

16.3.1964

346.4
A-83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин

P-1559

БЕТА-РАСПАД ПИОНА
МЭТФ, 1964, т 47, в 1, с 84-91.

Дубна 1964

А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин

P-1559

БЕТА-РАСПАД ПИОНА

Направлено в ЖЭТФ

2329/1, 48.
Дубна 1984

1. Введение

Характеристики бета-распада пиона



с большой точностью предсказываются теорией слабого взаимодействия^{/1,2/}, если справедлива гипотеза сохранения векторного тока^{/3,2/}. В рамках этой гипотезы вероятность бета-распада пиона может быть определена с погрешностью, не превышающей нескольких процентов^{/4,5/}:

$$\omega(\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu) = \frac{G^2 \Delta^8}{30\pi^3} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\Delta}{\mu} - 5 \frac{m^2}{\Delta^2} + \delta \right) \quad h=c=1. \quad (2)$$

Здесь G - константа слабого векторного взаимодействия, Δ - разность масс заряженного и нейтрального пионов^{/6,7/}, μ - масса π^+ -мезона, m - масса электрона, δ - радиационная поправка.

Первые исследования, проведенные в 1961-62 г.г.^{/8-11/}, показали, что несмотря на исключительно малую величину относительной вероятности $\lambda = \omega(\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu) / \omega(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu)$, составляющей, согласно теорин, всего лишь $1,04 \cdot 10^{-8}$, процесс (1) доступен измерениям. Полученная при этом вероятность λ оказалась близкой к величине, предсказанной на основе гипотезы сохранения векторного тока. Ниже сообщаются результаты дальнейших исследований бета-распада пиона^{/12/}, целью которых являлось измерение спектра позитронов и уточнение величины вероятности λ .

2. Постановка опыта

Для регистрации бета-распада пиона использовалась установка^{/13/}, содержащая четыре черенковских спектрометра полного поглощения (рис. 1). Эксперименты были выполнены на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в конце 1962 г. Выведенный из камеры ускорителя пучок положительных пионов формировался свинцовыми диафрагмами и магнитными линзами. Пионы проходили через ряд сцинтилляционных счетчиков 1-5 и останавливались в сцинтилляторе последнего счетчика 6, предназначенного для регистрации позитрона распада. Амплитудный анализ импульсов от этих счетчиков позволял четко выделять акты остановки пиона^{/14/}. Гамма-кванты от распада π^0 -мезонов регистрировались черенковскими спектрометрами. Между счетчиком 6 и спек-

1) Формула (2) получена Герштейном^{/9/}.

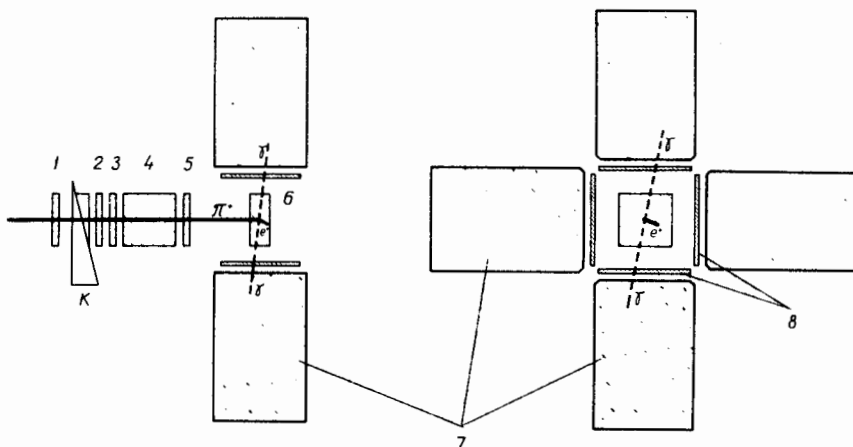


Рис. 1. Постановка опыта. 1-6 - сцинтилляционные счетчики, 7-черенковские спектрометры полного поглощения, 8-сцинтилляционные счетчики антисовпадений, К-тормозящий фильтр. В спектрометрах использованы фотоумножители 58 АУР, в сцинтилляционных счетчиках - 56 АУР

тросметрами были помещены сцинтилляционные счетчики, защищавшие спектрометры от заряженных частиц (счетчики антисовпадений).

Сцинтилляционные счетчики и черенковские спектрометры были помещены в многослойные магнитные экраны для устранения влияния рассеянного магнитного поля ускорителя. Все счетчики и спектрометры были снабжены импульсными источниками света наносекундной длительности, при помощи которых можно было моделировать остановку пиона и распад (1). Это позволяло быстро производить калибровку всей аппаратуры в процессе измерений.

Черенковские спектрометры и счетчик 5 были включены в схему совпадений^{/15/} с задержанными "воротами" длительностью $8 \cdot 10^{-8}$ сек, которая запускала развертку пятилучевого скоростного осциллографа^{/16/}. Время нарастания импульсов на экране осциллографа составляло $4 \cdot 10^{-9}$ сек при чувствительности вертикального отклонения лучей 60 мв/см. Импульсы от всех счетчиков и спектрометров установки смешивались^{/16/} и подавались на входы осциллографа. При этом импульсы счетчиков 3, 4, 6, 8 формировались по длительности. Особое внимание было обращено на формирование импульса в счетчике 6. Для этого счетчика был выбран режим питания, при котором выбросы и послеимпульсы были сведены к минимуму. Счетчик 6 был испытан при помощи двух импульсных источников света, моделировавших импульс от остановки пиона и возникающий через некоторое время импульс от позитрона распада. Варьи-

рование времени задержки и амплитуд этих импульсов показало, что позитрон в распаде (1) может быть надежно зарегистрирован, если временная задержка t между моментом его возникновения и остановкой пиона превышает $6 \cdot 10^{-9}$ сек. Такой же результат был получен при анализе зарегистрированных в калибровочных экспериментах событий $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ -распада (рис. 2, 10).

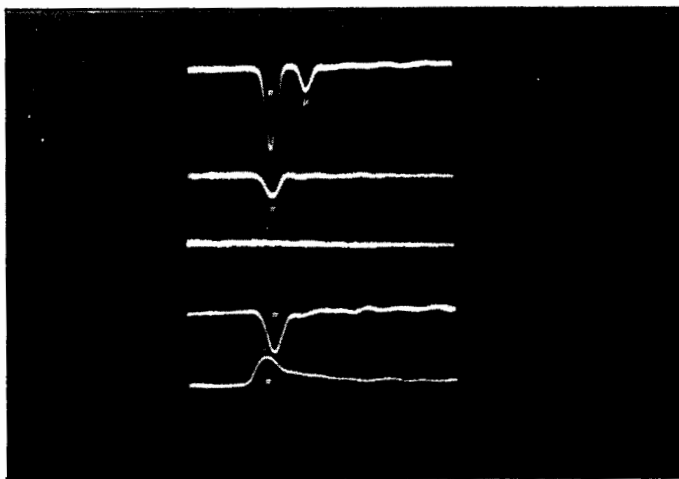


Рис. 2. Фотография случая $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ -распада. π^+ -импульсы, возникающие в счетчиках 5, 4, 3, 6 при торможении и остановке π^+ -мезона, μ^+ -импульс в счетчике 6 от μ^+ -мезона.

Для фотографирования импульсов был использован объектив Zeiss (ГДР) со светосилой 1:0,75 и фокусным расстоянием 100 мм. Фотографирование производилось при помощи киноаппарата РФК на высокочувствительную пленку "Изопанхром-13".

Настройка и калибровка аппаратуры была выполнена в опытах, где регистрировалась перезарядка остановившихся π^- -мезонов в мишени, помещенной между черенковскими спектрометрами. В качестве мишеней использовались жидкий водород и гидрид лития. Окончательная калибровка аппаратуры была проведена на основе амплитудно-временного анализа фотографий, полученных при регистрации малоинтенсивного процесса перезарядки $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ /17/ в сцинтиляторе счетчика 6 (рис. 3). Этот анализ показал, что выбранный метод регистрации обеспечивает разрешающее время для сцинтилляционных счетчиков $2 \cdot 10^{-10}$ сек, а для спектрометров - $7 \cdot 10^{-10}$ сек.

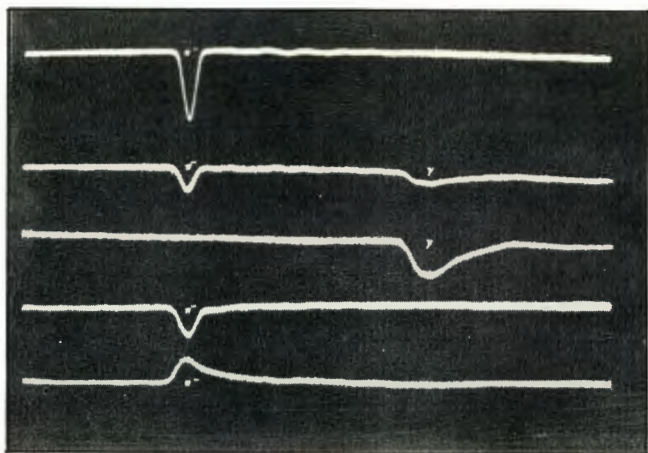


Рис. 3. Фотография случая перезарядки π^- -мезона в сцинтиляторе счетчика 6, π - те же импульсы, что на рис. 2, γ - импульсы от двух противоположных спектрометров.

3. Измерения

Основные измерения продолжались около 500 часов. За это время через установку было пропущено $4 \cdot 10^{10}$ пионов. В процессе измерений каждые два часа проводилась контрольная калибровка всей аппаратуры при помощи импульсных источников света (рис. 4). Проверка стабильности и линейности развертки осциллографа производилась также путем фотографирования стандартных синусоидальных сигналов с частотой 100 мГц от стабилизированного кварцевого генератора. Наряду с этим периодически повторялись контрольные эксперименты, в которых регистрировалась перезарядка отрицательных пионов в сцинтиляторе счетчика 6 и в мишени из гидрида лития.

Полученные фотографии предварительно просматривались на диаскопе. При этом были отобраны случаи, когда на фотографии была видна остановка пиона, сопровождаемая запаздывающим импульсом, и отсутствовали импульсы от счетчиков антисовпадений (рис. 5 а, б, в). Фотографии, на которых были зарегистрированы импульсы от счетчиков антисовпадений (рис. 6), обрабатывались отдельно - они служили источником информации о радиационном распаде пиона $\pi^+ \rightarrow \gamma + e^+ + \nu$.

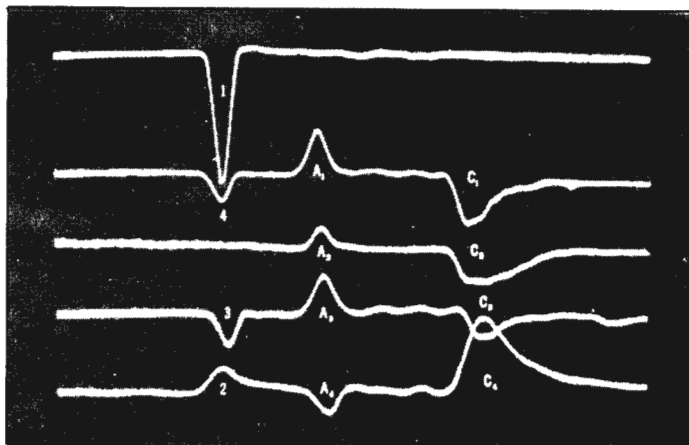


Рис. 4. Одновременное срабатывание импульсных источников света во всех счетчиках и спектрометрах установки (калибровка). 2, 3, 4, 1 - импульсы от счетчиков 5, 4, 3, 6. A_1 - A_4 - импульсы от счетчиков антисовпадений, C_1 - C_4 - импульсы от черенковских спектрометров.

Оставшиеся после проведения предварительного отбора 330 фотографий были подвергнуты временному анализу. При этом оказалось, что 81 событие, удовлетворяющее необходимым временным критериям (импульсы от γ -квантов и позитрона совпадают в пределах временного разрешения), может быть отнесено к распаду (1). Окончательный отбор событий был проведен на основе амплитудного анализа импульсов от черенковских спектрометров. Этот анализ показал, что с увеличением энергетического порога регистрации гамма-квантов E_{Π} уровень фона резко падает $\sim 1/2$ и при $E_{\Pi} = 30$ Мэв события бета-распада пиона могут быть надежно выделены.

После введения порога $E_{\Pi} = 30$ Мэв необходимым временным и амплитудным критериям удовлетворяло 52 события. Уровень фона случайных совпадений мы определили исходя из временных распределений импульсов от черенковских спектрометров и в счетчике 6. Одно из таких распределений приведено на рис. 7. Найденное число случайных $\gamma\gamma$ - e^+ и $\gamma e^+ - \gamma$ -совпадений оказалось равным 6. Фон, связанный с имитирующим процессом $\mu^+ - e^+$ -распада (с испусканием γ -кванта), был определен на основании фотографий (рис. 8), на которых между импульсами от остановившегося пиона и позитрона был виден импульс от μ^+ -мезона (1 событие). Наконец, следовало ожидать еще 2 фоновых события на основании двух зарегистрированных

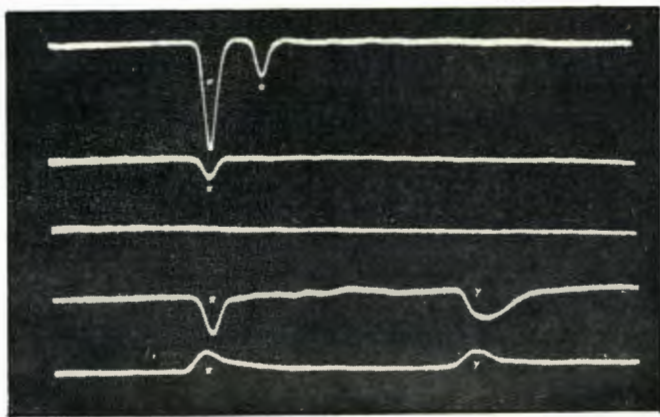
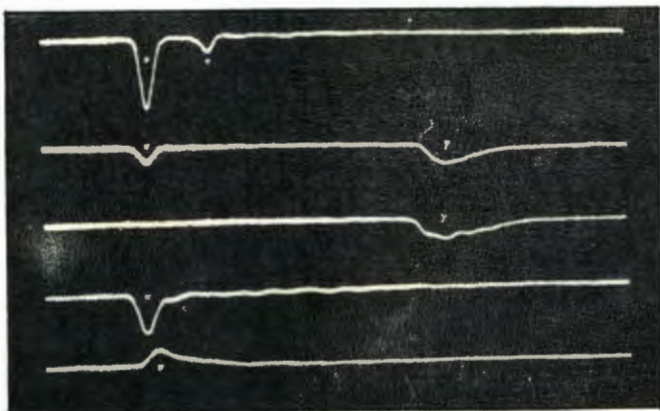
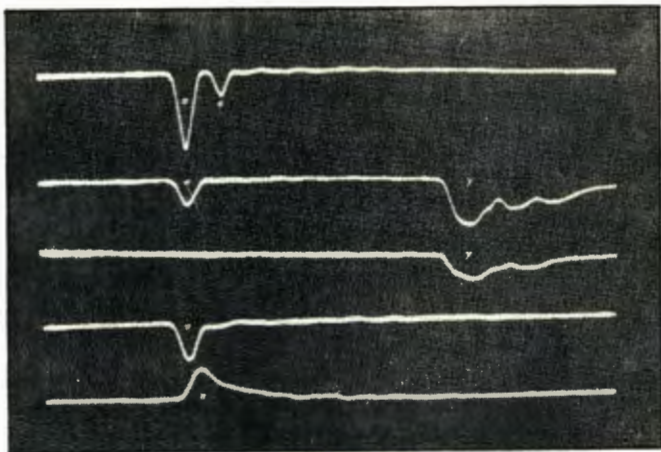


Рис. 5 а, б, в. Типичные фотографии бета-распада пионов. π и γ - те же импульсы, что и на рис.3. е - импульсы от позитронов распада. $t = 17, 31$ и $25 \cdot 10^{-9}$ сек, соответственно.

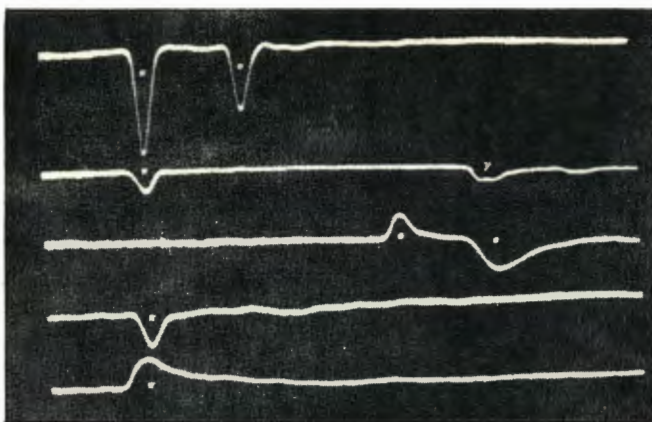


Рис. 6. Фотография радиационного распада $\pi^+ \rightarrow \gamma + e^+ + \nu$, π и γ - те же импульсы, что на рис. 3, e^- - импульсы от позитрона в счетчиках 6 и 8 и в спектрометре.

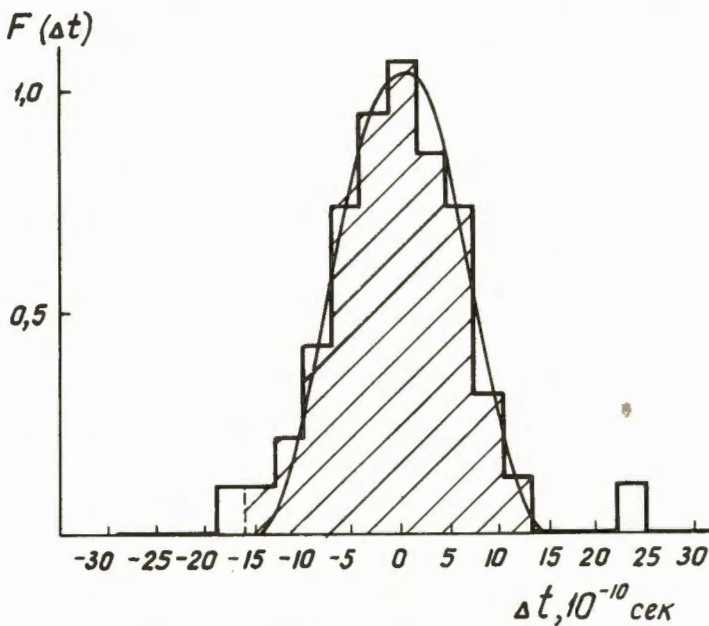


Рис. 7. Временное распределение зарегистрированных событий, Δt - задержка импульса от счетчика 6 (позитрон) относительно импульсов от спектрометров. Кривая - то же распределение, полученное в калибровочных опытах при регистрации перезарядки K^- -мезонов.

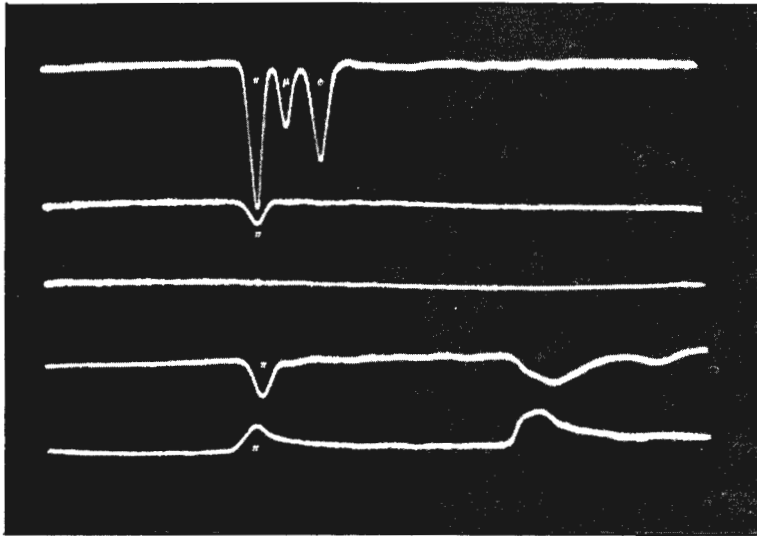


Рис. 8. Фотография одного из случаев, где между импульсами от пиона и позитрона виден импульс от μ^+ -мезона.

случаев со слишком большой амплитудой импульса от позитрона. Общее число фоновых событий получено, таким образом, равным 9. Число зарегистрированных случаев бета-распада пиона N при этом составляет

$$N = 43 \pm 7.$$

4. Результаты измерений

При проведении описываемых экспериментов производилась регистрация совпадений пар γ -квантов, летящих как в противоположные стороны (рис. 3), так и под углом 90° (рис. 9). Образующиеся при распаде (1) γ -кванты разлетаются под углом, близким к 180° . В условиях нашего опыта это должно было приводить к тому, что ожидаемое (с учетом углового разрешения установки) число случаев бета-распада пионов, зарегистрированных противоположными спектрометрами, N_{\perp} , на порядок величины превышает число случаев, зарегистрированных двумя соседними спектрометрами N_{\parallel} : $N_{\perp} / N_{\parallel} = 0,12$. Указанная угловая корреляция действительно имеет место для отобранных событий;

$$N_{\perp} / N_{\parallel} = 0,16 \pm 0,11.$$

При $E_{\pi} = 36$ Мэв $N_{\perp} / N_{\parallel} = 0,05 \pm 0,13$.

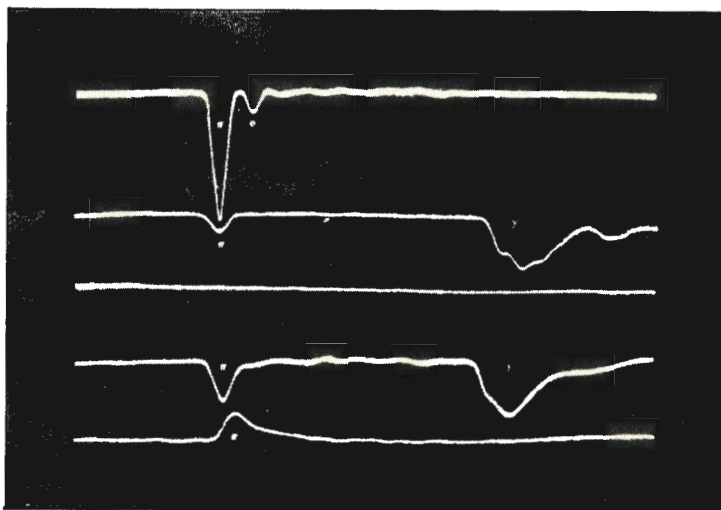


Рис. 9. То же, что и на рис. 5, но γ -кванты зарегистрированы двумя соседними спектрометрами. $t = 15 \cdot 10^{-9}$ сек.

Временное распределение зарегистрированных случаев, представленное на рис.10, также подтверждает правильность идентификации наблюдавшегося распада. Как видно из этого рисунка, где для сравнения приведено распределение для обычного $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ -распада, среднее время жизни наблюдавшегося распада совпадает со средним временем жизни π^+ -мезона. Амплитудное распределение импульсов в черенковских спектрометрах (энергетический спектр γ -квантов) также близко к ожидаемому для бета-распада пиона (рис. 11).

Энергетический спектр позитронов, образующихся при бета-распаде пионов, приведен на рис. 12. Он совпадает со спектром, вычисленным на основании сохранения векторного тока и исправленным с учетом разрешения счетчика в.

Вероятность бета распада пиона мы определили, исходя из числа зарегистрированных случаев распада N с учетом экспериментально найденной эффективности установки. Для определения эффективности спектрометры облучались γ -квантами от перезарядки π^- -мезонов в водороде. При этом варьировались место и угол входа γ -квантов в спектрометр. Полученная скорость счета сравнивалась со скоростью счета сцинтилляционных детекторов γ -квантов с известной эффективностью. При определении эффективности установки учитывались сдвиг и конечная длина "ворот" ($10 < t < 85 \cdot 10^{-9}$ сек),

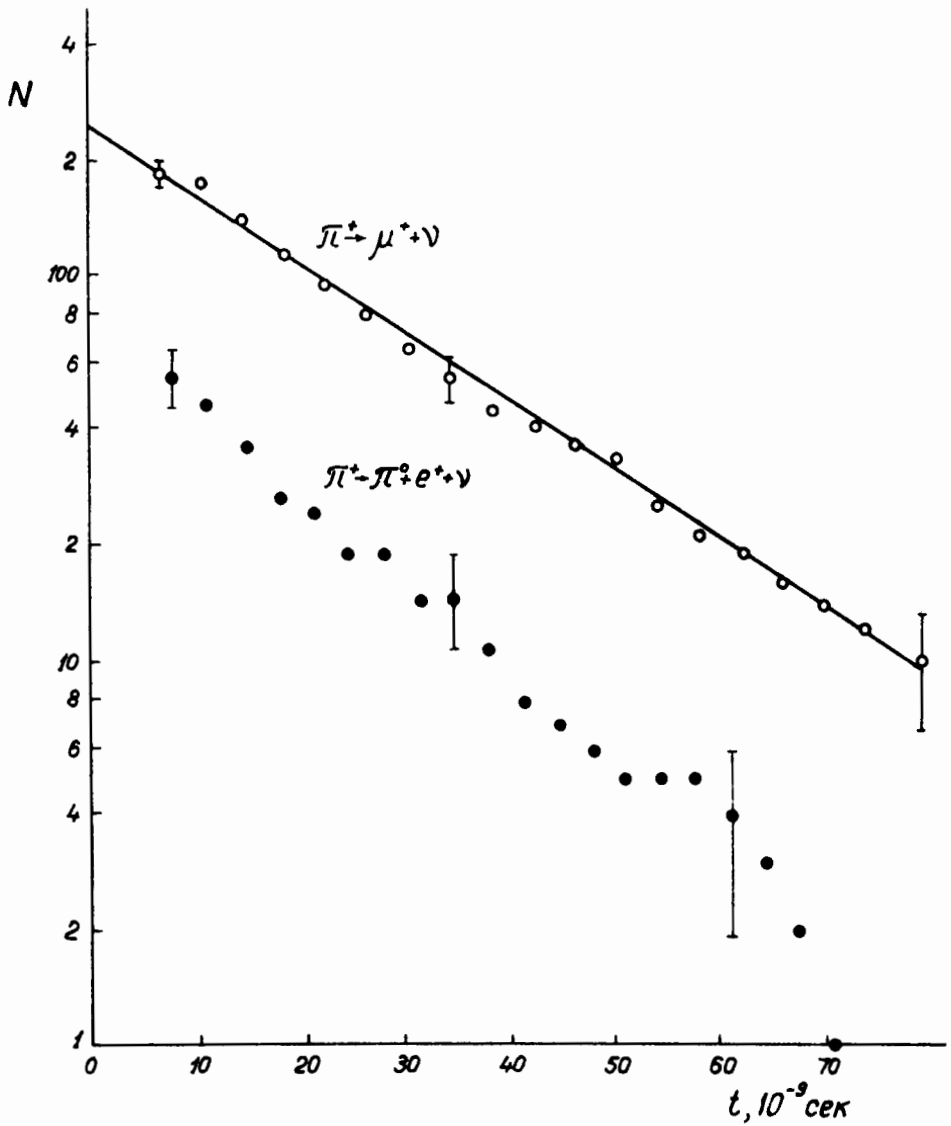


Рис. 10. Интегральное временное распределение зарегистрированных событий.
 \bullet - случаи бета-распада пиона, \circ - распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$. Прямая соответствует среднему времени жизни $\tau = 25,5 \cdot 10^{-9}$ сек.

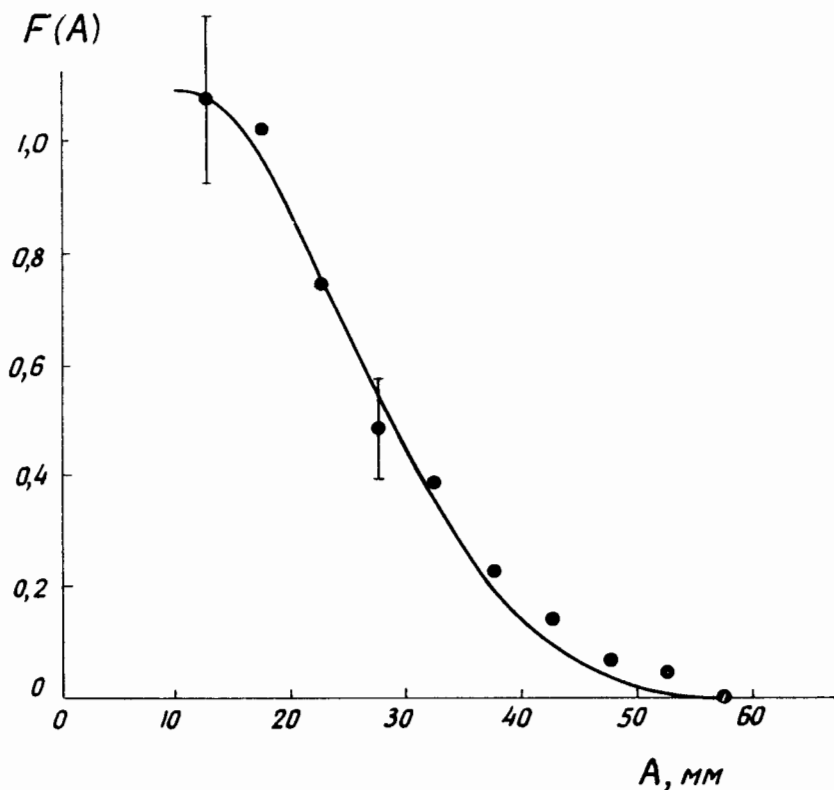


Рис. 11. Интегральное распределение $F(A)$ зарегистрированных событий по амплитудам A импульсов в черенковских спектрометрах. Кривая - то же распределение, полученное в калибровочных опытах при регистрации перезарядки π^- -мезонов.

энергетические пороги для γ -квантов ($E_{\pi} = 30$ Мэв) и позитрона (0,6 Мэв), поглощение γ -квантов в счетчиках 6 и 7 и эффективность просмотра. Эффективность регистрации бета-распада пиона получена равной $(10,5 \pm 1,4)\%$.

Величина относительной вероятности бета-распада пиона найдена равной

$$\lambda = (1,1 \pm 0,2) 10^{-8},$$

что согласуется с теоретически ожидаемым значением. Константа G , характеризующая бета-распад пиона (см. (2)), совпадает с векторной константой G_{β} , характеризующей бета-распад ядер:

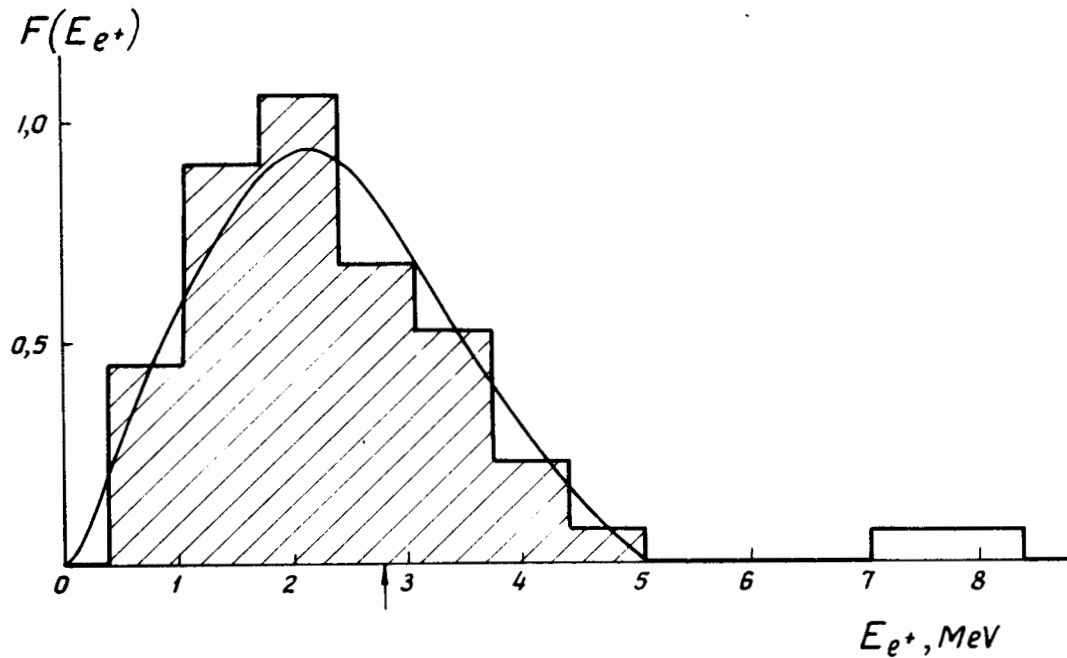


Рис. 12. Энергетический спектр позитронов, образующихся при бета-распаде пионов. Кривая вычислена с учетом разрешения аппаратуры. Стрелкой на шкале энергий позитронов E_{e^+} указано положение максимума распределения импульсов от μ^+ -мезонов в распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$.

$$G = (1,03 \pm 0,11) G_{\beta} .$$

Усредняя данные настоящей работы с результатами, полученными в ЦЕРН^{/18/}, находим

$$G = (1,04 \pm 0,07) G_{\beta} .$$

В заключение пользуемся случаем поблагодарить Г.П. Зорина, В.И. Орехова, А.В. Ревенко, Н.Н. Хованского, В.А. Черных, Л.Н. Андрианову и ее сотрудников, Н.Б. Едовину, Н.М. Ковалеву и К.А. Байчера и его сотрудников за помощь в создании аппаратуры и в работе. Мы благодарны Ким Ге Фа, Э.В. Нягу, З.Ф. Прокошкиной и М. Сгоновой за просмотр и обработку фотографий.

Л и т е р а т у р а

1. Я.Б. Зельдович. ДАН СССР, 97, 421 (1954).
2. R.F. Feinman, M.Gell-Mann. Phys. Rev., 109, 193 (1958).
3. С.С. Герштейн, Я.Б. Зельдович. ЖЭТФ, 29, 698 (1955).
4. G. Di Prato, G. Putzolu. Nuovo Cim., 21, 541 (1941).
5. М.В. Терентьев. ЖЭТФ, 44, 1320 (1963).
6. J.V. Czirr. Phys. Rev., 130, 341 (1963).
7. В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин. ЖЭТФ, 46, 1737 (1963).
8. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин, ЖЭТФ, 42, 832 (1962); 42, 1423 (1962).
9. A.F. Dunaitsev, V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin, V.I. Rykalin. Phys. Lett., 1, 138 (1962).
10. P. Depommier, J. Heintze, A. Mukhin, C. Rubbia, V. Soergel, K. Winter. Phys. Lett., 2, 23 (1962).
11. R. Bacastov, T. Elioff, R. Larsen, C. Wiegand, T. Ypsilantis. Phys. Rev. Lett., 9, 400 (1962).
12. A.F. Dunaitsev, V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin, V.I. Rykalin. Intern. Conf. on Fundamental Aspects of Weak Interaction. Brookhaven, USA (1963).
13. A.F. Dunaitsev, V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin, V.I. Rykalin. Proc. 1962 Intern. Conf. on Instrum. for High-Energy Physics, p. 252, Geneva, 1963.
14. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ПТЭ, 1, 159 /1963/.
15. А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин. Дубна, препринт 1415 /1963/.
16. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ПТЭ. /в печати/.
17. V.I. Petrukhin, Yu.D. Prokoshkin. Nuovo Cim., 23, 99 (1963); Dubna, preprint E-1471 (1963).
18. P. Depommier, J. Heintze, C. Rubbia, V. Soergel. Phys. Lett., 5, 61 (1963).

Дунайцев А.Ф., Петрухин В.И., Прокошкин Ю.Д.,
Рыкалин В.И.

P-1559

Бета-распад пиона

При помощи черенковских спектрометров зарегистрировано 43 случая бета-распада пиона. Величина относительной вероятности этого распада найдена равной $\lambda = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$, что подтверждает гипотезу сохранения векторного тока. Величины констант G и G_β , характеризующие бета-распад пиона и нуклона, совпадают: $G = (1,03 \pm 0,11) G_\beta$. Энергетический спектр позитронов, образующихся при бета-распаде пиона, согласуется с рассчитанным на основе гипотезы сохранения векторного тока.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна. 1964.

Dunajtsev A.F., Petrukhin V.I., Prokoshkin Yu.D., Rykalin V.I.

P-1559

Beta Decay of the Pion

43 events of the pion beta-decay have been detected by means of Cerenkov spectrometers. To identify events, use was made of a fast five-ray oscilloscope. The relative probability of the pion beta-decay was found to be $(1.1 \pm 0.2) 10^{-8}$ in agreement with the conserved vector current hypothesis. The positron spectrum is also consistent with that predicted by theory.

Preprint, Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna. 1964.