

УДК 539.1.05, 539.12

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ ДЛЯ ПОИСКА ЛЕГКОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

В. В. Дубинина¹, Н. П. Егоренкова¹, А. С. Кобякин¹, Е. А. Пожарова¹,
Н. Г. Полухина^{2,3}, В. А. Смирнитский¹, Н. И. Старков², Н. С. Тан²,
М. М. Чернявский², Т. В. Щедрина²

Одним из кандидатов на частицы темной материи является тяжелый фотон. В работе описывается эксперимент по поиску этих частиц с помощью ядерных фотоэмульсий, облученных в пучке позитронов с энергией 32 ГэВ. Проведена методическая работа для оценки эффективности поиска электронно-позитронных пар и точности определения эффективной массы.

Ключевые слова: темная материя, фотоэмульсия, микроскоп, сканирование, масса, ПАВИКОМ, распады.

В последнее десятилетие ставятся многочисленные эксперименты для выяснения природы темной материи, ответственной за наблюдаемые астрофизические явления. Некоторые теоретические модели предсказывают существование легкой темной материи (dark photon, DPh). Одним из таких возможных кандидатов является фотон A' – векторная частица со спином 1 и массой < 100 МэВ/ c^2 , которая может смешиваться с обычными фотонами [1]. Величина смешивания может быть порядка $10^{-5} - 10^{-3}$, что делает наблюдение реакций с A' вполне реальным. В результате осцилляций возникает переход обычного фотона в массивный A' с последующим его распадом. Опубликован проект эксперимента [2] поиска легкой темной материи на ускорителе SPS (ЦЕРН) для регистрации распада A' , образованного в реакции типа тормозного излучения при рассеянии электронов высокой энергии на ядре ($e^- Z \rightarrow e^- Z A'$). Виртуальный фотон кулоновского поля ядра некоторое время (в результате осцилляций) существует, как массивный и, в результате взаимодействия с электроном, может быть испущен из области

¹ ИТЭФ, 117218 Россия, Москва ул. Большая Черемушkinsкая, 25 ФГУП “ГНЦ РФ – ИТЭФ.”

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mmchernyav@yahoo.com.

³ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

ядра с последующим распадом $A' \rightarrow e^-e^+$ (рис. 1). Регистрацию пары предполагается проводить с помощью электронных детекторов.

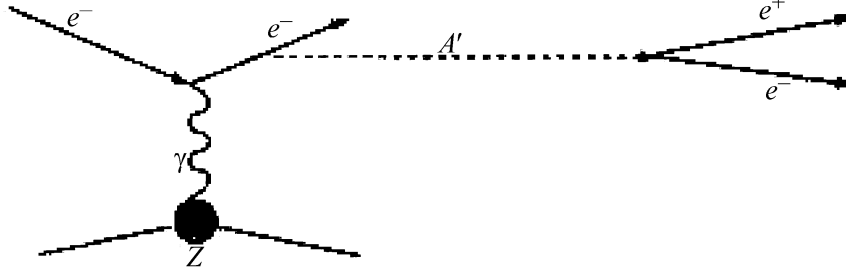


Рис. 1: Образование фотона A' (DPh) в реакции $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$ рассеяния электрона на ядре с последующим распадом A' на e^+e^- -пару.

Коллаборация The DarkLight Collaboration [3] готовит эксперимент для поиска A' в интервале от 10 до 100 МэВ/с² при электрон-протонном рассеянии $e^-p \rightarrow e^-pA'$ и последующем распаде $A' \rightarrow e^-e^+$. В работе [4] предполагается искать DPh (Z_D) в pp -столкновениях на LHC при лептонном распаде хиггс-бозона $h \rightarrow ZZ_D \rightarrow 4ll$ и в реакции $pp \rightarrow Z_D \rightarrow ll$. В эксперименте NA 48/2 (CERN) [5] проводится поиск A' в распадах K^+ -мезонов: $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma A'$ и $A' \rightarrow e^+e^-$ в области масс $A' > 10$ МэВ/с². В работе [6] приведен анализ чувствительности экспериментов XENON10 и XENON100 к обнаружению DPh в интервале масс 10 эВ/с² – 100 КэВ/с². Рассмотрена также возможность наблюдения распада $A' \rightarrow 3\gamma$ в экспериментах с ксеноном. В статье [7] исследовалась возможность существования ультралежкой темной материи с массой меньше eV (т.н. холодная темная материя, CDM). В эксперименте Mu3e [8] наблюдался распад 5.5×10^{16} мюонов с целью обнаружения распада A' с массой ~ 10 –80 МэВ/с² по каналу $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\nu_\mu A'$, $A' \rightarrow e^+e^-$ (рис. 2). Получено ограничение на константу смешивания $\varepsilon^2 \leq 10^{-8}$.

Анализ результатов поиска легкой темной материи в эксперименте XENON10, представленный в работе [9], позволил получить для DPh: 10^{-5} eV/с² $< m_v < 10^3$ eV/с² и $km_v < 10^{-12}$ eV/с², где k – константа смешивания, а m_v – масса DPh.

Мы проводим опыт с ядерной фотоэмульсией для поиска рождения A' в пучке позитронов $e^+Z \rightarrow e^+ZA'$ с последующим его распадом $A' \rightarrow 3\gamma$. В этом опыте используется эмульсионная камера, облученная в пучке позитронов с энергией 32 ГэВ на ускорителе в ИФВЭ (Протвино). Через камеру пропущено $\sim 10^7$ частиц. Для оценки эффективности поиска и точности определения массы частицы по γ -квантам мы использовали

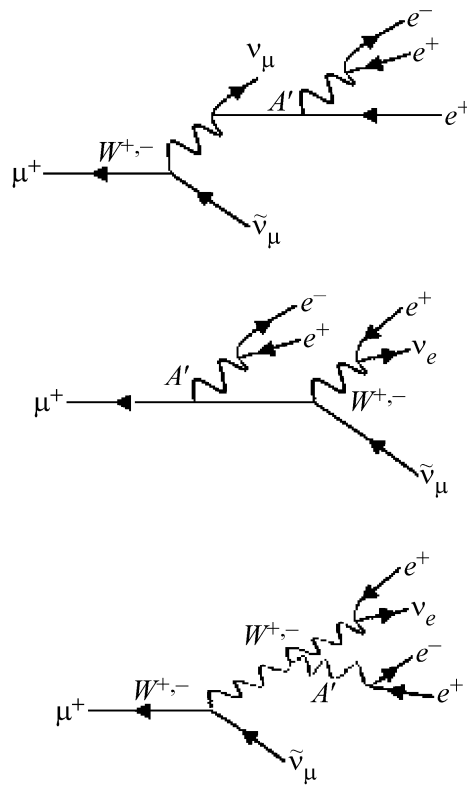


Рис. 2: Диаграммы Феймана для образования A' при распаде мюона, $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\nu_\mu A'$, $A' \rightarrow e^+e^-$.

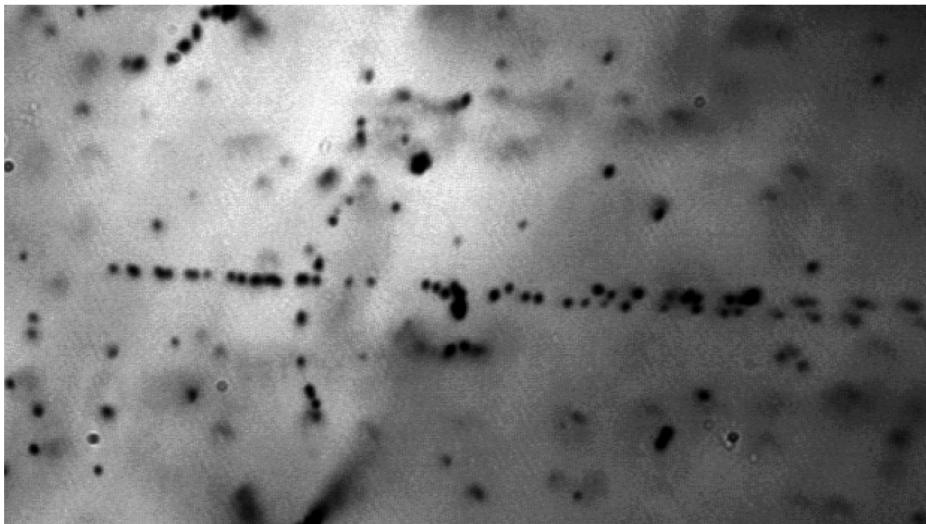


Рис. 3: Микрофотография конверсии γ -кванта в пару e^+e^- .

облучение эмульсионной камеры адронами, где наблюдали по электронам конверсии γ -кванты от распада π^0 -мезонов ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) и определяли направление их вылета. На рис. 3 показана микрофотография пары (e^+e^-). По этим измерениям вычислялась величина «промашки» – минимальное расстояние между направлениями вылета двух γ -квантов. Если величина «промашки» не превышала 500 мкм, то считалось, что эти два кванта вылетают из одной точки. Радиационная длина в ядерной эмульсии ~ 3 см, поэтому расстояние от вершины (места распада π^0 -мезона) до точки конверсии γ -квантов может составлять величину ~ 1 см. Затем по многократному рассеянию электронов определялась их энергия и вычислялась масса частицы, распавшейся на два γ -кванта, по формуле (1):

$$M = 2 \cos(\beta/2)(E_1 E_2)^{0.5}. \quad (1)$$

Здесь β – угол между импульсами γ -квантов P_1 и P_2 , E_1 и E_2 – их энергии. На рис. 4 гистограммой показано распределение частиц по массам, полученное в результате измерений и вычислений по формуле (1).

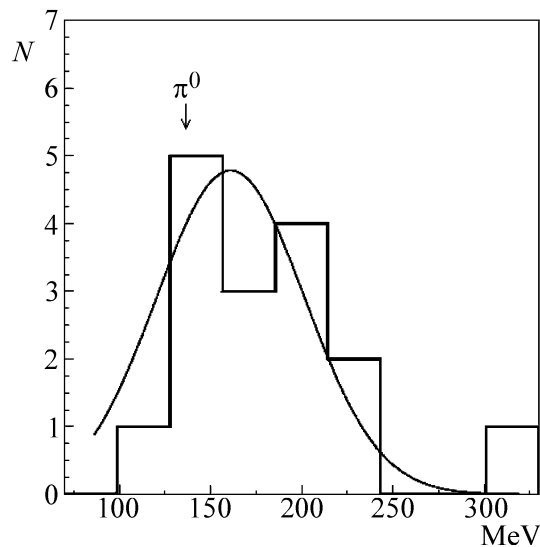


Рис. 4: Спектр масс частиц, измеренный по e^+e^- -парам от конверсии γ -квантов, возникающих при распаде $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.

Ошибка в измерении массы $\sim 20\text{--}25\%$ связана с необходимостью, для определения энергии γ -квантов, измерения многократного рассеяния следов четырех электронов. Определение массы частиц, распадающихся на три γ -кванта, разработано в работе [10] для поиска распада $\omega^0 \rightarrow 3\gamma$ и будет использовано нами для поиска распадов $A' \rightarrow 3\gamma$.

Эмульсионная камера, облученная позитронами с энергией 32 ГэВ, собрана из 29 слоев ядерной фотоэмульсии размером 10×20 см². Облучение проведено вдоль длинной стороны пучком позитронов с диаметром в сечении ~ 2 см. Ожидаемое распределение по энергии π^0 -мезонов в реакции их рождения с ядрами фотоэмульсии, полученное методом Монте-Карло, показано на рис. 5.

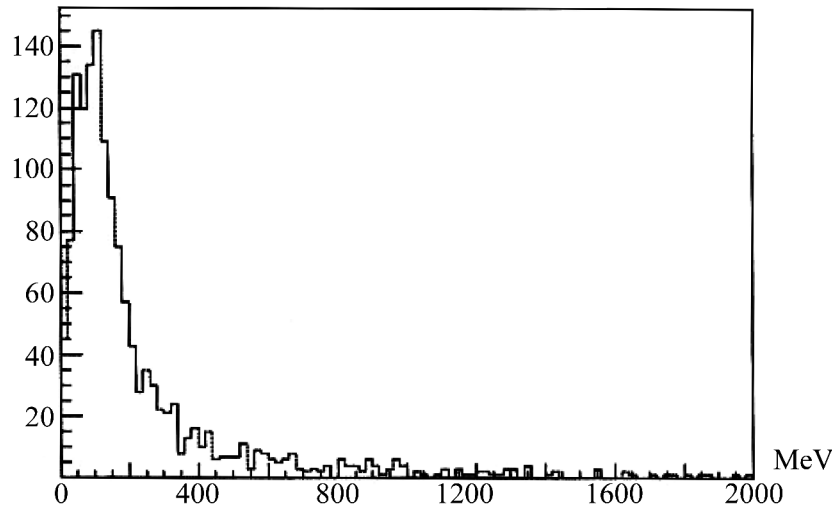


Рис. 5: Распределение по энергии π^0 -мезонов, рожденных в реакции позитронов с ядрами фотоэмульсии, полученное методом Монте-Карло.

В результате розыгрыша 5×10^4 e^+A взаимодействий получен энергетический спектр π^0 -мезонов с наиболее вероятным значением $E_\pi \sim 100$ МэВ. Эти энергии пионов (30–200) МэВ соответствуют $\beta \sim (0.6–0.9)$, что достаточно удобно для наблюдения распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (угол разлета γ -квантов в лабораторной системе координат $180^\circ–70^\circ$), что позволит сканировать эмульсию с целью поиска конверсионных пар на расстоянии $\sim 1–2$ см от пучка (конверсионная длина γ -квантов в эмульсии ~ 3 см) с достаточной эффективностью.

Сканирование эмульсий проводится на полностью автоматизированных микроскопах комплекса ПАВИКОМ. Микроскоп представляет собой робот, на подвижном вдоль осей $X–Y$ столике которого закреплена эмульсия, и CMOS камеру, закрепленную по направлению оптической оси (Z), вдоль которой она может перемещаться для изменения положения фокальной поверхности с шагом, примерно соответствующим половине глубины фокуса (3 мкм, шаг может быть и меньшим, выбор шага определяется объемом обрабатываемой информации). Управляющая рабочая станция содержит контрол-

лер движения, перемещающий эмульсию в место, которое требуется отсканировать, и перемещает камеру вдоль оси Z , по глубине эмульсии, для создания томографической последовательности изображений вдоль ее глубины. Для обработки площадей, больших размера одного поля зрения (около 300×400 мкм²), производится последовательное сканирование соседних полей зрения так, чтобы покрыть всю необходимую площадь. Изображения захватываются с мегапиксельной камеры, работающей на скорости 376 кадров в секунду, при неподвижном вдоль осей X – Y столике, при равномерном движении вдоль оси Z (так называемый stop-and-go алгоритм). Благодаря маленькой выдержке ($< 1/3000$ сек) захватываемые изображения практически неподвижны. Далее они отправляются на плату обработки изображения на рабочей станции, где производится усиление сигнала от проявленных зерен в эмульсии и устранение эффекта оптических aberrаций. Трехмерное множество кластеров обрабатывается online на центральном процессоре, при этом восстанавливаются цепочки зерен в одном слое эмульсии, т.н. микротреки. Микротрек может содержать от 6 до 16 кластеров.

Для обработки эмульсий на комплексе ПАВИКОМ в 2013–2014 гг. было разработано новое модернизированное программное обеспечение для сканирующих систем нового поколения, которое позволяет сканировать со скоростью до 40 см²/час и выполнять обработку изображений в режиме реального времени (означающем в данном контексте обработку видеоизображений с микроскопа непосредственно при сканировании, без стадии сохранения огромного объема графических файлов на промежуточном носителе). На ПАВИКОМ были разработаны ключевые элементы, позволившие создать распределенную систему обработки. Задействовав вычислительные возможности GPU (Graphical Processor Unit – графический процессор), удалось значительно ускорить обработку, повысить эффективность реконструкции треков, при обработке данных в реальном времени в режиме непрерывного сканирования. Такой автоматизированный метод измерений практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с тем, что даёт использование так называемых полуавтоматов. Новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий, что прежде было практически нереально. Создание подобных автоматизированных комплексов имеет большое значение, поскольку оно обеспечивает более высокий уровень проведения экспериментов с применением трековой методики, и существенно расширяет круг задач, где эта техника может быть эффективно использована. При сканировании измеряется направление вылета γ -

квантов (по конверсионным e^+e^- -парам) и определяется, путем перебора всех квантов, величина “промашки” (d). Эмульсии позволяют измерять геометрические параметры взаимодействий частиц с хорошей точностью, поскольку характерное расстояние между зернами эмульсии ~ 1 мкм. Если d превышает 10 мм (с такой точностью предсказывается определение вершины взаимодействия в эксперименте ОПЕРА, обработка событий которого также проводилась на ПАВИКОМ), то такие пары γ -квантов не участвуют в дальнейшем анализе. Для анализа первичной вершины производится объемное сканирование как минимум 1 см². Ожидаемый результат эксперимента: ограничение на массу $A \leq 100$ МэВ/ c^2 , на константу смешивания $\varepsilon \leq 10^{-3}$.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. Jaeckel and A. Ringwald, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **60**, 405 (2010); J. L. Hewett et al., arXiv:1205.2671; L. B. Okun, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **83**, 892 (1982); [*Sov. Phys. JETP* **56**, 502(1982)].
- [2] S. Andreas et al., arXiv:1312.3309v1 [hep-ph]; S. N. Gninenko et al., arXiv:1503.05687 [hep-ph].
- [3] J. Balewski et al., arXiv: 1412.4717v1 [physics.ins-det].
- [4] D. Curtin et al., arXiv: 1412.0018v1 [hep-ph].
- [5] E. Goudzovski, arXiv: 1412.8053v1 [hep-ex].
- [6] H. An et al., arXiv: 1412.8378v1 [hep-ph].
- [7] B. Dobrich, arXiv: 1501.03274v1 [hep-ph].
- [8] B. Echenard et al., arXiv: 1411.1770v1 [hep-ph].
- [9] H. An et al., arXiv: 1401.8287v1 [hep-ph].
- [10] В. В. Бармин и др., *ЖЭТФ* **45**, 1879 (1964).

Поступила в редакцию 2 июля 2015 г.