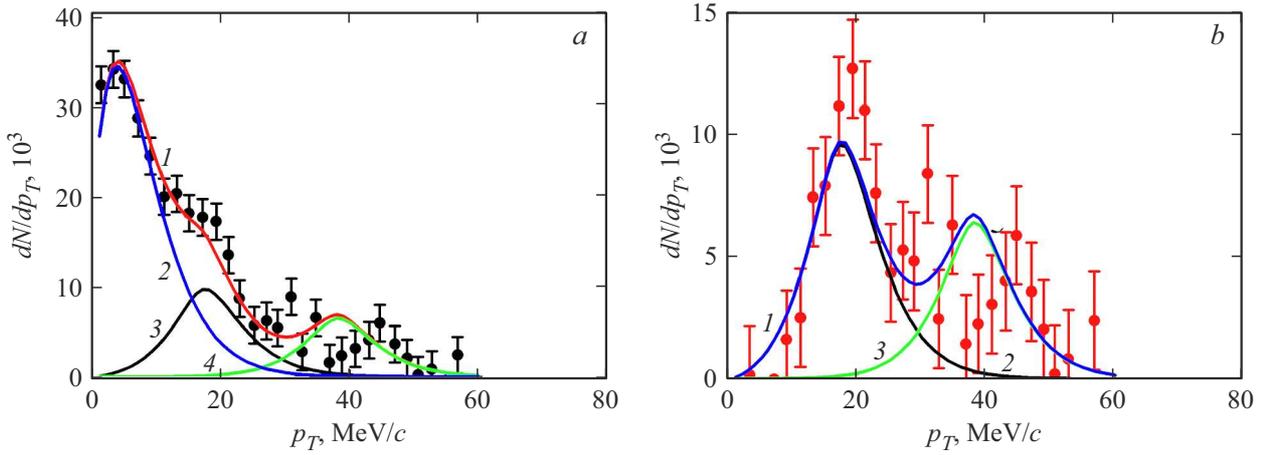
нения результатов [9] просто подбирал температуры для невозмущенного спектра фотонов и вклада бозона $X17$.

Мы нашли данную температуру и вычислили вклад при этой температуре от распада бозона $X17$ на два фотона. Также мы выяснили влияние на спектр фотонов бозона $X38$ с массой 38 MeV , который был обнаружен в реакциях протонов с ядрами углерода при импульсе налетающих протонов $5.5 \text{ GeV}/c$ [12]. Было предложено много различных объяснений существования этих частиц, таких как существование пятой силы [13–15], темной материи [16–18], аксиона [19,20], инстантона [21], КЭД-мезона (КЭД — квантовая электродинамика) [22], тетракварка [23]. В работах [4,5] было предложено интерпретировать новые бозоны в модели электромагнитной трубки при объединении двумерных квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики. Таким путем получаются массы бозонов $X17$ и $X38$.

В отличие от использованного в [4–8] распределения множественности N по поперечному импульсу для безмассовых ($m = 0$) и массивных ($m > 0$) частиц более правильно использовать распределение

$$\frac{dN}{dp_T} = CT p_T \sqrt{p_T} \exp\left(-\frac{\sqrt{m^2 + p_T^2} - m}{T}\right), \quad (1)$$

где p_T — поперечный импульс, m — масса частицы, C — нормировочный множитель. Для нахождения температуры T нужно использовать ультрарелятивистскую гидродинамику. Добавочный по сравнению с предыдущим рассмотрением множитель $\sqrt{p_T}$ перед экспонентой возникает при переходе от распределения Бозе–Эйнштейна к больцмановскому распределению [24]. Можно включить



a — экспериментальный спектр мягких фотонов [9] (точки), а также расчет с учетом бозона X17 (линия 1) и без него (линия 2). Линия 3 — вклад от бозона X17, линия 4 — вклад от бозона X38 с массой 38 MeV. *b* — те же экспериментальные данные [9] (точки), что и на фрагменте *a*, но после вычитания фона, представленного линией 2 на фрагменте *a*, который был вычислен по формуле (1). Общий вклад бозонов X17 и X38 показан линией 1, вклад бозона X17 — линией 2, вклад бозона X38 — линией 3.

в рассмотрение микроканоническое распределение или неэкстенсивную статистику Тсаллиса [25], но в настоящей работе мы пока этого не делаем.

Здесь мы упрощаем описание. Мы считаем, что за счет перераспределения начальной энергии E_0 по трем направлениям в тепловую энергию переходит треть энергии, а оставшаяся часть переходит в кинетическую энергию продольного расширения лоренцевски сжатой системы. Действительно, поскольку в нашем случае, вообще говоря, выполняется закон Паскаля, средние квадраты проекций импульсов частиц

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

могут быть выражены через полный импульс p . Но давление P есть среднее значение потока проекции импульса через единицу поверхности $P = \sqrt{\langle p_x^2 \rangle} nc$, а плотность энергии $e = nc p$, где n — плотность числа частиц, c — скорость света. Следовательно, получается ультррелятивистское уравнение состояния

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

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

$$\Phi = E + PV - TS \quad (4)$$

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

$$e + P = Ts. \quad (5)$$

Используя известные соотношения

$$dE = -PdV + TdS, \quad dP = sdT, \quad (6)$$

с учетом (3) находим

$$s = s_0(T/T_0)^3, \quad e = e_0(T/T_0)^4, \quad (7)$$

где постоянные s_0 и e_0 определяются из начальных условий. Отсюда находится температура безмассовых частиц [4,5]. Так можно описать распределение по поперечному импульсу для образующейся плазмы с сильным взаимодействием [4].

Наша интерпретация импульсных спектров фотонов заключается в использовании формулы (1) при $m = 0$ с температурой для фотонов согласно формуле (7), где за счет малости константы связи для электромагнитного взаимодействия начальная кинетическая энергия протонов E_0 в системе центра масс была уменьшена в соответствующее число раз, т.е. в 137×14.7 раз, как в работе [5]. Число испускаемых частиц и их энергия пропорциональны константе связи, которая равна 14.7 для сильного взаимодействия и 1/137 для электромагнитного. Здесь энергия

$$E_0 = \sqrt{2m_p c^2(2m_p c^2 + E_1)} - 2m_p c^2,$$

где $E_1 = \sqrt{p^2 c^2 + m_p^2 c^4} - m_p c^2$ — кинетическая энергия в лабораторной системе, $p = 450 \text{ GeV}/c$ — импульс налетающего протона, m_p — масса протона. Соответствующая тепловой энергии $E_T = E_0/3$ уменьшенная температура электромагнитной плазмы [4,5] получена равной $T = 3.8 \text{ MeV}$. В отличие от [5–8] здесь нами учтено дополнительно изоэнтропическое уменьшение температуры согласно соотношению (7) по формуле

$$T^3 V = T_0^3 V_0, \quad (8)$$

где T_0 — начальная температура до расширения [5], $V_0/V = G$ — лоренцевское сокращение объема.

Вклад испускания фотонов при распаде бозона $X17$ можно представить в форме [5], но в данном случае уже с учетом множителя $\sqrt{p_T}$ и с тем же нормирующим коэффициентом, что и в формуле (1) (см. рисунок).

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 согласуется с этими экспериментальными данными.

В результате усовершенствования расчета здесь нам удалось лучше описать мягкую экспоненциальную часть спектра испускаемых фотонов и явно выделить вклад распада бозонов $X17$ и $X38$ на два фотона по релятивистской кинематике (см. рисунок, b). Величина вклада бозона $X17$ в максимуме оказывается порядка четырех стандартных отклонений. При этом нужны дальнейшие экспериментальные подтверждения. Эти новые частицы, возможно, проявляются в космических лучах сверхвысоких энергий порядка 10^{11} GeV, недостижимых на современных ускорителях. Нам удалось воспроизвести всплеск, обнаруженный в экспериментах [26,27], за счет бозонов $X17$ и $X38$. В соответствующих формулах использовались аппроксимация экспериментального спектра космических лучей, пропорциональная E^{-3} , и вклад распада X -бозонов на фотоны по формулам излучения черного тела.

Излучение черного тела находит широкое применение в экспериментальной физике и технике [28,29]. Упомянем здесь, что наш подход может быть использован при создании черных поглотителей и излучателей — теплых „черных дыр“ в нанoeлектронике [30], а модификации излучения абсолютно черного тела для „черных дыр“ могут быть использованы в обосновании феноменологической квантовой гравитации [31].

Таким образом, 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

Авторы благодарны рецензенту за внимание и ценные советы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Fermi, Prog. Theor. Phys., **5**, 570 (1950). DOI: 10.1143/ptp/5.4.570
- [2] И.Я. Померанчук, ДАН СССР, **78**, 889 (1951).
- [3] Л.Д. Ландау, Изв. АН СССР. Сер. физ., **17**, 51 (1953). [Collected papers of L.D. Landau, ed. by D. Ter Haar (Pergamon Press, Oxford, 1965), paper 74].
- [4] А.Т. Дьяченко, Ядерная физика и инжиниринг, **11** (3), 133 (2020). DOI: 10.1134/S2079562919050075 [A.T. D'yachenko, Phys. Atom. Nucl., **83**, 1597 (2020). DOI: 10.1134/S1063778820090069].
- [5] А.Т. Дьяченко, Ядерная физика, **86** (1), 259 (2023). DOI: 10.31857/S0044002723010178 [A.T. D'yachenko, Phys. Atom. Nucl., **85**, 1028 (2022). DOI: 10.1134/S1063778823010179].
- [6] А.Т. D'yachenko, E.S. Gromova, J. Phys.: Conf. Ser., **2131**, 022054 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022054
- [7] А.Т. D'yachenko, A.A. Verisokina, M.A. Verisokina, Acta Phys. Pol. B, Proc. Suppl., **14**, 761 (2021). DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.14.761
- [8] А.Т. Дьяченко, А.А. Верисокина, М.А. Верисокина, ЭЧАЯ, **54** (3), 581 (2023). [A.T. D'yachenko, A.A. Verisokina, M.A. Verisokina, Phys. Part. Nucl., **54**, 462 (2023). DOI: 10.1134/S1063779623030127].
- [9] A. Belogianni, W. Beusch, T.J. Brodbeck, F.S. Dzheparov, B.R. French, P. Ganoti, J.B. Kinson, A. Kiirk, V. Lenti, I. Minashvili, V.F. Perepelitsa, N. Russakovich, A.V. Singovsky, P. Sonderegger, M. Spyropoulou-Stassinaki, O. Villalobos Baillie, Phys. Lett. B, **548**, 129 (2002). DOI: 10.1016/S0370-2693(02)02837-X
- [10] A.J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, J. Gulyás, M. Hunyadi, I. Kuti, B.M. Nyakó, L. Stuhl, J. Timár, T.G. Tornyi, Z. Vajta, Phys. Rev. Lett., **116**, 042501 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.042501
- [11] C.-Y. Wong, J. High Energy Phys., **2020**, 165 (2020). DOI: 10.1007/JHEP08(2020)165
- [12] K. Abraamyan, C. Austin, M. Baznat, K. Gudima, M. Kozhin, S. Reznikov, A. Sorin, EPJ Web Conf., **204**, 08004 (2019). DOI: 10.1051/epjconf/201920408004; arXiv: 1208.3829; arXiv:2311.18632v1 [hep-ex]
- [13] J.L. Feng, B. Fornal, I. Galon, S. Gardner, J. Smolinsky, T.M.P. Tait, P. Tanedo, Phys. Rev. Lett., **117**, 071803 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.071803
- [14] J.L. Feng, B. Fornal, I. Galon, S. Gardner, J. Smolinsky, T.M.P. Tait, P. Tanedo, Phys. Rev. D, **95**, 035017 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevD.95.035017
- [15] P.-H. Gu, X.-G. He, Nucl. Phys. B, **919**, 209 (2017). DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2017.03.023
- [16] P. Fayet, Eur. Phys. J. C, **77**, 53 (2017). DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4568-9
- [17] Y. Liang, L.-B. Chen, C.-F. Qiao, Chin. Phys. C, **41**, 063105 (2017). DOI: 10.1088/1674-1137/41/6/063105
- [18] L.-B. Jia, X.-Q. Li, Eur. Phys. J. C, **76**, 706 (2016). DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4561-3
- [19] J. Kozaczuk, D.E. Morrissey, S.R. Stroberg, Phys. Rev. D, **95**, 115024 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevD.95.115024
- [20] J.A. Dror, R. Lasenby, M. Pospelov, Phys. Rev. Lett., **119**, 141803 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.141803
- [21] M. Veselsky, V. Petousis, J. Leja, J. Phys. G, **48**, 105103 (2021). DOI: 10.1088/1361-6471/ac09db
- [22] C.-Y. Wong, A.V. Koshelkin, Eur. Phys. J. A, **59**, 285 (2023). DOI: 10.1140/epja/s10050-023-01180-8
- [23] H.-X. Chen, Mod. Phys. Lett. A, **39**, 2450057 (2024). DOI: 10.1142/S0217732324500573

- [24] В.И. Гольданский, Ю.П. Никитин, И.Л. Розенталь, *Кинематические методы в физике высоких энергий* (Наука, М., 1987). [V.I. Goldansky, Yu.P. Nikitin, I.L. Rosental, *Kinematic methods in high-energy physics* (Routledge, 1989).].
- [25] C. Tsallis, *J. Stat. Phys.*, **52**, 479 (1988). DOI: 10.1007/BF0101642
- [26] M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda, N. Inoue, K. Kadota, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, Y. Kawasaki, N. Kawasumi, H. Kitamura, F. Kusano, Y. Matsubara, K. Murakami, M. Nagano, D. Nishikawa, H. Ohoka, N. Sakaki, M. Sasaki, K. Shinozaki, N. Souma, M. Teshima, R. Torii, I. Tsushima, Y. Uchihori, T. Yamamoto, S. Yoshida, H. Yoshii, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 1163 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.1163
- [27] D.J. Bird, S.C. Corbató, H.Y. Dai, B.R. Dawson, J.W. Elbert, T.K. Gaisser, K.D. Green, M.A. Huang, D.B. Kieda, S. Ko, C.G. Larsen, E.C. Loh, M. Luo, M.H. Salamon, D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, T. Stanev, J.K.K. Tang, S.B. Thomas, S. Tilav, *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 3401 (1993). DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.3401
- [28] В.Ф. Вайскопф, *УФН*, **103** (1), 155 (1971). DOI: 10.3367/UFNr.0103.197101g.0155 [V.F. Weisskopf, *Lectures given in the summer vacation programme 1969* (CEBN, Geneva, 1970).].
- [29] И.С. Гибин, П.Е. Котляр, *Успехи прикладной физики*, **7** (2), 188 (2019).
- [30] S. Maslovski, C. Simovski, S. Tretyakov, *New J. Phys.*, **18**, 013034 (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/1/013034
- [31] A. Addazi, J. Alvarez-Muniz, R. Alves Batista, G. Amelino-Camelia, V. Antonelli, M. Arzano, M. Asorey, J.-L. Atteia, S. Bahamonde, F. Bajardi, A. Ballesteros, B. Baret, D.M. Barreiros, S. Basilakos, D. Benisty et al., *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **125**, 103948 (2022). DOI: 10.1016/j.pnpnp.2022.103948
- [32] S.K. Acharya, B. Cyr, J. Chluba, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **523**, 1908 (2023). DOI: 10.1093/mnras/stad1540