

С 346.4 а

X-152

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1-6049

Д.М.Хазинс

СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1971

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук

В.И. Петрухин

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук

А.Л. Любимов

кандидат физико-математических наук

С.В. Сомов

Ведущее предприятие: Институт теоретической и экспериментальной физики ГКАЭ СССР, Москва.

Автореферат разослан " " 1971 года.

Защита диссертации состоится " " 1971 года

на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по адресу: Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Учёный секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

1-6049

Д.М. Хазинс

СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ

Специальность 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

В 1964 году экспериментально было открыто нарушение CP -инвариантности в распаде долгоживущих K^0 -мезонов^{/1/}. Это открытие заставило физиков более критически относиться к инвариантности физических законов относительно дискретных преобразований, в том числе и к наиболее фундаментальной инвариантности относительно CPT -преобразования.

В докладе на Оксфордской конференции в 1965 году Ли^{/2/} проанализировал имеющиеся экспериментальные данные о симметрии различных типов взаимодействий (сильного, электромагнитного и слабого) относительно C , P , T , CP и CPT -преобразований. Опираясь на экспериментальную величину разности масс K_1^0 и K_2^0

$$\left| \frac{\Delta m_k}{m_k} \right| \approx 10^{-14},$$

Ли показал, что гамильтонианы сильного, электромагнитного и лептонной части слабого взаимодействий, сохраняющих странность, инвариантны относительно CPT -преобразования с точностью 10^{-14} , 10^{-12} и 10^{-8} , соответственно. CPT -инвариантность остальных частей слабого взаимодействия следует из равенства времен жизни частиц и античастиц для μ^- , π^- и K^- -мезонов.

Однако экспериментальная точность сравнения времен жизни (τ) этих частиц и их античастиц существенно хуже. В докладе Ли были приведены следующие цифры:

$$\left| \frac{\Delta \tau}{\tau} \right| < \begin{matrix} 10^{-3} & \text{для } \mu^+ \\ 8 \cdot 10^{-2} & \text{для } \pi^+ \\ 15 \cdot 10^{-2} & \text{для } K^+ \end{matrix}$$

Таким образом, естественный путь для проверки CPT -теоремы состоит в понижении верхнего предела величины $\frac{CPT}{\Delta \tau}$ для μ^- , π^- и K^- -мезонов.

В течение 1966-1968 г.г. был выполнен ряд экспериментальных работ /4-9/, в которых последовательно улучшалась точность сравнения времен жизни заряженных пионов. Некоторые данные об этих работах и их результатах приведены в таблице 1.

Наша работа по сравнению времен жизни заряженных пионов /9/, которая составляет содержание реферируемой диссертации, была выполнена в период с середины 1966 года до конца 1967 года.

Эксперимент был поставлен на мезонном пучке синхроциклотрона ОИЯИ и заключался в сравнении ослабления пучков положительных и отрицательных пионов со средним импульсом $P = 180$ Мэв/с из-за распада их на лету. Максимальное изменение пролетной базы составляло 6,84 м, что соответствует 0,683 распадной длины пиона с указанным импульсом. Идентификация пионов и измерение их скоростей производились с помощью спектрометра по времени пролета с временным разрешением $\Delta t = 0,65$ нсек.

Диссертация состоит из введения, в котором сделан обзор экспериментов по сравнению времен жизни заряженных пионов; четырех глав, в которых описываются спектрометр по времени

Таблица 1

Лаборатория	Время пучка	Методика	P (Мэв/с)	Статист. $N_{\pi^+} + N_{\pi^-}$	L (м)	$\left(\frac{\tau^+ - \tau^-}{\tau^+}\right) \delta\%$	τ_{π^+} (нсек)
1) Колумбийский университет /3/	1952	Сцинтилляционные счетчики	160	$93 \cdot 10^3$	0,23	-4 \pm 10	$\tau_{\pi^+} = 25,5 \pm 1,9$ $\tau_{\pi^-} = 24,4 \pm 1,8$
2) ЛЭП ОИЯИ /4/	июль 1966	Изогнутая разрядная камера, время пролета	67	$14,3 \cdot 10^3$	0,14	-2 \pm 6	
3) Колумб. университет /5/	март 1966	Сцинтилляционные счетчики, время пролета	120	$9 \cdot 10^5$	0,3	0,4 \pm 0,7	$\tau_{\pi^+} = 25,6 \pm 0,3$
4) Рочестер-Брукхейвен /6/	июль 1966	Электростат. сепаратор, диффер. черенк. счетч., сцинтил.сч.	1200 1600		0,74 0,55	0,23 \pm 0,40	$\tau_{\pi^+} = 26,67 \pm 0,24$
5) Беркли /7/	март 1967	Линко-воздух. дифф. счетч., сцинтил.сч.	311	$18 \cdot 10^6$	0,59	0,56 \pm 0,28	$\tau_{\pi^+} = 26,6 \pm 0,2$
6) Беркли /8/	июль 1968	Линко-детекторные дифф. счетч., сцинтил.сч.счетчики	285		0,56	0,064 \pm 0,069	$\tau_{\pi^+} = 26,0 \pm 0,1$
7) ЛЭП ОИЯИ /9/	май 1968	Спектрометр по времени пролета	180	$6 \cdot 10^6$	0,68	-0,14 \pm 0,29	$\tau_{\pi^+} \geq 24,8$

*) L - длина пути пионов, на которой производились измерения; величина L выражена в единицах распадной длины пиона (λ) (При вычислениях λ предполагалось $\tau_{\pi^+} = 26,0$ нсек).

пролета, постановка эксперимента, процедура измерений и обработки результатов и обсуждаются возможные систематические ошибки эксперимента; выводов, в которых сформулированы основные результаты диссертации, и приложения, где дан вывод некоторых формул, использовавшихся при обработке экспериментальных данных.

1.

Основной метод выделения пионов и определения их скоростей в нашей постановке эксперимента состоял в измерении времени пролета частиц, импульс которых задавался отклоняющим магнитом и системой коллиматоров. При этом весьма существенную роль в точности эксперимента играет временное разрешение установки, так как им определяется чистота выделения пионов из пучка и точность измерения их скоростей.

В связи с этим была поставлена задача создания спектрометра по времени пролета с максимально возможным временным разрешением. Основная трудность состояла в том, что хорошее разрешение нужно было получить при сравнительно большом размере сцинтиллятора одного из временных счётчиков (диаметр сцинтиллятора 160 мм). К тому времени наилучшее разрешение, которое было получено со сцинтилляторами подобных размеров, составляло $\Delta t = 0,9 \text{ нсек}^{10/}$.

Было испытано три варианта конструкции временного счётчика^{11/}. Лучшим из них оказался счётчик, который имел сцинтиллятор в виде диска диаметром 160 мм и толщиной 45 мм. Сцинтиллятор просматривался двумя фотоумножителями для компенсации эффекта пространственного разброса частиц, попадающих на сцинтиллятор. Во временных счётчиках использовались фотоумножители типа ХР-1020. С этим счётчиком было достигнуто

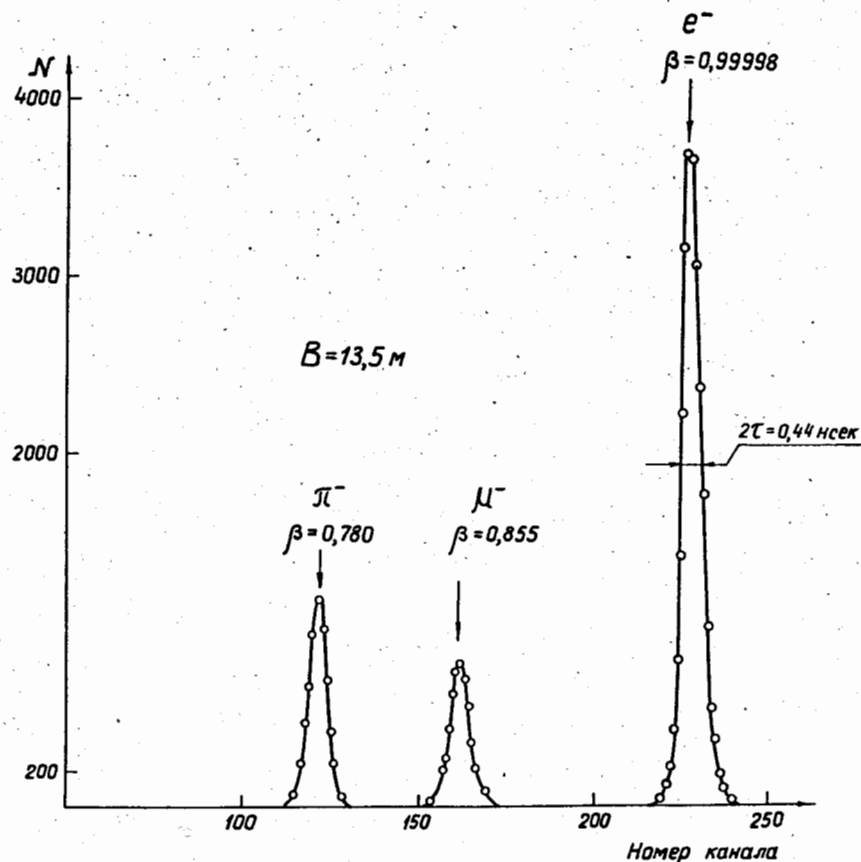


Рис. 1. Спектр масс частиц в мезонном пучке синхротрона ЛЯП ОИЯИ с импульсом 175 Мэв/с. Пролетная база 13,5 м.

разрешение $\Delta t = 0,44$ нсек. На рис. 1 показано как выглядит спектр по времени пролета при таком разрешении.

В первой главе обсуждаются также вопросы стабильности спектрометра, эффективности антисовпадений и некоторые эффекты взаимодействия пионов, влияющие на работу спектрометра.

II.

Экспериментальная установка, созданная на основе спектрометра по времени пролета, показана на рис. 2 и 3. Формирование пучка осуществляется магнитом (4) и системой коллиматоров (2), (3) и (5). Телескоп счётчиков $S_1 \div S_8$ вместе со счётчиками антисовпадений (A_4 и A_5), имеющими отверстия в центре диаметром 22 мм, выделяет из пучка такие частицы, которые лежат достаточно близко к оси вакуумного тракта и не касаются его стенок на всей длине тракта. Длина тракта изменялась в пределах 6,5-13,5 метра; внутренний диаметр тракта 150 мм. Фильтр Φ и счётчик антисовпадений A_9 служат для дискриминации мюонов и электронов по пробегу. Счётчики S_2 и S_8 - "базовые" для измерений по времени пролета.

Электронная логика построена таким образом, что в случае появления события, соответствующего логической схеме $(S_1 + S_2 + S_3 - A_4 - A_5) + (S_6 + S_7 + S_8 - A_9)$, открываются линейные ворота, которые пропускают сигналы от временных счётчиков на время-амплитудные преобразователи и анализатор для временного анализа. Кроме того, электроника вырабатывает временные интервалы, которые создают реперные пики на время-пролетном спектре и блокируют монитор в течение мертвого времени анализатора.

В выбранных условиях эксперимента интенсивность пионов составляет 10 сек^{-1} . Импульс пионов был равен 180 Мэв/с при

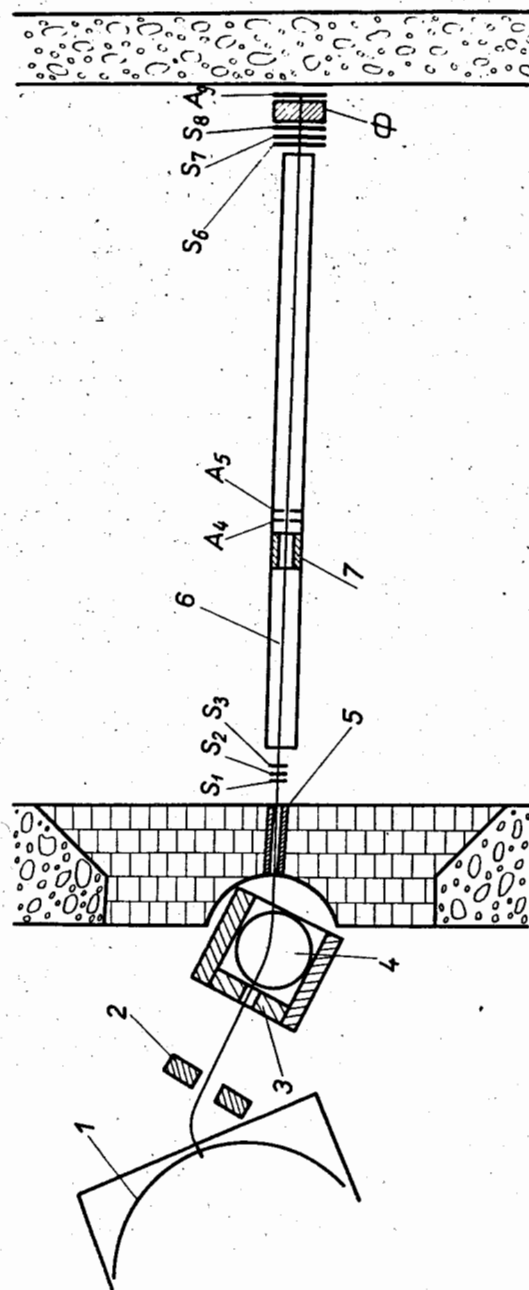


Рис. 2. Экспериментальная установка. 1 - камера синхроцикло-
на; 2,3,5 и 7 - коллиматоры; 4 - отклоняющий магнит; 6 - ва-
куумный тракт; $S_1 - S_8$, A_4 , A_5 и A_9 - сцинтиляцион-
ные счётчики; Φ - медный фильтр.

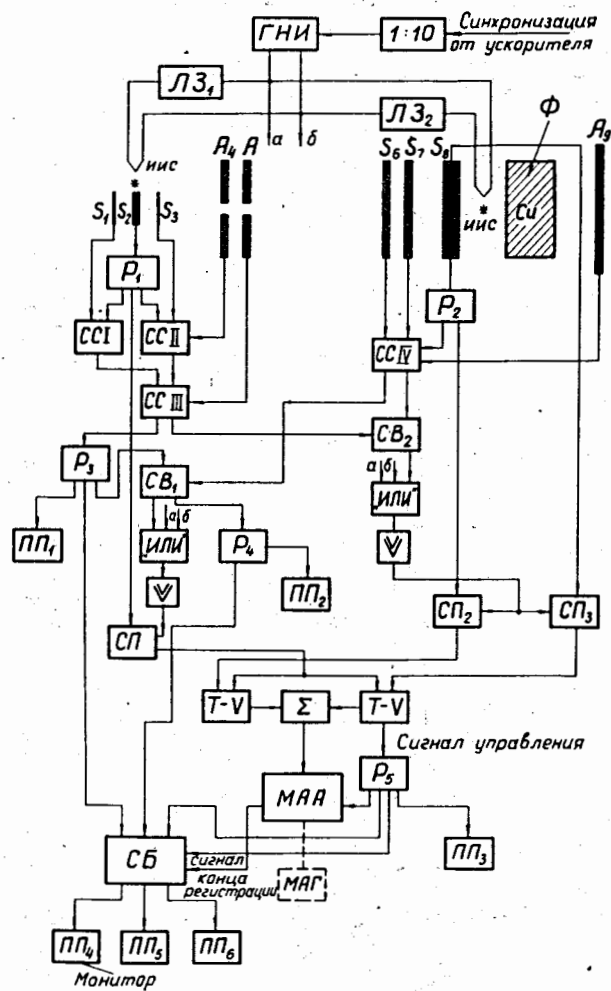


Рис. 3. Блок-схема электроники. "ГНИ" - двухканальный генератор наносекундных импульсов; "ИИС" - импульсные источники света; "ЛЗ" - кабельная линия задержки; "Р" - разветвитель; "СС" - схема совпадений; "СВ" - схема "ворот"; "ИЛИ" - смеситель; "У" - усилитель; "СП" - линейная схема пропускания; "Т" - время-амплитудный преобразователь; "Σ" - сумматор; "МАН" многоканальный амплитудный анализатор; "СБ" - схема блокировки; "МАГ" - четырехдорожечный магнитофон; "ПП" - пересчетная схема.

импульсном разбросе $\pm 1,5\%$. Отношение числа регистрируемых мюонов к числу пионов 0,01; соответствующие отношения для электронов 0,79 (для e^-) и 0,01 (для e^+).

Цикл измерений состоял в получении время-пролетных спектров частиц обоих знаков при трех положениях последней группы счётчиков (расстояние между временными счётчиками $B = 6,61$ м, $B = 9,93$ м и $B = 13,45$ м). В каждом спектре набиралось по $(3-6) \cdot 10^5$ пионов. На рис. 4 показан один из таких спектров. При переходе от одного знака частиц к другому поле отклоняющего магнита контролировалось по ядерному магнитному резонансу с относительной точностью $\pm 2 \cdot 10^4$. Всего было проведено 15 циклов измерений. При этом было зарегистрировано $6 \cdot 10^6$ пионов обоих знаков.

Фон в эксперименте определялся перекрытием пучка в отверстиях счётчиков A_4 и A_5 с помощью латунного стержня длиной 200 мм и диаметром, отличающимся от диаметра отверстий на $\Delta D < 0,1$ мм.

III.

Обработку результатов измерений можно разбить на четыре этапа. Первый из них состоял в выделении пионов из спектров по времени пролета. Однако из-за наличия небольшой доли медленных мюонов ($\approx 1\%$), которые не отключаются антисовпадениями и создают прилив в хвосте временного распределения пионов, и фона случайных совпадений из временных спектров не удается получить абсолютное количество зарегистрированных пионов с необходимой точностью. В связи с этим в пионном пике учитывалась только та часть его, которая прилегает к центру тяжести пика и форма которой одинакова для положительных и отрицательных пионов. Была разработана процедура сравнения форм

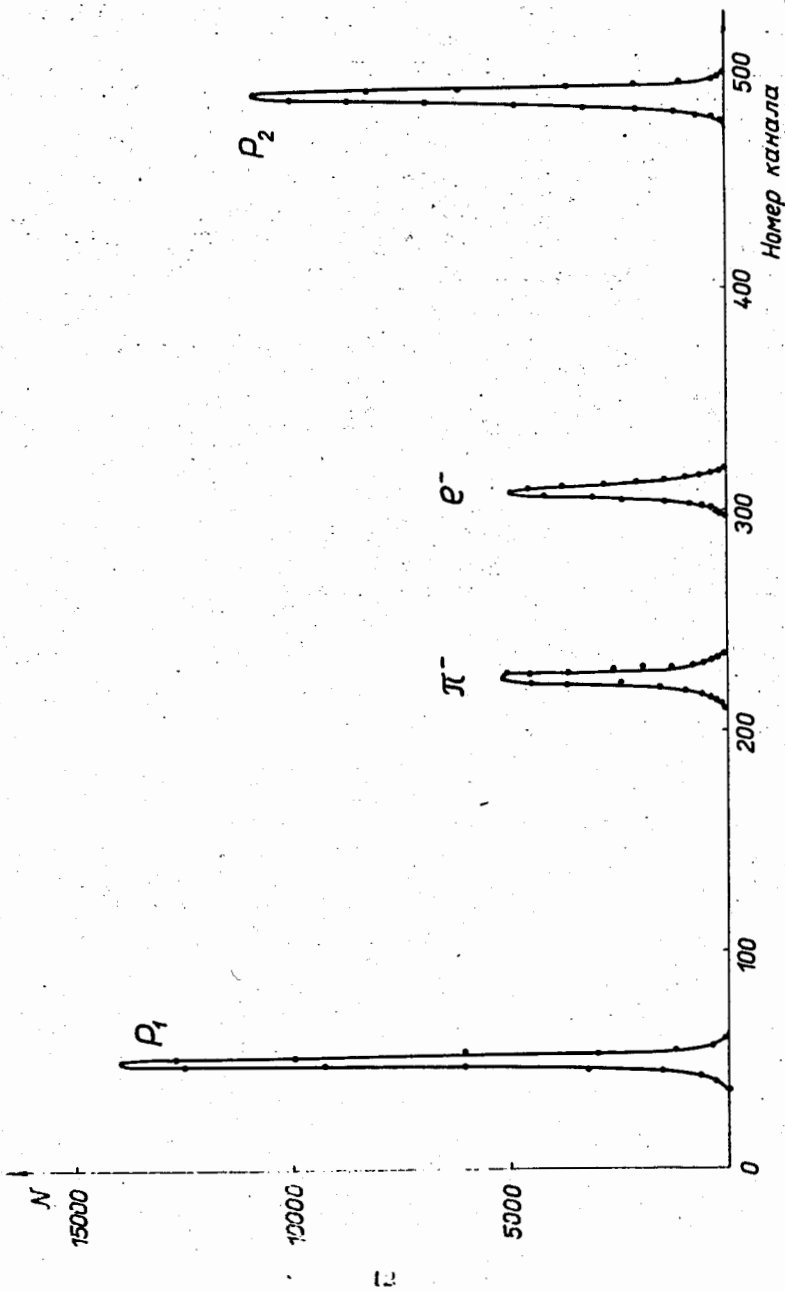


Рис. 4. Спектр отрицательного пучка по времени пролета на базе

временных распределений, которая позволяла надежно отмечать различия, обусловленные примесями порядка нескольких десятых долей процента от числа пионов.

Второй этап - определение средней скорости пионов. Для уменьшения вклада ошибок калировки шкалы спектрометра по времени пролета использовался следующий метод измерения средней скорости пионов (β_π). Измеряются два спектра частиц на двух базах пролета L и $(L - \Delta L)$. При этом изменение базы пролета (ΔL) производится таким образом, чтобы положение пика пионов на спектре, соответствующем базе $(L - \Delta L)$, совпадало примерно с положением пика электронов на спектре, соответствующем базе L . Формула для расчёта средней скорости пионов в этом случае имеет вид:

$$\beta_\pi = 1 - \frac{\Delta L}{L(1+\delta)},$$

где δ - небольшая поправка, связанная с неточным выполнением вышеуказанного условия. Для определения поправки δ необходима калировка шкалы спектрометра. Такая калировка была выполнена и было получено значение $\delta = 0,248 \pm 0,09$, откуда при $L = 13,45$ м и $\Delta L = 3,523$ м

$$\beta_\pi = 0,7901 \pm 0,0014.$$

Третий этап - сравнение средних скоростей положительных и отрицательных пионов. Сравнение производилось по расстояниям между пиками пионов и электронов для пучка положительных и отрицательных частиц. Для того чтобы исключить нестабильность спектрометра по времени пролета, расстояние между пиками пионов и электронов нормировалось на расстояние между реперными пи-

ками, которое соответствовало времени задержки фиксированного отрезка кабеля. В среднем, для отношения скоростей положительных и отрицательных пионов было получено:

$$\frac{\beta_+}{\beta_-} = (0,5 \pm 2,4) \cdot 10^{-4}.$$

Последний, четвертый этап состоял в вычислении отношения времен жизни заряженных пионов на основании сравнения числа пионов обоих знаков, зарегистрированных по различной длине пролета (N_0^+ , N_ℓ^+), и сравнения средних времен пролета положительных и отрицательных пионов (t_+). Расчетная формула основана на экспоненциальном законе распада пионов и имеет вид:

$$\frac{\tau_+}{\tau_-} = \sqrt{\frac{\frac{ct_+}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{ct_+}{L} \right)^2}{\frac{ct_-}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{ct_-}{L} \right)^2}} \cdot \frac{\ln \frac{N_0^-}{N_\ell^-}}{\ln \frac{N_0^+}{N_\ell^+}}.$$

Среднее значение отношения времен жизни заряженных пионов получено равным

$$\frac{\tau_+}{\tau_-} - 1 = -0,0014 \pm 0,0029.$$

Приведенная ошибка включает в себя в основном статистические ошибки с учетом несогласованности отдельных измерений между собой.

При обработке статистического материала применялись вычислительные машины БЭСМ-4 и "Минск-2" с использованием осциллографа со световым карандашом.

Важным моментом в прецизионных экспериментах является определение возможных систематических погрешностей измерений. Анализ такого рода ошибок посвящена четвертая глава реферруемой диссертации.

Возможные систематические ошибки, которые могут смещать величину отношения времен жизни заряженных пионов, можно разбить на три группы:

- 1) неучтенные потери пионов при транспортировке пучка, не связанные с их распадом;
- 2) недостаточно чистое выделение пионов;
- 3) ошибки, связанные со сравнением скоростей пионов.

Показано, что возможные систематические ошибки, обусловленные причинами, указанными в пунктах 1 и 3, существенно меньше 0,1%. Наибольшую возможную погрешность эксперимента мы видим в способе выделения зарегистрированных пионов из спектров по времени пролета; ее оценка $\leq 0,15\%$.

В приложении приведен вывод формул, которые использовались при обработке статистического материала.

Выводы

1. Разработан спектрометр по времени пролета с большой апертурой и рекордным для своего времени разрешением $\Delta t = 0,44$ нсек. Спектрометр использован в экспериментах по сравнению времен жизни заряженных пионов и по измерению спектров быстрых дейтронов, испускаемых при взаимодействии протонов с энергией 670 Мэв ядрами /12,13/.

2. На основе спектрометра по времени пролета создана установка для сравнения времен жизни заряженных пионов. Установка характеризуется следующими параметрами:

- а) временное разрешение $\Delta t = 0,65$ нсек;
- б) разрешение по импульсу $\frac{\Delta P}{P} = \pm 1,5\%$ при импульсе частиц $P = 180$ Мэв/с;
- в) максимальная база пролета частиц $V_{max} = 13,45$ м;
- г) длина, на которой изучался распад пионов, $l = 6,84$ м;
- д) дискриминация мюонов по пробегу $\approx 99\%$ при дискриминации пионов не более 5% ;
- е) уровень фона случайных совпадений $(0,1 \pm 0,2)\%$;
- ж) эффективность антисовпадений $> 0,9998$;
- з) угловая расходимость сформированного пучка $\Delta\phi = \pm 0,25^\circ$;
- и) интенсивность пионов обоих знаков на максимальной базе $- 10 \text{ сек}^{-1}$.

3. Проведены два сеанса измерений на синхроциклотроне ОИЯИ общей длительностью ≈ 200 часов, в течение которых набрана статистика $\approx 6 \cdot 10^6$ пионов обоих знаков; проведены контрольные измерения.

4. В результате обработки получены значения средней скорости пионов с точностью $0,18\%$ ($\beta_\pi = 0,790 \pm 0,0014$) и отношения средних скоростей положительных и отрицательных пионов с точностью $0,024\%$ ($\frac{\beta_+}{\beta_-} = 1,00005 \pm 0,00024$).

5. Отношение времен жизни заряженных пионов получено равным:

$$\frac{\tau_+}{\tau_-} - 1 = (-0,14 \pm 0,29)\%$$

при возможной статистической ошибке $\leq 0,15\%$. Этот результат является еще одним подтверждением справедливости *CPT*-теоремы.

Диссертация написана на основе работ ^{/9,10/}, опубликованных в виде препринтов ОИЯИ и в журналах "Ядерная физика" и "Приборы и техника эксперимента". Работы докладывались на Симпозиуме по наносекундной электронике (Дубна, 1967 год) и на 1-ом Международном совещании по нуклон-нуклонным и пион-нуклонным взаимодействиям (Дубна, 1968 год). Результат сравнения времен жизни заряженных пионов сообщался в докладе Кренина ^{/16/} на Международной конференции по физике высоких энергий в Вене (1968 год). Приведенная величина наряду с результатом работы ^{/7/} была наиболее точной среди известных к тому времени результатов измерений отношения времен жизни заряженных пионов.

Литература

1. J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Titch, R. Turlay. Phys. Rev. Lett., 13, 138 (1964).
2. T.D. Lee. Proc. Oxford Int. Conf. on Elementary Particles, 225 (1965).
3. R.P. Durbin, H.H. Loar, W.W. Havens. Jr. Phys. Rev., 88, 179 (1952).
4. В.И. Комаров, В.И. Петрухин, О.В. Савченко. Препринт ОИЯИ P-2802, Дубна, 1966.
5. M. Bardon, U. Dore, D. Dorfan, N. Krieger, L. Lederman, E. Schwarz. Phys. Rev. Lett., 16, 775 (1966).
6. F. Lobkowicz, A.C. Melissinos, Y. Nagashima, J.D. Fox, S. Tewksbury, H. Von Briesen. Phys. Rev. Lett., 17, 548 (1966).
7. D.S. Ayres, D.O. Caldwell, A.J. Greenberg, R.W. Kenney, R.J. Kurz, B.F. Stearns. Phys. Lett., 24B, 483 (1967).

8. D.S. Ayres, A.M. Cormack, A.J. Greenberg, R.W. Kenney, D.O. Caldwell, V.B. Elings, W.P. Hesse, R.J. Morrison. *Phys.Rev.Lett.*, 21, 261 (1968); *Phys.Rev.*, 3D, 1051 (1971).
9. В.И. Петрухин, В.И. Рыкалин, Д.М. Хазинс, З. Цисек. Препринт ОИЯИ P1-3862, Дубна, 1968; ЯФ, 9, 571 (1968); Материалы Международного совещания по нуклон-нуклонным и пион-нуклонным взаимодействиям, Дубна, ОИЯИ, P1-3971, 131 (1968).
10. C. Ward, A. Verick, E. Tagliaferri, C. York. *Nucl. Instr. & Meth.*, 30, 61 (1964).
11. В.Г. Лапшин, В.И. Петрухин, В.И. Рыкалин, Д.М. Хазинс, З. Цисек. Препринт ОИЯИ P13-3549, Дубна, 1967; ПТЭ, №6, 48 (1968); Материалы симпозиума по наносекундной ядерной электронике, Дубна, ОИЯИ, 13-3700, 349 (1967).
12. Л.С. Ажгирей, З.В. Крумштейн, Нго Куанг Зуй, В.И. Петрухин, Д.М. Хазинс, З. Цисек. ЯФ, 13, 6, 1971.
13. Л.С. Ажгирей, З.В. Крумштейн, Ю.П. Мереков, З. Мороз, Нго Куанг Зуй, В.И. Петрухин, А.И. Ронжин, Д.М. Хазинс, З.Цисек. В книге: *High-Energy Phys. and Nucl. Structure. Proc. of the III-d Int. Conf.*, 1969, p. 278-287.
14. J.W. Cronin. 14-th Int. Conf. on High-Energy Phys., Vienna, 1968, p. 281.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 сентября 1971 года.