

# Отчёт по научно исследовательской–практике

Георгий Павлович РАЗУВАЕВ

аспирант 3-го года обучения ИЯФ им. Г. И. Будкера, СО РАН

26 января 2017 г.

## Содержание

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Введение</b>   | <b>1</b> |
| <b>2 Мотивация</b>  | <b>2</b> |
| 2.1 Относительные вероятности распада . . . . .               | 2        |
| 2.1.1 $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$ . . . . .              | 2        |
| 2.1.2 $\rho \rightarrow \pi^0\gamma$ . . . . .                | 3        |
| 2.1.3 $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$ . . . . .                | 3        |
| 2.2 Аномальный магнитный момент мюона . . . . .               | 3        |
| 2.2.1 История . . . . .                                       | 3        |
| 2.2.2 Вклады в $g - 2$ . . . . .                              | 4        |
| 2.2.3 Расчёт вкладов в различных моделях . . . . .            | 4        |
| 2.3 Структура мезонов . . . . .                               | 4        |
| <b>3 Другие измерения</b>                                     | <b>5</b> |
| <b>4 Прделанная работа</b>                                    | <b>5</b> |
| 4.1 Эффективность реконструкции фотона . . . . .              | 6        |
| 4.2 CsI калориметр КМД-3 . . . . .                            | 6        |
| 4.3 Эксперимент по измерению $(g - 2)_\mu$ в J-PARC . . . . . | 7        |
| 4.4 Педагогическая практика . . . . .                         | 8        |
| 4.5 Участия и публикации . . . . .                            | 8        |
| 4.6 Награды и премии . . . . .                                | 9        |

## 1 Введение

В физике элементарных частиц отдельное место занимает измерение вероятности рождения тех или иных конечных состояний в реакциях частиц — сечений процессов. Изучение зависимости величины сечения от энергии взаимодействия предоставляет экспериментальную информацию для проверки и разработки различных моделей и теорий. Использование встречных пучков является одним из основных методов получения данных, что успешно используется в институте ядерной физики им. Г. И. Будкера уже более, чем пол века. Для столкновений используются электрон-позитронные пучки. Сейчас в институте работают два коллайдера ВЭПП-2000 [Бер+11] и ВЭПП-4. Первый из них может сканировать энергии в диапазоне от 320 ГэВ до 2 ГэВ. Обе точки взаимодействия пучков на ВЭПП-2000 оккупированы универсальными детекторами элементарных частиц: сферическим нейтральным детектором СНД и криогенным магнитным детектором КМД-3 [Fed06].

Детектор КМД-3 позволяет эффективно регистрировать события различных процессов с последующей физической реконструкцией событий. Данная работа посвящена изучению двух радиационных процессов  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  с конечным трёх-фотонным состоянием с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000. Основные данные по первому процессу получены по результатам работы коллайдера ВЭПП-2М с двумя детекторами КМД-2 и СНД в области энергий 0.6–1.4 ГэВ. Сечение  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  также изучалось методом радиационного возврата на детекторе ВаВар.

## 2 Мотивация

В столь большом и интересном мире нашлось место и для моей работы, которая посвящена измерению сечений реакций  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  и  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  с распадом псевдоскалярного мезона на два фотона. Выполняемый анализ проводится по данным набранным детектором КМД-3 на ускорителе встречных электрон-позитронных пучков ВЭПП-2000. Дальнейшая часть реферата пытается показать возможный интерес к выбранной теме.

### 2.1 Относительные вероятности распада

Наиболее точные измерения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  проведены в экспериментах на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-2М с детекторами КМД-2 и СНД. Из этих данных только распад  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$  был измерен с относительно высокой точностью.

#### 2.1.1 $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$

Точность обобщённого результата КМД-2 и СНД произведения  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma) \times B(\omega \rightarrow e^+e^-)$  составляет 1.7%. Однако, это значение произведения отличается от аналогичного, рассчитанного по  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)$  и  $B(\omega \rightarrow e^+e^-)$ , приведённых в таблице ПДГ [Oli+14] (см. Рис. 1). Эта разница вызвана существованием противоречием между измеренными значе-

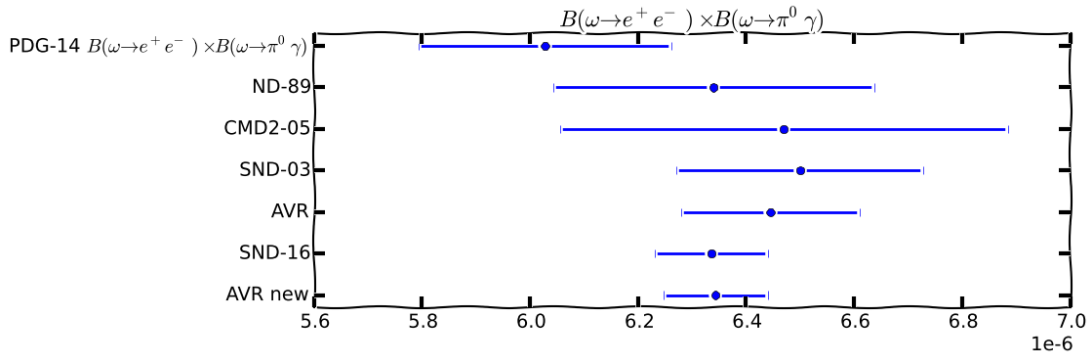


Рис. 1:  $B(\omega \rightarrow e^+e^-) \times B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)$ . PDG-14 — [Oli+14], ND-89 — [Dol+89], CMD2-05 — [Akh+05], SND-03 — [Ach+03a], AVR — среднее [Dol+89; Akh+05; Ach+03a], SND-16 — [Ach+16], AVR new — среднее [Dol+89; Akh+05; Ach+16]

ниями  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma) \times B(\omega \rightarrow e^+e^-)$ ,  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma) \times B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$  и  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)/B(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$  (см. Рис. 2). Два последних выражения известны с точностью 1.6% и 1.8% соответственно, и определяют нынешнее значение  $B(\omega \rightarrow \pi^0\gamma)$ , приводимое ПДГ. Для прояснения этого противоречия необходимо улучшение точности измерения сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  в области  $\omega$ -резонанса.

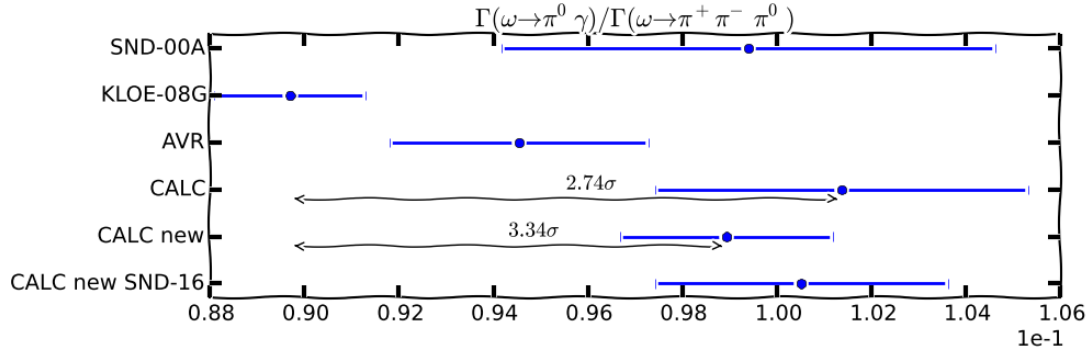


Рис. 2: Отношение ширины распада  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$  к  $\Gamma(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$ . SND-00A — [Aul+00], KLOE-08G — [Amb+08], AVR — средние значения предыдущих двух, CALC — среднее [Akh+05; Ach+03a; Dol+89] делённое на среднее [Akh+04; Aub+04; Ach+03b], CALC new — среднее [Akh+05; Ach+16; Dol+89] делённое на среднее [Akh+04; Aub+04; Ach+03b], CALC new SND-16 — [Ach+16] делённое на среднее [Akh+04; Aub+04; Ach+03b]

### 2.1.2 $\rho \rightarrow \pi^0\gamma$

Точность измерения относительной вероятности распада  $\rho \rightarrow \pi^0\gamma$  составляет 13% и определяется статистикой существующих измерений.

### 2.1.3 $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$

Формальная точность значения ПДГ вероятности распада  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$  лучше 5%. Оно получено путём усреднения измерений [Ach+00; Akh+05] с систематической ошибкой порядка 8% каждое. Систематическая ошибка возникает из неопределённости интерференции нерезонансной амплитуды с амплитудой  $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$  распада. Нерезонансная амплитуда определяется вкладами хвостов резонансов  $\omega$  и  $\rho^0$ , заодно дают вклад и высшие возбуждения векторных мезонов.

Чтобы уменьшить неопределённость таких вкладов, необходимо улучшить точность измерения сечения  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  в широком диапазоне энергий от энергий  $\sim 300$  МэВ до 2 ГэВ.

## 2.2 Аномальный магнитный момент мюона

Как люди не могут забыть Герострат, сжёгшего храм Артемиды, так и физики элементарных частиц рвутся попасть в истории кардинально изменив или изничтожив современную парадигму науки — Стандартную Модель. Некоторые из них ищут Новую Физику пробуя другие области энергии и массы, кто-то ищет новые распады, другие же могут мерить что-то очень точно и сравнивать это с предсказаниями теории. К последней группе относится изучение аномального магнитного момента мюона.

### 2.2.1 История

Экспериментальные измерения  $a_\mu$  впервые было осуществлено в СЛАКе [Gar+60]. Затем последовала серия измерений в ЦЕРНе, уступившее свое место эксперименту в БНЛ. В настоящий момент готовится два эксперимента по измерению  $g-2$ : в ФНАЛ [Gra+15] и Джей-ПАРКе [Sai12].

## 2.2.2 Вклады в $g - 2$

Для нахождения теоретического значения проводятся вычисления. Традиционно их разбивают на три группы

$$a_\mu = a_\mu^{QED} + a_\mu^{EW} + a_\mu^{had}, \quad (1)$$

где  $a_\mu^{QED}$  — электродинамический вклад,  $a_\mu^{EW}$  — вклад слабых взаимодействий,  $a_\mu^{had}$  — вклад сильных взаимодействий.

Вклад сильных взаимодействий принято разбивать на древесный, с одной дополнительной вершиной, с двумя и т. д. Отдельно выделяют так называемые диаграммы рассеяния света на свете.

Изучаемые процессы интересны для всех типов вкладов в  $a_\mu^{had}$ .

## 2.2.3 Расчёт вкладов в различных моделях

Существует много способов, чтобы рассчитать те или иные вклады. Главным образом это вызвано тем, что прямое вычисление согласно КХД крайне затруднено с математической точки зрения. Для обхода проблемы используются различные феноменологические модели, а также вычисления на решётках. Однако, удобнее рассматривать не методы, а научные группы, которые проводят эти расчёты.

Вклад процессов  $\pi^0\gamma$  и  $\eta\gamma$  в адронную поляризацию вакуума согласно [Hag+04] составляют:

$$a_\mu(\pi^0\gamma, 0.6 < \sqrt{s} < 1.03 \text{ ГэВ}) = (4.50 \pm 0.15) \times 10^{-10}, \quad (2)$$

$$a_\mu(\pi^0\gamma, \sqrt{s} < 0.6 \text{ ГэВ}) = (0.13 \pm 0.01) \times 10^{-10}, \quad (3)$$

$$a_\mu(\eta\gamma, 0.69 < \sqrt{s} < 1.43 \text{ ГэВ}) = (0.73 \pm 0.03) \times 10^{-10}. \quad (4)$$

Для процесса  $\pi^0\gamma$  в области ниже 0.6 ГэВ отсутствуют экспериментальные данные, вследствие чего сечение реакции экстраполировалось в рамках пертурбативной хиральной теории в приближении доминантности омега-мезона. В случае процесса  $\eta\gamma$  также использовалось ChPT для описания области вблизи порога и был показан вклад менее  $1 \times 10^{-12}$ . Этой же группой в работе [Hag+11] для диапазона энергий 0.305–1.8 ГэВ были получены значения  $a_\mu(\pi^0\gamma) = (4.54 \pm 0.14) \times 10^{-10}$  и  $a_\mu(\eta\gamma) = (0.69 \pm 0.02) \times 10^{-10}$ .

В работе [AKV10] вычисление вкладов  $\eta\gamma$  и  $\pi^0\gamma$  сделано в рамках модели Намбу–Иона-Лазинио с использованием дисперсионного соотношения рассчитаны вклады:

$$a_\mu(\pi^0\gamma, 0.6 < \sqrt{s} < 1.03 \text{ ГэВ}) = (4.50 \pm 0.15) \times 10^{-10}, \quad (5)$$

$$a_\mu(\pi^0\gamma, \sqrt{s} < 0.6 \text{ ГэВ}) = (0.13 \pm 0.01) \times 10^{-10}, \quad (6)$$

$$a_\mu(\eta\gamma, 0.69 < \sqrt{s} < 1.33 \text{ ГэВ}) = (0.73 \pm 0.03) \times 10^{-10}, \quad (7)$$

полностью соответствующие предыдущим работам.

## 2.3 Структура мезонов

Являясь частью СМ квантовая хромодинамика отвечает за процессы с участием адронов. Однако, она весьма ограничена в использовании для области энергий с характерной передачей импульса ниже 1 ГэВ. Это привело к популярности феноменологических подходов к описанию физики в данной области энергий. Используемые модели обладают рядом свободных параметров, которые можно определять из экспериментальных данных. С другой стороны, такие модели не только подгоняют уже имеющиеся данные, но обладают предсказательной силой, величину которой хорошо бы проверять не только качественно, но и численно. Для двух этих целей — определение свободных параметров и проверка верности —

прекрасно подходят сечения изучаемых процессов. Оба они относятся к магнитным радиационным переходам  $M1$ , что делает их хорошим инструментом для изучения структуры мезонов в свете различных феноменологических моделей, например кварковой модели с  $SU(3)$  или даже с  $SU(6)$  симметрией.

Особый интерес представляют структуры мезонов  $\eta$  и  $\eta'$ , так как в них допускается наличия вкладов  $c\bar{c}$ -кварков или примесь глюонов.

В своей статье О’Доннелл [ODo81] исследует кварковый состав мезонов в рамках кварковой модели и проверяет получаемые результаты с помощью экспериментальных данных, в то числе, по магнитнодипольным переходам векторных мезонов в пару фотон-псевдоскаляр.

В статье Болла, Фрере, Титгэт [BFT96] как феноменологической модели. С этой целью рассматриваются радиационные распады  $P \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $V \rightarrow P\gamma$  и  $P \rightarrow V\gamma$ . Упор делается на работу с основными состояниями, таким образом не учитываются вклады возбуждённых состояний лёгких векторных мезонов.

Эскрибано и Надаль [EN07] исследовали вклад в глюонов в состояния  $\eta$  и  $\eta(958)$  проводя феноменологический анализ радиационных распадов  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$  в рамках нарушенной  $SU(3)$  с учётом пространственного перекрытия волновых функций  $|V\rangle$  и  $|P\rangle$ . Авторы заключают, что глюонная составляющая в  $\eta$  и  $\eta(958)$  пренебрежимо мала, угол смешивание  $\eta - \eta' = (41.4 \pm 1.3)^\circ$ , и подчёркивают важность экспериментальных данных по  $(\rho, \omega, \phi) \rightarrow \eta\gamma$  для проведённых вычислений.

В статье Бенаёун, ДельБуоно, Эйдельмана, Иванченко и О’Коннелла [Ben+99] даётся разбор вопроса о совместном согласованном описании радиационных и лептонных распадов лёгких мезонов ( $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ ,  $P \rightarrow \gamma\gamma$  и  $V \rightarrow e^+e^-$ ).

### 3 Другие измерения

Данные измерения не будут являться первыми, однако, они возможно смогут претендовать на сравнимые или улучшенные точности в уже исследованных областях энергии  $\sqrt{s}$  или быть даже первыми и одними из первых в других. Ниже приведены данные о предыдущих измерениях с целью выявления современной ситуации в этой области извлечения данных природы.

Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  исследовалось во многих экспериментах. Первые опубликованные данные появились в 1976 году из Орсаля [Cos+76]. Дальнейший поток данных в основном происходит из установок Новосибирска, начиная с работы выполненной на детекторе НД [Dru+84] и продолжая данными с КМД-2 [Akh+95; Akh+99; Akh+01; Akh+05] и СНД [Ach+97; Ach+00; Ach+06; Ach+14]. Также известно измерение сечения реакции на детекторе ВаВаг [Aub+06].

Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  измерено несколько раз, начиная с работы в Орсаи [Cos+76] и продолжая работами в Новосибирске [Dru+84; Ach+00; Ach+03a; Akh+05; Ach+16].

### 4 Прделанная работа

По теме диссертации на данный момент разработан алгоритм отбора событий  $e^+e^- \rightarrow \pi^0/\eta\gamma \rightarrow 3\gamma$  и определения их числа  $N$ , по сигнальному моделированию определена эффективность регистрации событий  $\varepsilon_{det}$ , по событиям процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  вычислена эффективность нейтрального триггера  $\varepsilon_{NT}$ , радиационная поправка  $\delta_r$  к процессам посчитана в первой итерации по данным предыдущих измерений.

## 4.1 Эффективность реконструкции фотона

В этом же семестре основное внимание было уделено изучению отношения эффективностей  $\varkappa = \varepsilon_{\gamma}^{MC} / \varepsilon_{\gamma}^{exp}$ , где  $\varepsilon_{\gamma}^{MC}$  — эффективность регистрации фотона детектором КМД-3 в моделировании, а  $\varepsilon_{\gamma}^{exp}$  в эксперименте. Данная поправка для КМД-3 уже изучалась ранее для поиска событий  $e^+e^- \rightarrow \eta'$  [Akh+15], где была оценена как 2%. Такая оценка произведена по событиям процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  в канале распада  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  с последующим  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ . Определялось число событий  $N_3$ , когда зарегистрированы все частицы процесса — 2 трека и 3 фотона, и  $N_2$ , когда один из фотонов потерян, а остальные 2 фотона и 2 трека восстановлены. Отношение  $\varkappa$ , полученное таким образом, является интегральным и несёт в себе отпечаток распределений фотонов в конкретном процессе  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-3\gamma$ . Более того, точность такой поправки сравнима с её величиной. Главным образом этот недостаток вызван малой статистикой процесса. Однако, существует и другой пример вычисления отношения  $\varkappa$  по процессу  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Идея всё та же, выделяется два класса событий, определяется число событий каждого класса  $N_2$  и  $N_1$ . Данные вычисление были проведены в рамках работы [Ков15] для интегрально для нескольких диапазонов по энергии, лежащих в области от  $\phi$  и выше. Значительных отличий моделирования от эксперимента найдено не было. Для изучаемых мной конечного состояния поправка крайне важна, ввиду отсутствия треков. Поэтому было принято решение о использовании событий процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в областях энергии с большим сечением, а следовательно и с большим числом рождения трёх пионов — область энергий  $\omega$ -мезона и  $\phi$ . С этой целью разработаны критерии отбора:

- 2 неколлинеарных трека
- Не менее одного фотона
- $E_{dep}/p < 1$  для треков
- Масса отдачи треков близка к массе нейтрального пиона  $m_{\pi^0}$
- Инвариантная масса  $2\gamma$  близка к  $m_{\pi^0}$

Совместно с отбором событий проводится кинематическая реконструкция (КР). В случае, когда не хватает одного фотона, параметры пропавшего  $\gamma$ -кванта восстанавливаются. Когда же фотонов ровно два, то кинематическая реконструкция позволяет улучшить измеренные детектором параметры частиц. При наличии 3 и более фотонов по результатам КР выбирается лучшая комбинация  $\gamma$ -квантов. В этом подходе снова определяется число событий двух классов: когда  $\pi^0$  зарегистрирован и восстановлен, и когда фотонов для восстановления нейтрального пиона недостаточно. Ввиду достаточной статистики, в таком подходе можно рассматривать  $\varkappa$  как функцию полярного угла  $\theta$  и энергосодержания  $E_{dep}$  фотона в калориметре, то есть  $\varkappa = \varkappa(E_{dep}, \theta)$ . Аппроксимируя полученное распределение  $\varkappa$  получаем функцию, которую затем используем для вычисления поправок к конкретным процессам, учитывая распределения по энергосодержанию и полярному углу. Сейчас процедура выделения событий и КР реконструкция готовы. Идёт оптимизация бинирования  $\varkappa$  по  $E_{dep}$  и  $\theta$ . Предварительные результаты были доложены на коллаборационном семинаре КМД-3.

## 4.2 CsI калориметр КМД-3

В течение отчётного периода выполнялся регулярный набор небольших космических заходов с целью получения актуальной информации о состоянии калориметра, которая, в

свою очередь, докладывалась на еженедельных он-лайн планёрках КМД-3. Небольшие отчёты по каждому заходу сохранялись в специальный документ.

Была найдена и исправлена перепутка в подключение пары кабелей линеек CsI к платам УФО-32.

Были введены индивидуальные пороги на подавления нулей для каждого канала калориметра CsI. Для чего потребовалось расширение конфигурационной базы данных КМД-3 и создание новой таблицы базы данных калибровок, а также изменения одного из основных скриптов системы сбора данных детектора. На данный момент пороги  $t$  на подавление нулей определены как

$$t_i = m_i + 3\sigma_i, \quad (8)$$

где  $m_i$  и  $\sigma_i$  — центральное значение и ширина нормального распределения, подгоняющего пьедестальный спектр  $i$ -го канала. Для подавляющего большинства каналов  $\sigma$  не превосходит 2 каналов АЦП. Таким образом  $3\sigma = 6$  к. АЦП, что при типичном калибровочном коэффициенте  $k = 0.2$  МэВ/к. АЦП составляет  $\sim 1.2$  МэВ, что в 40 % меньше нижнего порога в 2 МэВ для кристаллов CsI в физической реконструкции КМД-3. В перспективе планируется перейти на так называемую запись соседей, когда в событии записывается не только информация с кристалла превысившего порог, но и со всех его соседей.

Недавно было обнаружено две задачи, связанные с коэффициентами аттенюации плат УФО-32, которыми следует заняться. Первая, коэффициенты аттенюации не калибровались уже несколько экспериментальных заходов. В связи с изменениями, внесёнными в платы после остановки комплекса ВЭПП-2000 на модернизацию, необходимо перекалибровать коэффициенты аттенюации. Вторая задача заключается в создании централизованной загрузки коэффициентов из базы данных калибровок автоматическим способом и проверки того, что в платах установлено, что и ожидается. Работа по данному направлению ведётся, уже созданы и заполнены нужные структуры и в конфигурационной БД, и в БД калибровок.

### 4.3 Эксперимент по измерению $(g - 2)_\mu$ в J-PARC

Закончен анализ пространственного разрешения монитора профиля пучка на основе микроканальной пластины (МКП) и фосфорного экрана, съём информации осуществлялся с помощью ПЗС камеры. По результатам проведённого анализа написан меморандум [Raz16], упомянут в приведён на осеннем митинге KPS<sup>1</sup>, на данный момент готовится черновик статьи по результатам работы монитора профиля пучка мюонов. Работа ведётся с Корейской и Японской группами, ввиду географической совещания проводятся регулярно раз в две недели с помощью видео конференций.

С начала ноября по середину декабря 2016 года находился в командировки в J-PARC, Токай, Япония. Основной целью поездки была подготовка и проведения теста на пучке мюонов линии D2 комплекса MLF. Помимо подготовки монитора профиля пучка, не мало сил было потрачено на подготовку секций ускорителя, параметры пучка которого мы и измеряли. Также в программу командировки входили: международное фокус ревью эксперимента по измерению аномального магнитного момента и электрического дипольного момента мюона в J-PARC, посещение выступлений конференции “Towards high precision muon  $g-2$ /EDM measurement at J-PARC”<sup>2</sup>, в след за этим я принял участие в коллаборационном собрании E34, где выступил с докладом по долгосрочной стабильности стандарта частоты. Во время прибытия было достигнуто соглашение о сотрудничестве по новому проекту — создание не деструктивного монитора профиля пучкам мюонов на основе тон-

<sup>1</sup><http://kps.or.kr/Conference/ConferenceView.asp?AC=0&CODE=CC20160601#>

<sup>2</sup>[http://g-2.kek.jp/meetings/g-2ws\\_2016/index.html](http://g-2.kek.jp/meetings/g-2ws_2016/index.html)

кой плёнки CsI(Tl) с оптическим съёмом информации. О результатах поездки был сделан доклад на семинаре лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН.

Подана и принята заявка на постерный доклад о результатах работы монитора профиля пучка мюонов на основе МКП в рамках конференции INSTR-2017.

#### 4.4 Педагогическая практика

В минувшем семестре у меня было два студента: один из них выполнял курсовую работу по электромагнитному практикуму, второй студент четвёртого курса приступил к выполнению бакалаврской работы.

Курсовая работа была посвящена изучению характеристик кремниевых фотоумножителей. С этой целью было использовано оборудование Caen Educational Toolkit в форме МРРС производства фирмы Hamamatsu; блока питания SiФЭУ, съёма и усиления сигнала, а также встроенного дискриминатора — SP5600; для съёма сигнала использовался АЦП Caen DT5720A [15]; для подачи светового пригодился SP5601 LED driver [14]. В ходе курсовой работы была измерена зависимость коэффициента усиления двух различных моделей SiФЭУ S10362-11-025C и S10362-11-100C от напряжения смещения. Курсовая работа была защищена на отлично. В рамках курсовой работы проводилась подготовка к созданию триггерных счётчиков на основе органического сцинтиллятора в виде пластин размерами примерно 15 см × 10 см × 1 см с канавками, куда для съёма светового сигнала помещались спектросмещающие фибры Kuraray Y11M. Устроив схему совпадения из двух счётчиков было продемонстрирована работоспособность прототипов счётчиков, путём наблюдения сигнала от космических мюонов.

Работа над бакалаврским дипломом находится, к сожалению, в начальном состоянии. На то есть две главных причины. Первая заключается в малом количестве свободного времени у студента для посещения института и работы над дипломом. Вторая, это моё отсутствие в ИЯФ в течение полутора месяцев из-за командировки. Однако, хочу обратить внимание, что это не помешало успешному выполнению курсовой работы. Темой дипломной работы выбрано измерение сечения реакции  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  с последующим распадом  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-2\gamma$  с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000. План по диплому делится на две больших части. Первая заключается во вхождение в курс дела, разработка алгоритма выделения событий и получения эффективности регистрации, с дальнейшей демонстрацией работоспособности, путём получения сечения исследуемой реакции в области энергий  $\phi$ -мезонного резонанса. Вторая часть ориентирована на выделение событий и получения сечения в диапазоне энергий 1.06–2 ГэВ. До конца семестра была проведено знакомство с детектором КМД-3, основными предыдущими публикациями по теме квалификационной работы, получен опыт работы с основным форматом хранения данных о физических событиях на детекторе, разработаны предварительные алгоритмы выделения событий, которые были опробованы как на данных моделирования, так и на реальной статистике.

#### 4.5 Участия и публикации

В конце августа 2016 года принимал участия с докладом “Calorimetry at CMD-3” на “CERN-BINP workshop for young scientists in  $e^+e^-$  colliders”.<sup>3</sup> По результатам конференции готовится публикация в CERN proceedings. Текст был послан редакторам и возвращён с замечаниями, над которыми сейчас идёт работа.

<sup>3</sup><https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=14124>



Во второй половине ноября 2016 года сделал доклад “Frequency Standard” на собрании коллаборации E34.<sup>4</sup>

Являюсь соавтором статьи (сейчас на стадии реферирования) и публикации по выступлению на конференции по тематике калориметров детектора КМД-3.

- [1] A. V. Anisenkov *et al.*, “Energy calibration of the barrel calorimeter of the CMD-3 detector”, JINST
- [2] V. E. Shebalin *et al.*, “Calorimetry of the CMD-3 detector,” Nucl. Instrum. Meth. A **824** (2016) 710. doi:10.1016/j.nima.2015.11.128

Помимо этого вхожу в список авторов трёх опубликованных в 2016 г. и одной в стадии реферирования статей по анализу данных на КМД-3, а также шести тезисов конференций.

## 4.6 Награды и премии

Наград и премий нет.

## Список литературы

- [14] *DS2477 SP5601 Led Driver*. Rev. 3. CAEN, дек. 2014. URL: [www.caen.it/servlet/checkCaenDocumentFile?Id=10703](http://www.caen.it/servlet/checkCaenDocumentFile?Id=10703).
- [15] *Digital Pulse Processing for Charge Integration*. 3a. CAEN. 2015.
- [Ach+00] M. N. Achasov и др. “Experimental study of the processes  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow \eta\gamma, \pi^0\gamma$  at VEPP-2M”. в: *Eur. Phys. J. C*12 (2000), с. 25–33. DOI: [10.1007/s100529900222](https://doi.org/10.1007/s100529900222).
- [Ach+03a] M. N. Achasov и др. “Experimental study of the  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  process in the energy region  $\sqrt{s} = 0.60\text{-GeV} - 0.97\text{-GeV}$ ”. в: *Phys. Lett.* B559 (2003), с. 171–178. DOI: [10.1016/S0370-2693\(03\)00336-8](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(03)00336-8). arXiv: [hep-ex/0302004](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0302004) [[hep-ex](#)].
- [Ach+03b] M. N. Achasov и др. “Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  in the energy region  $\sqrt{s}$  below 0.98-GeV”. в: *Phys. Rev.* D68 (2003), с. 052006. DOI: [10.1103/PhysRevD.68.052006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.68.052006). arXiv: [hep-ex/0305049](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0305049) [[hep-ex](#)].
- [Ach+06] M. N. Achasov и др. “Study of the  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  process with SND detector at the VEPP-2M  $e^+e^-$  collider”. в: *Phys. Rev.* D74 (2006), с. 014016. DOI: [10.1103/PhysRevD.74.014016](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.014016). arXiv: [hep-ex/0605109](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0605109) [[hep-ex](#)].
- [Ach+14] M. N. Achasov и др. “Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  in the center-of-mass energy range 1.07–2.00 GeV”. в: *Phys. Rev.* D90.3 (2014), с. 032002. DOI: [10.1103/PhysRevD.90.032002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.032002). arXiv: [1312.7078](https://arxiv.org/abs/1312.7078) [[hep-ex](#)].
- [Ach+16] M. N. Achasov и др. “Study of the reaction  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$  with the SND detector at the VEPP-2M collider”. в: *Phys. Rev.* D93.9 (2016), с. 092001. DOI: [10.1103/PhysRevD.93.092001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.092001). arXiv: [1601.08061](https://arxiv.org/abs/1601.08061) [[hep-ex](#)].
- [Ach+97] M. N. Achasov и др. “First physical results from SND detector at VEPP-2M”. в: (1997). arXiv: [hep-ex/9710017](https://arxiv.org/abs/hep-ex/9710017) [[hep-ex](#)].
- [Akh+01] R. R. Akhmetshin и др. “Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  in center-of-mass energy range 600-MeV to 1380-MeV at CMD-2”. в: *Phys. Lett.* B509 (2001), с. 217–226. DOI: [10.1016/S0370-2693\(01\)00567-6](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(01)00567-6). arXiv: [hep-ex/0103043](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0103043) [[hep-ex](#)].
- [Akh+04] R. R. Akhmetshin и др. “Reanalysis of hadronic cross-section measurements at CMD-2”. в: *Phys. Lett.* B578 (2004), с. 285–289. DOI: [10.1016/j.physletb.2003.10.108](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2003.10.108). arXiv: [hep-ex/0308008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0308008) [[hep-ex](#)].
- [Akh+05] R. R. Akhmetshin и др. “Study of the processes  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  in the c.m. energy range 600-MeV to 1380-MeV at CMD-2”. в: *Phys. Lett.* B605 (2005), с. 26–36. DOI: [10.1016/j.physletb.2004.11.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2004.11.020). arXiv: [hep-ex/0409030](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0409030) [[hep-ex](#)].

---

<sup>4</sup><https://kds.kek.jp/indico/event/22606/other-view?view=standard>

- [Akh+15] R. R. Akhmetshin и др. “Search for the process  $e^+e^- \rightarrow \eta'(958)$  with the CMD-3 detector”. в: *Phys. Lett.* B740 (2015), с. 273–277. DOI: [10.1016/j.physletb.2014.11.056](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.11.056). arXiv: [1409.1664](https://arxiv.org/abs/1409.1664) [hep-ex].
- [Akh+95] R. R. Akhmetshin и др. “Measurement of  $\phi$  meson parameters with CMD-2 detector at VEPP-2M collider”. в: *Phys. Lett.* B364 (1995), с. 199–206. DOI: [10.1016/0370-2693\(95\)01394-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01394-6).
- [Akh+99] R. R. Akhmetshin и др. “Study of the radiative decay  $\phi \rightarrow \eta\gamma$  with CMD-2 detector”. в: *Phys. Lett.* B460 (1999), с. 242–247. DOI: [10.1016/S0370-2693\(99\)00748-0](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)00748-0). arXiv: [hep-ex/9907003](https://arxiv.org/abs/hep-ex/9907003) [hep-ex].
- [AKV10] A. I. Ahmadov, E. A. Kuraev и M. K. Volkov. “Contributions of semi-hadronic states  $P\gamma; S\gamma, \pi^+\pi^-\gamma$  to amm of muon, in frames of Nambu–Jona-Lasinio model”. в: *Phys. Part. Nucl. Lett.* 7 (2010), с. 334–337. DOI: [10.1134/S1547477110050055](https://doi.org/10.1134/S1547477110050055). arXiv: [1002.1797](https://arxiv.org/abs/1002.1797) [hep-ph].
- [Amb+08] F. Ambrosino и др. “Study of the process  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$  in the  $\phi$ -meson mass region with the KLOE detector”. в: *Phys. Lett.* B669 (2008), с. 223–228. DOI: [10.1016/j.physletb.2008.09.056](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2008.09.056). arXiv: [0807.4909](https://arxiv.org/abs/0807.4909) [hep-ex].
- [Aub+04] Bernard Aubert и др. “Study of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  process using initial state radiation with BaBar”. в: *Phys. Rev.* D70 (2004), с. 072004. DOI: [10.1103/PhysRevD.70.072004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.072004). arXiv: [hep-ex/0408078](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0408078) [hep-ex].
- [Aub+06] Bernard Aubert и др. “Measurement of the  $\eta$  and  $\eta'$  transition form-factors at  $q^2 = 112 \text{ GeV}^2$ ”. в: *Phys. Rev.* D74 (2006), с. 012002. DOI: [10.1103/PhysRevD.74.012002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.012002). arXiv: [hep-ex/0605018](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0605018) [hep-ex].
- [Aul+00] V. M. Aulchenko и др. “The process  $e^+e^- \rightarrow \omega\pi^0$  near the  $\phi$  resonance”. в: *J. Exp. Theor. Phys.* 90 (2000). [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 90,1067(2000)], с. 927–938. DOI: [10.1134/1.559181](https://doi.org/10.1134/1.559181).
- [Ben+99] Maurice Benayoun, L. DelBuono, S. Eidelman, V. N. Ivanchenko и др. “Radiative decays, nonet symmetry and SU(3) breaking”. в: *Phys. Rev.* D59 (1999), с. 114027. DOI: [10.1103/PhysRevD.59.114027](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.114027). arXiv: [hep-ph/9902326](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9902326) [hep-ph].
- [BFT96] Patricia Ball, J. M. Frere и M. Tytgat. “Phenomenological evidence for the gluon content of  $\eta$  and  $\eta'$ ”. в: *Phys. Lett.* B365 (1996), с. 367–376. DOI: [10.1016/0370-2693\(95\)01287-7](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01287-7). arXiv: [hep-ph/9508359](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9508359) [hep-ph].
- [Cos+76] G. Cosme и др. “New Measurements with the Orsay Electron-Positron Storage Ring of the Radiative Decay Modes of the  $\phi$ -Meson”. в: *Phys. Lett.* B63 (1976), с. 352–356. DOI: [10.1016/0370-2693\(76\)90281-1](https://doi.org/10.1016/0370-2693(76)90281-1).
- [Dol+89] S. I. Dolinsky и др. “Radiative Decays of  $\rho$  and  $\omega$  Mesons”. в: *Z. Phys.* C42 (1989), с. 511. DOI: [10.1007/BF01557655](https://doi.org/10.1007/BF01557655).
- [Dru+84] V. P. Druzhinin и др. “Measurement of  $\phi$  Meson Radiative Decays at the Storage Ring Vepp-2M With the Neutral Detector”. в: *Phys. Lett.* B144 (1984), с. 136–140. DOI: [10.1016/0370-2693\(84\)90192-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(84)90192-8).
- [EN07] Rafel Escribano и Jordi Nadal. “On the gluon content of the  $\eta$  and  $\eta'$  mesons”. в: *JHEP* 05 (2007), с. 006. DOI: [10.1088/1126-6708/2007/05/006](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/006). arXiv: [hep-ph/0703187](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0703187) [hep-ph].
- [Fed06] G. V. Fedotov. “CMD-3 detector for VEPP-2000”. в: *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 162 (2006). [332(2006)], с. 332–338. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2006.10.010](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.10.010).
- [Gar+60] R. L. Garwin, D. P. Hutchinson, S. Penman и G. Shapiro. “Accurate Determination of the  $\mu^+$  Magnetic Moment”. в: *Phys. Rev.* 118 (1960), с. 271–283. DOI: [10.1103/PhysRev.118.271](https://doi.org/10.1103/PhysRev.118.271).
- [Gra+15] J. Grange и др. “Muon ( $g-2$ ) Technical Design Report”. в: (2015). arXiv: [1501.06858](https://arxiv.org/abs/1501.06858) [physics.ins-det].
- [Hag+04] Kaoru Hagiwara, A. D. Martin, Daisuke Nomura и T. Teubner. “Predictions for  $g-2$  of the muon and  $\alpha_{QED}(M_Z^2)$ ”. в: *Phys. Rev.* D69 (2004), с. 093003. DOI: [10.1103/PhysRevD.69.093003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.093003). arXiv: [hep-ph/0312250](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0312250) [hep-ph].
- [Hag+11] Kaoru Hagiwara, Ruofan Liao, Alan D. Martin, Daisuke Nomura и др. “ $(g-2)_\mu$  and  $\alpha(M_Z^2)$  re-evaluated using new precise data”. в: *J. Phys.* G38 (2011), с. 085003. DOI: [10.1088/0954-3899/38/8/085003](https://doi.org/10.1088/0954-3899/38/8/085003). arXiv: [1105.3149](https://arxiv.org/abs/1105.3149) [hep-ph].
- [ODo81] Patrick J. O’Donnell. “Radiative decays of mesons”. в: *Rev. Mod. Phys.* 53 (1981), с. 673. DOI: [10.1103/RevModPhys.53.673](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.53.673).
- [Oli+14] K. A. Olive и др. “Review of Particle Physics”. в: *Chin. Phys.* C38 (2014), с. 090001. DOI: [10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001).

- [Raz16] G. P. Razuvaev. *The Spatial Resolution Study of the Low Energy Muon Beam Profile Monitor*. июнь 2016. URL: <http://e34docs.kaist.ac.kr/index.php/cappnote/view/45>.
- [Sai12] Naohito Saito. “A novel precision measurement of muon  $g-2$  and EDM at J-PARC”. в: *AIP Conf. Proc.* 1467 (2012), с. 45–56. DOI: [10.1063/1.4742078](https://doi.org/10.1063/1.4742078).
- [Бер+11] Д. Б. Беркаев и др. “ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ”. в: *ЖЭТФ* 140 (2011), с. 247–255.
- [Ков15] Оксана Александровна Коваленко. “Измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  с детектором КМД-3”. дис. . . . маг. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, июль 2015.