

УДК 539.12

Г. С. ПОКАТАШКИН¹, Е. С. КОКОУЛИНА², Р. Г. ШУЛЯКОВСКИЙ¹**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО РОЖДЕНИЯ
МЯГКИХ ФОТОНОВ НА НУКЛОТРОНЕ**¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: shulyakovsky@iaph.bas-net.by, glebyshek92@mail.ru²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия, e-mail: kokoulina@jinr.ru

В статье обсуждаются предварительные результаты моделирования электромагнитного калориметра для регистрации мягких фотонов на пучке Нуклотрона с энергией 3,5 ГэВ на основе пакетов Geant4 и UrQMD. Приводится теоретическое предположение связи конденсата Бозе – Эйнштейна с явлением аномального выхода мягких фотонов, основанное на данных сотрудничества СВД-2 (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация), что является актуальной задачей в столкновении релятивистских ядер.

Ключевые слова: мягкие фотоны, конденсат Бозе – Эйнштейна, адронизация, кварк-глюонная плазма, Нуклотрон, электромагнитный калориметр, Монте-Карло.

G. S. POKATASHKIN¹, E. S. KOKOULINA², R. G. SHULYAKOVSKY¹**SIMULATION OF THE ABNORMAL BIRTH OF SOFT PHOTONS ON THE NUCLOTRON**¹Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: shulyakovsky@iaph.bas-net.by, glebyshek92@mail.ru²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, e-mail: kokoulina@jinr.ru

The first results of simulation of an electromagnetic calorimeter for registration of soft photons on the Nuclotron beam with the energy of 3.5 GeV on the basis of Geant4 and UrQMD packages are discussed in the paper. The theoretical assumption is made on the relation between Bose – Einstein condensate and abnormal soft photon production on the basis of the SVD-2 data (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation). This is an actual task for heavy nucleus collisions.

Keywords: soft photons, Bose – Einstein condensate, hadronization, quark-gluon plasma, Nuclotron, electromagnetic calorimeter, Monte-Carlo.

Введение. В конце 1970-х гг. на пузырьковой камере ВЕВС (ускоритель SPS ЦЕРН) изучались спектры прямых фотонов от распада K^+p -взаимодействия при энергии 70 ГэВ [1]. Полученные данные не соответствовали теоретическим предсказаниям квантовой электродинамики (КЭД). Форма внутреннего тормозного излучения согласовалась с теорией, однако измеренное полное сечение превосходило ожидания. Этот факт указывает на наличие другого механизма излучения фотонов по сравнению с тормозным излучением. Энергетическая область наблюдаемой аномалии менее 60 МэВ (так называемые мягкие фотоны (МФ)). Эксперименты по измерению аномального выхода мягких фотонов проводились коллаборациями NA34, NA22, WA83, WA91, WA102, DELPHI и подтвердили превышение выхода МФ по сравнению с предсказаниями Стандартной модели [2]. В эксперименте DELPHI было обнаружено 17-кратное превышения выхода МФ в зависимости от множественности нейтральных пионов по сравнению с КЭД [3]. В процессах слабого взаимодействия выход МФ полностью согласуется с теоретическими предсказаниями [4]. Вероятно, что явление аномального выхода мягких фотонов коррелирует с механизмом адронизации. Имеется теоретическая гипотеза о связи образования мягких фотонов и процесса конденсации пионов (КБЭ).

1. Феноменологические модели аномального рождения мягких фотонов. Попытки теоретического описания аномального выхода мягких фотонов привели к формированию множества феноменологических моделей. Так, модель, описанная Е. В. Шуряком, применяет аналог идеи Л. Д. Ландау для определения фононов и «ротонов» в жидком гелии: подход основан на модели возникновения квазипионного газа и оценке испускания МФ в соответствии с КЭД [5]. Модель, предложенная Чук-Ин Вонгом, базируется на тезисе об осцилляции цвета кварков при адронизации (осцилляции плотности цветового заряда ведут к осцилляциям плотности электрического заряда кварков, которые, в свою очередь, ведут к эмиссии мягких фотонов на стадии формирования мезонов) [6]. Удачную модель представил Ван Хов и дополнил П. Личард: описание аномального выхода МФ в сильных взаимодействиях строится на процессах, происходящих в холодной кварк-глюонной плазме. В данной модели испускание мягких фотонов обусловлено в основном тормозным излучением на стадии кварк-глюонного взаимодействия ($q\bar{q} \rightarrow g\gamma$, $qg \rightarrow q\gamma$, $\bar{q}g \rightarrow \bar{q}\gamma$) [7]. В работе [8] коллаборацией СВД-2 было измерено распределение по множественности заряженных и нейтральных пионов в реакции $pp \rightarrow n\pi+X$ при энергии пучка протонов 50 ГэВ. В области множественности $\langle n_{\pi^0} \rangle > 18$ наблюдается рост нормированной дисперсии ω распределения по числу π^0 мезонов по множественности ($\omega = \sigma_{\pi^0} / \langle n_{\pi^0} \rangle$, где σ_{π^0} – сечение процесса рождения нейтрального пиона, $\langle n_{\pi^0} \rangle$ – множественность). Это свидетельствует о достижении режима Бозе – Эйнштейновского пионного конденсата (КБЭ): при большой множественности понижается температура и увеличивается плотность энергии в системе. Учитывая обнаруженные указания на КБЭ, было выдвинуто предложение о том, что в процессе конденсации пионы выпадают в состояние с минимальной энергией и, предположительно, излучают мягкие фотоны.

2. Моделирование прототипа электромагнитного калориметра. Для описания фотонных спектров на основе известной физики необходимо моделирование эксперимента. Обычно для этих целей используют статистический метод Монте-Карло, который отлично подходит для симуляции прохождения частиц через вещество. На базе вышеупомянутого метода реализовано огромное число программных продуктов. Одним из них является пакет моделирования Geant4, разработанный в ЦЕРН. С помощью данного пакета можно моделировать условия проведения реального эксперимента на основе уже имеющихся теоретических и экспериментальных данных.

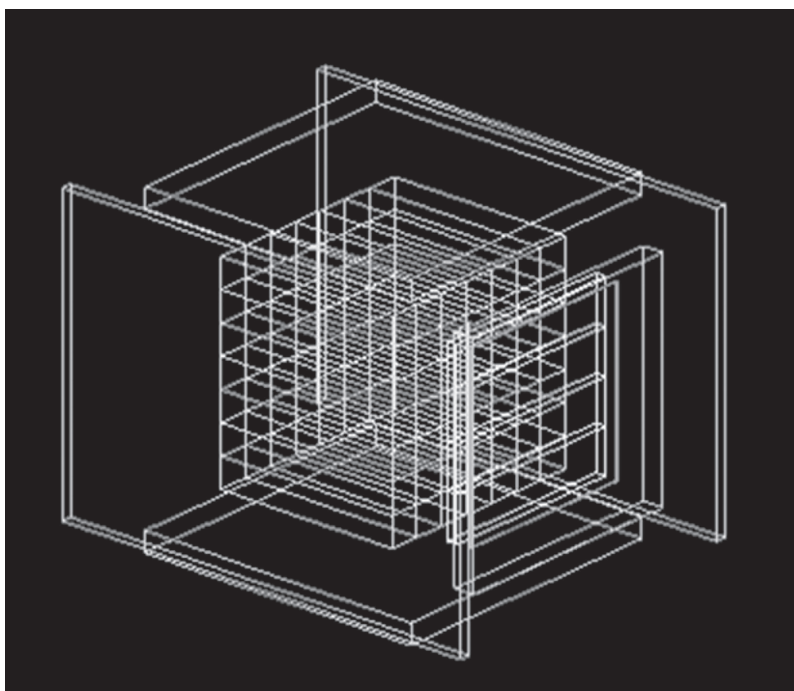


Рис. 1. Прототип электромагнитного калориметра с вспомогательными элементами

Для анализа фотонных спектров в виртуальном эксперименте необходимо измерить энергию вторичных частиц. Эту задачу выполняют ЭМ калориметры. Данный раздел посвящен моделированию электромагнитного калориметра на основе кристаллов BGO. Основной причиной выбора BGO является высокое энергетическое разрешение (порядка нескольких мегаэлектрон-вольт). Моделирование прохождения частиц через калориметр осуществлялось с помощью пакета Geant4, который является стандартом, при этом использовался генератор первичных вершин UrQMD. Параметры генератора следующие: пучок – дейтрон; мишень – углерод; прицельный параметр – 0; энергия пучка – 3,5 А ГэВ/с. Прототип электромагнитного калориметра (ЭМК) представлен на рис. 1.

Электромагнитный калориметр включает в себя не только поглощающий слой материала, но и другие, вспомогательные, элементы:

- передний «вето»-счетчик – $23 \times 23 \times 2$ см³ из полистирола;
- боковые «вето»-счетчики – $1 \times 30 \times 42$ см³ из полистирола;
- верхний и нижний «вето»-счетчики – $28 \times 28 \times 2$ см³ из полистирола;
- предливневой детектор – пластина свинца $18 \times 18 \times 0,2$ см³, 4 пластины сцинтилляторов по $18 \times 4,5 \times 1$ см³ каждая из полистирола;

- поглощающий слой из 49 кристаллов BGO – $3 \times 3 \times 18$ см³ каждый;

- расстояние от мишени до плоскости ЭМК составляет 203 см, угол наклона к мишени – 16,3°.

Первые три счетчика представляют собой «охранную систему», предотвращающую утечку энергии и ложные срабатывания системы на фон. Предливневой детектор выступает в роли триггера начала электромагнитного ливня, а пластинка свинца выполняет функцию конвертера. Поглощающий слой из кристаллов BGO «впитывает» частицы и сигнализирует обслуживающей аппаратуре о зарегистрированном количестве энергии.

3. Результаты моделирования. Кроме учета сигналов «охранной системы», в моделировании были применены следующие условия на отбор событий:

- сигнал в предливневом детекторе, означающий начало ЭМ ливня;
- энерговыделение в кристаллах BGO больше 2 МэВ;
- характерное время пролета фотонов до пластика предливневого детектора менее 6,6 нс.

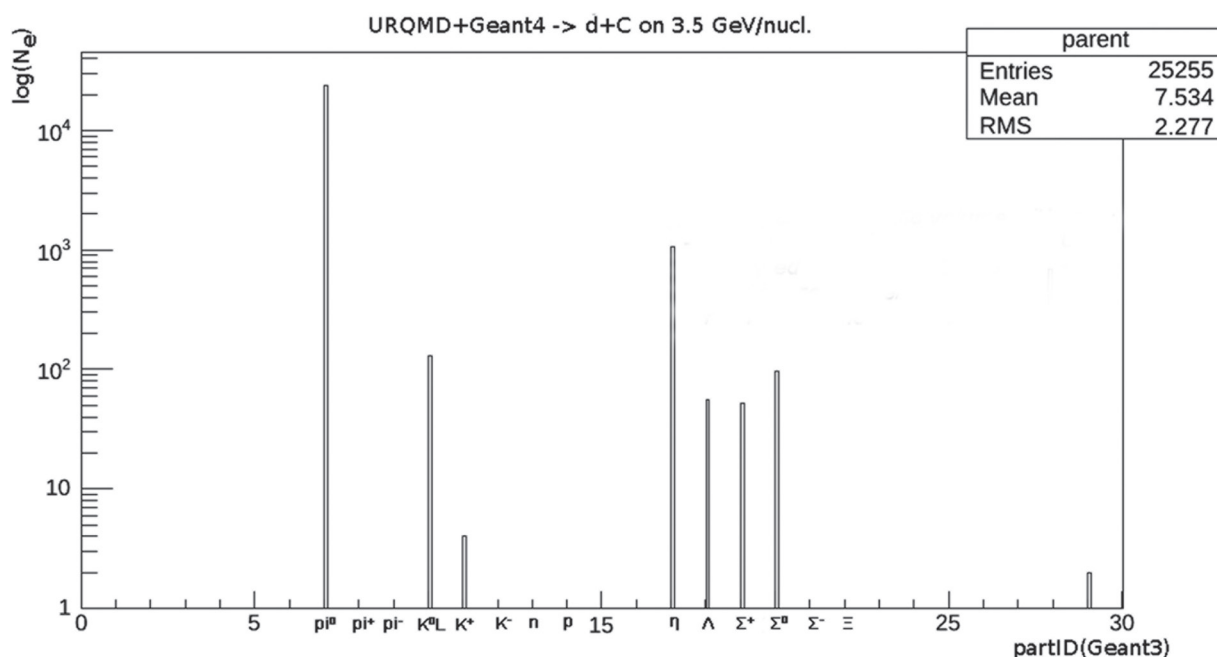


Рис. 2. «Родители» частиц, которые дают сигнал в объеме электромагнитного калориметра

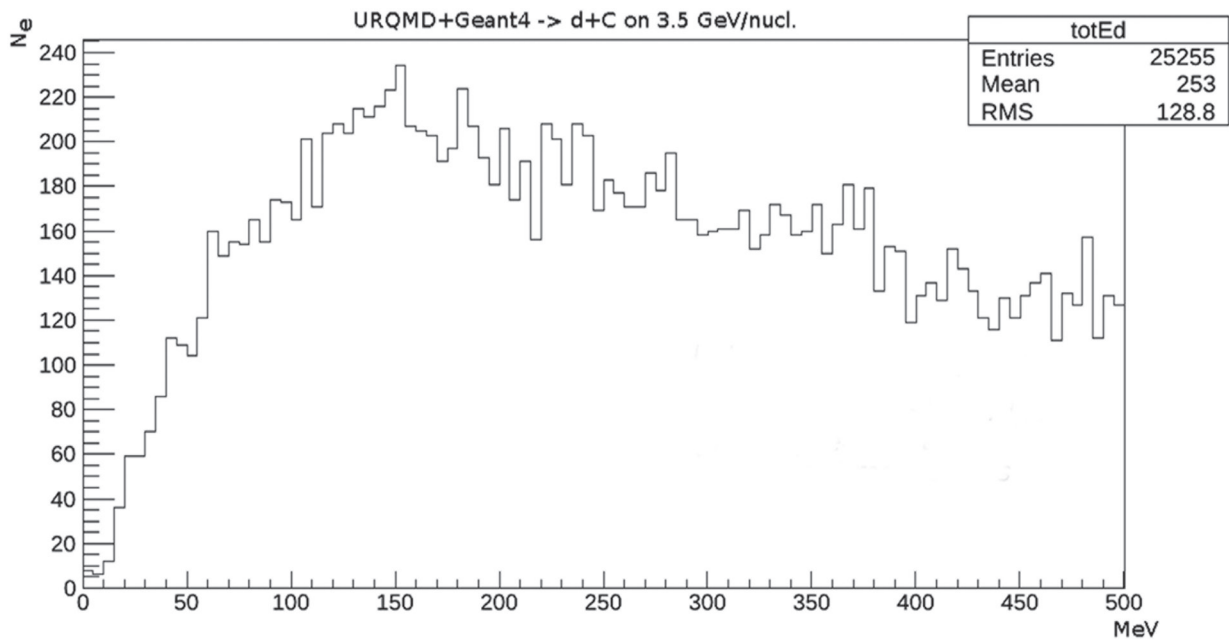


Рис. 3. Смоделированный фотонный спектр

Данные условия позволяют избавиться от вклада нейтронов, которые «эмитируют» фотоны в электромагнитном калориметре. Как видно из рис. 2, основными частицами в зарегистрированном фотонном спектре являются π^0 -мезоны. Соответствующий фотонный спектр приведен на рис. 3. Стоит отметить, что отсутствие аномального выхода мягких фотонов в низкоэнергетической области фотонного спектра менее 60 МэВ обусловлено отсутствием в Geant4 и UrQMD (и других пакетах) механизма генерации и транспортировки прямых МФ через вещество.

Выполненное моделирование доказывает уникальность и важность явления аномального выхода мягких фотонов. Формирование феноменологического описания, которое согласуется с экспериментальными данными, могло бы внести ясность в процессы адронизации. Стоит отметить, что результаты данного моделирования согласуются с полученными ранее в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) [9].

Заключение. Поиск причин аномального выхода мягких фотонов является нетривиальной задачей, во многом благодаря сложностям выделения полезного сигнала прямых мягких фотонов. Важным фактом, указывающим на возможную природу аномалии, является отсутствие нарушения выхода МФ в процессах слабого взаимодействия. Полученный в работе фотонный спектр демонстрирует актуальность исследуемого явления. В дальнейшем планируется тесное сотрудничество с сотрудниками коллаборации СВД-2 и выполнение физической программы с электромагнитным калориметром на установке VM@N на пучках Нуклотрона (d, Li, C и др.) в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия).

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф16Д-009 «Изучение выхода мягких фотонов в адронных и ядерных взаимодействиях на ускорителях ОИЯИ и ИФВЭ»).

Список использованной литературы

1. Observation of direct soft photon production in K^+p interactions at 70 GeV/c / P. V. Chliapnikov [et al.] // Phys. Lett. B. – 1984. – Vol. 141. – P. 56–59.
2. Further analysis of a direct soft photon excess in π^-p interactions at 280 GeV/c / A. Belogianni [et al.]; WA91 Collaboration // Phys. Lett. B. – 2002. – Vol. 548. – P. 122–128.
3. Perepelitsa, V. F. Anomalous Soft Photons in Hadronic Decays of Z^0 / V. F. Perepelitsa // Nonl. Phenom. Compl. Syst. – 2009. – Vol. 12, N 4. – P. 334–337.

4. Evidence for an excess of soft photons in hadronic decays of Z^0 / J. Abdallah [et al.]; DELPHI Collaboration // Eur. Phys. J. C. – 2006. – Vol. 47. – P. 273–294.
5. Shuryak, E. V. The “soft photon puzzles” and pion modification in hadronic matter / E. V. Shuryak // Phys. Lett. B. 231. – 1989. – P. 175–177.
6. Wong Cheuk-Yin. Anomalous soft photons in hadron production / Wong Cheuk-Yin // Phys. Rev. Lett. C. – 2010. – Vol. 81. – P. 064903.
7. Lichard, P. The cold quark-gluon plasma as a source of very soft photons in high energy collisions / P. Lichard, L. Van Hove // Phys. Lett. B. – 1990. – Vol. 245. – P. 605–608.
8. Рядовиков, В. Н. Топологические сечения в pp-взаимодействиях при 50 ГэВ / В. Н. Рядовиков // Ядерная физика. – 2012. – Вып. 75, № 3. – С. 343–348.
9. Kokoulina, E. Soft photon registration at Nuclotron / E. Kokoulina // Proc. Sci. – 2015. – Vol: SISSA. – P. 1–5.

Поступила в редакцию 04.07.2016