

Разработка прецизионных проволочных
детекторов и создание установки для
исследования распадов мюонов

Ю.И. Давыдов

ЛЯП ОИЯИ

24 марта 2026

Содержание

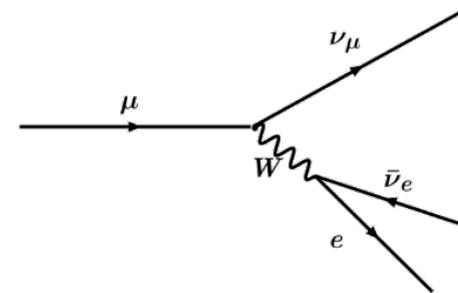
1. Параметры Мишеля
2. Спектрометр TWIST
3. Прецизионные проволочные детекторы установки TWIST
4. Методики обработки данных со спектрометра TWIST и определения параметров Мишеля
5. Результаты измерения параметров Мишеля в эксперименте TWIST
6. Заключение

Параметры Мишеля

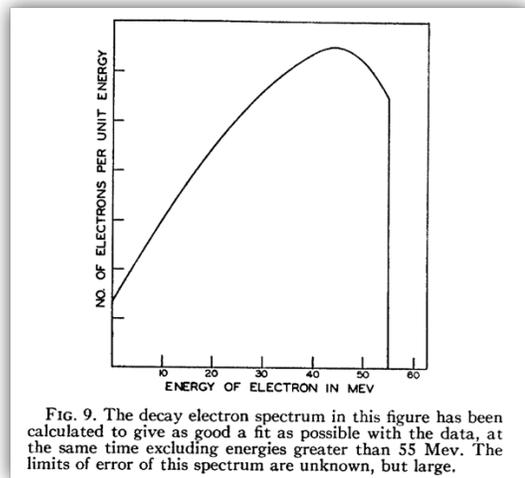
- C.D. Anderson and S.H. Neddermeyer. *Phys. Rev.*, 50, p.263-271, (1936) : мезотрон – первое наблюдение мюона
- C.M.G. Lattes, H. Muirhead, G.P.S. Occhialini and C.F. Powell. *Nature*, 159, p.694-697 (1947) : открытие π -мезона
- E.P. Hincks and B. Pontecorvo. *Phys. Rev.*, 74(6), p.697-698 (1948) :
- J. Steinberger. *Phys. Rev.*, 75(8), p.1136-1143 (1949)

▪ L. Michel. <i>Proc. Phys. Soc.</i> , A63, p.514-531 (1950)	параметр ρ
▪ C. Bouchiat and L. Michel. <i>Phys. Rev.</i> , 106(1), p.170-172 (1957)	параметр η
▪ T. Kinoshita and A. Sirlin. <i>Phys. Rev.</i> , 107(2), p.593-599 (1957)	параметр δ
<i>Phys. Rev.</i> , 108(3), p.844-850 (1957)	параметр ξ

$$\begin{aligned} \rho &= 0.75 \\ \delta &= 0.75 \\ \xi &= 1.0 \\ \eta &= 0 \end{aligned}$$

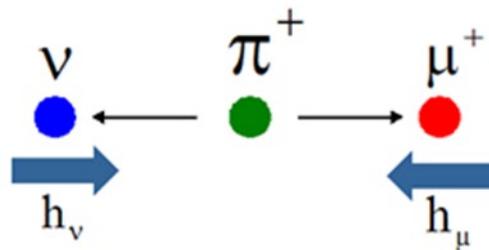


Louis Michel (1923-1999)

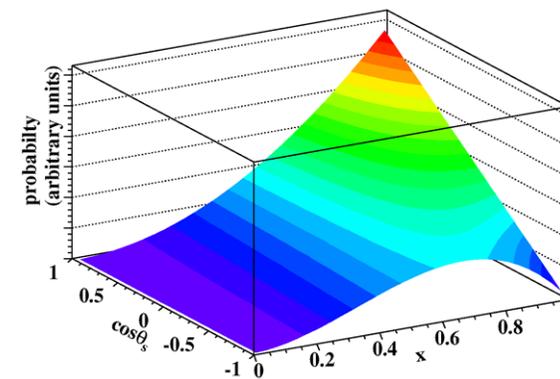


Спектр электронов в распадах остановившихся мюонов (J.Steinberger. *Phys. Rev.*, 75(8), p.1136 (1949))

Распад пиона в покое

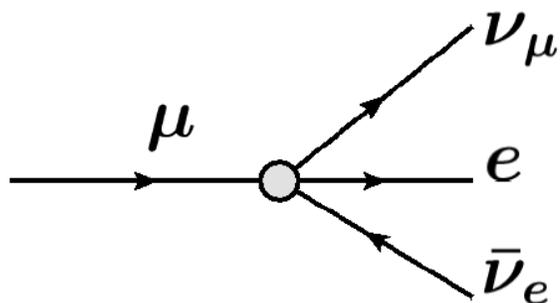


$$p_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} = 29.792 \text{ MeV}/c$$



Распад мюона при низких энергиях

При низких энергиях распад мюона может быть с хорошим приближением представлен как локальное четырехфермионное взаимодействие



$$M = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{\substack{i,j=L,R \\ \kappa=S,V,T}} g_{ij}^{\kappa} \langle \bar{\psi}_{e_i} | \Gamma^{\kappa} | \psi_{\nu_e} \rangle \langle \bar{\psi}_{\nu_{\mu}} | \Gamma_{\kappa} | \psi_{\mu_j} \rangle$$

g_{ij}^{κ} - 10 комплексных амплитуд констант связи

Допускают взаимодействие между любыми комбинациями левых (L) или правых (R) мюонов и позитронов и связанными с ними нейтрино

$$\frac{d^2\Gamma}{dx d(\cos \theta_s)} = \frac{m_{\mu}}{4\pi^3} E_{max}^4 G_F^2 \sqrt{x^2 - x_0^2} \left(x(1-x) + \rho(4x^2 - 3x - x_0^2) + \eta x_0(1-x) \right. \\ \left. + P_{\mu} \xi \frac{1}{3} \sqrt{x^2 - x_0^2} \left[1 - x + \frac{2}{3} \delta \left(4x - 3 + \left(\sqrt{1 - x_0^2} - 1 \right) \right) \right] \cos \theta_s \right)$$

Спектр распадов позитронов является линейной функцией параметров ρ и η и произведений степени поляризации мюона и параметров Мишеля $P_{\mu} \xi$ и $P_{\mu} \xi \delta$.

Прецизионное измерение параметров Мишеля является прямым тестом (V-A) структуры электрослабого взаимодействия в Стандартной модели и может быть чувствительным к физическим процессам за ее пределами

H.-J. Gerber, W. Fetscher and K.F. Johnson. Physics Letters B, 173(1), p.102-106 (1986)

Предыдущие измерения параметров Мишеля

Измерения на синхроциклотроне ЛЯП:

- А.И. Алиханян, В.Г. Кириллов-Угрюмов, Л.П. Котенко, Е.П. Кузнецов и Ю.С. Попов. ЖЭТФ 34 253-254 (1958) [Soviet Physics JETP 7, p.176 (1958)]
- В.В. Бармин, В.П. Канавец, Б.В. Морозов, И.И. Першин. ЖЭТФ 34, 830-835 (1958) [Soviet Physics JETP 7, p.573 (1958)]
- С.А. Али-Задэ, И.И. Гуревич, Ю.П. Добрецов, Б.А. Никольский, Л.В. Суркова. ЖЭТФ 36 1327-1329 (1959) [Soviet Physics JETP 9, p.940 (1959)]
- В.В. Ахманов и др. ЯФ 6 316-328 (1967) [Soviet Journal of Nuclear Physics 6, p.230 (1967)]

Наиболее точные измерения параметров Мишеля до TWIST:

$$\rho = 0.7518 \pm 0.0026$$

S.E. Derenzo. Physical Review, 181, p.1854 (1969)

$$\delta = 0.7486 \pm 0.0026 \pm 0.0028$$

B. Balke et al. Physical Review D, 37, p.587 (1988)

$$P_{\mu\xi} = 1.0027 \pm 0.0079 \pm 0.0030$$

I. Beltrami et al. Phys. Lett. B194, p.326 (1987)

$$\eta = -0.007 \pm 0.013$$

H. Burkard et al. Phys. Lett. B160, p.343 (1985)

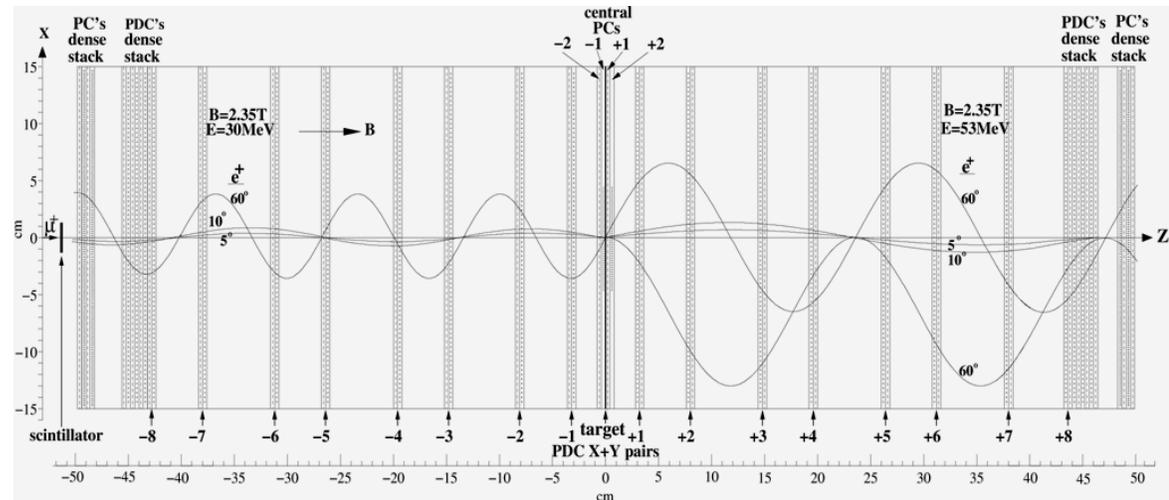
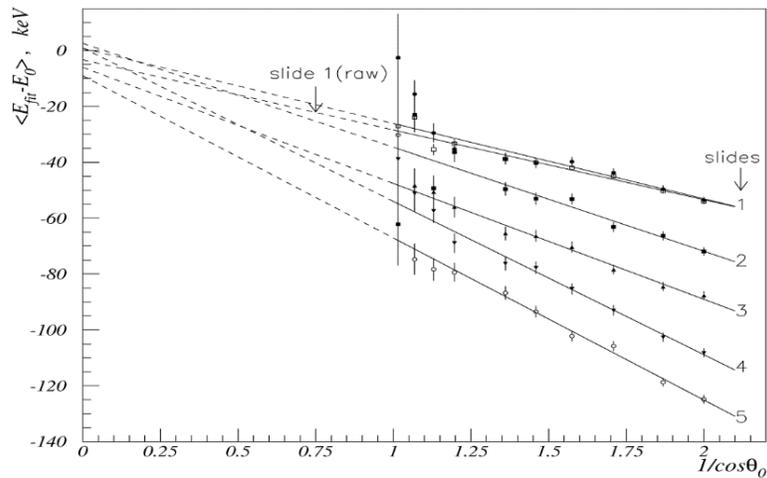
Эксперименты с использованием газовых детекторов для восстановления двумерных спектров $N(p, \theta)$ позитронов распада:

- Эксперимент LAMPF E455 в Лос-Аламосе (США) с использованием времяпроекционной камеры закончился неудачей из-за искажения электрического поля положительными ионами [*Ming-Jen Yang. NIM A270, p.126-139 (1988)*]
- Эксперимент LAMPF E969 на установке MEGA в Лос Аламосе также завершился неудачно из-за низкой эффективности камер и недостаточной точности знания положения проволок в детекторе [*Fei-Sheng Lee, PhD thesis, Virginia Tech, 2001*].

Требования к спектрометру

- Детектор из планарных, расположенных ортогонально внешнему однородному магнитному полю, может удовлетворять требованиям эксперимента по одновременному измерению нескольких параметров Мишеля
- Рассеяние позитронов в детекторе должно быть минимальным.
- Необходимо с высокой точностью знать расположение проволочек камер как в плоскости (X,Y), так и по Z координате вдоль оси пучка
- Монте Карло моделирование показало, что среднеквадратичное отклонение проволок от идеального положения в каждой плоскости должно быть не более 20 мкм
- Положение анодных плоскостей камер в спектрометре должно быть известно с точностью примерно 10^{-4} .

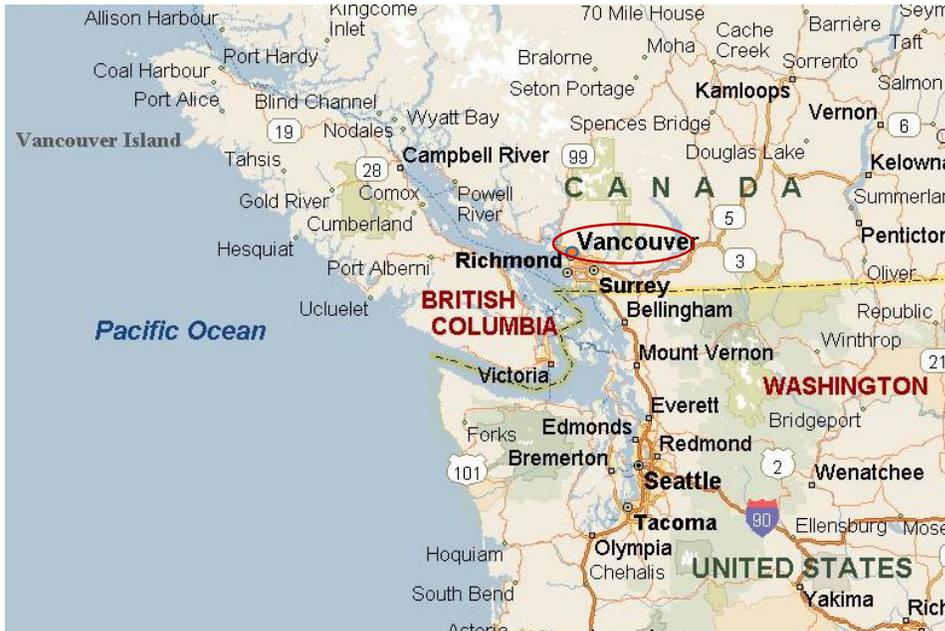
$\Delta E(E, \theta) = \Delta E(E, \theta = 0)/\cos\theta$ - потери энергии позитрона при вылете под углом θ .



A.A Khrutchinsky, Yu. Yu Lachin, and V.I Selivanov. A Monte-Carlo study of a precision magnetic spectrometer with planar geometry. NIM A396, p.135-146 (1997).

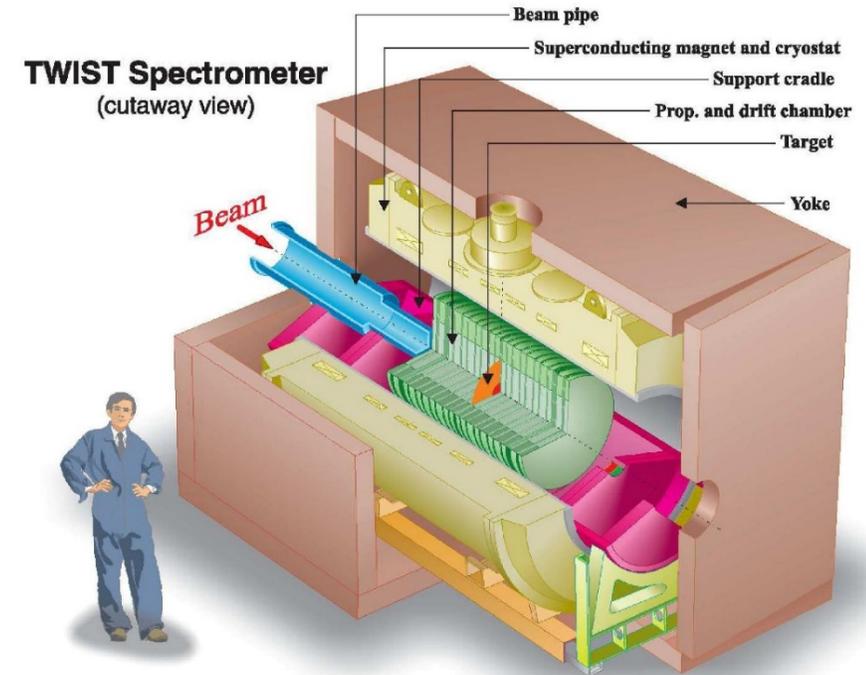
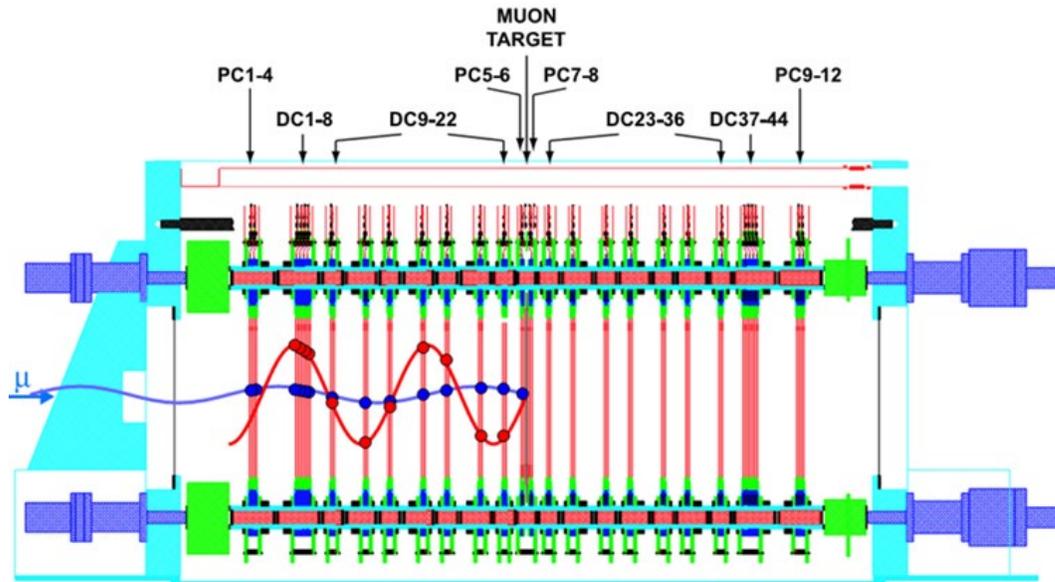
Эксперимент TWIST

- Эксперимент по измерению одновременно трех параметров Мишеля в одном эксперименте с точностью на уровне $\sim 10^{-4}$ с использованием разработанной методики для изготовления прецизионных камер был принят на ускорителе в ТРИУМФ (Ванкувер, Канада) .
- Целью созданной коллаборации TWIST (TRIUMF Weak Interaction Symmetry Test) было измерение параметров Мишеля ρ , δ , $P_\mu \xi$ из двумерного спектра данных $N(p, \theta)$ (p , θ - импульс и угол вылета позитрона распада) в распадах положительных мюонов с точностью примерно на порядок лучше существовавших до нашей работы неопределенностей в измерениях всех трех параметров. P_μ и ξ экспериментально неразделимы, поэтому измеряется только их произведение.



Спектрометр TWIST

- Концепция спектрометра TWIST основана на использовании симметричной сборки планарных многопроводочных дрейфовых камер, помещенных в однородное соленоидальное магнитное поле
- Мюоны останавливаются в мишени в центре сборки и треки позитронов от их распадов с высокой точностью регистрируются дрейфовыми камерами.



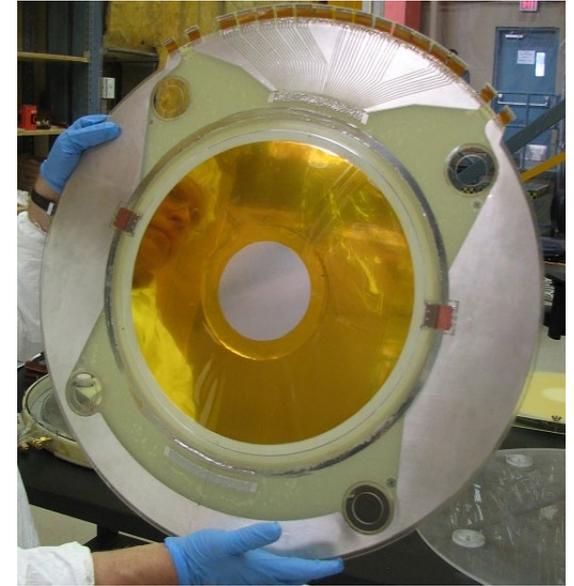
Разработка новой методики создания проволочных детекторов

Особенности изготовления камер:

- Использование немагнитных материалов
- Стеклянные столы (диски) с оптически полированными поверхностями для изготовления камер
- Оптически полированные ситалловые спейсеры для сборки камер (4.000 ± 0.003 мм) и модулей (8, 20 и 40 мм, ± 0.003 мм)
- Оптически полированные стеклянные линейки (4.000 ± 0.003 мм) с прецизионно нанесенными рисками (1.000 ± 0.0015 мм)
- Алюминизированный майлар толщиной 6.35 мкм
- Материалы, не портящиеся в агрессивной среде DME

Процесс изготовления камер включал несколько этапов:

- Подготовка катодов;
- Подготовка и клеивание ламели на стеклянную рамку;
- Вклеивание ситаловых колец в стеклянные рамки;
- Подготовка катодных плоскостей;
- Натяжение проволок;
- Контроль натяжения проволок и их положений;
- Сборка камер в модули;
- Предварительное тестирование модулей.



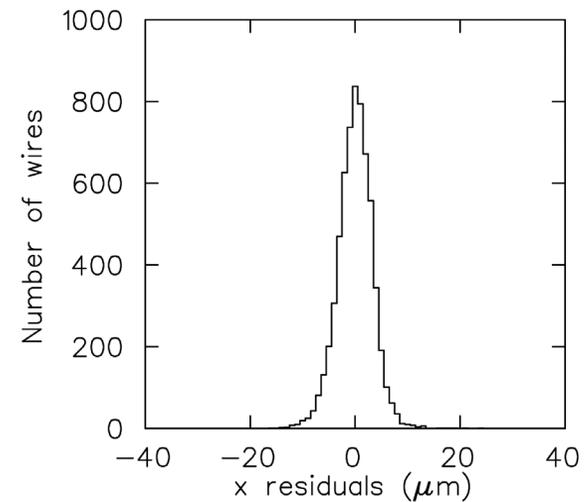
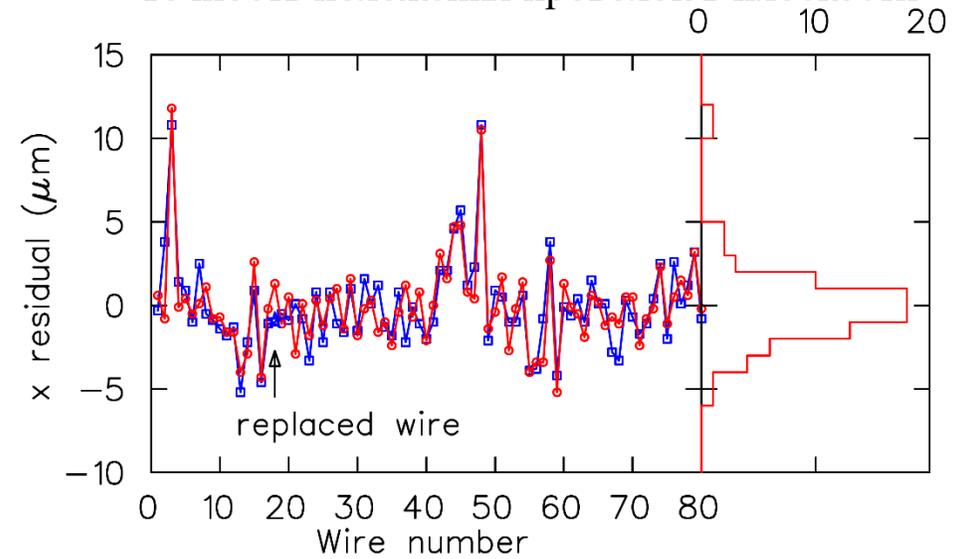
Геометрические точности изготовления камер

Намотку проволоки осуществляли 2 человека
Контроль положения проволоки с помощью CCD камер



ДК: 80 проволок диаметром 15 мкм, шаг 4 мм,
ПК: 160 проволок диаметром 15 мкм, шаг 2 мм
ПК (мишенный модуль): 48 проволок диаметром 15 мкм, шаг 2 мм

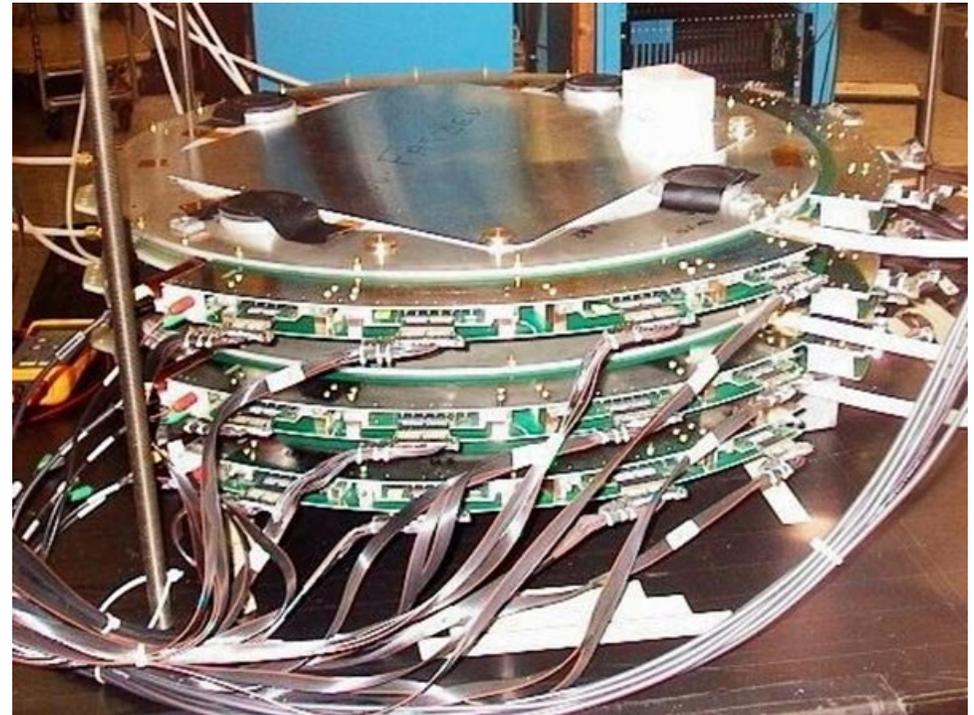
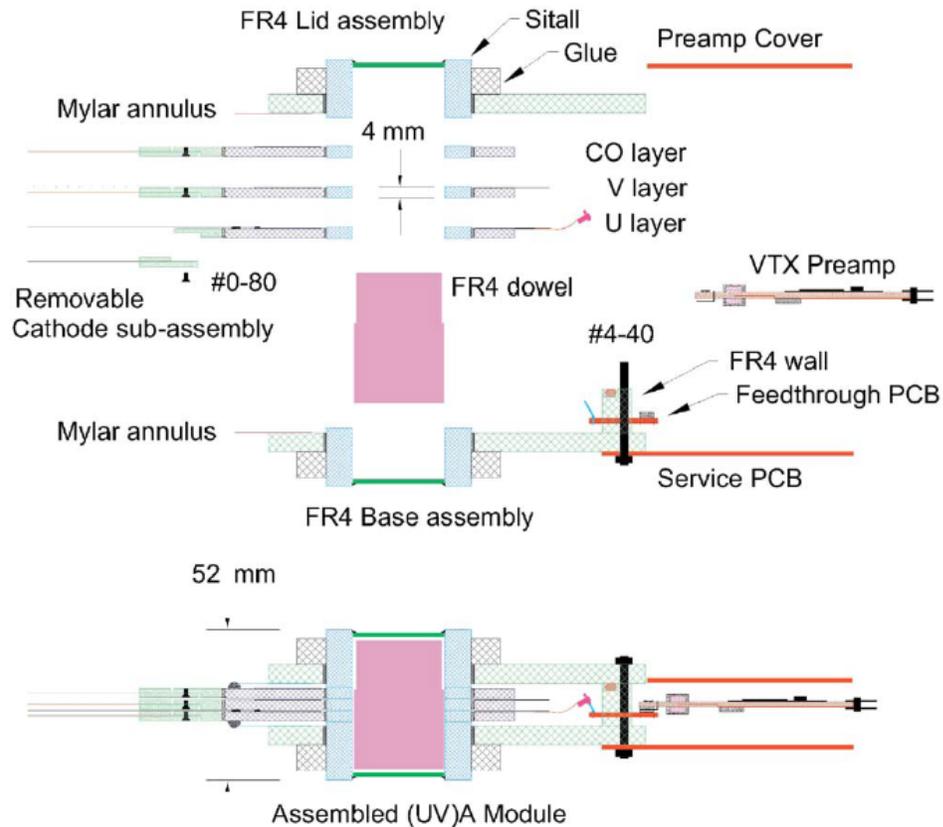
Точность положения проволок в плоскости



Распределение
смещений проволок от
их номинальных
положений для 70
плоскостей. $\sigma = 3.5$ мкм

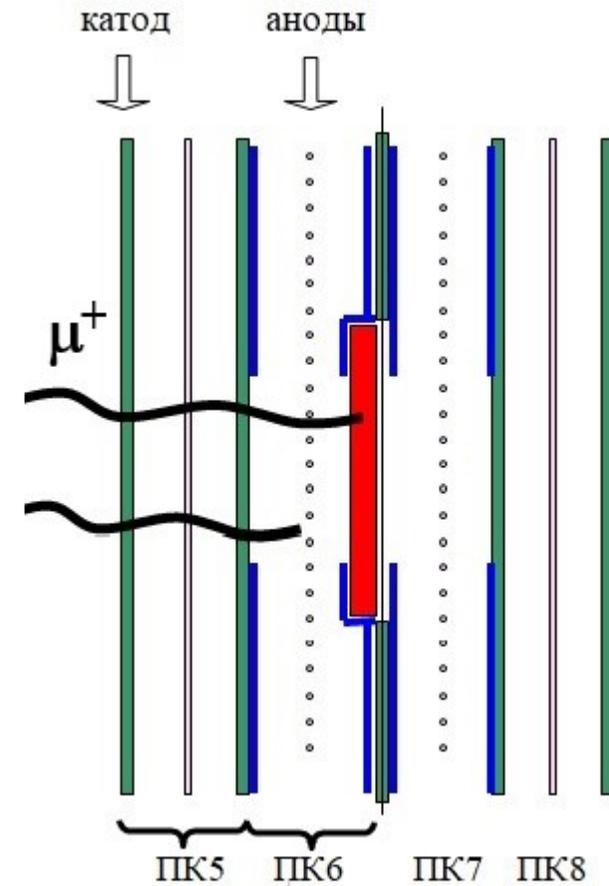
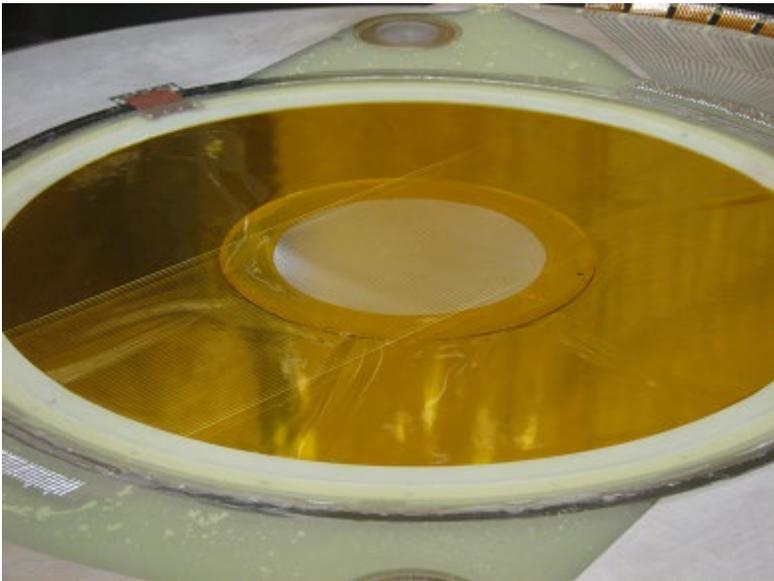
Модули детекторов

- 14 модулей ДК, составленных из двух плоскостей
- 2 модуля ДК, содержащих по 8 плоскостей каждый;
- 2 модуля ПК, содержащих по 4 плоскости каждый;
- мишенный модуль, составлен из четырех плоскостей ПК



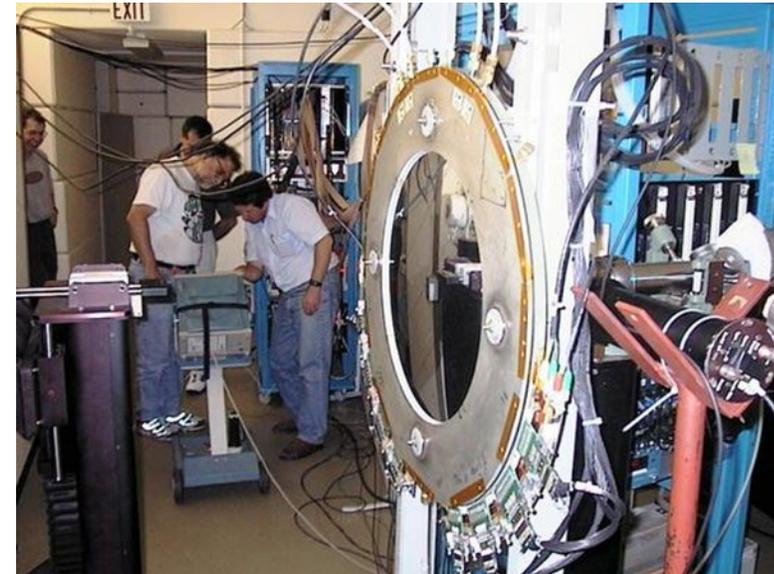
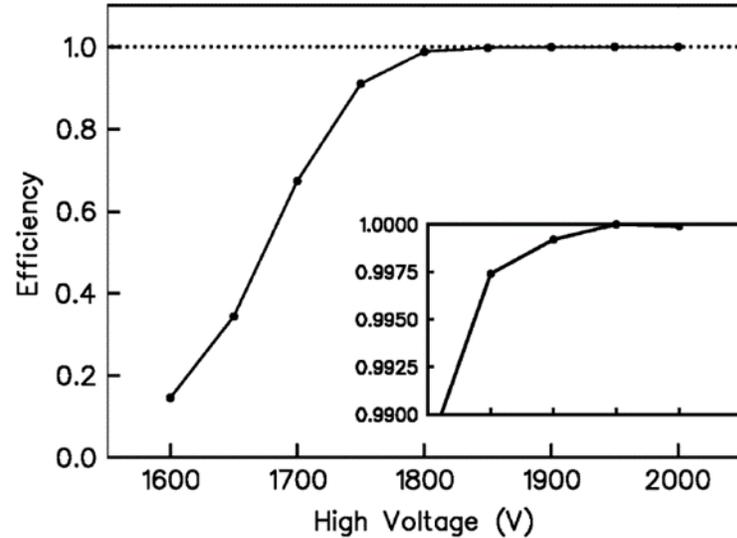
Мишенный модуль

- Майлар с нанесенным на него с двух сторон углеродным слоем толщиной примерно по 10 мкм. Общая толщина - около 145 мкм.
- Алюминиевая фольга толщиной 71.6 ± 0.5 мкм высокой чистоты ($>99.999\%$)
- Серебро высокой чистоты ($>99.999\%$) толщиной 30.9 ± 0.6 мкм.
- Тормозная способность трех типов мишеней близка друг другу.



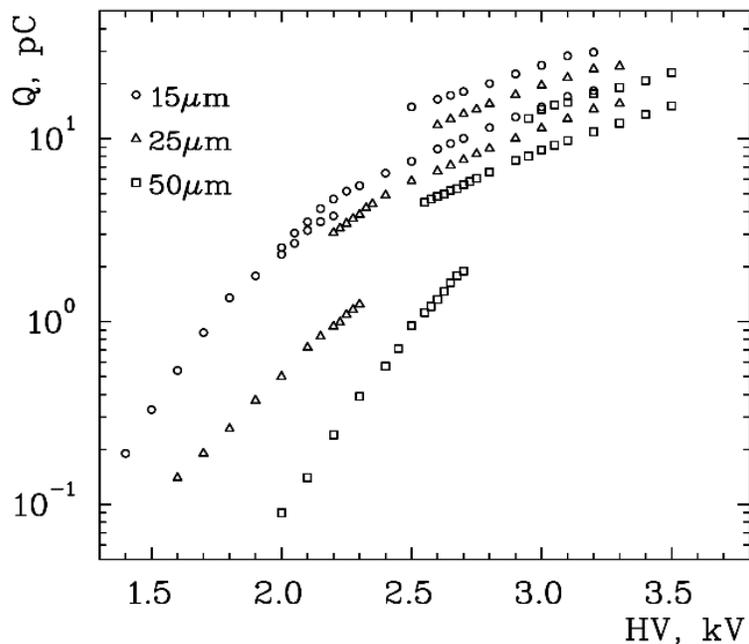
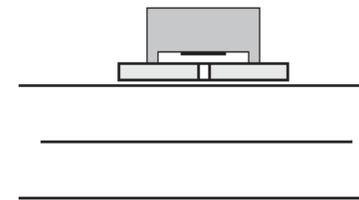
Тестирование модулей

- Тестирование модулей на утечку газа (не более 0.3 см^3 в минуту)
- Однородность газового усиления по площади камер (^{55}Fe)
- Тесты при повышенной загрузке на способность держать ток
- Измерение эффективности регистрации на пучке пионов $120 \text{ МэВ}/c$

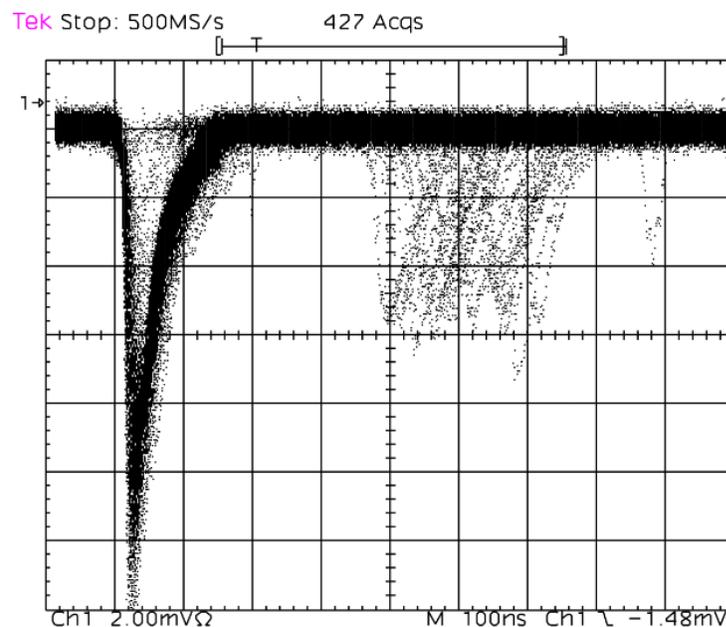


Исследование гасящих свойств газа DME

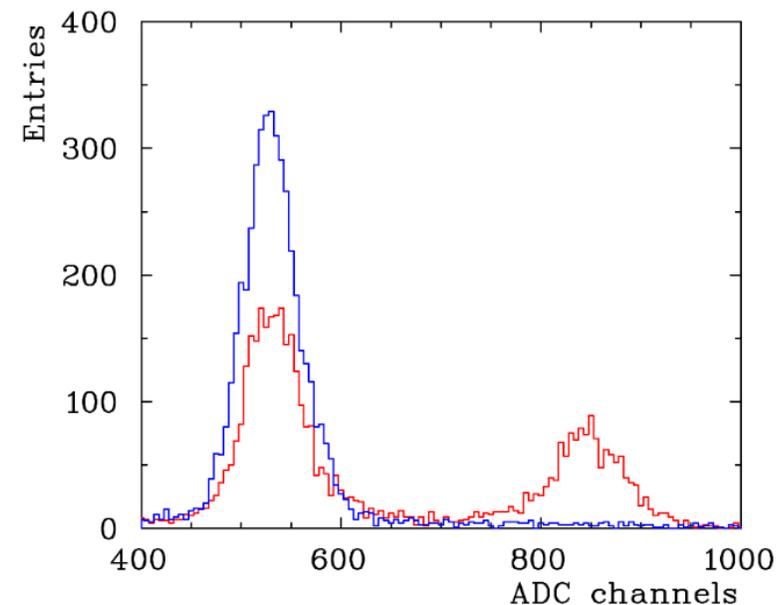
- Однопроволочные камеры, $12 \times 12 \text{ мм}^2$
- Проволоки диаметром 15, 25 и 50 мкм
- Альфа источники ^{148}Gd (3.183 МэВ) и ^{241}Am (5.44 и 5.48 МэВ)
- Программа SRIM для определения пробегов альфа частиц



Зарядовые распределения при облучении альфа частицами ^{148}Gd

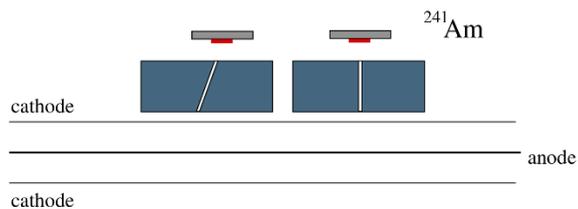


DME, 50 мкм проволока, $U=3100 \text{ В}$

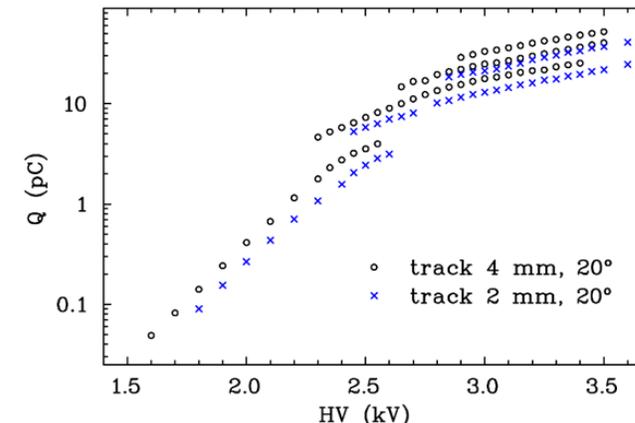
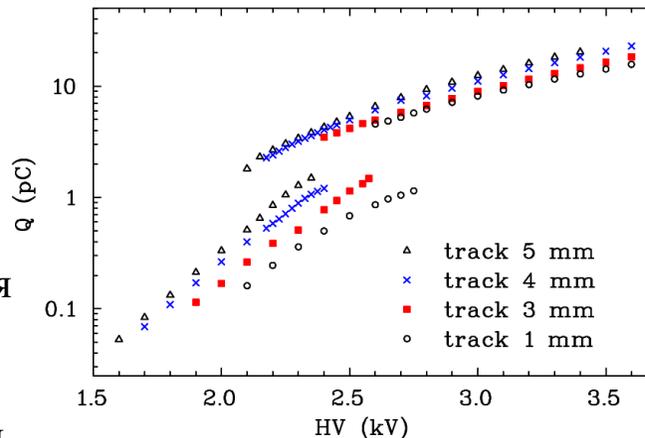


Спектр на проволоке 15 мкм при $U=2900 \text{ В}$ с коллиматором $0.5 \times 5 \text{ мм}$

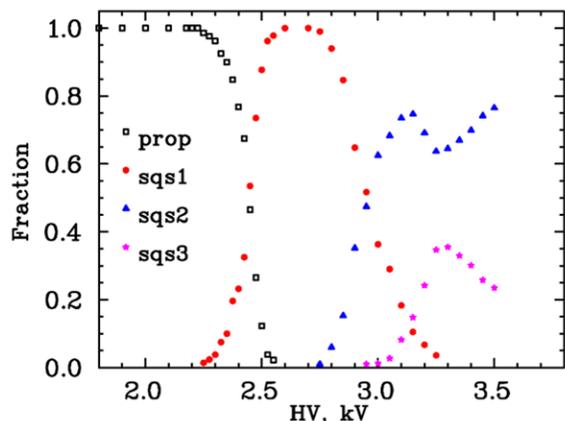
Исследование гасящих свойств газа DME (2)



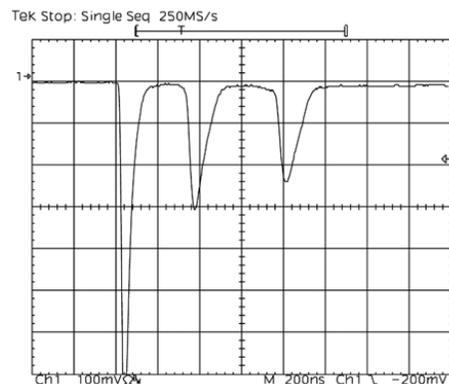
- При нормальном падении альфа частиц наблюдаются только одиночные СГС сигналы независимо от длины трека, т.е. первичной ионизации
- При падении альфа частиц под углом 20° образуются двойные СГС сигналы при длине трека 2 мм и тройные – при длине трека 4 мм



Зарядовые характеристики камеры при облучении альфа частицами с разной длиной треков при падении перпендикулярно и под углом 20°. Диаметр проволоки 50 мкм



Доли пропорциональных и СГС сигналов при длине наклонных треков 4 мм



Тройной стример от наклонного трека длиной 4 мм

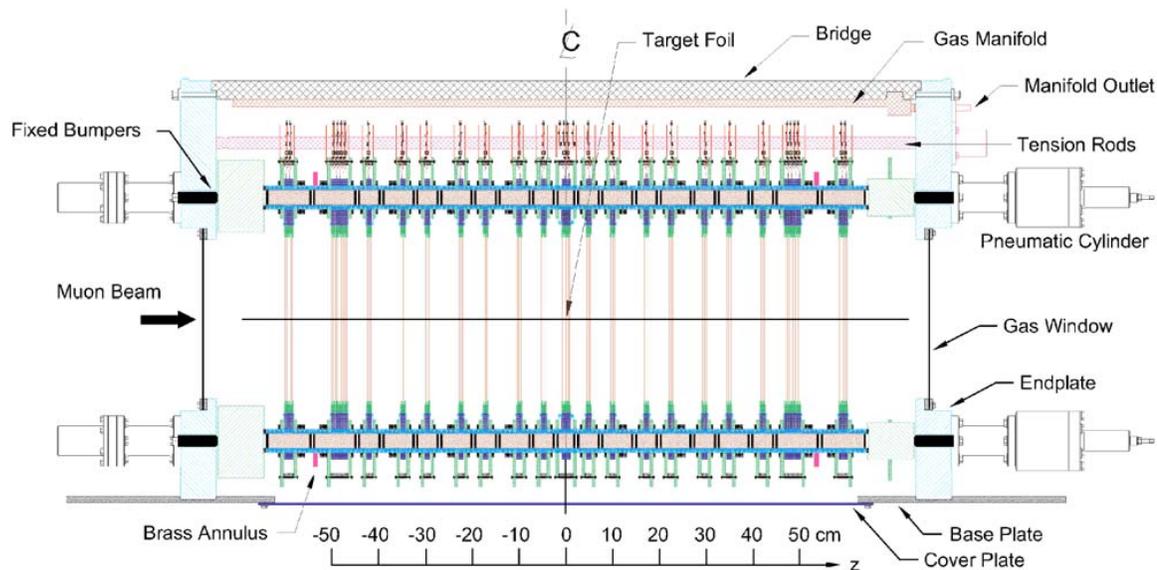
$$\eta = l_d \cdot t_d \quad \text{- Определение мертвой зоны}$$

$$\eta = \sum f_i \cdot \delta_i \cdot t_{di}$$

f_i - доля событий с i стримерами
 δ_i - длина нечувствительной зоны
 t_{di} - мертвое время

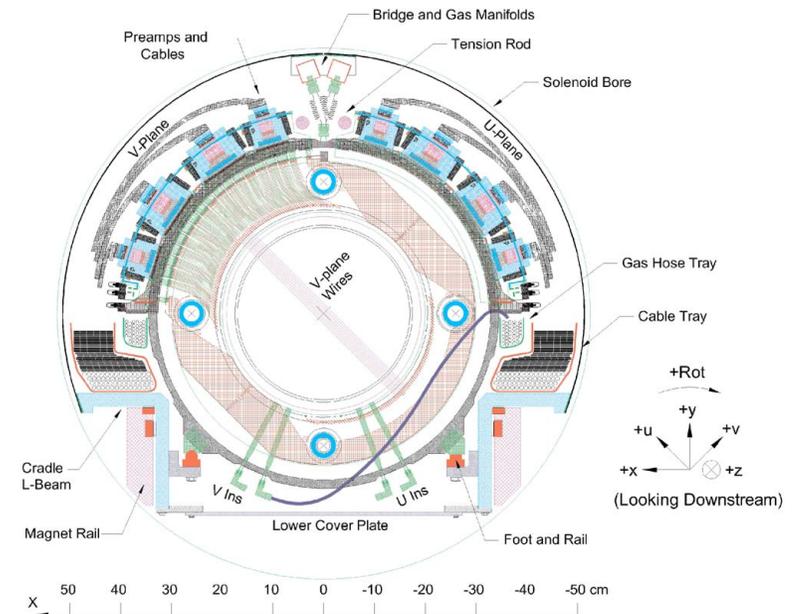
Продemonстрировано, что при переходе камер в СГС режим газ не теряет гасящих свойств. Получены оценки мертвого времени камер в СГС режиме на уровне 1 мкс и длины нечувствительной зоны менее 0.7 мм

Система планарных проволочных детекторов TWIST



- 16 модулей ДК и 3 модуля ПК
- Наружные катоды модулей служили разделительным окном с внешним объемом
- Пространство между модулями заполнялось газовой смесью $\text{He}+3\%\text{N}_2$
- Все ДК продувались газом DME, все ПК – смесью $\text{CF}_4/\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80/20)
- Газовая система поддерживала дифференциальное давление в модулях и гелий-азотном объеме

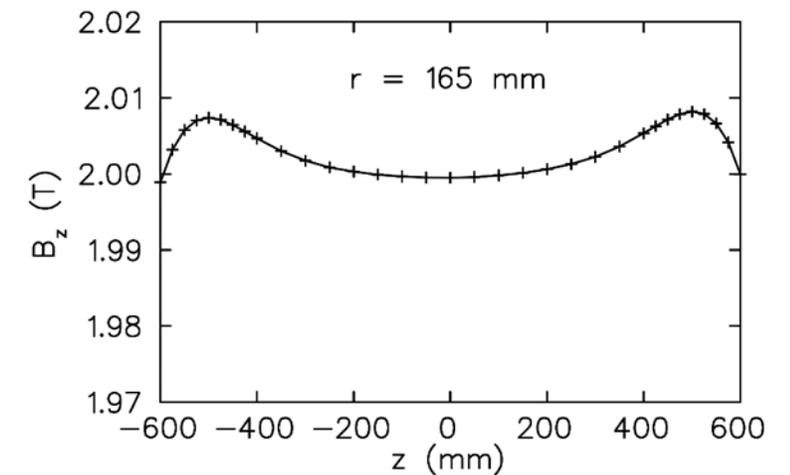
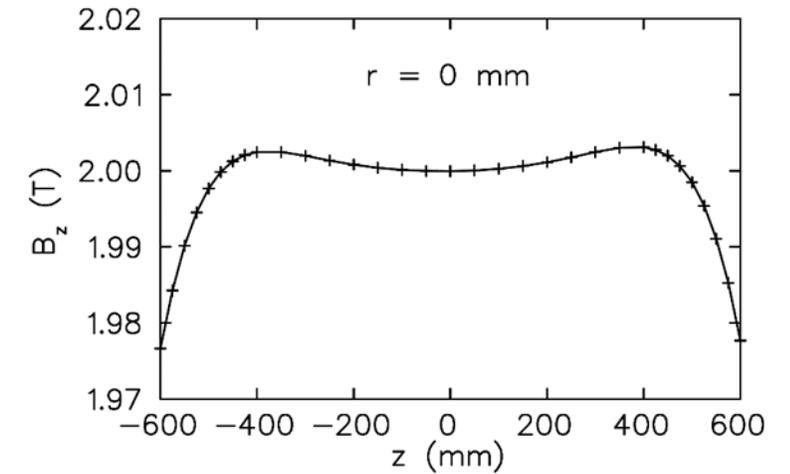
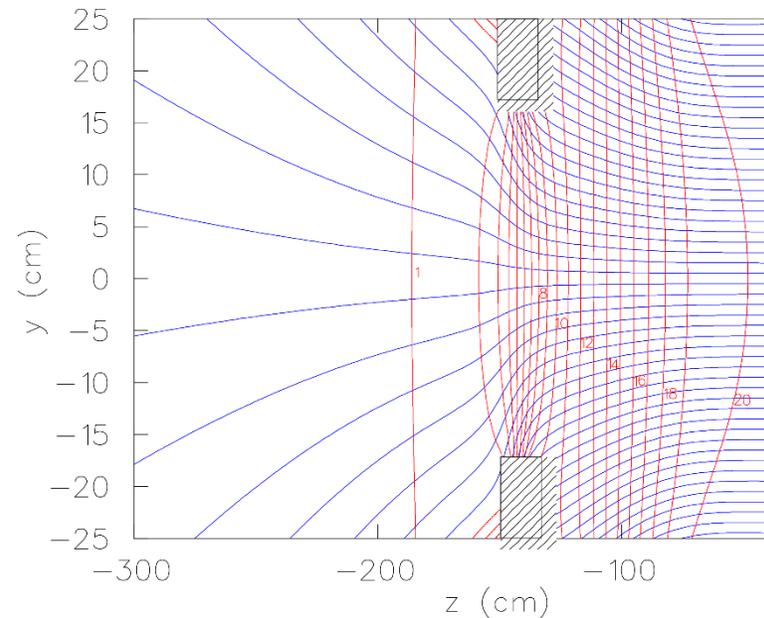
- Сжатие сборки с усилием 1470 N на каждую колонку ситалловых колец обеспечивало оптический контакт между кольцами и точность определения длины всей сборки лучше 50 микрон на длине 1000 мм
- Все плоскости и модули касаются друг друга только поверхностями ситалловых колец/спейсеров
- Положения всех анодных плоскостей по Z координате известно с точностью в несколько десятков микрон



R.S. Henderson, Yu.I. Davydov, W. Faszler et al. Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A548, p.306-335 (2005)

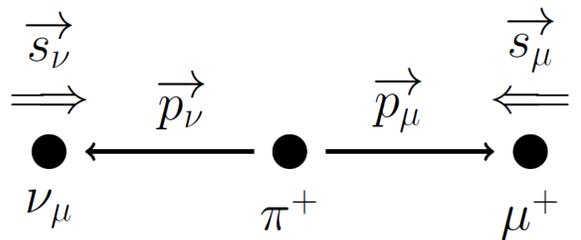
Магнитное поле спектрометра

- Сверхпроводящий соленоидальный магнит (Oxford Instruments).
Внутренний диаметр магнита составляет 1 метр
- Карта поля снималась при напряженностях поля 1.96 Тл, 2.00 Тл и 2.04 Тл во всем объеме магнита и за пределами ярма на входе мюонного пучка
- Вариация поля составляла менее 8 мТл в пределах рабочего объема спектрометра

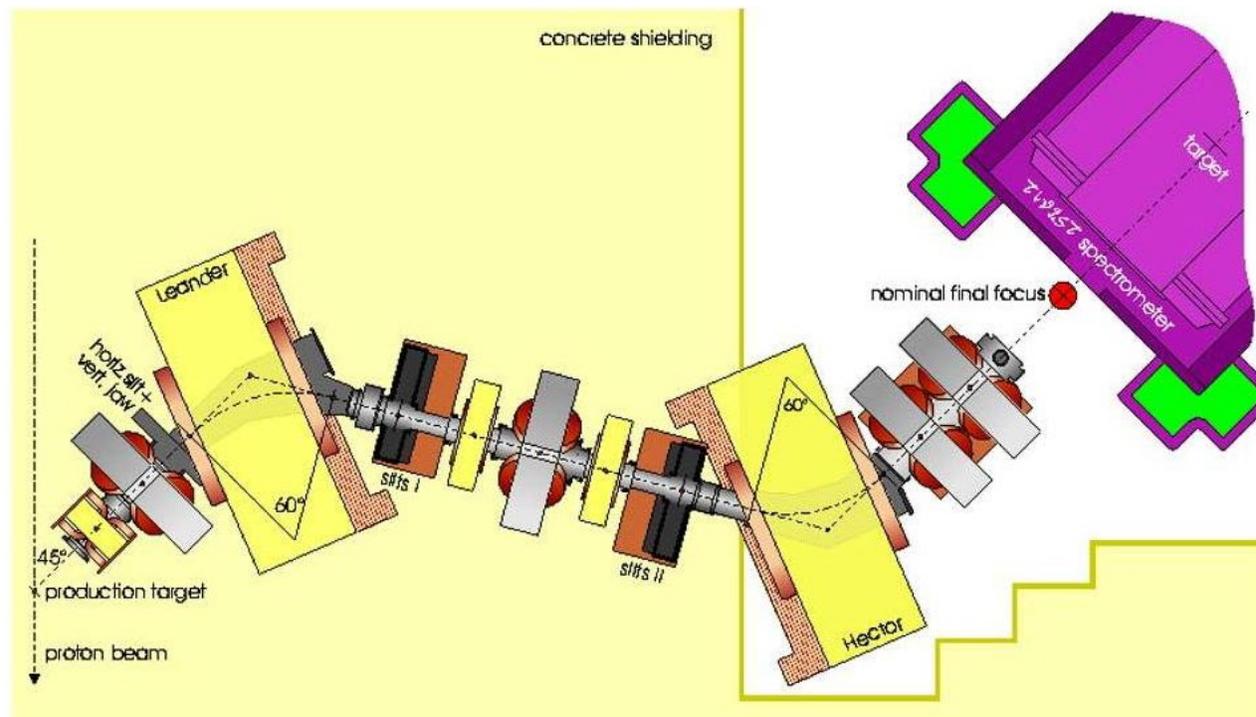


Пучок мюонов: канал М13

- Протонный циклотрон ТРИУМФ $E_p=520$ МэВ, банчи длительностью около 4 нсек, период 43 нсек
- Углеродная мезонообразующая мишень
- Канал М13 захватывал заряженные частицы, вылетающие из мишени Т1 под углом 135°
- Импульсное разрешение канала составляет 0.7% (FWHM)

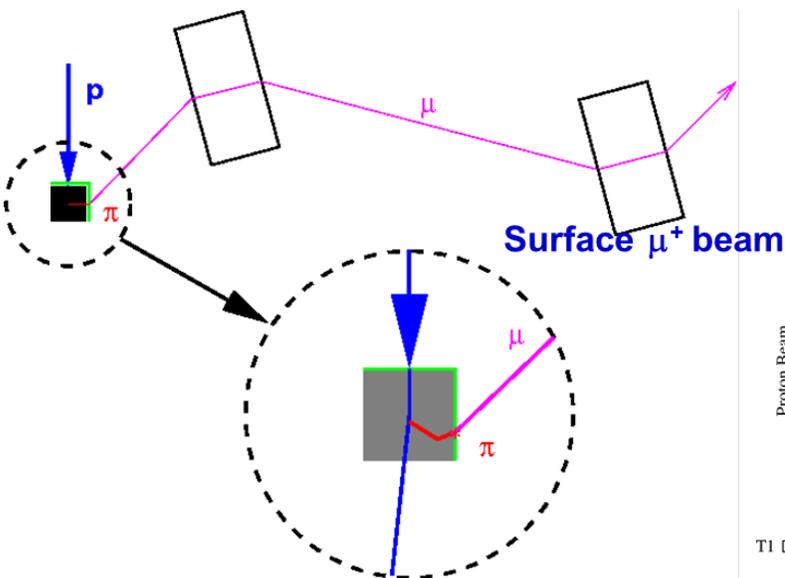
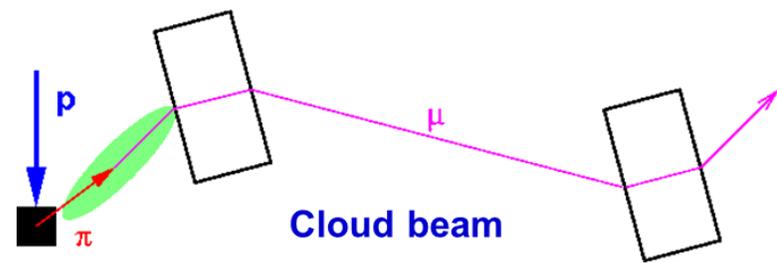

$$p_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} = 29.792 \text{ MeV}/c$$

При распаде остановившегося пиона мюон имеет практически 100% поляризацию и импульс 29.79 МэВ/с

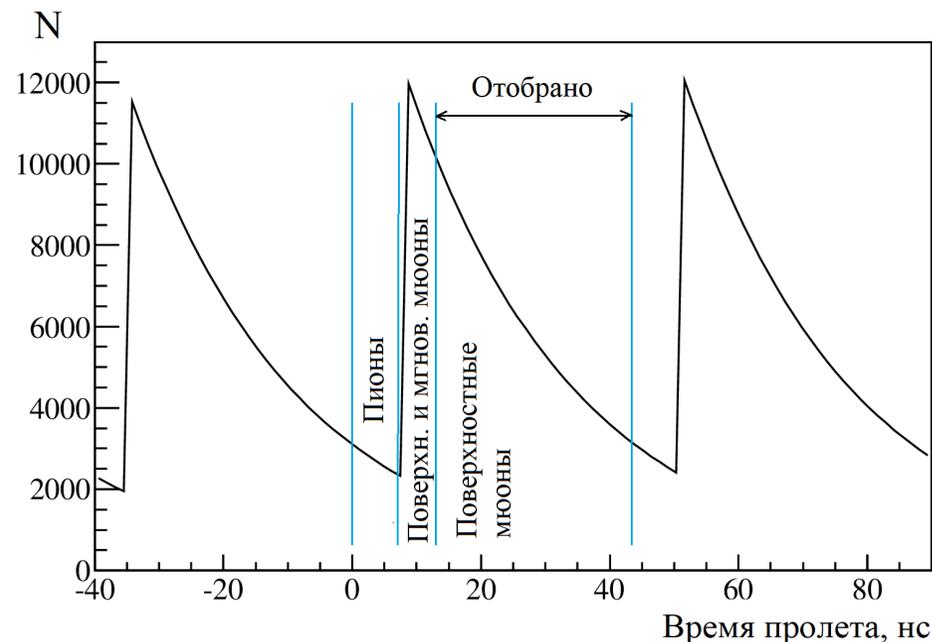
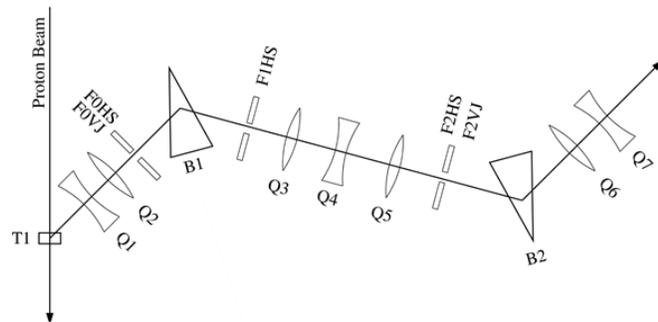


Выделение пучка поляризованных мюонов

- Длина канала M13 $L=11.4$ м
- Канал настраивался на захват частиц с импульсом 29.6 МэВ/с, чуть ниже импульса мюона при распаде пиона в покое
- Время пролета канала мюонами с импульсом 29.6 МэВ/с равно 141 нс, а пионов с тем же импульсом – 183 нс, что позволяет разделить мюоны и пионы

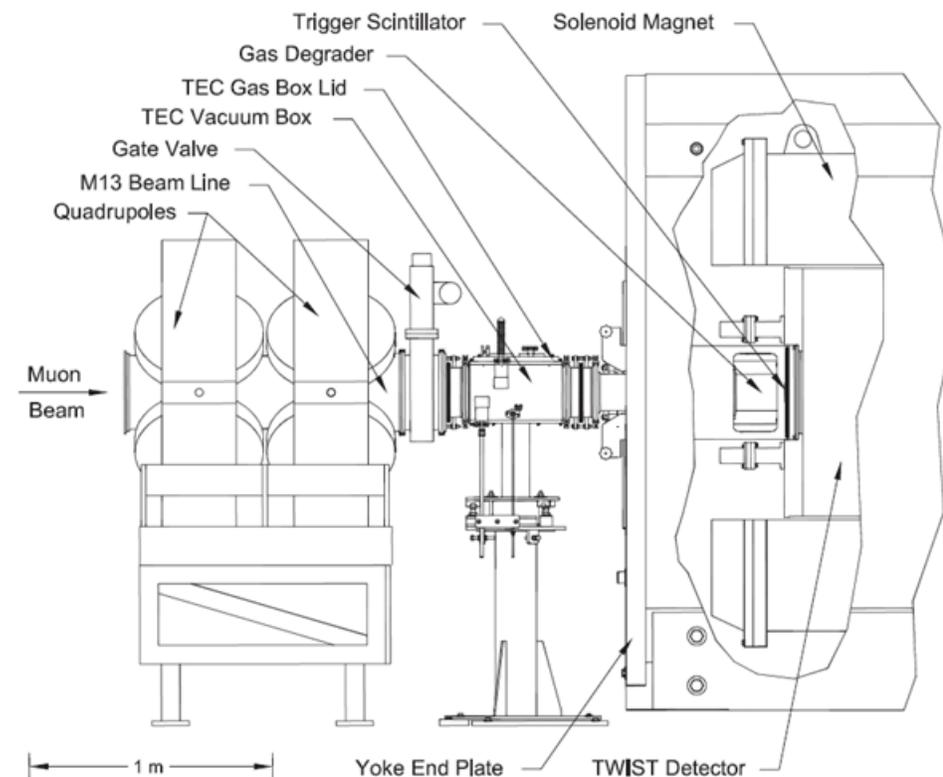
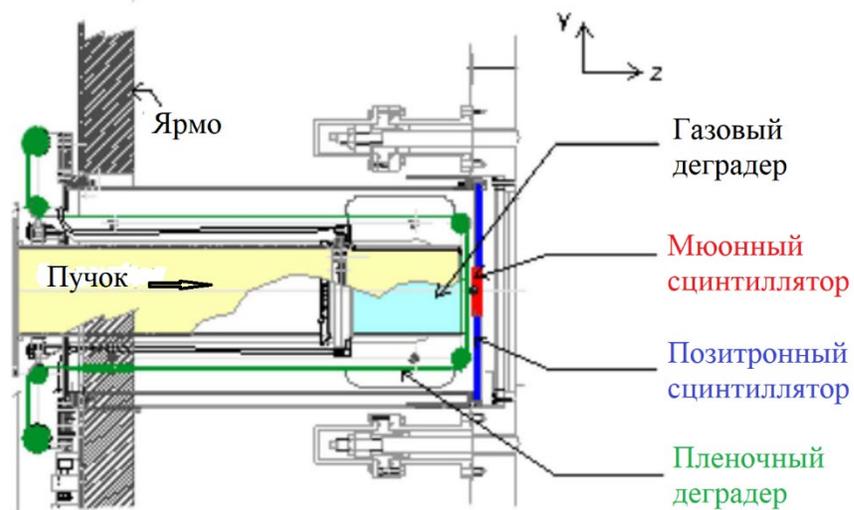
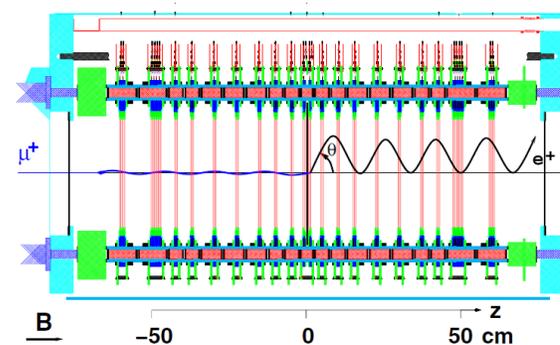


Мюоны с импульсом 29.6 МэВ/с захватываются из тонкого слоя мезонообразующей мишени (до 15 микрон) и практически не теряют поляризацию за счет многократного рассеяния. Такие мюоны называются поверхностными.



Контроль остановок пучка мюонов

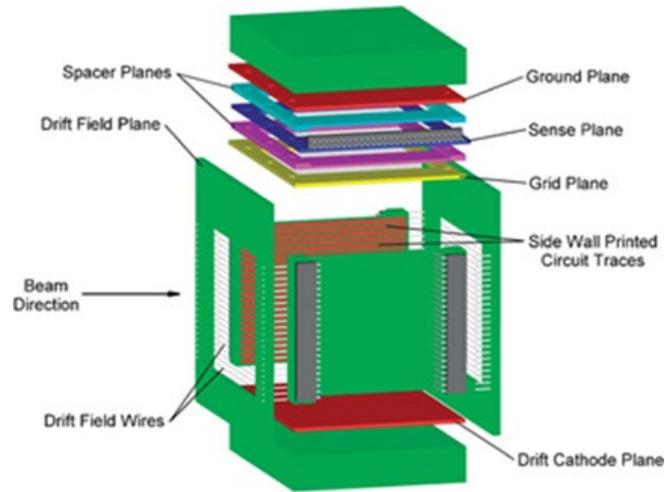
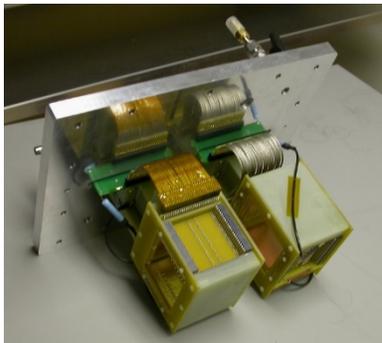
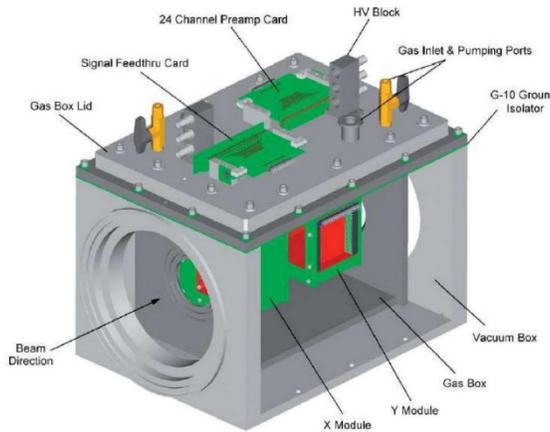
- Мюоны, входящие в спектрометр, пересекают специальный модуль, включающий газовый деградер, пленочный деградер, мюонный и позитронный сцинтилляционные счетчики
- Пленочный деградер выполнен в виде ленты, на которой были закреплены пленки различной толщины от 0 (открытое окно) до 1 мм
- Газовый деградер имел длину 21.7 см и наполнялся смесью He/CO₂ при атмосферном давлении. Количество вещества на пути мюонов варьировалось от 3.6 мг/см² (100% He) до 40.3 мг/см² (100% CO₂)



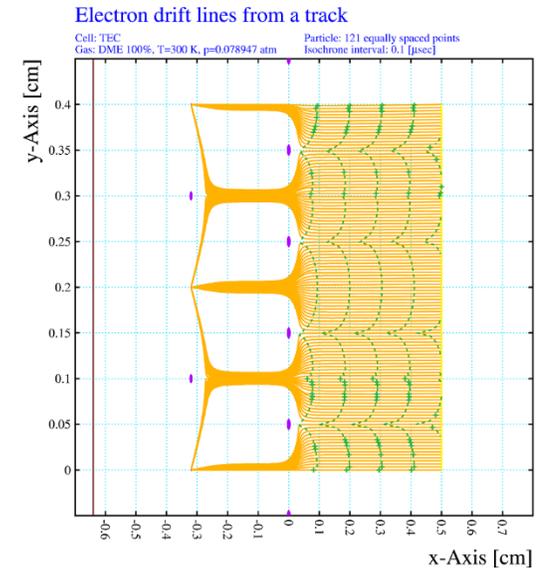
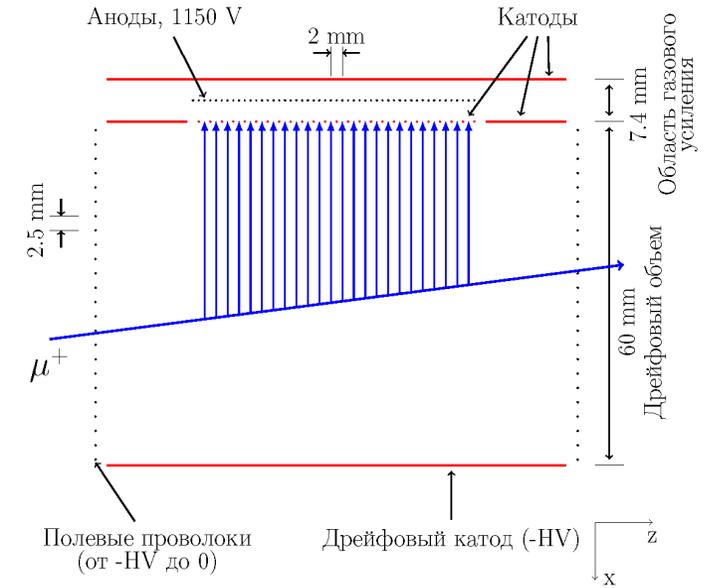
Контроль положения пучка мюонов

Блок времяпроекционных камер для контроля пучка мюонов:

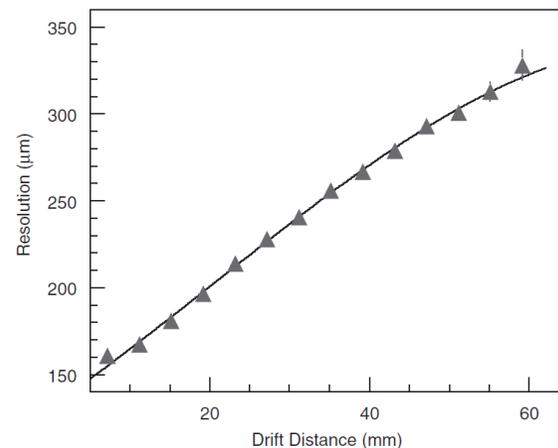
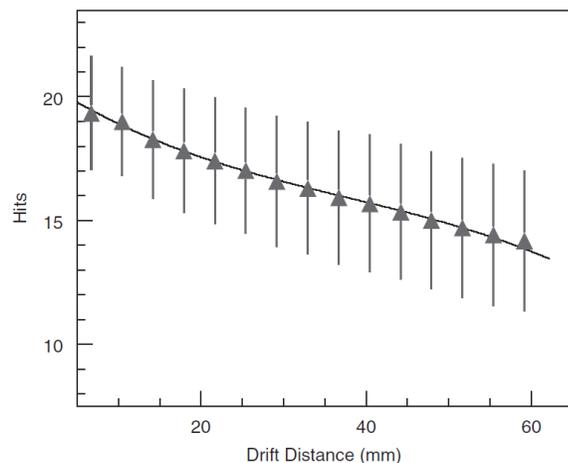
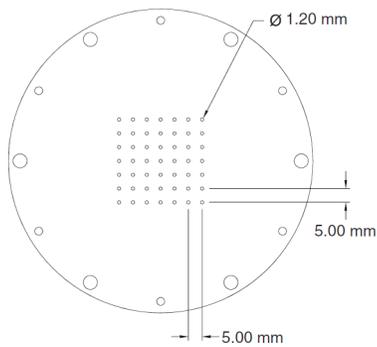
- Каждая камера имеет поперечное сечение чувствительной области $60 \times 60 \text{ мм}^2$ и длину по пучку 46 мм
- ВПК наполнены газом DME при давлении 60 Торр
- Диаметры проволок выбраны после специального исследования
- Поле в дрейфовом промежутке $\sim 160 \text{ В/см}$



Электрическое поле в дрейфовом промежутке искажается за счет проникновения более сильного поля из области газового усиления, а также за счет влияния соседней камеры блока

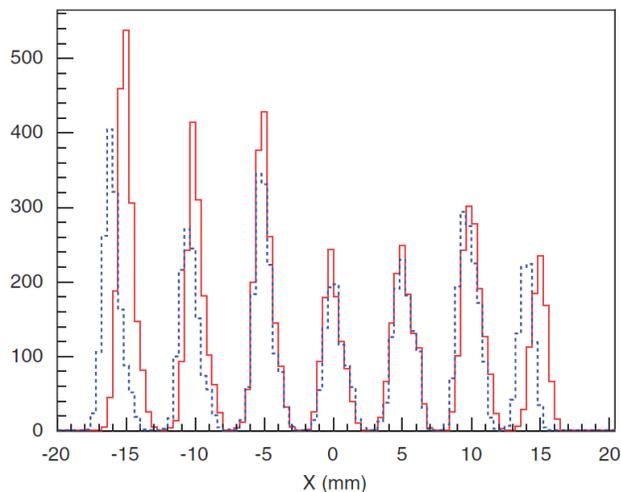


Контроль положения пучка мюонов (2)



Измеренное разрешение отдельной ячейки в зависимости от расстояния трека мюона до анодной проволоки

Зависимость числа сработавших проволок от длины дрейфа при прохождении мюонов

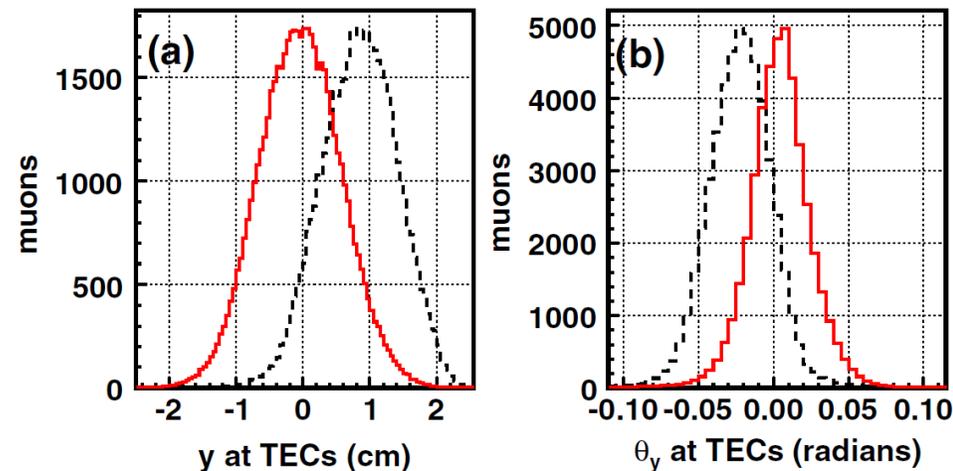


Профили пучка при прохождении через коллиматоры: штриховые линии - до корректировки на искажение поля, сплошные линии - после корректировки

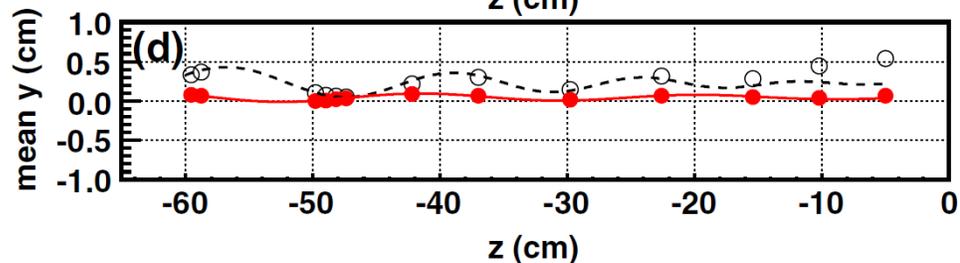
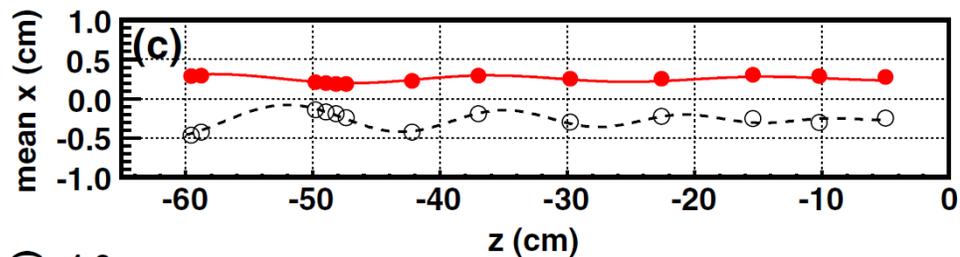
Угловое разрешение ВПК составляет ~ 3 мрад, пространственное разрешение, экстраполированное в середину зоны между X и Y модулями, равно ~ 150 мкм

Контроль положения пучка мюонов (3)

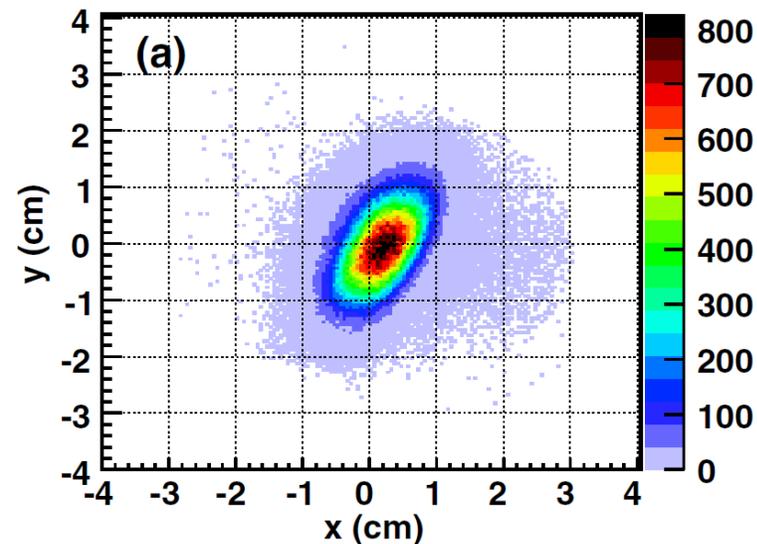
- Обнаружено, что пучок мюонов при входе в граничное магнитное поле спектрометра смещен относительно оси спектрометра как по оси X , так и по Y
- Блок ВПК устанавливался в канал в начале и в конце набора данных для контроля положения пучка мюонов



Y -координата и угол Θ_y мюонов на входе в магнитное поле спектрометра до (штриховые линии) и после корректировки поля канала M13 (сплошные линии).



Положение пучка вдоль оси спектрометра до и после корректировки поля канала M13



Особенности газового усиления при высоких значениях E/p

Газовое усиление в общем виде $\ln M = \int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr$

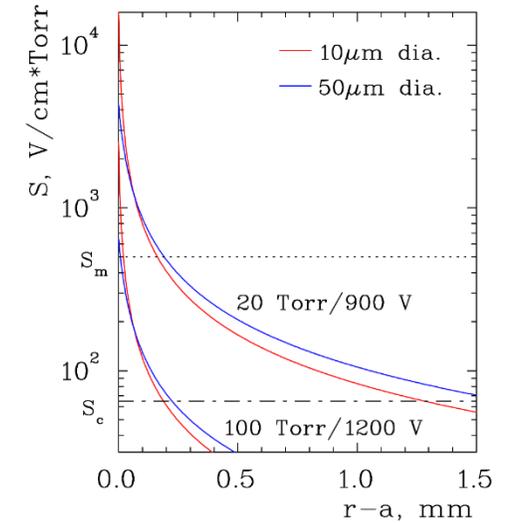
$$S_c = E_c/p \approx 40-90 \text{ В/см}\cdot\text{Torr}$$

$$S_m = E_m/p \approx 350-520 \text{ В/см}\cdot\text{Torr}$$

α - первый коэффициент Таунсенда $\frac{\alpha}{P} = A \exp\left(\frac{-BP}{E}\right)$

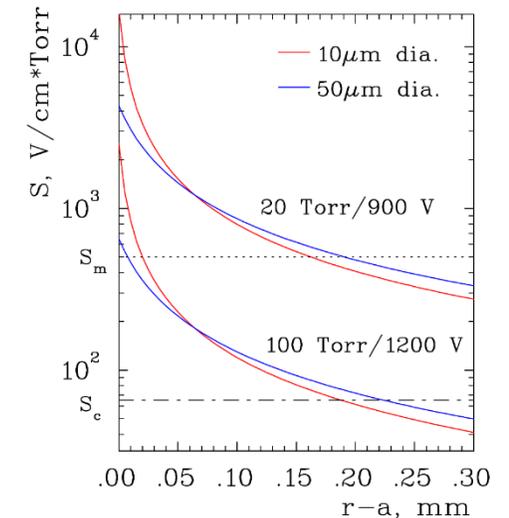
$$\alpha_1 = A \exp\left(\frac{-BP}{E}\right), S_c < S < S_m$$

$$\alpha_2 = n\sigma, S \geq S_m$$



Предложена эмпирическая формула расширения формулы Таунсенда на высокие напряженности поля:

$$\alpha(r) = A \exp\left(\frac{-BP}{E(r)}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{I_0 n \sigma}{e E(r)}\right)\right) + n \sigma_i \exp\left(-\frac{I_0 n \sigma}{e E(r)}\right)$$

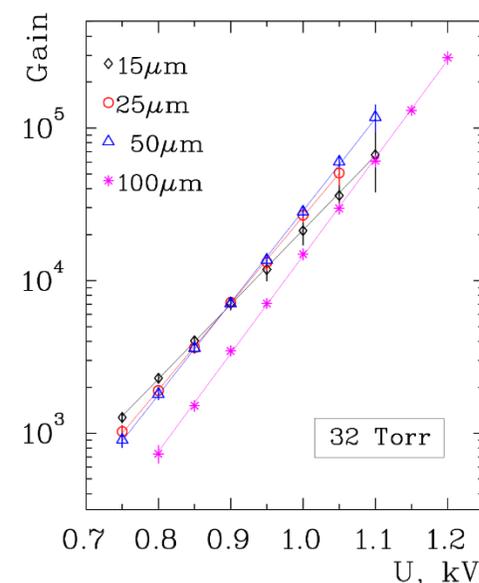
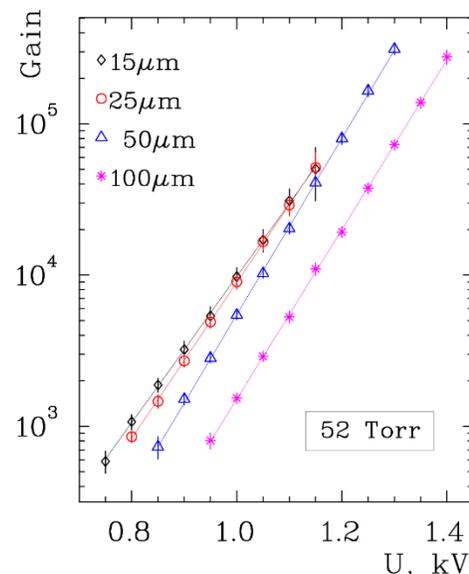
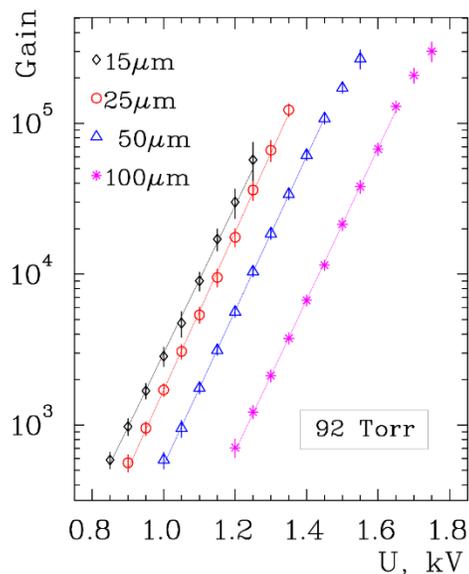
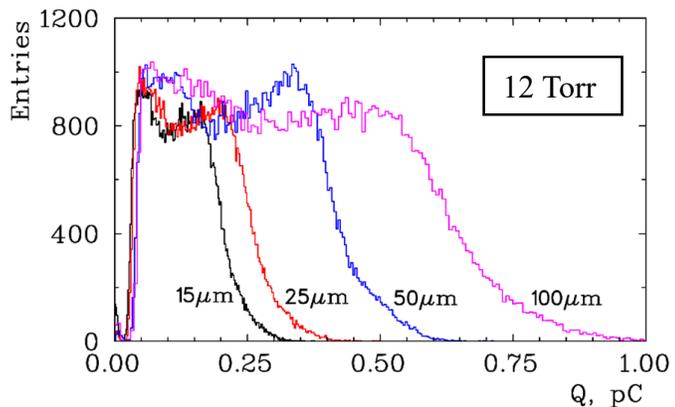
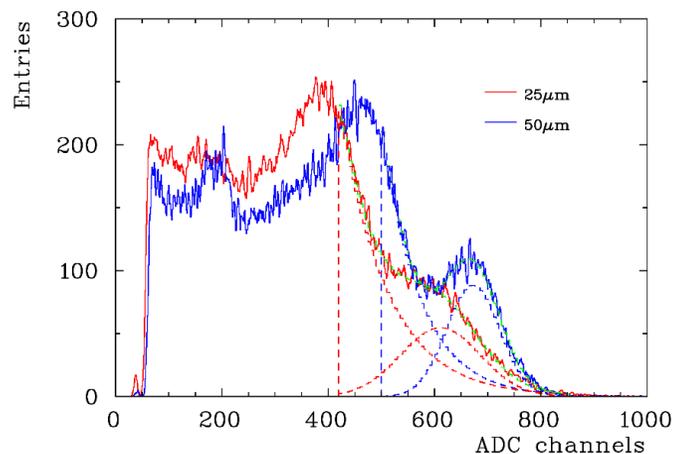


Особенности газового усиления при высоких значениях E/p (2)

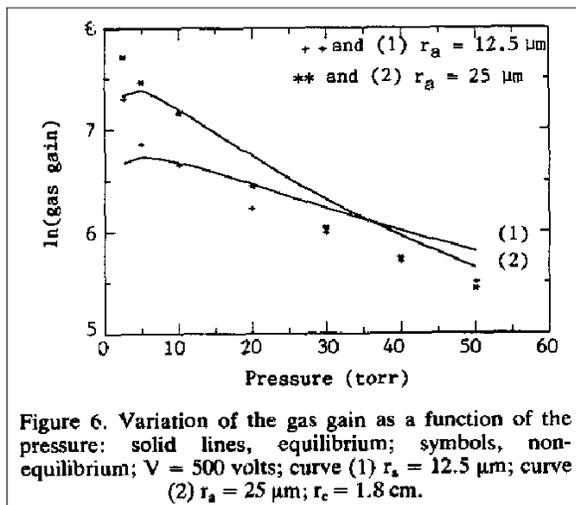
- Однопроволочные камеры, $12 \times 12 \text{ мм}^2$
- Проволоки диаметром 15, 25, 50 и 100 мкм
- iso- C_4H_{10} , 92, 52, 32 и 12 Торр
- Источник ^{55}Fe

1 атм: 700-750 $\mu\text{м}$
 92 Торр: $\sim 6 \text{ мм}$
 52 Торр: $\sim 11 \text{ мм}$
 32 Торр: $\sim 17 \text{ мм}$
 12 Торр: $\sim 45 \text{ мм}$

Пробег электрона от
 фотопоглощения:



Теоретические расчеты газового усиления

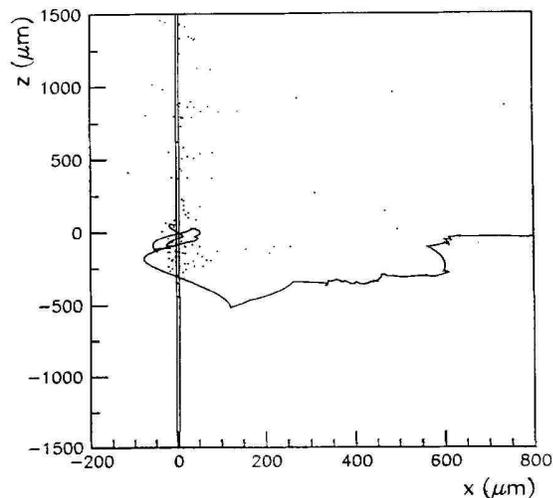
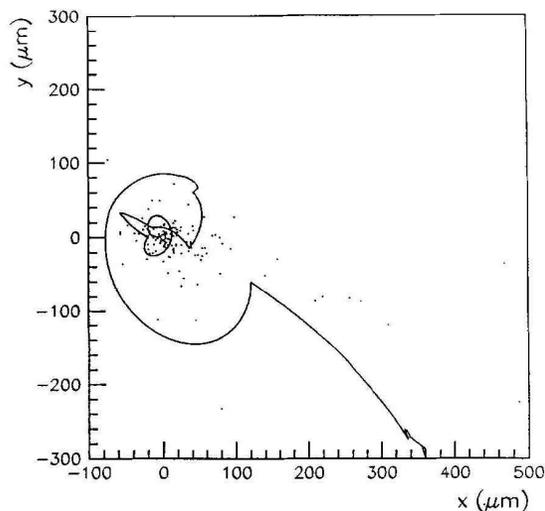


P.Segur et al. Radiation Protection Dosimetry, Vol.29 №1/2, p.23-30 (1989)

P.Segur et al. Radiation Protection Dosimetry, Vol.31 №1-4, p.107-118 (1989)

В работах проведены микроскопические расчеты первого коэффициента Таунсенда и газового усиления при низких давлениях:

- при низком давлении электроны при дрейфе в направлении проволоки могут пролететь мимо нее, добавляя дополнительную ионизацию при таком вращении вокруг проволоки
- при высоком значении E/p электроны находятся в неравновесном состоянии с электрическим полем, поэтому имеют меньшую ионизационную способность

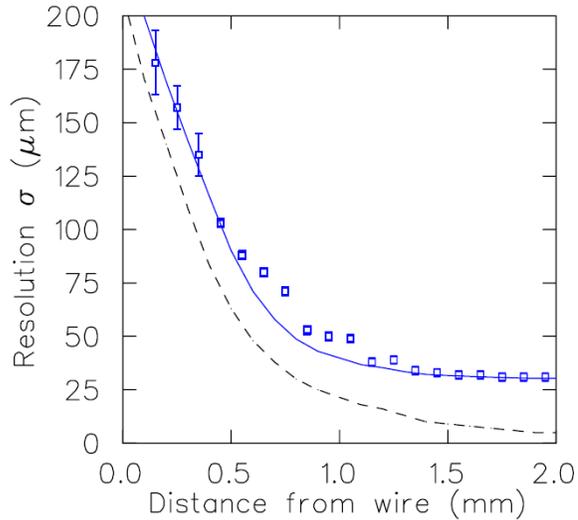


H.Pruchova, B.Franek. NIM A366(1995), p.385

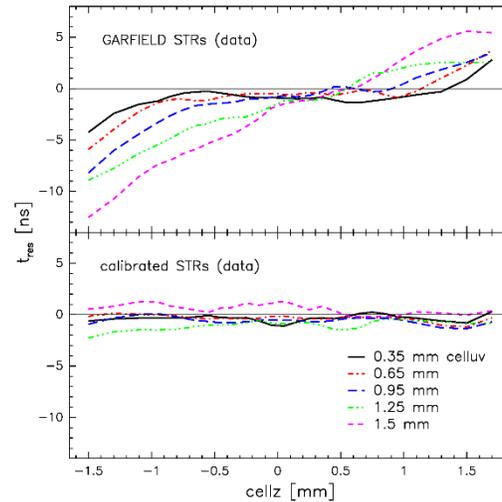
Авторы показали вероятность электронов при низких давлениях вращаться вокруг проволоки, прежде чем попасть на нее. Но этот эффект дает незначительный вклад в общее усиление на проволоке. Основной вклад в более высокое газовое усиление на толстых проволоках дает увеличение области газового усиления на более дальние расстояния от проволоки.

Пространственное и импульсное разрешение спектрометра

- Пространственное разрешение определялось с помощью пионов с импульсом 120 МэВ/с при выключенном магнитном поле
- Для уменьшения многократного рассеяния пионов использовались 8 плоскостей для построения треков и определялось разрешение девятой плоскости



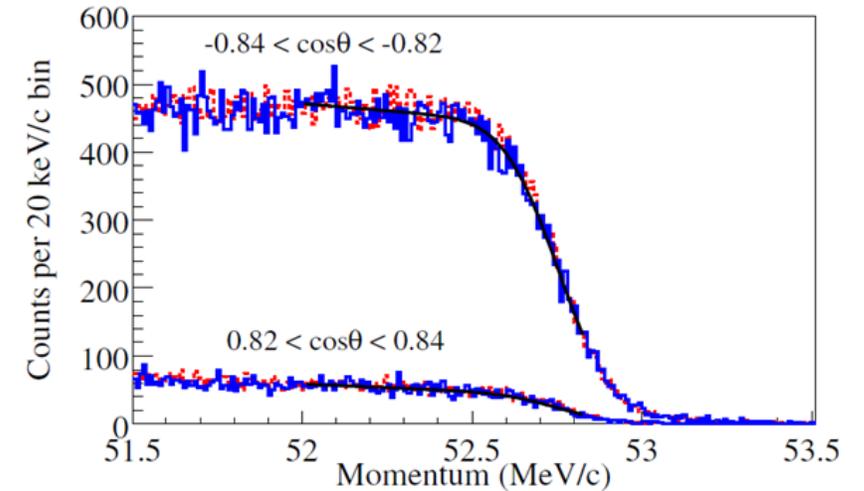
Точки- экспериментальные значения, штриховая линия- GARFIELD. Сплошная линия – с учетом многократного рассеяния (~30 мкм) и временного джиттера (1.5 нс)



Временное разрешение в ячейке вдоль оси Z для разных расстояний от проволоки: при помощи GARFIELD (вверху) и после калибровки при помощи пучка (внизу). Получено пространственное разрешение камер 50-100 мкм практически во всем дрейфовом промежутке

Энергетическая калибровка при любых углах θ определяется с использованием граничной энергии позитронов $E = 52.8$ МэВ и заключена в самом спектре. Внешние калибровки в прежних экспериментах давали систематику $> 10^{-3}$.

Импульсное разрешение спектрометра определялось с использованием позитронов распада с импульсом $p > 52$ МэВ/с



Разрешение является функцией $1/\cos\theta$
Импульсное разрешение в пределах рабочего объема - (70-160) кэВ/с

Методика обработки данных со спектрометра TWIST

- Определение параметров Мишеля проводилось путем сравнения двумерных экспериментальных Мишелевских спектров позитронов в распадах мюонов как функции импульсов и углов вылета позитронов $N(p, \cos\theta)$ и моделированных спектров, полученных при аналогичных условиях.
- Моделированные спектры получались при проводке позитронов распада через установку и последующего восстановления их углов вылета и импульсов.
- Экспериментальные и моделированные данные обрабатывались одними и теми же программами, что позволяет компенсировать возможные неучтенные эффекты в отклике детекторов при прохождении мюонов и позитронов.



Скрытый (blind) анализ

Экспериментальные и моделированные данные имели идентичный вид и анализировались одними и теми же программами.

Мишелевские спектры, полученные из экспериментальных и МонтеКарло данных, фитировались друг относительно друга.

В результате определялись не сами параметры Мишеля, а разность параметров из экспериментальных данных и данных Монте Карло, $\Delta\rho$, $\Delta\delta$, $\Delta\xi$.

При анализе данных использовался метод, называемый “blind analysis” – слепой или скрытый анализ.

При моделировании спектра позитронов распада $N(p, \cos\theta)$ параметры Мишеля выбирались случайным образом в пределах $\rho = 0.75 \pm 0.01$, $\eta = 0$, $P\mu\xi = 1 \pm 0.01$, $\delta = 0.75 \pm 0.1$.

Параметры Мишеля оставались скрытыми до окончания анализа данных

Экспериментальные данные

I раунд: майларовая мишень. Измерение ρ и δ

II раунд: мишень из Al высокой чистоты (>99.999%). Измерение ρ , δ и $P_{\mu\xi}$

III раунд: мишени из Al и Ag высокой чистоты (>99.999%). Измерение ρ , δ и $P_{\mu\xi}$

В финальном раунде набрано 11×10^9 событий, из них 0.55×10^9 в рабочем объеме

Номер серии	Тип мишени	Условия набора
68	Серебро	Стандартный, остановки на 1/3 толщины мишени
70		Магнитное поле 1.96 Тл
71		Магнитное поле 2.04 Тл
72		Установлена ВПК
73		Остановки мюонов в начале спектрометра
74		Стандартный
75		Стандартный
76		Пучок мюонов смещен с оси поля
80	Алюминий	Остановки мюонов в начале спектрометра
83		Установлен пучковый пакет в конце спектрометра
84		Стандартный
86		Пучок мюонов смещен с оси поля
87		Стандартный
91		Пониженный импульс 28.75 МэВ/с
92		Пониженный импульс 28.85 МэВ/с
93		Пониженный импульс 28.85 МэВ/с

Моделированные данные

При моделировании отклика установки TWIST был использован пакет GEANT3.21

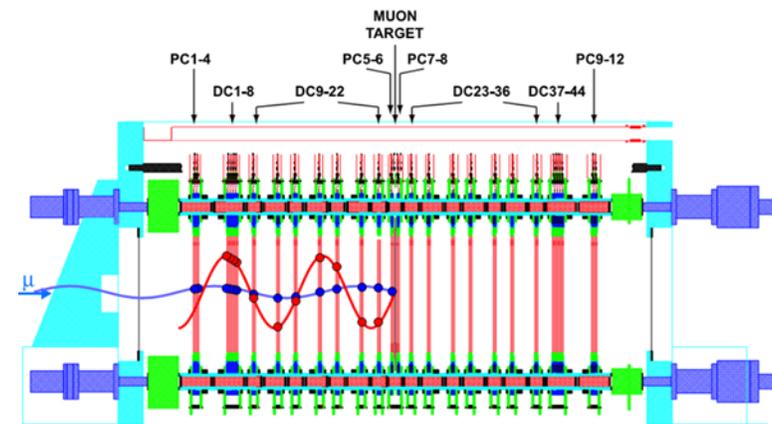
Для каждого типа набора экспериментальных данных производилось моделирование данных при тех же условиях

1. Моделирование пучка

- Начальной точкой мюонов и пучковых позитронов при моделировании пучка была координата $z=-195$ см
- Начальный профиль пучка мюонов и его расходимость при $z=-195$ см определялись при помощи блока ВПК
- Пучок позитронов сначала измерялся внутри спектрометра в отсутствие магнитного поля, а затем определялись профиль и расходимость пучка в точке $z=-195$ см

2. Моделирование детектора

- Монте-Карло моделирование включало полную геометрию установки с точным положением каждой проволоочки камер и катодных плоскостей, материал конструкций камер.
- При моделировании треков мюонов и позитронов и их проводке через детектор использовалась измеренная карта магнитного поля



Моделированные данные (2)

3. Спектр позитронов распада

При моделировании спектра позитронов распада с отдельного сервера брались сгенерированные ранее со скрытыми параметрами в соответствии с теоретическим спектром распада мюона данные со значениями импульса и угла вылета позитронов (p , $\cos\theta$).

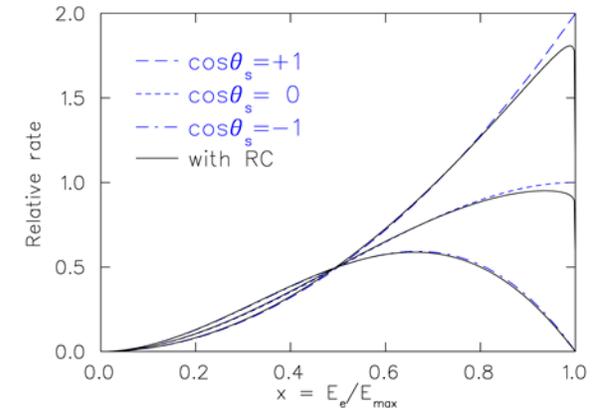
Спектр распада позитронов включал радиационные поправки первого порядка, ведущие и следующие за ведущими логарифмические поправки второго порядка, ведущие логарифмические поправки третьего порядка.

A. Arbuzov, J. High Energy Phys. 03, 063 (2003)

A. Arbuzov et al., Phys. Rev. D66, 93003 (2002)

A. Arbuzov et al., Phys. Rev. D65, 113006 (2002)

K. Melnikov et al. J. High Energy Phys. 09, 014 (2007)



4. Отклик камер

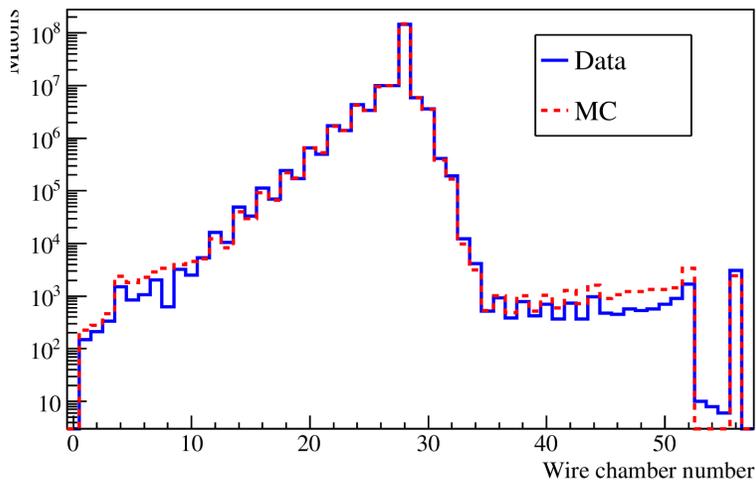
- Включены параметры газа, газовое усиление для точного воспроизведения экспериментальных данных
- Длина нечувствительной зоны вдоль проволоки 0.06 см и среднее время восстановления чувствительности 3 мкс
- Время дрейфа электронов и координаты треков определялись при помощи программы GARFIELD. В дальнейшем была создана новая карта, связывающая координату и время дрейфа из GARFIELD с уточнением при помощи пучка

Верификация моделированных данных

Моделированные и экспериментальные данные сверялись на всех этапах

Для сравнения экспериментальных и моделированных данных проводились специальные наборы данных с остановками мюонов в начале или конце спектрометра, до входа в спектрометр и т.п. Моделирование производилось при тех же параметрах, при которых производился набор экспериментальных данных.

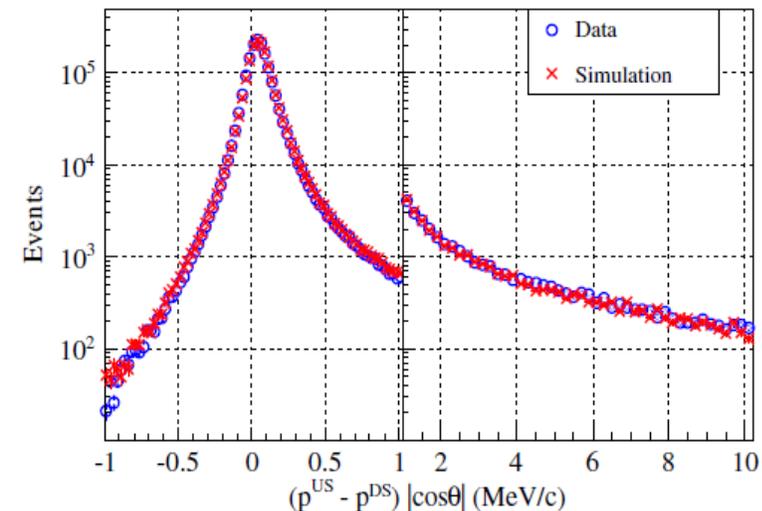
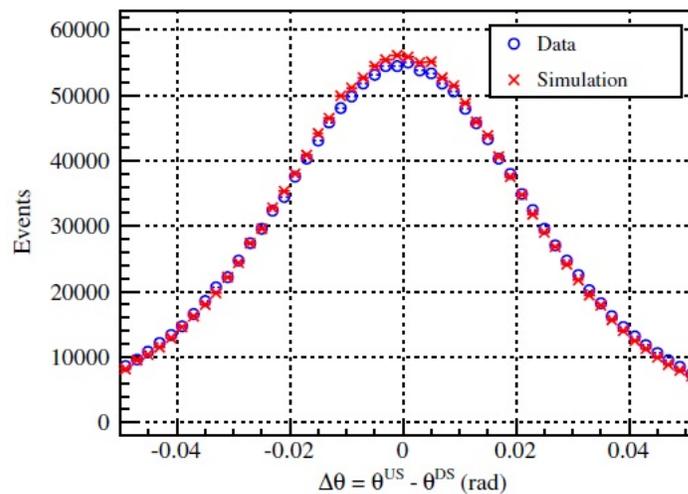
Распределение остановок
позитронов в детекторе



Взаимодействие позитронов в мишени:

Остановка мюонов в начале спектрометра

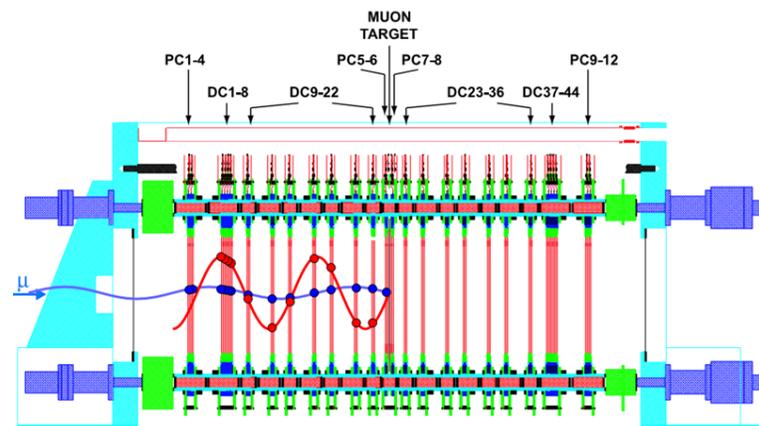
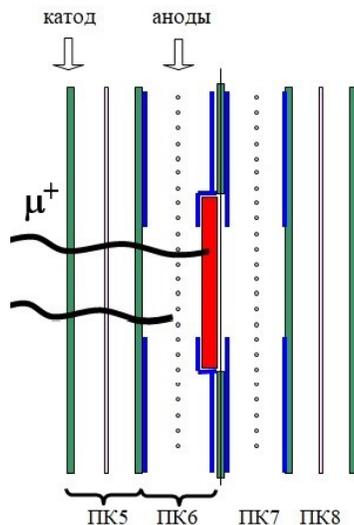
Восстановление треков в двух частях независимо



Отбор событий

Отбор индивидуальных событий:

- Время пролета мюонов
- Тип события
- Остановка в мишени
- Длительность сигнала в ПК5 и ПК6
- Наличие трека позитрона
- Статус фита
- Заряд частицы (позитрон)
- Парное соответствие
- Расстояние между вершинами в мишени
- Время распада мюона (1050 – 9000 нс)



Отбор событий (2)

Отбор спектра по рабочему объему:

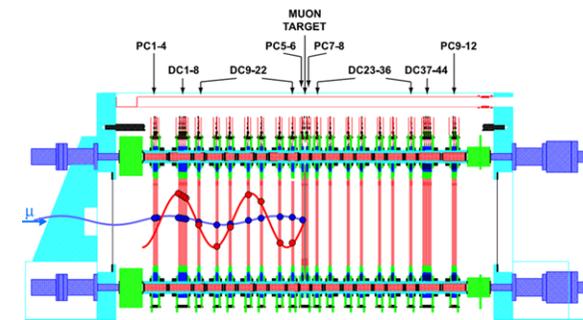
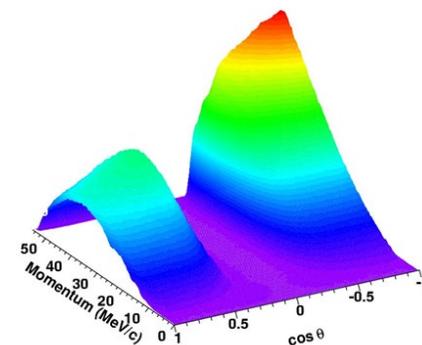
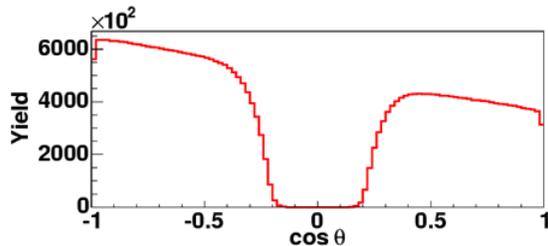
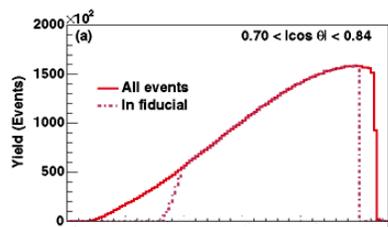
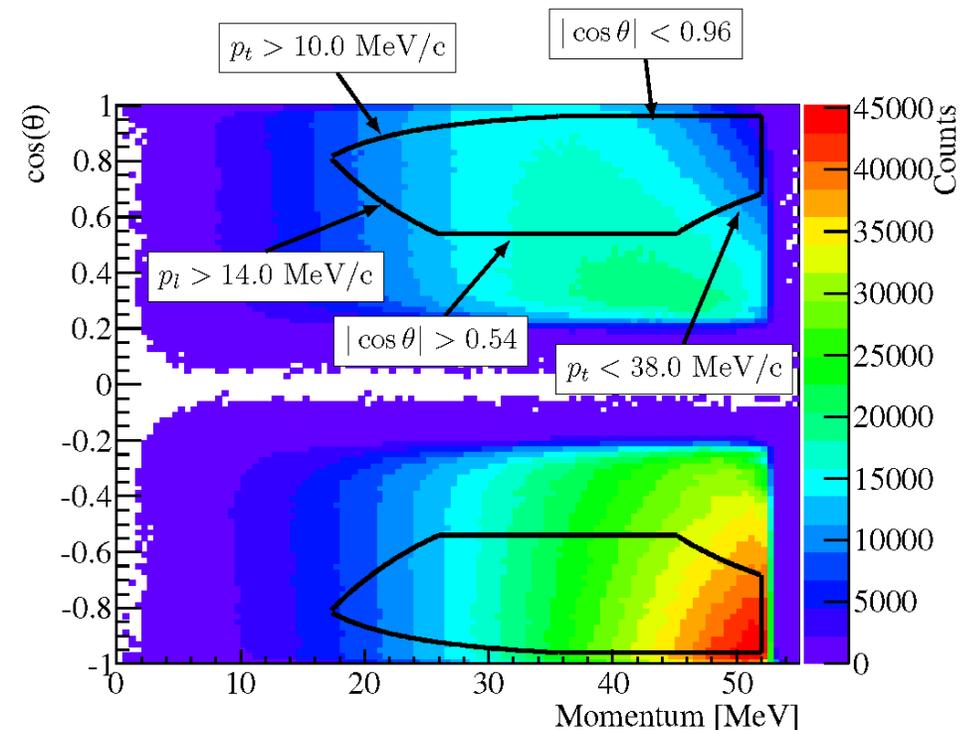
$0.54 < |\cos\theta| < 0.96$: при малых и больших углах вылета позитронов реконструкция треков будет ненадежна

$p < 52.0$ МэВ/с: треки позитронов с импульсом $p > 52.0$ МэВ/с используются в энергетической калибровке и поэтому исключены из фитирования параметров распада.

$p_t > 14.0$ МэВ/с: такое обрезание по продольной компоненте импульса исключает область с потенциальными неопределенностями в связи с геометрией расположения плоскостей (после изменения расположения плоскостей такие неопределенности еще остались, но они оказались существенно дальше от границ рабочей области)

$p_t < 38.0$ МэВ/с: треки позитронов с большим поперечным импульсом могут выйти за пределы области чувствительности детекторов.

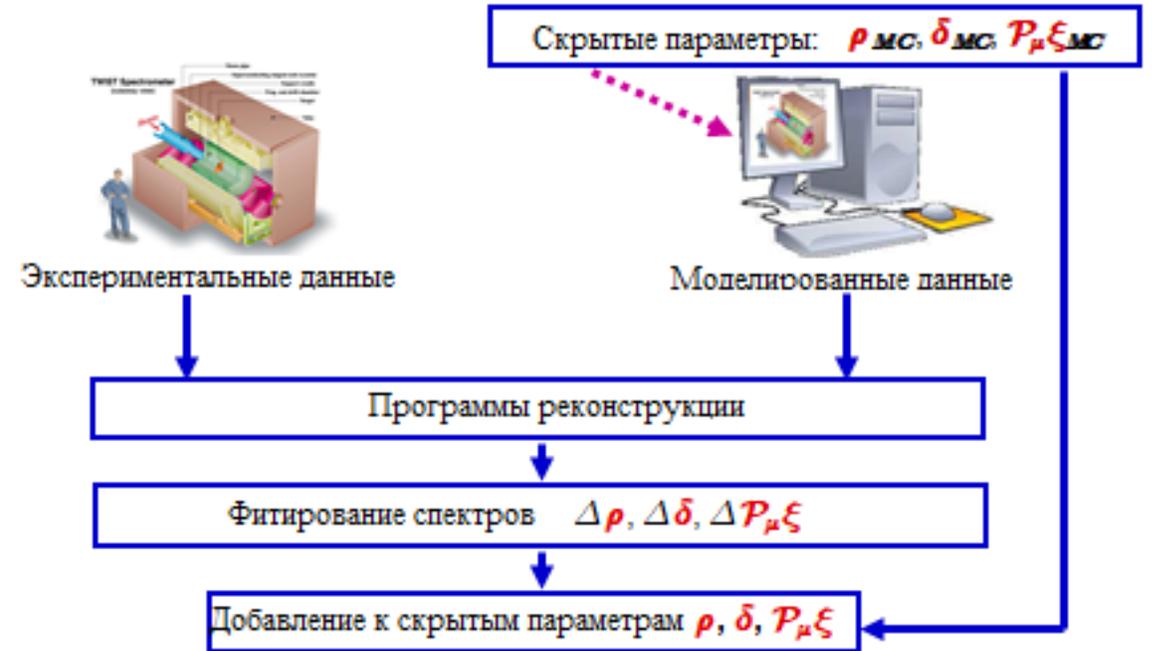
$p_t > 10.0$ МэВ/с: это ограничение исключает из анализа треки с малым радиусом спиралей треков.



После отбора в спектрах для анализа оставались около 7% событий в экспериментальных данных и около 12% - в моделированных

Метод определения параметров Мишеля

- Определение параметров Мишеля проводилось путем сравнения двумерных экспериментальных Мишелевских спектров позитронов в распадах мюонов как функции импульсов и углов вылета позитронов $N(p, \cos\theta)$ и моделированных спектров, полученных при аналогичных условиях.
- Моделированные спектры получались при проводке позитронов распада через установку и последующего восстановления их углов вылета и импульсов.
- Экспериментальные и моделированные данные обрабатывались одними и теми же программами.

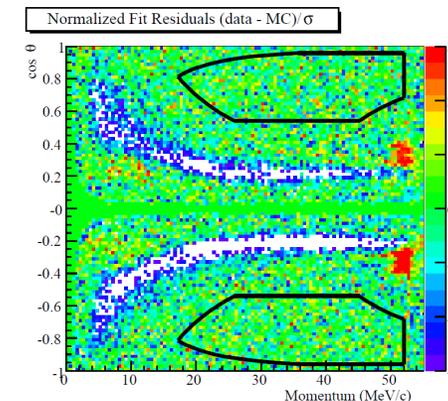
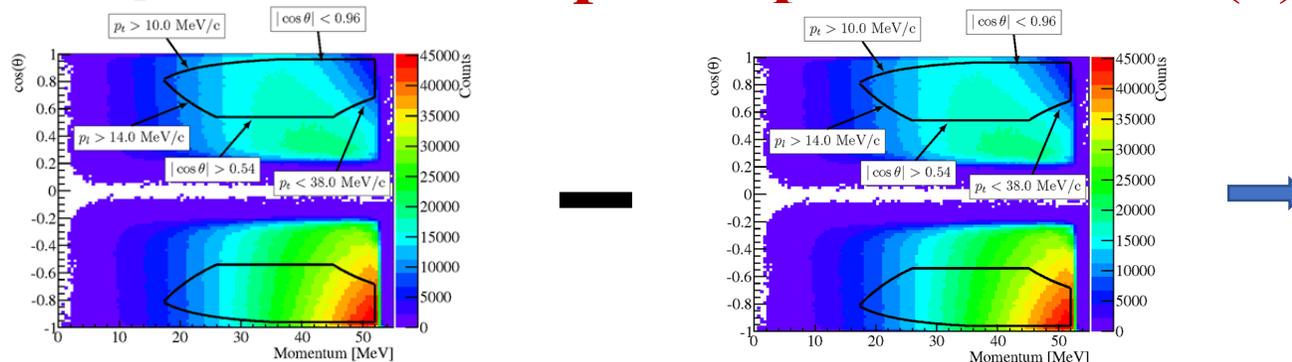


При анализе данных использовался “blind analysis” метод – слепой или скрытый анализ.

При моделировании спектра позитронов распада $N(p, \cos\theta)$ параметры Мишеля выбирались случайным образом в пределах $\rho = 0.75 \pm 0.01$, $\eta = 0$, $P_\mu\xi = 1 \pm 0.01$, $\delta = 0.75 \pm 0.01$.

Параметры Мишеля, использовавшиеся при моделировании спектра позитронов, оставались скрытыми до окончания анализа данных.

Метод определения параметров Мишеля (2)



- Метод определения параметров Мишеля использует линейную зависимость Мишелевского спектра позитронов от параметров Мишеля ρ и η , а также от произведения параметров $P_\mu \xi$ и $P_\mu \xi \delta$
- При анализе использовались только события, отобранные в спектре в рабочем объеме. Спектр делился на 2444 бина с шагом 0.5 МэВ/с по импульсу и 0.02 по ($\cos\theta$).
- Различия между бинами экспериментальных данных и соответствующими бинами базового спектра использовались для построения функции χ^2 , которая минимизируется при помощи стандартного алгоритма MINUIT с весами производных спектров как параметрами фита.
- В результате определялась разница параметров $\Delta\rho$, $\Delta\delta$, $\Delta P_\mu \xi$ между экспериментальными значениями параметров Мишеля и скрытыми значениями, использованными при генерировании спектра позитронов $N(p, \cos\theta)$.
- Экспериментальные значения параметров Мишеля находились путем добавления найденных разностей $\Delta\rho$, $\Delta\delta$, $\Delta P_\mu \xi$ к скрытым параметрам Мишеля, использовавшимся в моделировании

$$\chi^2 = \sum_{\Omega} \frac{(n_i^{\text{Data}} - n_i^{\text{MC}})^2}{\sigma_i^2}$$

$$\sigma_i^2 = (\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2$$

n_i^{Data} - содержимое бина данных i

n_i^{MC} - содержимое бина моделирования i

Метод определения систематических неопределенностей

- Точность определения параметров Мишеля в эксперименте TWIST ограничена систематическими неопределенностями.
- Оценки систематических неопределенностей сделаны для большинства известных источников таких ошибок методом сравнения двух моделированных спектров либо изменением условий отбора событий

Основные источники систематических неопределенностей:

- Отклик камер
- Взаимодействие позитронов с материалами
- Радиационные поправки и корреляция с η
- Импульсная калибровка
- Разрешение реконструкции треков
- Тормозное излучение и δ -электроны
- Толщина мишени/место остановок
- Деполяризация мюонов на входе в спектрометр
- Деполяризация мюонов в мишени



Оценка систематических неопределенностей

q - источник систематической неопределенности при определении параметра Мишеля,

σ_q - его ошибка

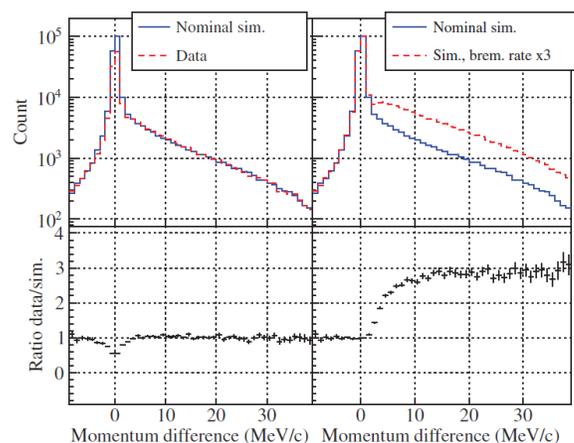
λ - один из параметров Мишеля (ρ , δ или ξ)

$$\sigma_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta q} \sigma_q \quad - \text{неопределенность в определении параметра } \lambda$$

1. Оценки систематических неопределенностей из-за тормозного излучения и рождения дельта-электронов:

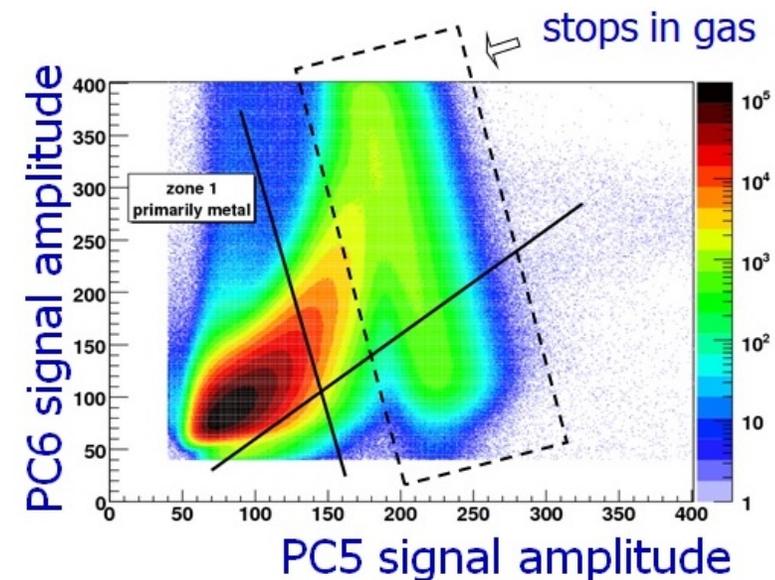
Остановки в начале спектрометра

Сравнение экспериментального и моделированного, моделированного и моделированного с 3х частотой тормозного излучения

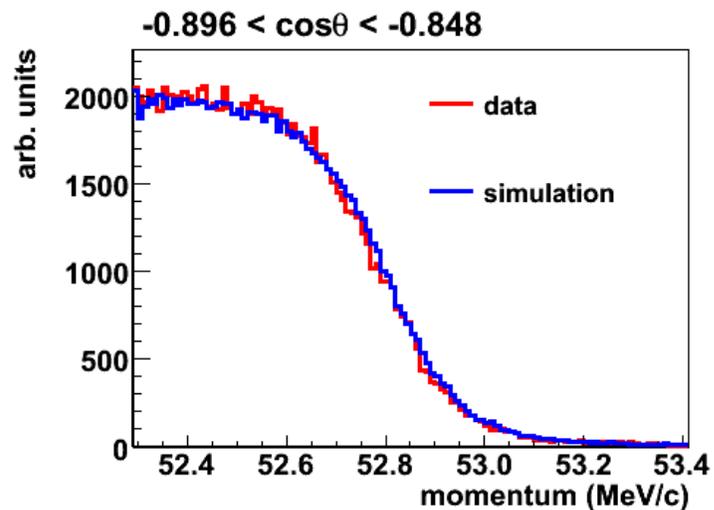


величина неопределенности параметров Мишеля ρ , δ и $R\mu\xi$ составляет $\pm 1.8 \times 10^{-4}$, $\pm 1.6 \times 10^{-4}$ и $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ для Ag мишени

2. Остановки в мишени/газе ПК6

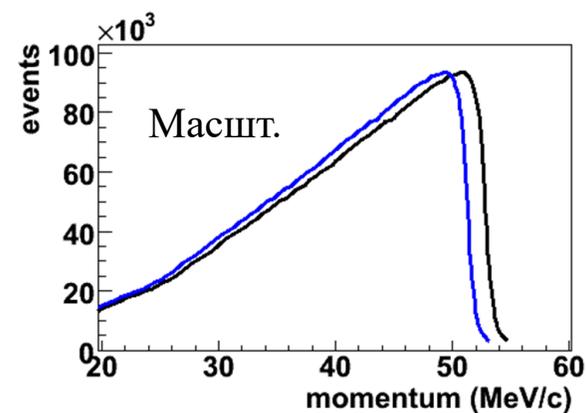
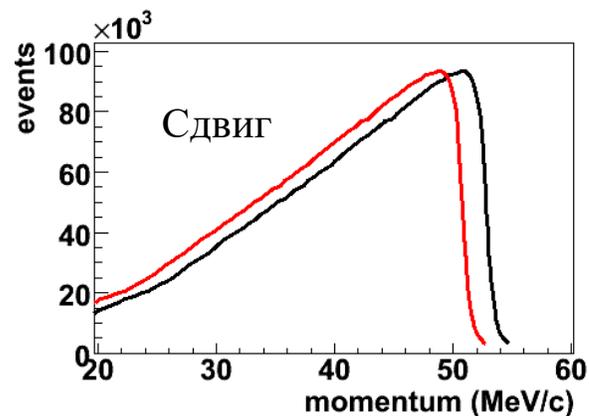


Оценка систематических неопределенностей (2)



Импульсная калибровка

- Используется край спектра 52.8 МэВ/с
- Потери энергии зависят от угла вылета θ
- Различие ≈ 10 кэВ/с до калибровки
- Калибровка – как сдвиг или масштабирование
- Различие $\approx 2-3$ кэВ/с после калибровки



Неопределенности $\Delta\rho = 1.0 \times 10^{-4}$ $\Delta\delta = 1.1 \times 10^{-4}$

Результаты измерения параметров Мишеля

В раунде I набора данных использовалась мишень из майлара, имевшая разброс по толщине. Поляризация мюонов не сохраняется в майларе, поэтому эти данные использованы для определения только параметров ρ и δ

Получены результаты:

$$\rho = 0.75080 \pm 0.00032(\text{stat}) \pm 0.00097(\text{syst}) \pm 0.00023(\eta)$$
$$\delta = 0.74964 \pm 0.00066(\text{stat}) \pm 0.00112(\text{syst})$$

J.R.Musser et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. Lett. Vol. 94, no. 10, 101805 (2005)

A. Gaponenko et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D71, no. 7, 071101 (2005)

Оба результата в 2006 году были занесены в данные Particle Data Group как наиболее точные.

Раунд II:

Мишеный модуль из алюминиевой фольги

Использование блока ВПК позволило провести юстировку пучка по X координате и получить более точные входные данные мюонного пучка для моделирования

Получены результаты:

$$\rho = 0.75014 \pm 0.00017(\text{stat}) \pm 0.00044(\text{syst}) \pm 0.00011(\eta)$$
$$\delta = 0.75067 \pm 0.00030(\text{stat}) \pm 0.00067(\text{syst})$$
$$P_{\mu\xi} = 1.0003 \pm 0.0006(\text{stat}) \pm 0.0038(\text{syst})$$

R.P. MacDonald et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D78, 032010 (2008)

B. Jamieson et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D74, no. 7, 072007 (2006)

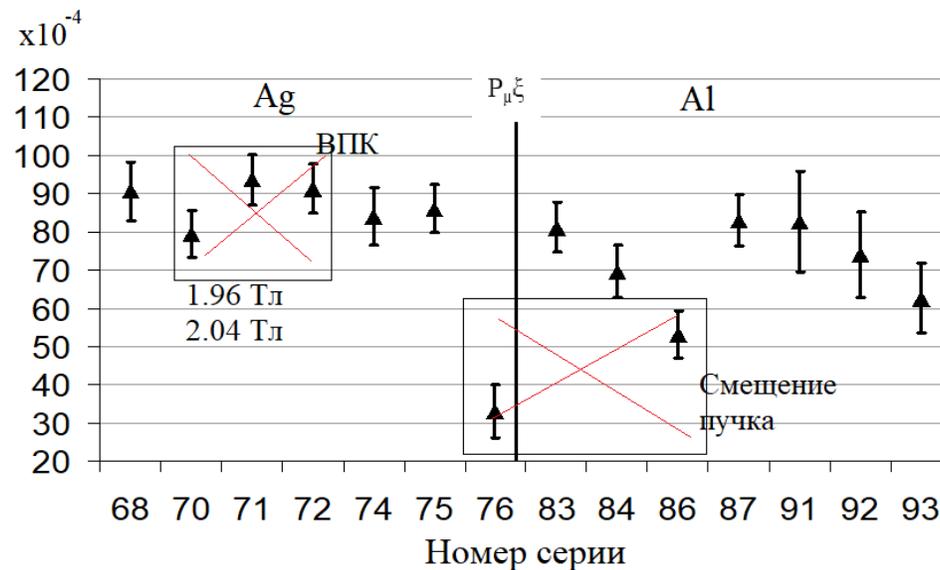
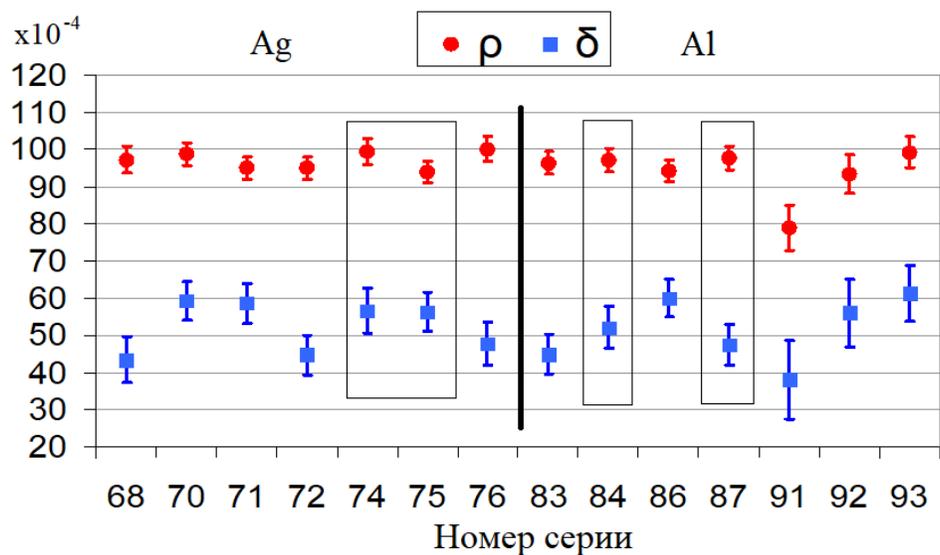
Результаты были занесены в данные Particle Data Group в 2008 году как наиболее точные.

Результаты измерения параметров Мишеля (2)

Раунд III: использовались два типа мишеней – Al и Ag высокой чистоты (>99.999%)

Пространственно-временные характеристики начали вычисляться комбинированно по результатам моделирования в GARFIELD и по результатам измерений времен дрейфа в камерах

Из фитирования экспериментального и моделированного спектров были определены разности $\Delta\rho$, $\Delta\delta$ и $\Delta P_{\mu\xi}$ для каждой серии набора данных:



Суммарные неопределенности в финальном наборе данных

Источник неопределенности	Величина неопределенности ($\times 10^{-4}$)		
	ρ	δ	$P_{\mu}^{\pi\xi}$
<i>Общее для обоих типов мишеней:</i>			
Радиационные поправки и корреляция с η	1.3	0.6	1.2
Импульсная калибровка	1.2	1.2	1.5
Разрешение	0.6	0.7	1.5
Отклик камер	1.0	1.8	2.3
Взаимодействие позитронов	0.5	0.2	0.4
Другие	0.3	0.3	0.4
Деполяризация мюонов в fringe field			+15.8, -4.0
Деполяризация мюонов в мишени			3.2
Распады пионов в канале M13			1.0
<i>Ag мишень:</i>			
Тормозное излучение и δ -электроны	1.8	1.6	0.5
Толщина мишени/место остановок	3.8	6.4	0.6
<i>Al мишень:</i>			
Тормозное излучение и δ -электроны	0.7	0.7	0.3
Толщина мишени/место остановок	0.2	0.8	0.8
Взвешенная систематическая неопределенность	2.3	2.7	+16.5, -6.3
Взвешенная статистическая неопределенность	1.2	2.1	2.9
Суммарная неопределенность	2.6	3.4	+16.8, -6.9

Финальный результат определения параметров Мишеля

Получены финальные значения:

$$\rho = 0.74977 \pm 0.000012(\text{stat}) \pm 0.00023(\text{syst})$$

$$\delta = 0.75049 \pm 0.00021(\text{stat}) \pm 0.00027(\text{syst})$$

$$P_{\mu}\xi = 1.00084 \pm 0.00029(\text{stat}) \begin{matrix} +0.00165 \\ -0.00063 \end{matrix}(\text{syst})$$

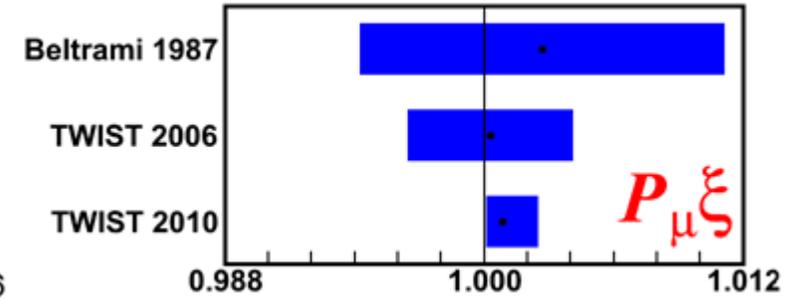
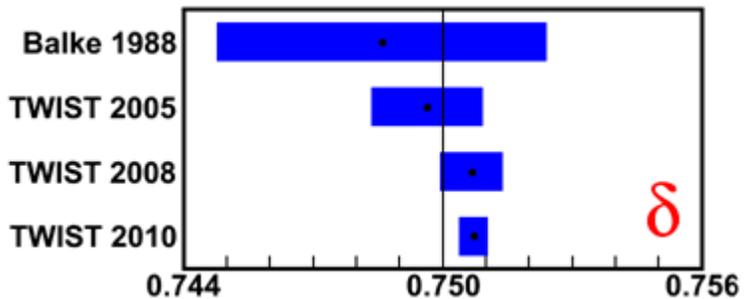
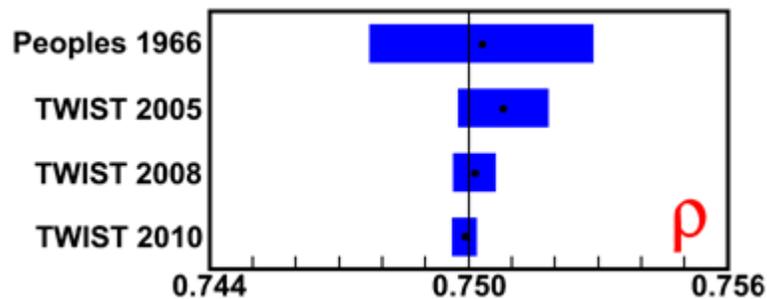
R. Bayes et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. Lett., Vol. 106, 041804 (2011)

A. Hillairet et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D85, 092013 (2012)

J.F. Bueno et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D84, 032005 (2012)

Все полученные значения согласуются с предсказаниями Стандартной модели

Все три результата включены в таблицы Particle Data Group в 2012 году как измеренные с минимальными неопределенностями и на сегодняшний день остаются непревзойденными и наиболее точными измерениями параметров ρ , δ и $P_{\mu}\xi$. Точность измерения параметра Мишеля ρ , существовавшего до TWIST, улучшена в 14 раз, параметра Мишеля δ - в 11 раз, значения величины $P_{\mu}\xi$ - в 7 раз.



Таким образом, эксперимент TWIST решил принятую на себя задачу примерно на порядок уменьшить систематические неопределенности в измерениях параметров Мишеля

Новые ограничения на теории за пределами Стандартной модели

I. *B. Herczeg. Phys. Rev. D 34(11), p.3449-3456 (1986)*

В лево-правой симметричной (LRS) модели электрослабых взаимодействий W (WL) бозон Стандартной модели и правый массивный калибровочный бозон W_R с массовыми собственными состояниями W_1 и W_2 связаны соотношениями

$$W_L = W_1 \cos \zeta + W_2 \sin \zeta,$$

$$W_R = e^{i\omega} (-W_1 \sin \zeta + W_2 \cos \zeta)$$

$$P_\mu \simeq 1 - 2t_\theta^2 - 2\zeta_g^2 - 4t_\theta\zeta_g \cos(\alpha + \omega)$$

$$\xi \simeq 1 - 2(t^2 + \zeta_g^2)$$

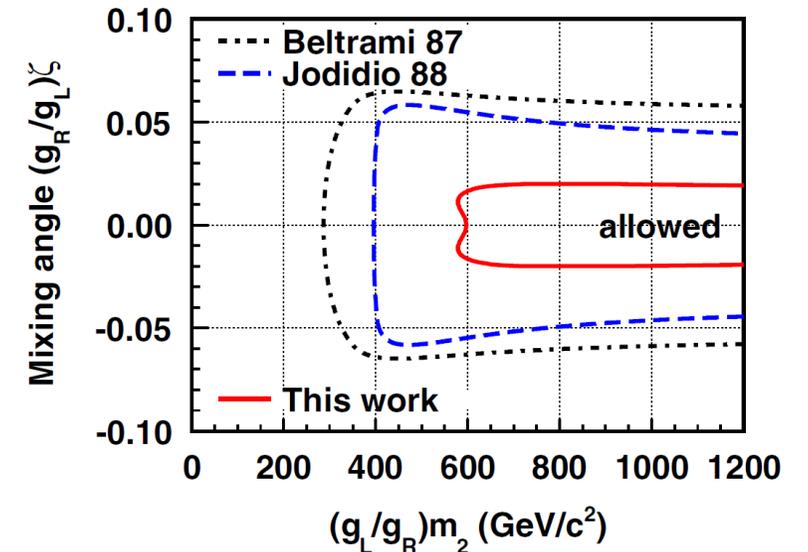
$$\rho \simeq \frac{3}{4}(1 - 2\zeta_g^2)$$

В рамках обобщенной LRS модели установлен новый предел на угол смешивания в мюонном секторе $|(g_R/g_L)\zeta| < 0.020$ (90% C.L.) с существовавшего до наших измерений предела $|(g_R/g_L)\zeta| < 0.066$. Нижний предел на массу $(g_R/g_L)m_2$ собственного состояния W_2 в распадах мюонов увеличен до 578 ГэВ/ c^2 с существовавшего до наших измерений значения 400 ГэВ/ c^2 .

D0: 780 ГэВ/ c^2 (1996), 800 ГэВ/ c^2 (2004), 1 ТэВ/ c^2 (2008).

CMS: > 4.4 ТэВ/ c^2

ATLAS: нижний предел 3.8-5 ТэВ/ c^2



Новые ограничения на теории за пределами Стандартной модели (2)

II. Глобальный анализ распада мюона

H.-J. Gerber W. Fetscher and K.F. Johnson. Physics Letters B173, p.102-106 (1986)

H. Burkard et al. Physics Letters B160, p.343-348 (1985)

C.A. Gagliardi, R.E. Tribble, N.J. Williams. Physical Review D. 2005. Vol. 72, 073002.

Вероятность распада левых и правых мюонов на левые или правые позитроны можно выразить через константы связи $g_{\mu e}$

$$Q_{RR} = \frac{1}{4} |g_{RR}^S|^2 + |g_{RR}^V|^2$$

$$Q_{LR} = \frac{1}{4} |g_{LR}^S|^2 + |g_{LR}^V|^2 + 3 |g_{LR}^T|^2$$

$$Q_{RL} = \frac{1}{4} |g_{RL}^S|^2 + |g_{RL}^V|^2 + 3 |g_{RL}^T|^2$$

$$Q_{LL} = \frac{1}{4} |g_{LL}^S|^2 + |g_{LL}^V|^2$$

Кроме параметров Мишеля имеются еще семь дополнительных параметров распада мюонов, определяющих продольную и поперечную поляризацию вылетающих позитронов, которые являются билинейной комбинацией констант связи $g_{\mu e}$

В результате глобального анализа распадов мюонов были получены новые более строгие ограничения на некоторые константы связи $g_{\mu e}$ и новое рекордное ограничение на вероятность распада правого мюона в любой тип электрона, запрещенный в Стандартной модели. Новый предел составляет $Q_R^{\mu} < 0.00082$ (90% CL).

A. Hillairet et al., TWIST Collaboration. Phys. Rev. D Vol. 85, 092013 (2012)

Заключение

- Разработанная новая методика построения проволочных камер позволила создать прецизионные планарные камеры для работы в магнитном поле. Проволочные камеры имели высокие геометрические точности, что стало залогом их стабильной работы в течение всего времени набора данных. Распределение отклонений проволок в дрейфовых камерах от номинального положения имеет узкое распределение со среднеквадратичным отклонением $\sigma=3.5\text{мкм}$. Положение каждой анодной плоскости в сборке детектора известно с точностью в несколько микрон и суммарная длина всей сборки камер известна с точностью около 50 мкм на длине 120 см, что соответствует относительной точности 5×10^{-5} . Высокая точность геометрических параметров камер существенно упростила моделирование отклика детекторов и позволила уменьшить систематические ошибки при определении параметров Мишеля.
- Созданный спектрометр позволил впервые при измерении параметров Мишеля в распадах положительных мюонов провести полное восстановление двумерных спектров позитронов как функции импульсов и углов их вылета и с рекордной точностью из одних и тех же наборов данных определить параметры ρ , δ , $P_{\mu\xi}$:

$$\rho = 0.74977 \pm 0.000012(\text{stat}) \pm 0.00023(\text{syst})$$

$$\delta = 0.75049 \pm 0.00021(\text{stat}) \pm 0.00027(\text{syst})$$

$$P_{\mu\xi} = 1.00084 \pm 0.00029(\text{stat}) \begin{matrix} +0.00165 \\ -0.00063 \end{matrix}(\text{syst})$$

Все три результата включены в таблицы Particle Data Group в 2012 году как измеренные с рекордной точностью и на сегодняшний день остаются наиболее точным измерением этих параметров. Точность предыдущего рекордного измерения параметра Мишеля ρ , выполненного до TWIST, улучшена в 14 раз, параметра Мишеля δ - в 11 раз, величины $P_{\mu\xi}$ - в 7 раз. Полученные в эксперименте результаты согласуются с предсказанием Стандартной модели

Спасибо за внимание!