Институт Теоретической и Экспериментальной Физики

ITEP-9-03

FERMILAB
FEB 6 2004
LIBRARY

9 – 03

В.А. Андреев, В.А. Горбунов, А.Н. Гусев, В.С. Демидов,
Е.В. Демидова, А.А. Жданов, Ю.В. Ёлкин, Е.М. Карасёв,
Е.Н. Комаров, А.Г. Крившич, А.Ю. Соколов,
Н.А. Халдеева, Ю.П. Шкуренко, Г.В. Щербаков,
В.В. Яновский

Эксперимент ФАМИЛОН.
Постановка задачи, моделирование

Москва 2003

УДК 539.1 М-16

ЭКСПЕРИМЕНТ ФАМИЛОН. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ:
Препринт ИТЭФ 9 -03/

В.А. Андреев[1], В.А. Гордеев[1], К.Е. Гусев, В.С. Демидов, Е.В. Демидова, А.А. Жданов[1], Ю.В. Ёлкин[1], Е.М. Карасёв[2], Е.Н. Комаров[1], А.Г. Крившич[1],А.Ю. Соколов, Н.А. Халдеева Ю.П. Шкуренко, Г.В. Щербаков[1], В.В. Яновский[1]
М., 2003 -18с.

Теоретическим обоснованием эксперимента является гипотеза существования элементарных частиц – фамилонов α , ответственных за нарушение горизонтальной симметрии семейств лептонов. Существование таких частиц должно привести к безнейтринным распадам лептонов типа $\tau\to\mu\alpha$, $\tau\to e\alpha$ и $\mu\to e\alpha$. На пучке мюонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ готовится к постановке эксперимент по поиску распада μ^+-мезона на позитрон и фамилон. Установка ФАМИЛОН смонтирована на пучке «поверхностных» мюонов ускорителя, выполнены методические измерения. В работе описана постановка эксперимента ФАМИЛОН, приведены результаты моделирования процесса прохождения заряженных частиц в магнитном спектрометре.

EXPERIMENT FAMILON. STATEMENT OF THE PROBLEM, SIMULATION

V.A. Andreev[1], V.A. Gordeev[1], K.E. Gusev, V.S. Demidov, E.V. Demidova, A.A. Zhdanov[1], Yu.V. Elkin[1], E.M. Karasev[2], E.N. Komarov[1], A.G. Krivshich[1], A.Yu. Sokolov, N.A. Khaldeeva, Yu.P. Shkurenko, G.V. Sherbakov[1], V.V. Janovsky[1]

Theoretical substantiation of experiment is the hypothesis of existence of elementary particles – familons α , responsible for breaking of horizontal symmetry of lepton families. Existence of such particles should result in neutrinoless decays of leptons $\tau\to\mu\alpha$, $\tau\to e\alpha$ и $\mu\to e\alpha$. Experiment for seeking of μ^+ decay into positron and familon is prepared on muon beam of the phazotron LNP JINR. Installation FAMILON is mounted at the beam of "surface" muons, methodical measurements have been carried out already. In this paper statement of experiment FAMILON is described, results of simulation of passage of the charged particles in a magnetic spectrometer are presented.

Рис. –7, список лит. –10 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2003

---

[1] *Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН (ПИЯФ),*
[2] *Стерлитамакский Государственный педагогический институт.*

Введение

Развитие теории элементарных частиц за пределы стандартной модели утрачивает возможности своей прямой проверки и вынуждает экспериментаторов использовать косвенные методы изучения физики сверхвысоких энергий. Такие методы преимущественно связаны с редкими процессами, происходящими с явным нарушением лептонного и барионного чисел. В лептонном секторе проблема нарушения симметрии связана с возможным несохранением поколений лептонов, т.е. с несохранением по-отдельности электронного, мюонного и тау-лептонного зарядов. В случае нарушения глобальной симметрии поколений $SU(3)_H$ предполагается существование безмассовых частиц, названных фамилонами. В модели, предложенной в 1983 г. Ансельмом А.А. и Уральцевым Н.Г.[1], нарушение симметрии поколений приводит к предсказанию синглетного фамилонного состояния α. Дальнейшее развитие эта модель получила в работах [2-5].

В последние годы несохранение поколений лептонов в нейтринном секторе широко обсуждается в связи с утверждениями о существовании нейтринных осцилляций в подземных экспериментах с атмосферными нейтрино. Теоретические модели связывают эффекты смешивания массивных нейтрино с возможным существованием безнейтринных распадов заряженных лептонов, таких как распады $\mu \to e\,\gamma$, $\mu \to 3e$ или $\mu \to e$ - конверсия в ядрах, на которые имеются жесткие экспериментальные ограничения: $Br(\mu \to e\,\gamma) < 4.9\cdot10^{-11}$, $Br(\mu \to 3e) < 1.0\cdot10^{-12}$, $Br(\mu \to e$ - конверсии$) < 4.4\cdot10^{-12}$ [6]. Экспериментальные ограничения на вероятность распадов с несохранением лептонных поколений $\mu \to e\,\alpha$ и $\tau \to \mu\,\alpha$ значительно слабее, и поиск этих редких процессов имеет большие преимущества с точки зрения теоретических моделей, изучающих возможную природу симметрии поколений и механизмы ее нарушения.

Целью эксперимента является поиск безнейтринных распадов мюона на позитрон и фамилон ($\mu^+ \rightarrow e^+ \alpha$). Эксперимент будет проводиться на пучке «поверхностных» мюонов на фазотроне ЛЯП ОИЯИ на установке ФАМИЛОН.

Идея эксперимента

Концепция эксперимента разработана в ПИЯФ [7]. Поиск двухчастичных распадов мюона на позитрон и безмассовую частицу (фамилон) сводится к анализу высокоэнергичной части спектра позитронов от распадов мюона по основному каналу $\mu \rightarrow e\,\upsilon\upsilon$. Прямое наблюдение монохроматической линии от редкого распада $\mu \rightarrow e\,\alpha$ на фоне распада $\mu \rightarrow e\,\upsilon\upsilon$ помимо того, что требует применения магнитного спектрометра с высоким разрешением по энергии, связано и с трудностями абсолютных измерений (фоновые события, рассеяние и др.) и представляется крайне проблематичным. Однако многих трудностей можно избежать, если исследовать распады поляризованных мюонов и анализировать энергетические и угловые распределения позитронов. На рис. 1 показано распределение позитронов по углу между направлением движения позитрона и спином мюона для исследуемого и основного распадов. Если в первом случае имеет место изотропное распределение позитронов, то во втором - резко выраженная асимметрия вылета позитронов относительно направления спина мюона, связанная с несохранением четности. Отсюда следует, что фон от основного распада значительно меньше для позитронов, вылетающих в сторону, противоположную направлению спина мюона, чем для любых других направлений.

Экспериментально идея одновременного анализа энергетического и углового распределений реализуется следующим образом. Импульс позитрона измеряется прецизионным магнитным спектрометром с разрешением по энергии

порядка 10^{-3}, а для анализа корреляции между направлением спина μ-мезона и позитрона используется стандартная μSR – техника [8]. Спектры прецессии в перпендикулярном магнитном поле спина поляризованного мюона, остановившегося в мишени из вещества с высокой плотностью электронов проводимости (с целью предотвращения деполяризации за счет образования мюония), анализируются как функция энергии позитрона. Если распады

$\mu \rightarrow e\alpha$ существуют, то это приводит к резкому уменьшению коэффициента асимметрии вблизи верхней границы спектра Мишеля [7]. Следует заметить, что в такой постановке эксперимента систематические неопределенности сводятся к минимуму, так как все μSR- спектры набираются одновременно.

Установка ФАМИЛОН

Схема установки представлена на рис 2. Основные элементы установки описаны в работе [9].

Установка расположена на пучке «поверхностных» мюонов с кинетической энергией 4 МэВ, получаемых от распада π^+-мезонов, остановившихся в поверхностном слое мезонообразующей мишени.

В верхней части рисунка представлена система магнитных элементов для μSR—анализа процесса $\mu \rightarrow e$ - распада, состоящая из двух пар колец Гельмгольца для создания скрещенных магнитных полей $B_{\perp}$=0÷500 Гс и $B_{||}$=0÷1000 Гс и трех пар квадратных катушек для компенсации рассеянных магнитных полей в месте расположения мишени.

Спектрометрический магнит имеет диаметр полюсов 80 см и величину зазора между полюсами 24 см. Поле в центре магнита – 3 кГс.

Координатно-детектирующую часть магнитного спектрометра составляют сцинтилляционные счетчики С1-С6 и пропорциональные камеры ПК1-ПК4.

Счетчики включены в систему быстрого (наносекундного) отбора события требуемой конфигурации, которая обеспечивает формирование триггерного сигнала. Система координат выбирается таким образом, что ось X направлена по среднему направлению позитронов, Z направлена вверх, а Y так, чтобы система координат была правой. Y-Z плоскости пропорциональных камер имеют шаг 2 мм при зазоре 4 мм и разное число каналов в зависимости от размера. Камеры ПК1 и ПК2 размером 200×200 мм имеют по 192 канала; камеры ПК3 и ПК4 размером 350×350 мм имеют по 352 канала каждая. Для работы камер используется магическая смесь Ar(75%)+C_4H_{10}(24.7%)+хладон13В1(0.3%), которая готовится в специальной газосмесительной установке, обеспечивающей производительность до 200 см^3/мин смеси.

Электроника установки ФАМИЛОН (рис.3) выполнена в стандарте КАМАК и имеет программное управление через персональный компьютер типа Pentium-II. Используемые интерфейсные средства - контроллеры типа А2, приводы ветви и прямое сопряжение интерфейса компьютера с контроллером К16 - обеспечивают возможность работы с удаленными до 100 м крейтами. При этом время выполнения одной операции составляет 30 мкс, что в условиях нашего эксперимента не ограничивает скорости набора статистики, т.к. максимальная интенсивность полезных событий составляет 100 с$^{-1}$.

Электроника считывания пропорциональных камер выполнена в виде модулей, каждый из которых содержит 32 разряда чтения состояний камеры. Логика работы электроники аналогична логике, реализованной в установке МАГ[10]. Особенностью системы приема и запоминания информации является то, что она после каждого цикла регистрации работает непрерывно до прихода триггерного сигнала. Сигнал с каждой проволочки поступает в ОЗУ емкостью 16 разрядов. Адрес ячейки ОЗУ изменяется с частотой 25 МГц. Таким образом, в каждый момент времени в системе запоминания содержится информация о 16-ти состояниях каждой проволочки, отделенных друг от друга интервалом в

40 нс, так что время памяти ОЗУ составляет 640 нс. Триггерный сигнал останавливает циклическую запись, электроника обеспечивает считывание информации с проволочек пропорциональных камер в ЭВМ, после чего циклическая запись в ячейки ОЗУ возобновляется до прихода следующего триггера.

Программное обеспечение ON-LINE реализовано в системе WINDOWS с соблюдением технологии объектно-ориентированного программирования. Оно выполняет следующие функции:

управление подготовкой экспериментов;

тестирование подсистем установки и системы в целом;

управление накоплением информации в экспериментах;

управление on-line - обработкой в экспериментах;

отбор по параметрам и отображение экспериментальной информации и результатов on-line – обработки;

отбор по параметрам и просмотр измеряемой информации off-line;

отображение треков и результатов обработки on-line и off-line.

Результирующее быстродействие аппаратуры и программного обеспечения составляет 300-1000 событий в секунду и зависит от числа сработавших проволочек.

Основными задачами OFF-LINE программ является восстановление энергии позитрона по данным пропорциональных камер и формирование выходного массива данных в формате NTUPLE для проведения статистической и физической обработки.

Компьютерное обеспечение эксперимента ФАМИЛОН представляет собой распределенную по институтам-участникам эксперимента совокупность ЭВМ, связанных сетью ИНТЕРНЕТ, с концентрацией информации в ПИЯФ. Отдельные компьютеры в институтах должны иметь одинаковые наборы специализированных программ обработки экспериментальной информации.

Аппаратура в целом смонтирована на пучке мюонов, проверка ее работоспособности производилась в отладочном сеансе на ускорителе. По результатам сеанса[11] и компьютерного моделирования в рамках пакета GEANT-3.21 сформулировано техническое задание на доукомплектование установки дополнительными устройствами, которые обеспечат более высокую точность измерения энергий позитронов.

Моделирование установки ФАМИЛОН

Как было отмечено выше, методически задача поиска безнейтринных распадов мюонов сводится к измерению энергетической зависимости асимметрии углового распределения позитронов от распада мюона вблизи верхней границы спектра Мишеля (E_m=52.83 МэВ). Специфика эксперимента заключается в том, что требуется измерить импульсы мягких позитронов с помощью магнитного спектрометра, что накладывает определенные ограничения на конфигурацию установки.

Целью моделирования является оценка влияния вещества на пути позитронов (воздуха, проволочек, сцинтилляторов и пр.) на точность измерения их импульсов и оптимизация расположения детекторов в установке для достижения максимальной энергетической точности и эффективности регистрации позитронов. В качестве базовых исходных данных в программу вводились размеры магнита, карта магнитного поля, конструкция блоков пропорциональных камер, относительное расположение магнита и мишени.

Погрешность измерения импульса p позитрона определяется, в основном, погрешностью в измерении его направления до магнита и за ним по координатам сработавших проволочек пропорциональных камер и зависит от величины шага h, с которым расположены сигнальные проволочки в координатных плоскостях, и от расстояния X_n между плоскостями камер. В качестве относитель-

ной погрешности примем величину σ_p/p, где σ_p – среднее квадратичное отклонение. Зависимость погрешности в измерении направления позитронов с импульсом 52.8 МэВ в вакууме от расстояния X_n при h=2 мм показана убывающей пунктирной кривой на рис.4. В реальных условиях эксперимента основным фактором, приводящим к увеличению погрешности, является многократное рассеяние позитронов в веществе установки. Зависимость среднего угла многократного рассеяния позитрона от его пробега в воздухе показана на рисунке звездочками, соединенными возрастающей кривой. Суммарная погрешность как среднее геометрическое этих двух составляющих представлена сплошной кривой, которая имеет широкий минимум в районе 10-18 см. По-видимому, для достижения максимальной точности в измерении импульса позитронов расстояния между блоками пропорциональных камер до магнита и за ним должны быть порядка 20 см в случае, если между камерами воздух.

Для оценки предельной точности в измерении импульса позитрона было выполнено моделирование регистрации в камерах монохроматических позитронов с импульсами 52.8 МэВ (максимум в спектре Мишеля) и 51.8 (на 1 МэВ меньше) при условии, что на пути позитронов нет вещества. Разность координат Y точек пересечения позитронами указанных импульсов плоскости камеры ПК4 составила 37 мм. Отсюда получим коэффициент пересчета от точности измерения координаты к точности измерения импульса, он составляет 0.027 МэВ/мм.

Чтобы оценить влияние вещества в установке на точность измерения импульса, моделировалась регистрация монохроматических позитронов с максимальной энергией в спектре Мишеля для различных вариантов конфигурации установки. На рис.5 показаны распределения позитронов по координате Y в плоскости ПК4 для трех случаев: а) учитываются только конструкционные материалы, из которых изготовлены пропорциональные камеры, а вся установка находится в вакууме (сплошная линия), б) вакуум только внутри магнита (точ-

ки), в) вся установка работает в воздухе (пунктир). Видно, что основной вклад в разброс координат вносит воздух.

Аналогичные расчеты были выполнены еще для двух случаев: если все промежутки между камерами заполнены гелием и если внутри магнита расположен вакуумный кожух, а остальное пространство установки заполнено гелием.

Анализируя результаты моделирования, можно получить оценки точности измерения импульсов позитронов в различных конфигурациях установки. При этом за меру точности в измерении импульса принимались среднеквадратичные отклонения в распределениях по координатам y точки пересечения позитроном плоскости камеры ПК4 (рис.5), измеряющей горизонтальную координату. Приведем наиболее важные результаты.

Предельная точность, которая может быть достигнута при измерении координат с дискретностью h=2 мм в гипотетическом идеальном случае, когда на пути позитронов нет вещества, σ_p = 0.025 МэВ или для максимума спектра Мишеля $\sigma_p/p \approx 5\cdot10^{-4}$.

Максимально достижимая точность с пропорциональными камерами данной конструкции (с определенным количеством вещества на пути позитронов) при условии, что вся установка помещена в вакуум, составляет $\sigma_p/p \approx 2.5\cdot10^{-3}$.

Если воздух откачать только внутри магнита, то погрешность в измерении импульса возрастет до $\sigma_p/p \approx 5\cdot10^{-3}$.

Если всю измерительную часть установки заполнить гелием, то точность улучшится до $\sigma_p/p \approx 3\cdot10^{-3}$.

В случае, когда вся установка находится в воздухе, $\sigma_p/p \approx 9\cdot 10^{-3}$.

По-видимому, оптимальным является вариант, когда из вакуумного кожуха откачивается воздух, а остальное пространство заполняется гелием. В этом случае $\sigma_p/p \approx 2.6\cdot 10^{-3}$. На рис. 6 показаны траектории 50 позитронов с энергией 52.8 МэВ для такой конфигурации.

Отметим, что реальная точность измерения импульсов будет несколько выше, т.к. приведенные оценки сделаны по координатам только одной камеры, а при восстановлении импульсов учитываются координаты, по крайней мере, в двух камерах.

Дальнейшее увеличение точности измерения импульсов возможно лишь при таком усовершенствовании конструкции координатных детекторов, которое приведет к уменьшению количества вещества на пути позитронов.

Важным параметром эксперимента является эффективность регистрации позитронов в зависимости от их энергий и углов вылета. Она также вычислялась методом Монте-Карло для оптимальной конфигурации установки. Предполагалось, что позитроны вылетают из мишени изотропно в угле до 8^0 , а спектр позитронов описывается функцией Мишеля. Рассматривалась часть спектра в интервале 35-52.8 МэВ. Эффективность как функция двух переменных - импульса позитрона и угла вылета из мишени - определялась как отношение числа событий двумерных гистограмм – одна построена для позитронов, зарегистрированных в камерах ПК2 - ПК4, другая - для позитронов, вылетающих из мишени. На рис. 7 показаны зависимости эффективности от импульса позитрона для различных углов вылета (0^0 (сплошная линия), 2^0 (пунктир), 4^0 (точки), 6^0(штрих-пунктир) и 8^0 (сплошная линия)). Из рисунка видно, что эффективность регистрации позитронов с импульсами от 45 МэВ до максимального значения не опускается ниже 0.5 вплоть до 6^0.

Заключение

Ближайшая задача физических исследований на установке ФАМИЛОН (2004-2005 гг.) – на существующей аппаратуре получить первую прямую экспериментальную оценку на вероятность безнейтринного распада мюона на

уровне $R_\alpha=\Gamma(\mu \to e\,\alpha)/\Gamma(\mu \to e\,\upsilon\upsilon) \le 10^{-5}$ (300 часов набора статистики на пучке «поверхностных» мюонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ).

Дальнейшее развитие эксперимента связано с созданием магнитного спектрометра с энергетическим разрешением $\approx 10^{-4}$ и временным разрешением 0.25 нс. Возможный проект такого спектрометра рассмотрен в работе [12]. Основными детектирующими элементами предлагаемой установки является активная мишень на основе плоскопараллельных лавинных детекторов для регистрации точки остановки мюона и времяпроекционная камера в магнитном поле для измерения кривизны трека позитрона. В принципе, такая аппаратура позволила бы исследовать процесс $\mu \to e\,\alpha$ на уровне $R_\alpha \le 3\ 10^{-8}$.

Эксперимент выполняется в рамках следующих программ: Целевой научно-технической программы России «Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники гражданского назначения», подпрограмма «Фундаментальная ядерная физика», проект «Физика редких процессов»; Программы РАН «Нейтринная физика»; проекта РФФИ (грант 99-02-19943-а); и Программы поддержки ведущих научных школ России (проект 99-02-18540а).

Литература

1. А.А. Ансельм, Н.Г. Уральцев, ЖЭТФ **84,** 1961 (1983)
2. А.А Ансельм., Н.Г. Уральцев, М.Ю. Хлопов,ЯФ, **41,** 1678 (1985).
3. Z.G.Berezhiani and M.Yu.Khlopov, Z.Phys.C. **49,** 73 (1991)
4. M.Yu.Khlopov and A.S.Sakharov, *in Proceeding of 1-st International conference on cosmoparticle physics "Cosmion'94", Moscow, Ed. by M.Yu.Khlopov, M.E.Prokhorov, A.A.Starobinsky, J.Tran Thanh Van.* (Editions Frontieres, 1996) p. 273. ЯФ, **57(4),** 690 (1994)
5. K.M.Belotsky, M.Yu.Khlopov, A.S.Sakharov, A.A.Shklyaev, and A.L.Sudarikov, Gravitation & Cosmology. **4**, Supplement, 70 (1998).

6. K.Hagiwara et al. (Particle Data Group), Phys.Rev. **D66** (2002).
7. В.А. Гордеев, Препринт № 1077, ЛИЯФ (Ленинград, 1985).
8. В.А. Гордеев, Докторская диссертация, Ленинглад (1990)
9. В.А. Гордеев, В.А. Андреев, В.Г. Гребинник и др. Препринт 2380, ПИЯФ (Гатчина, 2000).
10. М.П.Безуглов, Е.Т.Богданов, Е.В.Быстрицкая и др. ПТЭ 1, 13 (2002).
11. В.А. Гордеев, В.А. Андреев, В.Г. Гребинник и др. *Научная сессия МИФИ - 2002. Сборник научных трудов.* (М.: МИФИ, 2002), С. 17.
12. V.A.Andreev, D.V.Balin, V.N.Duginov et al. Preprint 2405, PNPI (Gatchina, 2001).

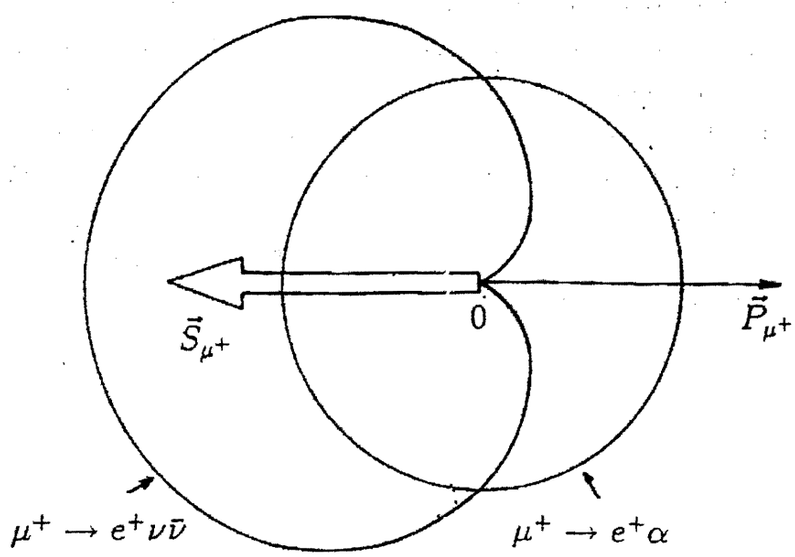

Рис 1. Угловое распределение позитронов относительно направления спина мюона для распадов $\mu \to e\,\upsilon\upsilon$ и $\mu \to e\,\alpha$

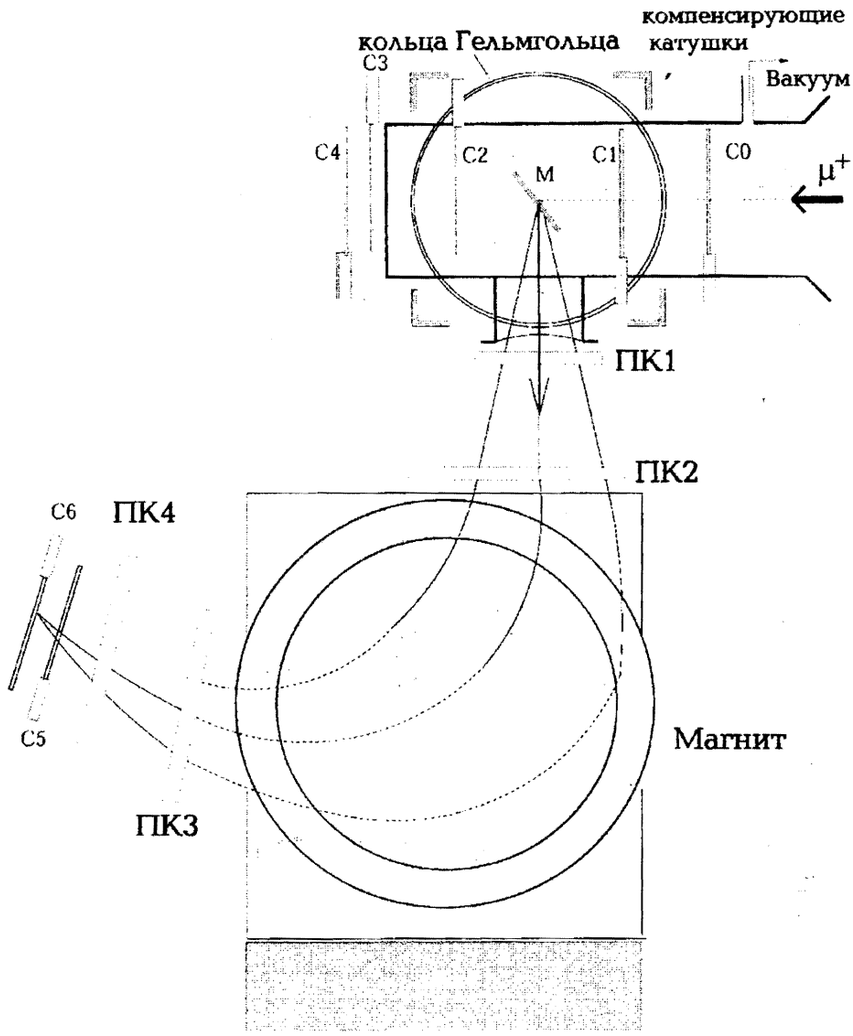

Рис.2 Схема установки ФАМИЛОН.

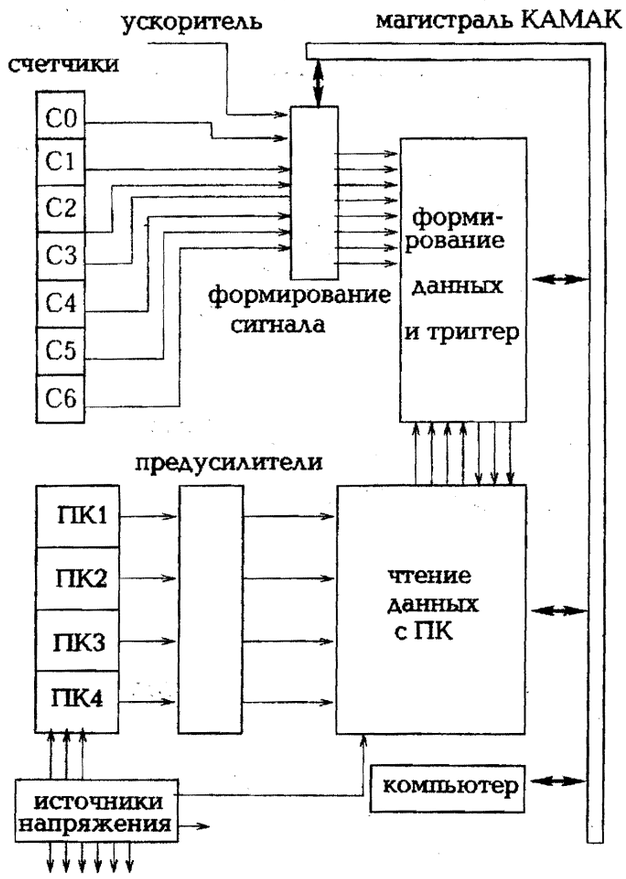

Рис. 3. Блок-схема электроники установки ФАМИЛОН

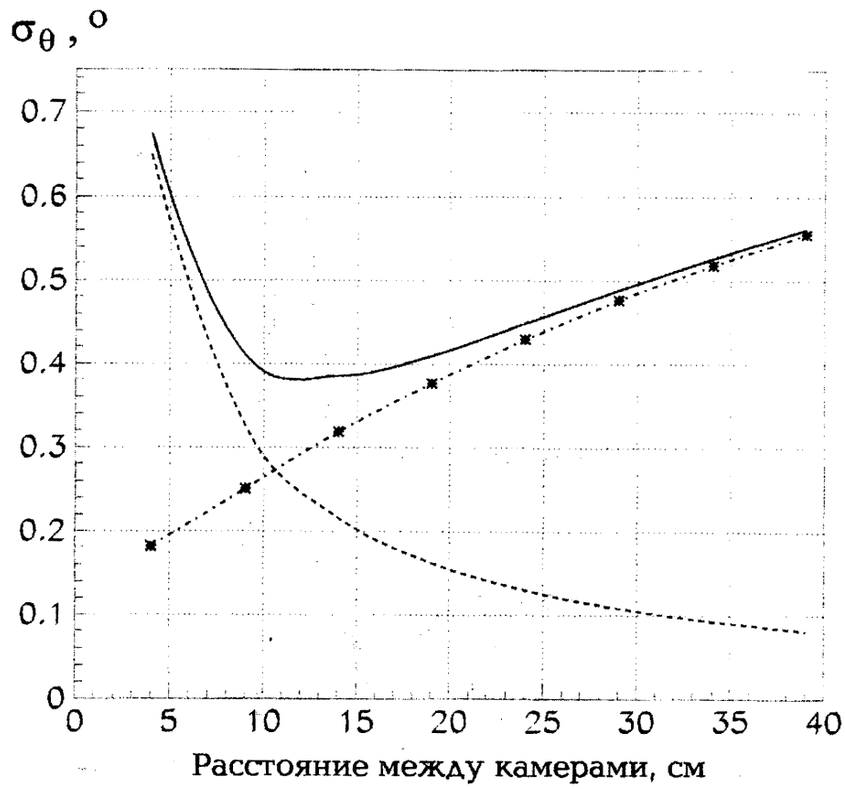

Рис. 4. Зависимость погрешности в измерении направления позитронов с энергией E_m 52.8 МэВ от расстояния X между плоскостями регистрации. Штриховой линией показана точность измерения в вакууме, штрих-пунктирной – погрешность, обусловленная многократным рассеянием, сплошная линия – погрешность в реальных условиях эксперимента.

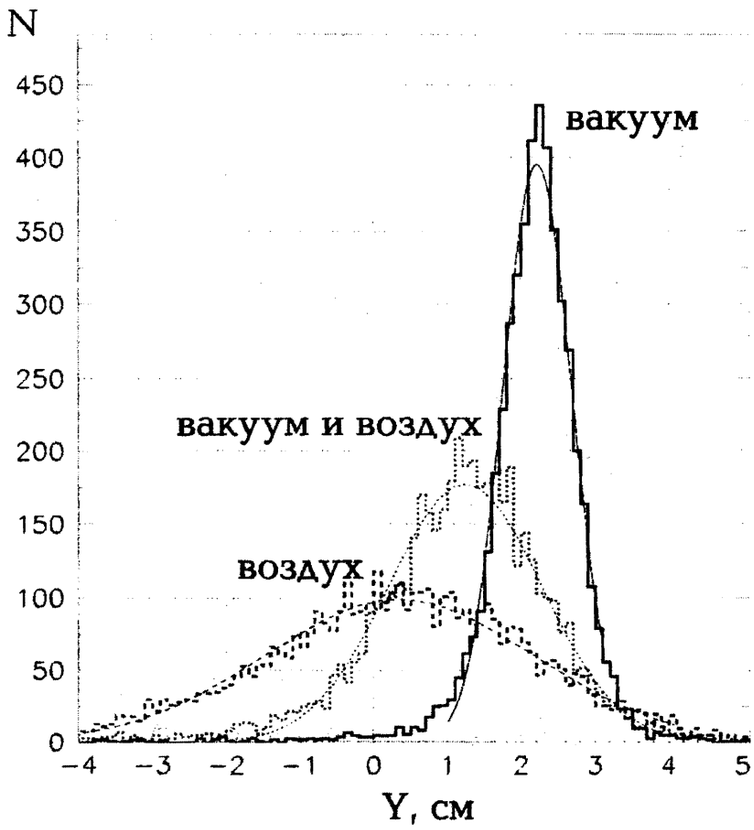

Рис. 5. Распределения позитронов по координате *Y* в камере ПК4 для трех случаев: три камеры (ПК2,3 и 4) расположены в вакууме(сплошная линия), вакуум только внутри магнита(точки) и камеры находятся в воздухе (пунктир).

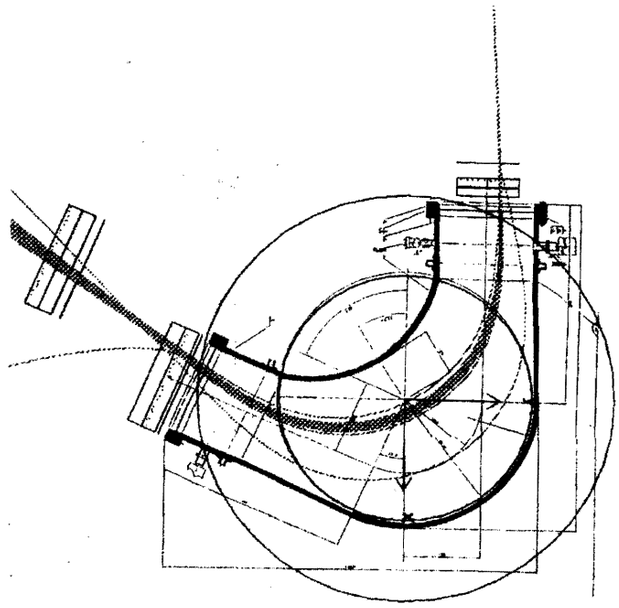

Рис. 6. Результаты моделирования траекторий позитронов с энергией 52.8 МэВ в установке ФАМИЛОН.

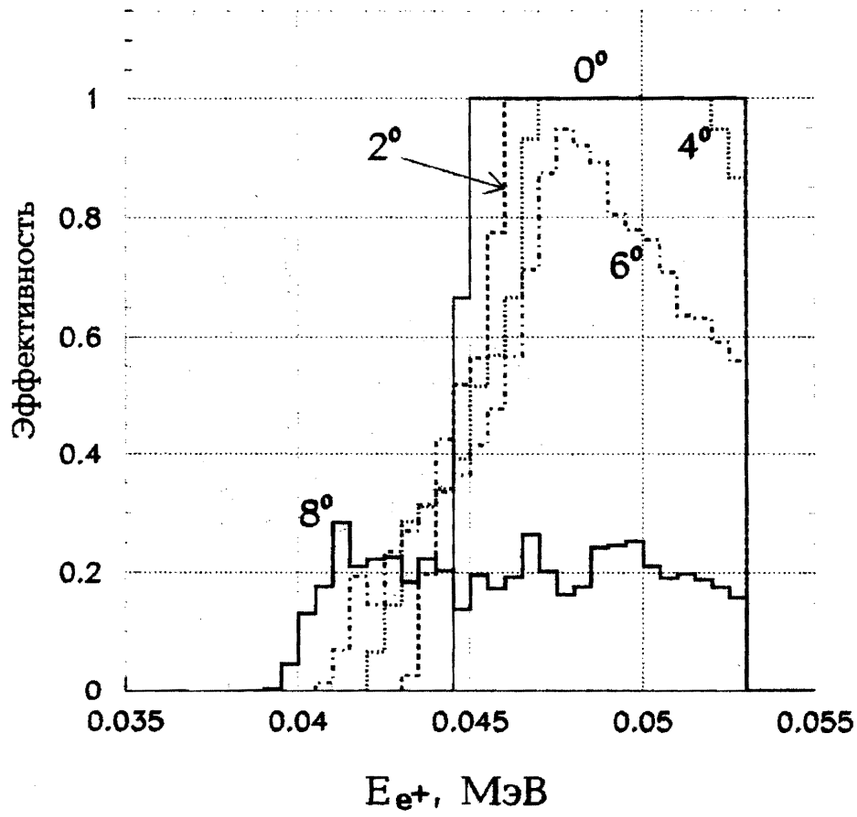

Рис. 7. Зависимость эффективности регистрации позитронов от их импульсов для пяти значений углов вылета (0^0(сплошная линия), 2^0 (пунктир), 4^0(точки), 6^0(штрих-пунктир) и 8^0 (сплошная линия)).