

Содержание

1	Введение	2
1.1	Мотивация	2
1.2	Отличие от работы CLEO	2
2	Сбор данных	3
2.1	Тагирование Λ_c	3
2.2	Критерии отбора	3
	Appendix 1: Метод вычисления формфактора	5
3	Литература	6

1. Введение

1.1. Мотивация

Предпосылки открытия очарованного бариона Λ_c появились в 1975 году, когда в результате наблюдения аномалии в распаде $e^+e^- \rightarrow e^+ + \mu^- + E_{miss}$ (см. [PhysRevLett1975]) было высказано предположение о существовании заряженного легкого очарованного бариона. Открытие на достаточном уровне значимости произошло более чем 10 лет спустя на коллайдере SPEAR (см. [Avery1988]) по распаду $\Lambda_c \rightarrow pK^-\pi^+$. Λ_c , будучи самым легким из очарованных барионов, распадается исключительно посредством слабого взаимодействия, что позволяет изолировать и исследовать вклад этого взаимодействия в барионных системах.

В частности, канал $\Lambda_c \rightarrow \Lambda l \nu_l$, где $l = e, \mu$, а распад с продуктом $l = \tau$ подавлен в силу закона сохранения 4-импульса:

$$m_{\Lambda_c} = 2.28646 \text{ GeV} < 2.89261 \text{ GeV} = 1.77693 \text{ GeV} + 1.11568 \text{ GeV} = m_\tau + m_\Lambda.$$

Бранчинговые отношения для полулептонных распадов $\Lambda_c \rightarrow \Lambda l \nu_l$, где $l = e, \mu$, были измерены в нескольких работах. Для канала $\Lambda_c \rightarrow \Lambda e \nu_e$ измеренное бранчинговое отношение составляет $B(\Lambda_c \rightarrow \Lambda e \nu_e) = 3.56 \pm 0.13\%$, как указано в статье [CLEO2022]. Для канала $\Lambda_c \rightarrow \Lambda \mu \nu_\mu$ измеренное бранчинговое отношение равно $B(\Lambda_c \rightarrow \Lambda \mu \nu_\mu) = 3.48 \pm 0.17\%$ согласно [CLEO2023].

Полулептонные распады Λ_c являются удобным и относительно простым случаем для исследования переходов тяжелого кварка в легкий, что позволяет точнее проверять предсказания теоретических моделей, таких как эффективная теория тяжелых кварков (HQET) и квантовая хромодинамика на решетке (LQCD). Проверка этих моделей с помощью экспериментов может не только подтвердить их верность, но и выявить отклонения от стандартной модели, что потенциально указывает на существование новой физики, включая новые взаимодействия или экзотические частицы.

Возможно, стоит написать про внедрение *FEI*, так как это может быть важно для дальнейшего развития области. Нейронные сети всегда звучат круто для людей, которые в них не разбираются.

1.2. Отличие от работы CLEO

Измерение форм-фактора $\Lambda_c \rightarrow \Lambda l \nu_l$ важно для проверки результатов предыдущего эксперимента [CLEO2023], в котором был измерен форм-фактор $\Lambda_c \rightarrow \Lambda e \nu_e$. Важно сравнить методологические и экспериментальные аспекты текущего исследования с работой команды CLEO.

Прежде всего, команда CLEO сделала предположение о том, что спин бариона Λ равномерно распределен. Это предположение оказывает влияние на значение спиральности, которое напрямую входит в уравнение для форм-фактора. В данной работе предлагается более точное измерение распределения направлений спина, основанное на анализе распада в канале $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+$. Этот подход позволяет уменьшить систематические ошибки и повысить точность вычислений.

Второе важное отличие заключается в использовании независимого источника данных. В то время как команда CLEO использовала данные, собранные с детектора "CLEO" на Корнельском электронном накопительном кольце (Cornell Electron Storage Ring), в настоящей работе анализ проводился на детекторе "Belle" установленном на ускорителе "KEK". Это не только обеспечивает независимую проверку результатов, но и позволяет уточнить их с учётом различий в экспериментальных установках.

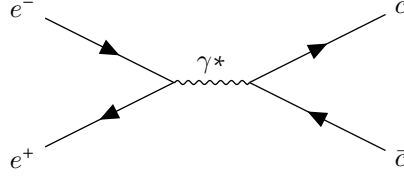
Наконец, команда CLEO не проводила анализа полулептонного распада $\Lambda_c \rightarrow \Lambda \mu \nu_\mu$, что является существенным упущением. В данном исследовании этот канал был тщательно изучен, что позволяет расширить понимание полулептонных распадов и улучшить тесты на универсальность лептонов.

Таким образом, данная работа вносит вклад в дальнейшее изучение свойств бариона Λ_c и уточнение результатов, полученных в предыдущих исследованиях.

2. Сбор данных

2.1. Тагирование Λ_c

Для восстановления распадов Λ_c -барионов и определения импульса недетектируемого нейтрино применяется тагирование по заряду, аромату и барионному числу. Будем предполагать, что Λ_c образуется из \bar{c} -кварка и подхваченных из вакуума недостающих кварков. В таком случае будем называть систему центромасс c -кварка X_c , то есть неизвестная очарованная частица, которая фактически может быть не одной, а несколькими частицами сразу.



Для того чтобы определить состав X_c , необходимо, чтобы соблюдались законы сохранения барионного числа, аромата, заряда, а также 4-импульса. Такая технология называется тагированием [ссылка на работу](#). В результате получим, что в X_c будет входить хотя бы один барион и кварки ucd , а также любые пары $q\bar{q}$. В итоге возможны следующие варианты X_c . Также важно понимать, что чем больше частиц содержит X_c , тем менее вероятно событие с такой комбинацией, так как новые частицы требуют дополнительных кварковых пар, создание которых требует больше энергии. Кроме того, при добавлении новых частиц время работы программы увеличивается экспоненциально, так как сложность алгоритма $\mathcal{O}(C^n)$ [в аппендиксе покажу, что это так, и добавлю ссылку](#).

Я рассмотрю $X_c \rightarrow \Lambda_c^{tag}; \Lambda_c^{tag} \pi^- \pi^-; \Lambda_c^{tag} \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-; D^0 p; D^+ p \pi^-; D^{*0} p; D^{*+} p \pi^-$, чтобы отличать Λ_c которую мы тагируем от той что является продуктом X_c , вторую обозначаю как Λ_c^{tag} . Каналы распада прочих частиц, так как для этой остальных частиц нам уже известны бранчинговые соотношения, будут использованы самые эффективные из них согласно [PDGTablesBar] для барионов и [PDGTablesMes] для мезонов.

Particle	Channels
D^0	$K^- \pi^+; K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-; K^- K^+; K_s^0 \pi^+ \pi^+; K_s^0 \pi^0; K^+ K^- K_s^0$
D^+	$K^- \pi^+ \pi^+; K_s^0; K_s^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-; K^+ K^- \pi^+$
Λ_c^{tag}	$p K^- \pi^+; \Lambda^0 \pi^+; \Lambda^0 \pi^+ \pi^0; p K_s^0 \pi^0$
D^{*+}	$D^0 \pi^0; D^0 \gamma$
D^{*+}	$D^+ \pi^0; D^0 \pi^+$
π^0	$\gamma \gamma$
K_s^0	$\pi^+ \pi^-$

2.2. Критерии отбора

В данном разделе изложены критерии отбора, принятые на основании работы [BelleDetector2002]. Все аспекты, не рассмотренные в указанной работе, будут обсуждены отдельно.

- На все фотоны, используемые при реконструкции событий, накладывается ограничение $E_\gamma > 50$ MeV, поскольку фотоны с меньшей энергией трудно отличимы от индуцированных токов, что может привести к ошибочной интерпретации их как сигналы фотонов.

- Идентификация частиц (PID): Для идентификации частиц используются данные с детекторов CDC, ACC и TOF, которые позволяют вычислить функции правдоподобия L_π, L_K, L_p , соответствующие гипотезам пиона, каона и протона, соответственно. Для различения гипотез частиц а и b применяется условие на отношение:

$$\mathcal{L}_{a/b} = \frac{L_a}{L_a + L_b}$$

p	все треки, не прошедшие идентификацию по вышеуказанным критериям	$\mathcal{L}_{p/K} < 0.6; \mathcal{L}_{p/\pi} > 0.6$
K^0		$\mathcal{L}_{p/K} < 0.4; \mathcal{L}_{K/\pi} > 0.6$
π^\pm		

- K_s^0 -мезоны реконструируются по распаду $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ из кандидатов, отобранных с помощью стандартного инструмента V0finder и собранных в таблице MdstVee2. Критерии отбора следующие:

$$\left| M_{K_s^0} - M_{K_s^0}^{real} \right| < 30 \text{ MeV}; \quad \rho_{K_s^0} > 1 \text{ мм}; \quad z_{K_s^0} > 1 \text{ см}; \quad \cos \theta_{K_s^0} > 0.99$$

где $M_{K_s^0}^{real} = 497.611$ MeV, $M_{K_s^0}$ — инвариантная масса пионов ($\pi^+\pi^-$), собранных в K_s^0 -мезон, $z_{K_s^0}$ и $\rho_{K_s^0}$ — цилиндрические координаты реконструированной вершины распада K_s^0 -мезона в лабораторной системе отсчёта, а $\cos\theta_{K_s^0}$ — азимутальный угол между импульсом K_s^0 и направлением на его вершину распада.

Независимо от работы [BelleDetector2002], среди пар $\pi^+\pi^-$, идентифицированных как кандидаты на дочерние продукты распада K_s^0 -мезона, можно использовать знание о том, что импульсы продуктов распада должны исходить из вершины распада. Это позволяет откорректировать измеренные импульсы с учётом погрешностей, чтобы они соответствовали данной гипотезе (в дальнейшем это будет называться "фит в вершину") (возможно, в **аппендиксе надо описать как работает фит**). Аналогично, на основании инвариантной массы, известной для K_s^0 , можно корректировать величины импульсов дочерних частиц так, чтобы $M_{K_s^0}$ совпадала с $M_{K_s^0}^{real}$. Этот метод будет называться "фит в массу".

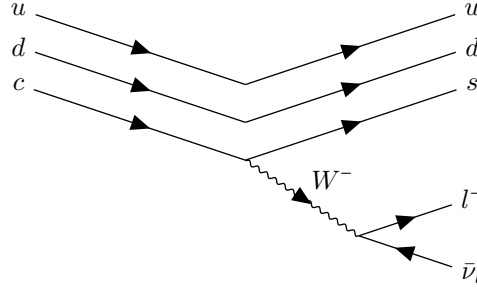
- π^0 -мезоны восстанавливались в распаде на два фотона, которые в свою очередь реконструировались по кластерам энергоделения в ECL. Критерии отбора:

$$|M_{\pi^0} - M_{\pi^0}^{real}| < 15 MeV$$

После отбора стандартно были установлены погрешности для импульсов фотонов и выполнена фит в вершину и массу.

Appendix 1: Метод вычисления формфактора

Λ_c барион состоит из $u\bar{c}d$ кварков, в ходе распада $\Lambda_c \rightarrow \Lambda l \nu_l$ происходит переход $c \rightarrow s$ посредством испускания W^+ бозона то есть правильно будет записать $c \rightarrow sW^+$, W^+ распадается на $W^+ \rightarrow l^+ \nu_l$, в итоге оставшиеся кварки uds формируются в Λ барион. Таким образом получим следующую феймановскую диаграмму.



Переход $\Lambda_c \rightarrow \Lambda$ индуцируется слабым током j_μ , который можно разложить по аксиальной и векторной части: $j_\mu = j_\mu^A + j_\mu^V$. Обозначим волновые функции частиц $B_{\Lambda_c}(p_{\Lambda_c}, M_{\Lambda_c}) \rightarrow B_\Lambda(p_\Lambda, M_\Lambda) + l(p_l, m_l) + \nu_l(p_\nu, m = 0)$. Форм факторы выражаются как:

$$\langle B_{\Lambda_c}(p_{\Lambda_c}, M_{\Lambda_c}) | j_\nu^V | B_\Lambda(p_\Lambda, M_\Lambda) \rangle = u_2^\dagger \left(\mathfrak{F}_1^V(q^2) \gamma_\nu + \frac{\mathfrak{F}_2^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} \sigma_{\mu\nu} q^\nu + \frac{\mathfrak{F}_3^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} q_\mu \right) u_1 \quad (2.1)$$

$$\langle B_{\Lambda_c}(p_{\Lambda_c}, M_{\Lambda_c}) | j_\nu^A | B_\Lambda(p_\Lambda, M_\Lambda) \rangle = u_2^\dagger \left(\mathfrak{F}_1^A(q^2) \gamma_\nu + \frac{\mathfrak{F}_2^A(q^2)}{M_{\Lambda_c}} \sigma_{\mu\nu} q^\nu + \frac{\mathfrak{F}_3^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} q_\mu \right) \gamma_5 u_1 \quad (2.2)$$

Где γ_μ - матрицы Диррака, q_μ - 4-импульс W^+ бозона, $\sigma_{\mu\nu} = \frac{1}{2}(\gamma_\mu \gamma_\nu - \gamma_\nu \gamma_\mu)$.

Дописать вывод связи форм фактора и спиральности

3. Литература

Список литературы

- [1] Avery P., Blanco R., Liu K., et al. Observation of the Charmed Baryon Λ_c^+ at SPEAR // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 50. P. 747-750. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.747.
- [2] Perl M. L., Abrams G. S., Boyarski A. M., et al. Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. P. 1129-1132. DOI: 10.1103/PhysRevLett.35.1129.
- [3] Eisenstein B. I., Alexander J. P., Berkelman K. Study of the Semileptonic Decay $\Lambda_c \rightarrow \Lambda e \nu_e$ // Physical Review D. 2022. V. 105. P. 012007. DOI: 10.1103/PhysRevD.105.012007.
- [4] Dobbs S., Metreveli Z., Seth K. K. Study of $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \mu^+ \nu_\mu$ and test of lepton flavor universality with $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda l^+ \nu_l$ decays // Physical Review D. 2023. V. 106. P. 032005. DOI: 10.1103/PhysRevD.106.032005.
- [5] Navas S., et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 3. P. 030001.(2024)
- [6] Navas S. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. № 3. P. 030001. (2024)
- [7] Abashian A. et al. The Belle Detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2002. V. 479. P. 117–232.