

Содержание

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 лёгкого 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 лёгким 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 $B(\Lambda_c \rightarrow \Lambda \mu \nu) = 3.48 \pm 0.17\%$ согласно [CLEO2023].

Полулептонные распады Λ_c являются удобным и относительно простым случаем для исследования переходов тяжелого кварка в лёгкий, что позволяет точнее проверять предсказания теоретических моделей, таких как эффективная теория тяжёлых кварков (HQET) и квантовая хромодинамика на решётке (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.

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 распределён. 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.

1.3. Модели и теоретические предсказания

Как уже было сказано выше, на данный момент существуют численные методы вычисления форм-факторов, основанные на различных приближениях или моделях. Все они дают различные результаты (см. таблицу ??). Поскольку сильное взаимодействие сложно поддаётся теоретическим расчётам из-за отсутствия малого параметра, результаты могут быть проверены только экспериментально.

Таблица 1. Форм-факторы полулептонных распадов $\Lambda_c \rightarrow \Lambda$ для $q^2 = 0$.

Form Factor	$\mathfrak{F}_1^V(0)$	$\mathfrak{F}_2^V(0)$	$\mathfrak{F}_3^V(0)$	$\mathfrak{F}_1^A(0)$	$\mathfrak{A}_2^A(0)$	$\mathfrak{A}_3^A(0)$
[QCD2021]	0.687(138)	0.486(117)	0.164(80)	0.539(101)	-0.388(100)	-0.359(283)
[BagModel1989]	0.35	0.09	0.25	0.61	-0.04	-0.11
[RQM2016]	1.14	0.072	0.252	0.517	-0.697	-0.471
[QSR2009]	0.665	0.285	—	0.665	-0.285	—
[LFCQM2018]	0.468	0.222	—	0.407	-0.035	—

2. Экспериментальная установка

2.1. Коллайдер КЕК

Ускоритель КЕКВ является электрон-позитронным коллайдером, состоящим из двух колец, пересекающихся в одной точке под углом 22 mrad , что позволяет измерять СР-асимметрию. Пучки электронов и позитронов сталкиваются с энергией 8 GeV и 3.5 GeV соответственно. Пучки рождаются на фотонной фабрике и, проходя через линейный ускоритель, где разгоняются до скорости, близкой к скорости света, передаются в основные кольца. В режиме накопления пучка подача происходит непрерывно, а в нормальном режиме сбора данных - периодически, раз в несколько миллисекунд **точное значение времени подачи можно уточнить**.

Основной целью было производство большого количества В-мезонов. Работа ускорителя началась в декабре 1998 года и закончилась в конце июня 2010 года. За это время КЕКВ установил мировой рекорд по светимости - $2.11 \times 10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$, который на сегодняшний день был превзойдён только на коллайдере SuperKEKB - усовершенствованной версии, собранной на основе КЕКВ.

[ссылка на КЕК digital accelerator и список литературы](#)

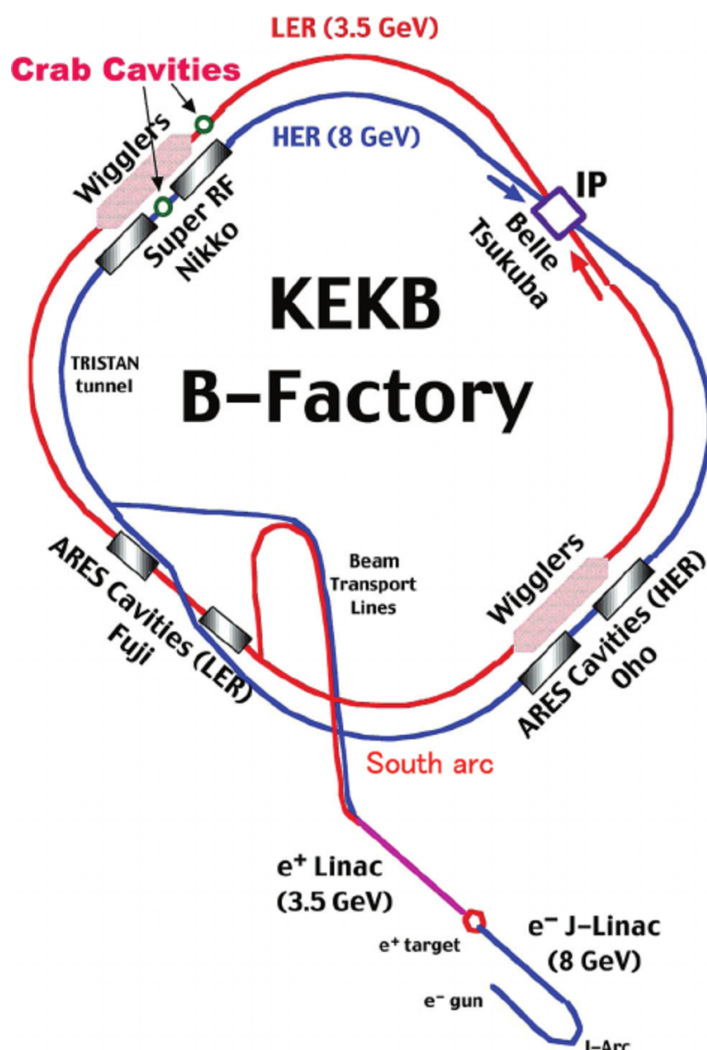


Рис. 1. Ускорительный комплекс КЕКВ

2.2. Детектор Belle

Детектор Belle охватывал весь азимутальный угол, а также перекрывал часть полярного угла от 17° до 150° , что соответствует 0.74 полного телесного угла. Установка окружала точку взаимодействия и состояла из вершинного кремниевго детектора (SVD), центральной дрейфовой камеры (CDC) из 50 цилиндрических слоёв, массива аэрогелевых черенковских счётчиков (ACC), системы измерения времени пролёта (TOF) из сцинтилляционных счётчиков, электромагнитного калориметра (ECL), изготовленного из кристаллов йодида цезия (CsI), и переднего калориметра (EFC), расположенных внутри сверхпроводящего соленоида, обеспечивающего магнитное поле величиной 1.5 Tl . В железном ярме электромагнита был расположен детектор K_L^0 мезонов и μ (KLM), составленный из

стеклянных резистивных плоских камер. Общий вид детектора Belle показан на рис. ???. Подробно о поддетекторах и восстановлении события в [ссылка на ашпендикс](#).

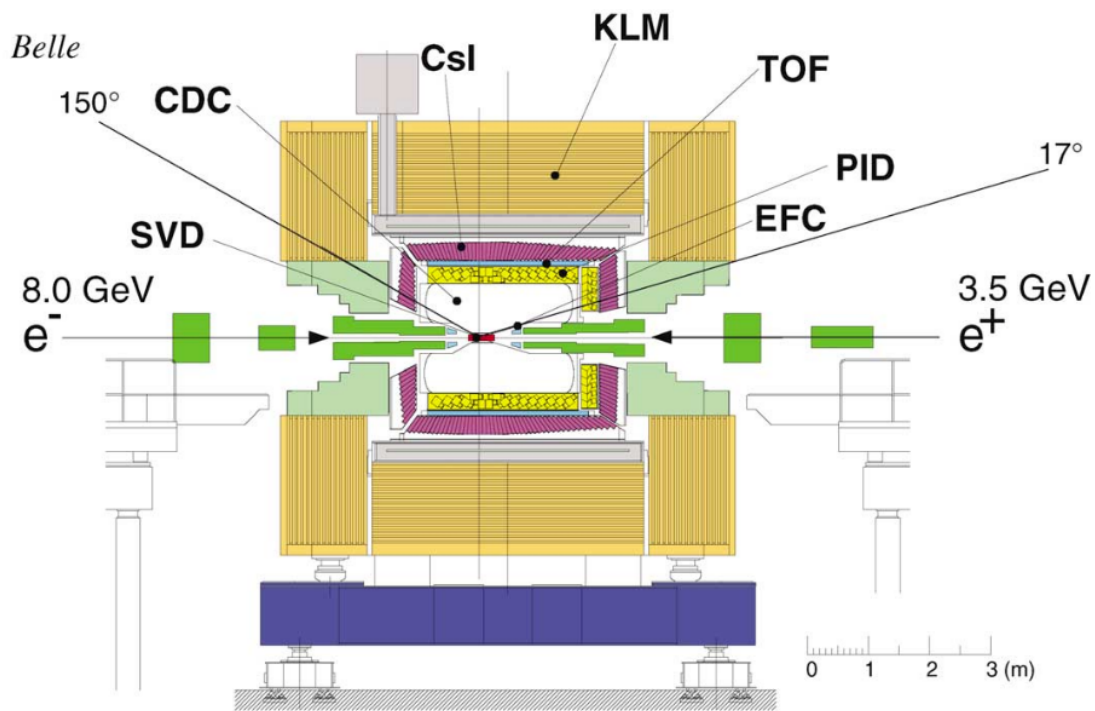
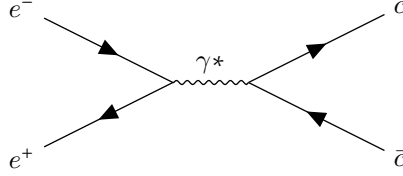


Рис. 2. Детектор Belle в сечении

3. Сбор данных

3.1. 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	$\pi^+ \pi^-$

3.2. 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 $M_{K_s^0}^{real} = 497.611 \text{ MeV}$, $M_{K_s^0}$ — 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 энерговыделения в ECL. Критерии отбора:

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

После отбора стандартно были установлены погрешности для импульсов фотонов и выполнены фиты в вершину и массу.

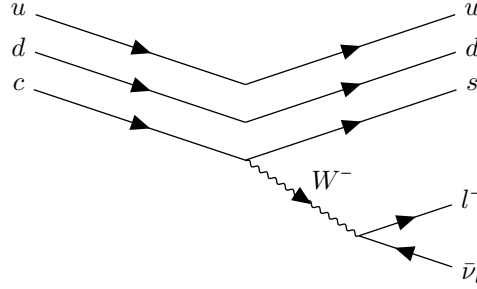
- Отбор D -мезонов:

$$\begin{array}{l|l} D^0 & |M_{D^0} - M_{D^0}^{real}| < 15 \text{ MeV} \\ D^\pm & |M_{D^\pm} - M_{D^\pm}^{real}| < 15 \text{ MeV} \\ D_{*^\pm} & |M_{D_{*^\pm}} - M_{D_{*^\pm}}^{real}| < 3 \text{ MeV} \\ D_{*^0} & |M_{D_{*^0}} - M_{D_{*^0}}^{real}| < 3 \text{ MeV} \end{array}$$

Где $M_{D^\pm}^{real} = 1864.83 \text{ MeV}$; $M_{D^0}^{real} = 1869.65 \text{ MeV}$; $M_{D_{*^\pm}}^{real} = 2010.26$; $M_{D_{*^0}}^{real} = 2006.85 \text{ MeV}$.

Appendix 1: Метод вычисления формфактора

Λ_c барион состоит из u 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 $c \rightarrow s W^+$, 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:

$$\langle B_{\Lambda_c}(p_{\Lambda_c}, M_{\Lambda_c}) | j_\nu^V | B_\Lambda(p_\Lambda, M_\Lambda) \rangle = u_2^\dagger \left(\mathfrak{F}_1^V(q^2) \gamma_\nu + \frac{\mathfrak{F}_2^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} \sigma_{\mu\nu} q^\nu + \frac{\mathfrak{F}_3^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} q_\mu \right) u_1 \quad (3.1)$$

$$\langle B_{\Lambda_c}(p_{\Lambda_c}, M_{\Lambda_c}) | j_\nu^A | B_\Lambda(p_\Lambda, M_\Lambda) \rangle = u_2^\dagger \left(\mathfrak{F}_1^A(q^2) \gamma_\nu + \frac{\mathfrak{F}_2^A(q^2)}{M_{\Lambda_c}} \sigma_{\mu\nu} q^\nu + \frac{\mathfrak{F}_3^V(q^2)}{M_{\Lambda_c}} q_\mu \right) \gamma_5 u_1 \quad (3.2)$$

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

4. 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] Perez-Marcial R., Huerta R., Garcia A., Avila-Aoki M. Predictions for semileptonic decays of charm baryons. 2. Nonrelativistic and MIT bag quark models // Phys. Rev. D. 1989. V. 40. P. 2955. DOI: 10.1103/PhysRevD.40.2955.
- [6] Faustov R. N., Galkin V. O. Semileptonic decays of Λ_c baryons in the relativistic quark model // Eur. Phys. J. C. 2016. V. 76. P. 628. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4492-z.
- [7] Liu Y. L., Huang M. Q., Wang D. W. Improved analysis on the semi-leptonic decay $\Lambda_c \rightarrow \Lambda l \nu$ from QCD light-cone sum rules // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 074011. DOI: 10.1103/PhysRevD.80.074011.
- [8] Zhao Z. X. Weak decays of heavy baryons in the light-front approach // Chin. Phys. C. 2018. V. 42. P. 093101. DOI: 10.1088/1674-1137/42/9/093101.
- [9] Geng C. Q., Liu C. W., Tsai T. H. Semileptonic weak decays of antitriplet charmed baryons in the light-front formalism // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 054018. DOI: 10.1103/PhysRevD.103.054018.
- [10] Gutsche T., Ivanov M. A., Korner J. G., Lyubovitskij V. E., Santorelli P. Semileptonic decays $\Lambda_c \rightarrow \Lambda \ell \nu$ in the covariant quark model // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 034008. DOI: 10.1103/PhysRevD.93.034008.
- [11] Bahtiyar H., Can K. U., Oka M., Takahashi T. T. $\Lambda_c \rightarrow \Lambda$ Form Factors in Lattice QCD // Phys. Rev. D. 2021. V. 102. P. 114505. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.114505.
- [12] Navas S., et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. 3. P. 030001.(2024)
- [13] Navas S. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2024. V. 110. № 3. P. 030001. (2024)
- [14] Abashian A. et al. The Belle Detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2002. V. 479. P. 117–232.