

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРА МИШЕЛЯ ξ' В РАСПАДАХ τ -ЛЕПТОНА НА СУПЕР ЧАРМ-ТАУ-ФАБРИКЕ

© 2021 г. Д. А. Бодров^{1),2)*}

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.; после доработки 28.05.2020 г.; принята к публикации 28.05.2020 г.

В настоящей работе представлено исследование возможности первого измерения продольной поляризации мюона из распада τ -лептона для определения параметра Мишеля ξ' на будущей Супер чарм-тау-фабрике (СЧТФ). Оценено число сигнальных событий, ожидаемое на полной статистике данных СЧТФ, изучены основные фоновые процессы, а также методы их подавления. Статистическая точность измерения ξ' ожидается на уровне $\sigma_{\xi'} \approx 0.02$, что дает возможность новой проверки Стандартной модели на высоком уровне точности.

DOI: 10.31857/S0044002721010074

1. ВВЕДЕНИЕ

Параметры Мишеля лептонного распада [1] являются билинейными комбинациями констант связи, возникающих в наиболее общем выражении для матричного элемента распада, не противоречащем лоренц-инвариантности:

$$M = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{\substack{\gamma=S,V,T \\ \varepsilon,\mu=R,L}} g_{\varepsilon\mu}^{\gamma} \langle \bar{\ell}_{\varepsilon} | \Gamma^{\gamma} | (\nu_{\ell})_{\alpha} \rangle \times \quad (1)$$

$$\times \langle (\bar{\nu}_{\tau})_{\beta} | \Gamma_{\gamma} | \tau_{\mu} \rangle,$$

$$\Gamma^S = 1, \quad \Gamma^V = \gamma^{\mu}, \quad (2)$$

$$\Gamma^T = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma^{\mu\nu} = \frac{i}{2\sqrt{2}} (\gamma^{\mu} \gamma^{\nu} - \gamma^{\nu} \gamma^{\mu}).$$

Параметры Мишеля описывают лоренц-структуру взаимодействия заряженных токов в теории слабого взаимодействия, и их точное измерение может служить для проверки Стандартной модели (СМ), в которой единственной ненулевой константой является $g_{LL}^V = 1$. Общее выражение для дифференциальной ширины распада лептона в терминах параметров Мишеля и их полное описание можно найти в [2].

В распадах мюона большинство параметров Мишеля было измерено с хорошей точностью [2]. В распадах тау-лептонов с точностью в несколько

процентов были измерены только четыре параметра: ρ , η , ξ и δ [3, 4]. Большая статистика событий рождения $\tau^+ \tau^-$ -пар, набранная экспериментом Belle, позволила также измерить параметры радиационного распада тау-лептона $\bar{\eta}$ и $\xi\kappa$ [5].

В настоящей работе представлено исследование возможности первого измерения поляризации мюонов из распадов тау-лептонов для определения параметра Мишеля ξ' на будущей Супер чарм-тау-фабрике (СЧТФ) [6, 7].

2. МЕТОД

Для измерения поляризации мюонов предлагается использовать угловое распределение электронов (здесь и далее везде подразумеваются частицы обоих знаков) в системе покоя распавшихся в дрейфовой камере мюонов, поскольку импульс электрона коррелирует со спином мюона. В системе покоя неполяризованного тау-лептона средняя проекция спина мюона на его импульс равна P_L , где $P_L \approx 0.98\xi'$, и угловой спектр электронов описывается следующей формулой:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\cos \theta)}{d \cos \theta} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_L}{3} \cos \theta \right). \quad (3)$$

Здесь θ — это угол между импульсами электрона и тау-лептона в системе покоя мюона.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На момент написания настоящей работы детектор СЧТФ находится на этапе разработки, и его полное моделирование пока отсутствует. В исследовании мы использовали дрейфовую камеру, имеющую симметричную цилиндрическую форму,

¹⁾Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия.

²⁾Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия.

*E-mail: bodrov.da@phystech.edu

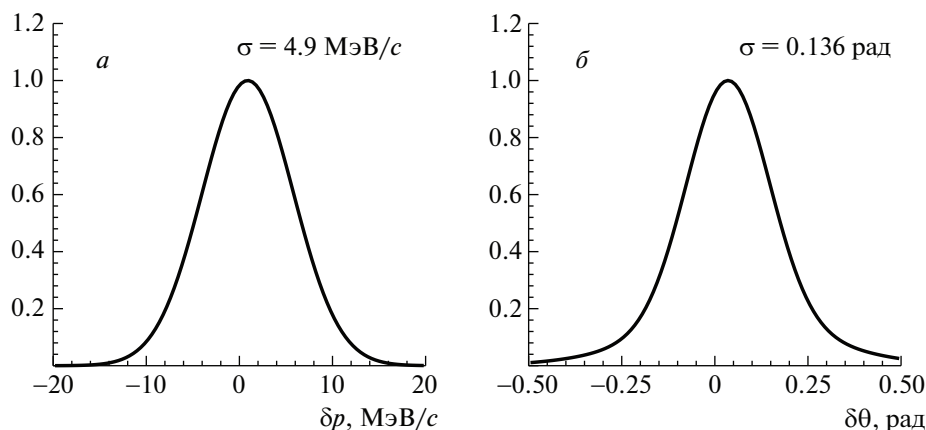


Рис. 1. *a* — Импульсное разрешение электрона в системе покоя мюона, *б* — угловое разрешение электрона в системе покоя мюона.

длиной 200 см, с внешним диаметром 160 см и внутренним диаметром 40 см. Среднее пространственное разрешение в ячейке дрейфовой камеры было выбрано равным 125 мкм, что является реалистичной величиной для современных трековых детекторов. Однородное магнитное поле направлено вдоль оси дрейфовой камеры и имеет значение 1.5 Т. Мы оценили импульсное и угловое разрешение электронов в системе покоя мюонов в такой дрейфовой камере, составившие $\sigma_p \approx 4.9$ МэВ/с и $\sigma_\theta \approx 0.136$ рад соответственно (рис. 1), что позволяет правильно восстановить кинематику распада мюона и эффективно подавить фоновые процессы, как будет показано ниже.

Используя моделирование методом Монте-Карло, мы оценили число восстановленных распадов $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ $N_{\text{rec}} \approx 2.5 \times 10^5$ из $N_{\tau^+\tau^-} \approx 2.1 \times 10^{10}$ $\tau^+\tau^-$ -пар, которые планируется произвести за все время работы СЧТФ. На рис. 2 показана

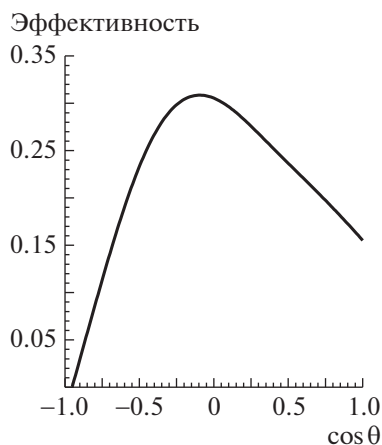


Рис. 2. Функция эффективности восстановления распадов $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ в зависимости от направления вылета электрона в системе покоя мюона.

зависимость эффективности восстановления распада от направления вылета электрона. Нулевая эффективность для вылетающих назад электронов является следствием того, что в этом случае электроны рождаются практически в покое в лабораторной системе отсчета (ЛСО) и не дают достаточно хитов в детекторе для их восстановления. Провал эффективности для электронов, вылетающих вперед, объясняется близкими импульсами мюона и электрона в ЛСО, что не позволяет программе реконструкции треков различить два трека.

4. ПОДАВЛЕНИЕ ФОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Рождение и распад $\tau^+\tau^-$ -пары имеют ярко выраженную топологию, поэтому после применения эффективных предварительных критериев отбора $\tau^+\tau^-$ -событий фоны от КЭД и рождения адронов становятся пренебрежимо малыми, и основной фон ожидается от распадов τ -лептонов, отличных от $\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$. Распад $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ в дрейфовой камере выглядит как излом трека, что будет являться основным критерием для его отбора. Распады на лету легких мезонов и рассеяние частиц на веществе детектора могут имитировать сигнал. Для подавления этих процессов будет использована информация от системы идентификации частиц, а также кинематика распада на лету.

Поскольку легкие мезоны в основном распадаются двухчастично с монохроматической дочерней частицей в системе покоя распадающегося мезона, предлагается использовать их спектр с различными массовыми гипотезами для наложения вето на эти фоны. На рис. 3 показаны спектры импульсов дочерней частицы в системе покоя материнской в гипотезах μ , π , K для материнской и e , μ , π для дочерней частиц. Преобладающий вклад ожидается от распадов π^- из-за большой вероятности распада τ -лептона в π , а также меньшего на два порядка

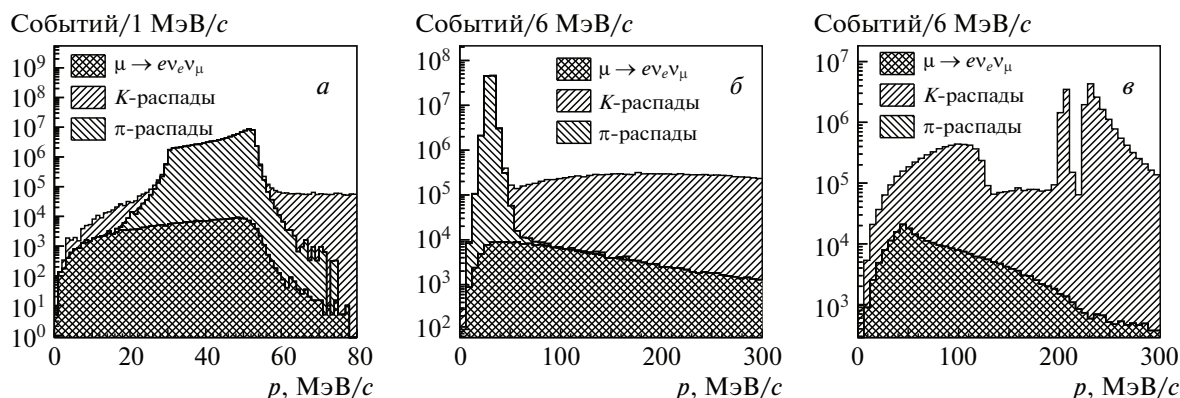


Рис. 3. Импульсные распределения дочерних частиц в системе покоя распавшихся для сигнала и основных источников фона. а — массовая гипотеза $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$, б — массовая гипотеза $\pi \rightarrow \mu \nu$, в — массовая гипотеза $K \rightarrow \mu$.

их времени жизни по сравнению с мюоном. Спектры распадов $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ и $\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$ сильно перекрываются, когда мы приписываем первому треку массу μ и дочернему треку массу e , как видно из рис. 3а. Однако, приписав массы π и μ первому и второму треку соответственно, мы сводим это перекрытие к минимуму (рис. 3б). Двухчастичные распады K -мезонов можно подавить аналогично, как видно из рис. 3в. Трехчастичные распады каонов дают или дополнительные треки, или фотоны от π^0 в конечном состоянии, что позволяет подавить их вклад.

Таким образом, использование распределений, изображенных на рис. 3, информации о dE/dx -потерях в дрейфовой камере и информации от электромагнитного калориметра позволит эффективно подавить вклад от всех основных фоновых процессов. По нашим оценкам подавление вклада от распадов π^+ составит $\sim 2 \times 10^3$ раз, а от распадов K^+ составит $\sim 5 \times 10^2$ раз с суммарной эффективностью для сигнала 80%.

Точность измерения параметра ξ' на полной статистике СЧТФ ожидается на уровне $\sigma'_\xi \approx 0.02$ с учетом поправок на эффективности восстановления распада $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ и критериев отбора, которые были оценены выше.

5. АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СЧТФ

В этом разделе будут перечислены аппаратные и программные требования для экспериментальной установки, выполнение которых позволит провести измерение поляризации мюонов с максимальной допустимой точностью. Во-первых, требуется дрейфовая камера с большим внешним радиусом, поскольку количество распадов мюонов зависит от длины пролета (исследование показало, что увеличение длины дрейфовой камеры не дает ощутимого

улучшения в точности). Во-вторых, газовая смесь должна выбираться в соответствии с требованиями хорошего разрешения по dE/dx -потерям и уменьшения вклада от многократного рассеяния. Восстановление треков частиц с использованием сигналов только от вершинного детектора позволит восстанавливать мюоны, распавшиеся до внутренней стенки дрейфовой камеры. Ключевым требованием является реконструкция трека частицы, распадающейся на лету, совместно с восстановлением трека дочерней частицы и вершины распада. Кроме того, для данного анализа существенно, чтобы треки с малыми импульсами (с несколькими витками в r - ϕ -плоскости в дрейфовой камере) реконструировались с высокой эффективностью. Выполнение этих требований повысит эффективность восстановления событий $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$, тем самым уменьшая погрешность измерения.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение настоящая работа подтверждает возможность первого измерения поляризации мюонов из распадов тау-лептонов и извлечения параметра Мишеля ξ' на будущей Супер чарм-тау-фабрике. Ожидаемое в Стандартной модели значение $\xi' = 1$ можно проверить с точностью $\sigma'_\xi \approx 0.02$, что сопоставимо с результатом измерения для распада мюона $\xi'_\mu = 1.00 \pm 0.04$ [8].

Автор статьи выражает благодарность своему научному руководителю П.Н. Пахлову за помощь в проведении данного исследования. Также выражаю благодарность группе Belle ЛТКЛ ФИАН им. П.Н. Лебедева за плодотворные обсуждения данной работы на научных семинарах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Michel, Proc. Phys. Soc. A **63**, 514 (1950).

2. M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).
3. A. Heister *et al.* (ALEPH Collab.), Eur. Phys. J. C **22**, 217 (2001).
4. J. P. Alexander *et al.* (CLEO Collab.), Phys. Rev. D **56**, 5320 (1997); hep-ex/9705009.
5. N. Shimizu *et al.* (Belle Collab.), PTEP **2018**, 023C01 (2018); arXiv:1709.08833.
6. А. Е. Бондарь (от имени Коллаборации проекта Супер-чарм-тау-фабрики), ЯФ **76**, 1132 (2013) [Phys. At. Nucl. **76**, 1072 (2013)].
7. Q. Luo and D. Xu, in *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference* (2018), p. MOPML013.
8. H. Burkard, F. Corriveau, J. Egger, W. Fetscher, H.-J. Gerber, K. F. Johnson, H. Kaspar, H. J. Mahler, M. Salzmann, and F. Scheck, Phys. Lett. B **150**, 242 (1985).

FEASIBILITY STUDY OF τ -DECAY MICHEL PARAMETER ξ' MEASUREMENT AT THE FUTURE SUPER CHARM-TAU FACTORY

D. Bodrov^{1),2)}

¹⁾ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²⁾ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russia

In this paper, we present a feasibility study of the first measurement of the longitudinal polarization of a muon from the τ -lepton decay to extract the Michel parameter ξ' at the future Super Charm-Tau Factory (SCTF). The expected number of $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ events on the full SCTF data was estimated, possible background processes were studied, and methods of their suppression were suggested. Statistical accuracy was estimated to be $\sigma_{\xi'} \approx 0.02$, which enables a new verification of the Standard Model at a high level of accuracy.