

**ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

УДК 539.17

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОНОВ И НЕЙТРАЛЬНЫХ
МЕЗОНОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО
СПЕКТРОМЕТРА ФОС ЭКСПЕРИМЕНТА ALICE**

© 2024 г. Д. А. Аверьянов^а, *, Д. С. Блау^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123098 Россия

*E-mail: daver99@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 30.05.2023 г.

Эксперимент ALICE оптимизирован для изучения свойств горячей кварк-глюонной плазмы, получаемой в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Один из электромагнитных калориметров ALICE, Фотонный Спектрометр (ФОС), предназначен для измерения прямых фотонов и спектров нейтральных мезонов. В настоящее время рассматривается возможность увеличить рабочую площадь детектора ФОС за счет использования кристаллов $PbWO_4$ эксперимента CMS. Возможно изменение кинематического диапазона по псевдобыстроте, с неизменным азимутальным углом, или азимутальному углу, с прежней псевдобыстротой. Также существует возможность раздвижения модулей детектора без добавления дополнительных кристаллов. Моделирование процессов столкновения протонов при энергии 13 ТэВ проводилось при помощи программы PYTHIA методом Монте-Карло. Из полученных результатов моделирования можно утверждать, что для проведения измерений в области низких p_T наиболее оптимальным является увеличение азимутального угла, поскольку появляется возможность исследовать область p_T вплоть до 25 МэВ/с для π^0 . Это позволяет провести измерения прямых фотонов в области очень низких энергий (десятки мегаэлектронвольт), а также, возможно, проверить теорему Лоу для мягких фотонов. При этом также значительно увеличивается доступный диапазон для измерения η -мезона (до 50 МэВ/с).

Ключевые слова: фотонный спектрометр, столкновения протонов, кварк-глюонная плазма, нейтральные мезоны, прямые фотоны, PYTHIA

DOI: 10.56304/S2079562923010049

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент ALICE [1] является одним из четырех основных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе. Он оптимизирован для изучения свойств горячей кварк-глюонной плазмы, получаемой в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Один из электромагнитных калориметров ALICE, Фотонный Спектрометр (ФОС) [2], предназначен для измерения прямых фотонов и спектров нейтральных мезонов.

ФОС – это высокогранулярный электромагнитный калориметр, который измеряет спектры фотонов с энергиями от десятков МэВ до 100 ГэВ. ФОС состоит из четырех модулей, расположенных в нижней части детектора ALICE на радиальном расстоянии 460 см от точки взаимодействия. Он покрывает примерно четверть единицы по псевдобыстроте $|\eta| \leq 0.125$ и азимутальный угол $250^\circ < \phi < 320^\circ$ (рис. 1а). Три модуля ФОС состоят из 3584 элементов, расположенных в 56 рядов по 64 элемента в каждом, а четвертый модуль имеет

56 рядов по 32 элемента. Каждый элемент изготовлен из кристалла $PbWO_4$ размером $22 \times 22 \times 180$ мм³ и фотодетектора APD размером 5×5 мм². Другие важные характеристики детектора приведены в табл. 1.

2. ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ФОС

В настоящее время рассматривается возможность увеличения рабочей поверхности ФОСа за счет использования кристаллов $PbWO_4$ эксперимента CMS. Кристаллы CMS имеют проекционную геометрию в узком торце 28×28 мм², в широком – 30×30 мм². Так, можно увеличить рабочую поверхность, изменив диапазон по псевдобыстроте, сохраняя неизменным азимутальный угол (рис. 1б), или азимутальному углу, оставляя прежней псевдобыстроту (рис. 1в). Также рассматривалась возможность раздвижения модулей детектора на угол $\Delta\phi = 30^\circ$ между 1–2 и 3–4 модулями без добавления дополнительных кристаллов (рис. 1г).

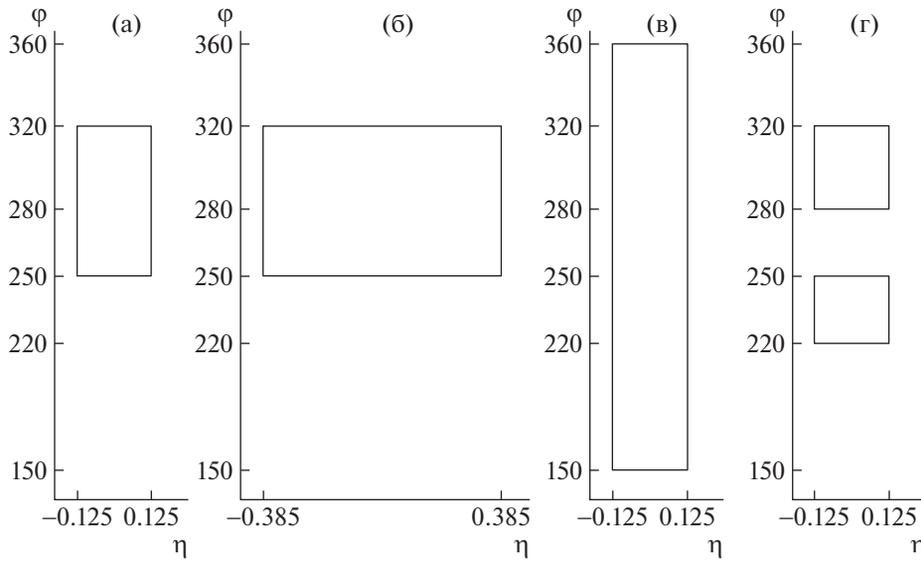


Рис. 1. Различные варианты модернизации ФОС: (а) Текущий вариант ($|\eta| \leq 0.125$, $\Delta\phi = 70^\circ$); (б) Увеличение псевдо-быстроты ($|\eta| \leq 0.385$, $\Delta\phi = 70^\circ$); (в) Увеличение азимутального угла ($|\eta| \leq 0.125$, $\Delta\phi = 210^\circ$); (г) Раздвижение модулей ($|\eta| \leq 0.125$, $220^\circ < \phi < 250^\circ$ и $280^\circ < \phi < 320^\circ$).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ В PYTHIA

Моделирование процессов столкновения протонов при энергии 13 ТэВ проводилось при помощи программы PYTHIA [3] методом Монте-Карло. Использовалась версия PYTHIA 8.243 с включенным процессом SoftQCD:inelastic. Рассматривались рожденные в результате столкновений нейтральные мезоны: пионы (π^0) и эта-мезоны (η и η') – с каналами распада на два фотона: $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ и η (η') $\rightarrow 2\gamma$. Для этой задачи было сгенерировано 20000 событий без ограничения в кинематический диапазон по η и ϕ (ограничение по быстроте – $|y| < 0.5$). Рассчитанные с помощью

PYTHIA спектры π^0 , η и η' показаны на рис. 2а. Получить зависимость величины геометрической эффективности (acc) от поперечного импульса p_T удалось, разделив количество событий, в которых фотоны распада попадали в диапазон ($|\eta| \leq 0.125$, $\Delta\phi = 70^\circ$) (таких событий было сгенерировано 1.6 млн для π^0 , 16.5 млн для η и 58 млн для η'), на общее число сгенерированных событий на единицу быстроты (рис. 2б) по формуле:

$$\text{acc} = \frac{dN/dp_T dy \text{ (in PHOS acceptance)}}{dN/dp_T dy \text{ (generated)}}.$$

Таблица 1. Основные характеристики детектора ФОС

Активный элемент	Кристаллы PbWO ₄
Мольеровский радиус	2.0 см
Фотодетектор	APD 5 × 5 мм ²
Толщина	20 X ₀
Акцептанс	Run 1: $ \eta < 0.12$, $260^\circ < \phi < 320^\circ$ Run 2: $ \eta < 0.12$, $250^\circ < \phi < 320^\circ$
Гранулярность	Ячейка 2 × 2 см ² $\Delta\phi \times \Delta\eta = 0.0048 \times 0.0048$ рад
Модульность	3 + 1/2 модулей 12544 ячеек
Динамический диапазон	0–100 ГэВ
Энергетическое разрешение	$\sigma_E/E = 1.8\%/E \oplus 3.3\%/\sqrt{E} \oplus 1.1\%$
Расстояние от точки взаимодействия	460 см, 0.2 X ₀

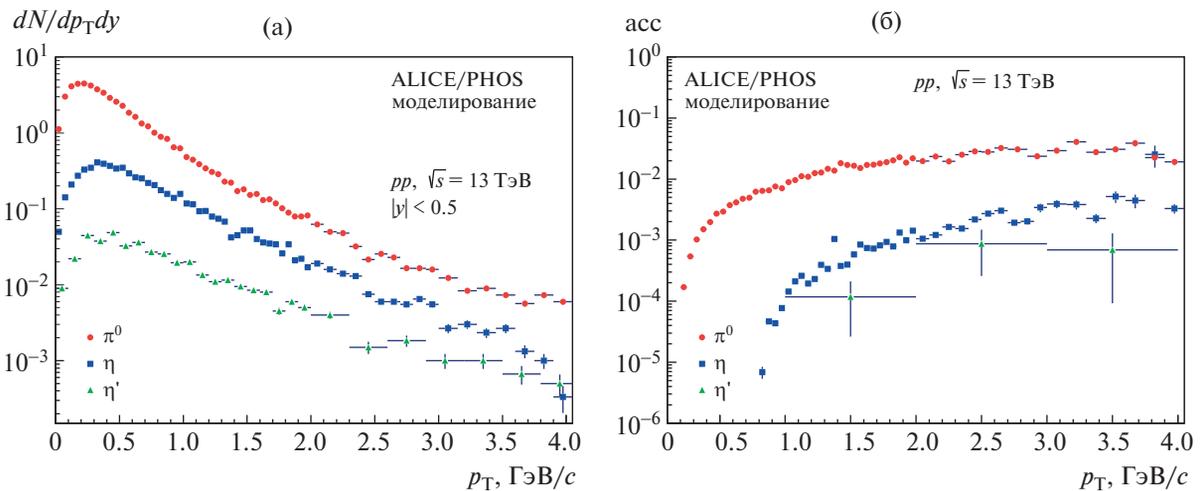


Рис. 2. Инвариантные спектры нейтральных мезонов (а); геометрическая эффективность (acc) нейтральных мезонов (б).

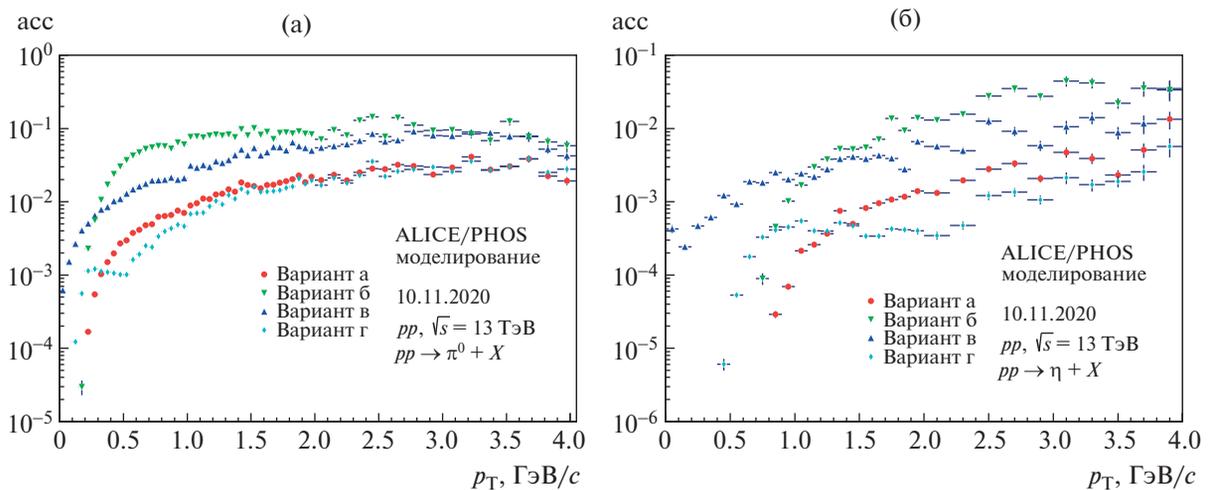


Рис. 3. Изменение геометрической эффективности (acc) в случае π^0 -мезона (а); изменение acc в случае η -мезона (б).

Аналогичные зависимости были рассчитаны и для каждого из возможных вариантов модернизации детектора ФОС (б, в и г) для π^0 и для η на рис. 3 соответственно.

Из полученных результатов моделирования можно утверждать, что для проведения измерений в области низких p_T наиболее оптимальным является увеличение азимутального угла ϕ , поскольку появляется возможность исследовать область p_T вплоть до 25 МэВ/с для π^0 (рис. 3а). Это позволяет провести измерения прямых фотонов в области очень низких энергий (десятки мэгаэлектрон-вольт), а также, возможно, проверить теорему Лоу [4] для мягких фотонов, дающую связь между выходом тормозного излучения частиц и выходом заряженных частиц. При этом также значи-

тельно увеличивается доступный диапазон для измерения η -мезона (до 50 МэВ/с) (рис. 3б). При раздвижении модулей детектора также становится возможным рассматривать область низких p_T (для π^0 – до 120 МэВ/с). Однако, в области 0.3 – 1.5 ГэВ/с для π^0 (рис. 3а) и 1.3–3 ГэВ/с для η -мезонов (рис. 3б) для η -мезонов эффективность заметно падает (примерно на 40%).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривались три различных варианта изменения акцептанса: изменение псевдобыстроты, изменение азимутального угла и раздвижение модулей. Для всех этих вариантов были смоделированы процессы столкновения протонов при энергии 13 ТэВ при помощи программы PYTHIA

методом Монте-Карло. Были рассмотрены изменения геометрической эффективности π^0 и η при различных изменениях акцептанса. Для обоих мезонов становится возможным рассматривать область низких p_T вплоть до 25 и 50 МэВ/с, соответственно, при увеличении азимутального угла. При изменении псевдобыстроты область таких низких p_T остается недостижимой, но улучшается эффективность в области средних p_T . При раздвижении модулей, т.е. без использования дополнительных кристаллов, область p_T вплоть до 120 и 450 МэВ/с становится доступной для исследова-

ния, но в области средних p_T наблюдается значительное уменьшение эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Aamodt K. et al.* // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08002.
2. *Dellacasa G. et al.* ALICE Technical Design Report of the Inner Tracking System (ITS). 1999. Geneva: CERN.
3. *Sjöstrand T. et al.* // Comput. Phys. Commun. 2015. V. 191. P. 159.
4. *Low F.* // Phys. Rev. 1958. V. 110 (4). P. 974.

Evaluation of Photon and Neutral Meson Measurement Capabilities Using the Upgraded PHOS Spectrometer of the ALICE Experiment

D. A. Averyanov^{1, *} and D. S. Blau¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123098 Russia

*e-mail: daver99@yandex.ru

Received May 30, 2023; revised May 30, 2023; accepted May 30, 2023

Abstract—The ALICE experiment is optimized to study the properties of hot quark-gluon plasma produced in ultra-relativistic heavy-ion collisions. One of the ALICE electromagnetic calorimeters, the Photon Spectrometer (PHOS), is designed to measure direct photons and neutral mesons spectra. At the present time the possibility of increasing acceptance of the PHOS detector by using PbWO₄ crystals of the CMS experiment is being considered. It is possible to change the kinematic range by varying pseudorapidity, with a constant azimuthal angle, or azimuthal angle, with the same pseudorapidity. It is also possible to move apP the detector modules without adding extra crystals. The simulation of proton-proton collisions at 13 TeV was carried out using the PYTHIA package. It can be argued from the obtained simulation results that for measurements in the low p_T region, the most optimal option is to increase the azimuthal angle, since it becomes possible to study the p_T region down to 25 MeV/c for π^0 . This makes it possible to measure direct photons at very low energies (tens of megaelectronvolts) and possibly to verify the Low theorem for soft photons. The available range for measuring η -meson significantly increases as well (down to 50 MeV/c).

Keywords: photon spectrometer, proton-proton collisions, quark-gluon plasma, neutral mesons, direct photons, PYTHIA