

Разработка прецизионных проволочных детекторов и создание установки для исследования распадов мюонов

Давыдов Ю.И.

ЛЯПОИЯИ

19 января 2026

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка новой методики изготовления планарных проволочных камер и впервые создание на их основе установки для полного восстановления двумерных спектров позитронов как функции импульсов и углов их вылета для определения параметров Мишеля в распадах положительных мюонов с предельно высокой чувствительностью. Для выполнения этой цели **необходимо решить задачи**:

- **Разработать технологию создания прецизионных планарных проволочных камер** с малым количеством материала на пути мюонов и позитронов распада.
- **Создать проволочные детекторы на основе разработанной технологии** для работы в магнитном поле со среднеквадратичным отклонением проволок от идеального положения в каждой плоскости менее 20 мкм.
- **Разработать методику оценки мертвого времени проволочных камер**, наполненных газом DME, после прохождения мюонов с высокой ионизационной способностью и провести исследования для определения данных для моделирования отклика детектора.
- **Разработать методику исследования времяпроекционных камер (ВПК) низкого давления** для определения геометрических параметров, характеристик и режимов работы.
- **Создать установку на основе планарных проволочных камер** с расположением проволок в плоскостях и положения плоскостей вдоль оси Z спектрометра, известными с относительной точностью лучше 10^{-4} , **для полного восстановления двумерных спектров позитронов и измерения трех параметров Мишеля**. Спектрометр должен измерять импульсы Мишелевских позитронов распада с точностью на уровне 10^{-3} .

Актуальность и новизна

Актуальность работы

Проведение эксперимента для измерения параметров Мишеля с рекордной точностью требует создания прецизионных проволочных камер и уникальной по своим параметрам установки. Такой эксперимент является прямым тестом Стандарной модели, подтверждая актуальность проведенной работы

Научная новизна

Заключается в разработке технологии и в создании прецизионных планарных проволочных камер и уникальной установки, позволившей восстановить двумерные спектры $N(p, \theta)$ позитронов распада и на порядок улучшить точность измерений трех параметров Мишеля в распадах положительных мюонов

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на семинарах в ЛЯП ОИЯИ, в РНЦ "Курчатовский Институт", ИЯИ РАН, в университетах США и Канады, на рабочих совещаниях коллаборации TWIST в ТРИУМФ (Ванкувер, Канада), неоднократно представлялись на международных конференциях и совещаниях (International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010) Vancouver, Canada; 25th Lake Louise Winter Institute (LLWI 2010), Canada, 2010; International Workshop on Neutrino Factories 2009, Chicago, USA, 2009; IEEE NSS, Dresden, Germany, 2008; Conference "New Trends in High Energy Physics", Yalta, 2007; 8th Pisa Meeting on Advanced Detector, Italy, 2001; The Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society (DPF2000), Columbus, USA, 2000 и др.)

Публикации

1. Yu.I. Davydov et al. Drift chambers for a precision measurement of the Michel parameters in muon decay // Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A. 2001. Vol. 461. P. 68-70.
2. R.S. Henderson, Yu.I. Davydov, W. Faszer et al. Precision planar drift chambers and cradle for the TWIST muon decay spectrometer // Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A. 2005. Vol. 548. P. 306-335.
3. J.R.Musser, R. Bayes, Yu.I. Davydov et al. Measurement of the Michel Parameter ρ in Muon Decay // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94, no. 10. P. 101805.
4. A. Gaponenko, R. Bayes, Yu.I. Davydov et al. Measurement of the muon decay parameter δ // Phys. Rev. D. 2005. Vol. 71, no. 7. P. 071101.
5. B. Jamieson, R. Bayes, Yu.I. Davydov et al. Measurement of $P\mu\xi$ in polarized muon decay // Phys. Rev. D. 2006. Vol. 74, no. 7. P. 072007.
6. R.P. MacDonald, R. Bayes, J. Bueno, Yu.I. Davydov et al. Precision measurement of the muon decay parameters ρ and δ // Phys. Rev. D. 2008. Vol. 78. P. 032010.
7. Yu.I. Davydov, R. Openshaw. Study of a self quenching streamer mode in pure gases of DME and isobutane // Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A. 2006. Vol. 557. P. 561-567.
8. Yu.I. Davydov, R. Openshaw. Self quenching streamer mode in quenching gases initiated by alpha particles // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. Vol. 56. P. 2880-2884.
9. J. Hu, G. Sheffer, Yu.I. Davydov et al. Time expansion chamber for characterization of TWIST low energy muon beams // Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A. 2006. Vol. 566. P. 563-574.
10. Yu.I. Davydov. On the first Townsend coefficient at high electric field // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53. P. 2931-2935.
11. Yu.I. Davydov, R. Openshaw, V. Selivanov, G. Sheffer. Gas gain on single wire chambers filled with pure isobutane at low pressure // Nucl. Instr. Methods in Phys. Research A. 2005. Vol. 545. P. 194-198.
12. N.L. Rodning, W. Andersen, Yu.I. Davydov et al. TWIST - The TRIUMF Weak Interaction Symmetry Test: The Michel parameters from mu+ decay // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 2001. Vol. 98. P. 247-254.
13. M.A. Quraan, ..., Yu.I. Davydov et al. A precision measurement of muon decay // Int. J. Mod. Phys. A. 2001. Vol. 16S1A. P. 296-298.
14. Yu.I. Davydov. Tests of the standard model with the TWIST experiment // New trends in high-energy physics: Experiment, phenomenology, theory. Proceedings, 21st Conference, Yalta, Crimea, Ukraine, September 15-22, 2007. P. 51-57.
15. A. Hillairet, R. Bayes, Yu.I. Davydov et al. Precision muon decay measurements and improved constraints on the weak interaction // Phys. Rev. D. 2012. Vol. 85. P. 092013.
16. J.F. Bueno, R. Bayes, Yu.I. Davydov et al. Precise measurement of parity violation in polarized muon decay // Phys. Rev. D. 2011. Vol. 84. P. 032005.
17. A. Hillairet, ..., Yu.I. Davydov et al. Blind analysis results of the TWIST experiment // 25th Lake Louise Winter Institute: Celebrating 25 years. 2010. arXiv:hep-ex/1006.1007.
18. R. Bayes, J.F. Bueno, Yu.I. Davydov et al. Experimental Constraints on Left-Right Symmetric Models from Muon Decay // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 106. P. 041804.

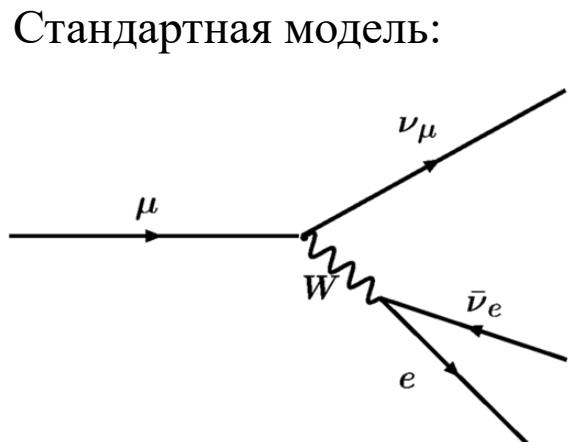
Параметры Мишеля

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

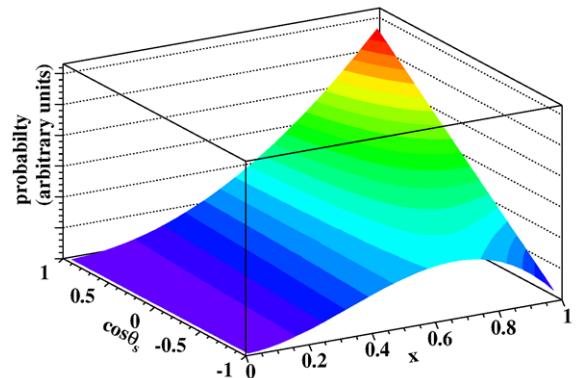
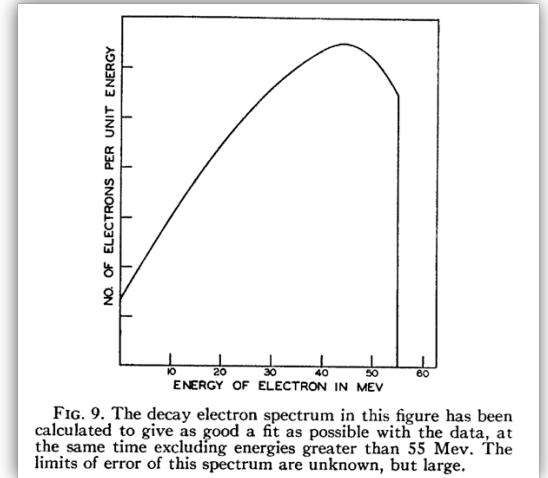


Louis Michel (1923-1999)



Стандартная модель:

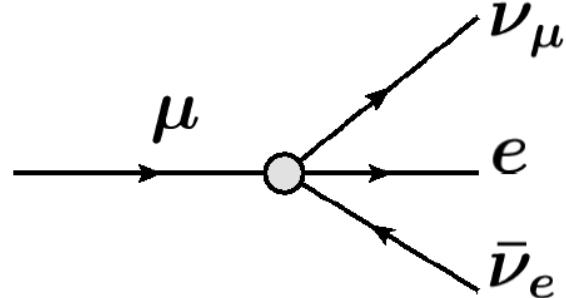
$$\begin{aligned}\rho &= 0.75 \\ \delta &= 0.75 \\ \xi &= 1.0 \\ \eta &= 0\end{aligned}$$



Распад мюона

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

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



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

i и j - спиральность мюона и электрона (L или R)

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

$k - S, V$ или T

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

В контексте V-A взаимодействия Стандартной модели $g_{LL}^V \equiv 1$

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

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

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)]

Эксперименты с восстановлением 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 недостаточной точностью знания положения проволок в детекторе [Fei-Sheng Lee, PhD thesis, Virginia Tech, 2001].

Наиболее точные измерения параметров Мишеля до TWIST:

$$\rho = 0.7518 \pm 0.0026$$

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

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

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

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

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

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

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

Эксперимент TWIST

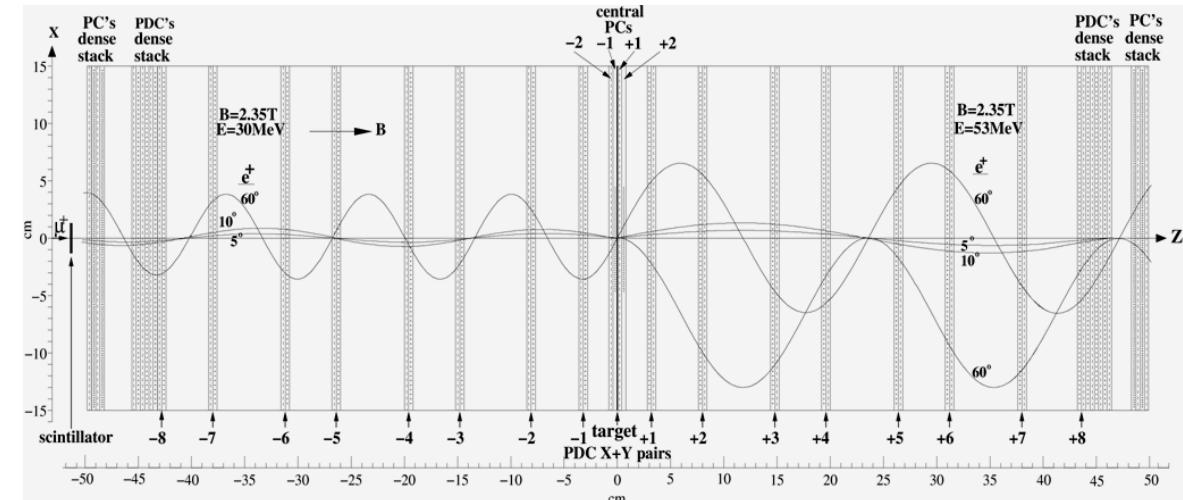
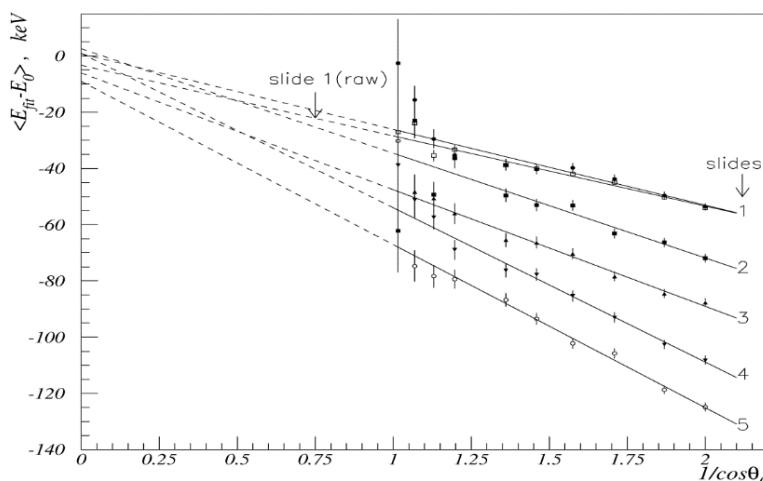
- Эксперимент по измерению параметров Мишеля с точностью на уровне $\sim 10^{-4}$ с использованием разработанной методики для изготовления прецизионных камер был принят на ускорителе в ТРИУМФ (Ванкувер, Канада).
- Целью созданной коллаборации TWIST (TRIUMF Weak Interaction Symmetry Test) было измерение 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.



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}

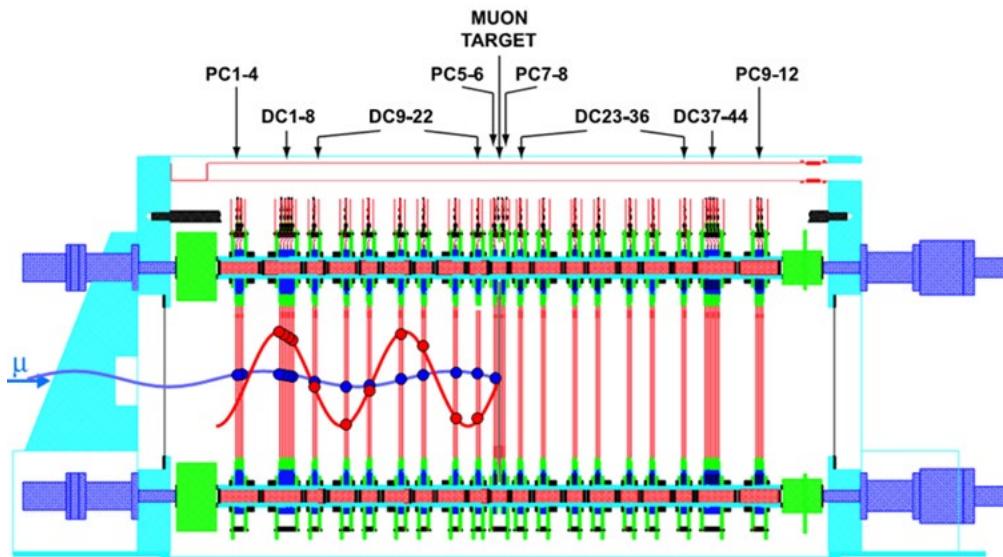
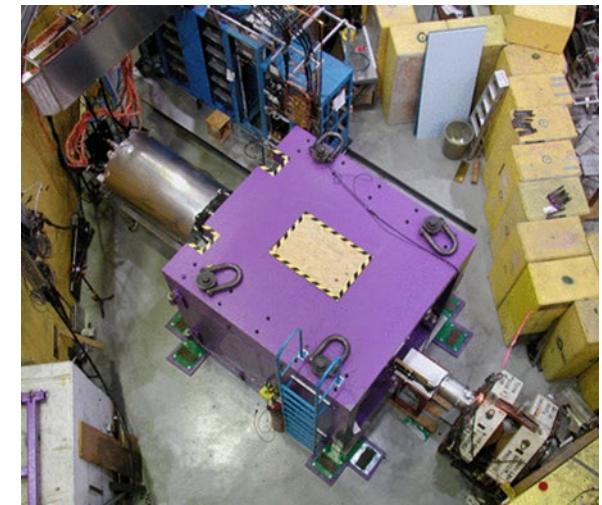
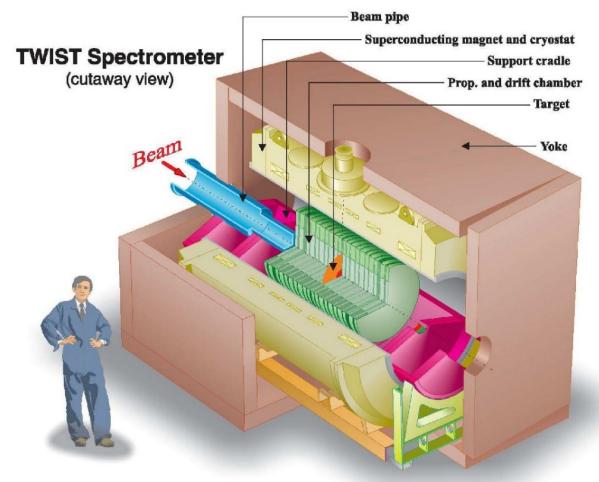
$$\Delta E(E, \theta) = \Delta E(E, \theta = 0) / \cos \theta \quad - \text{потери энергии позитрона при вылете под углом } \theta$$



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).

Спектрометр TWIST

- Концепция спектрометра TWIST основана на использовании симметричной сборки планарных многопроволочных 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.



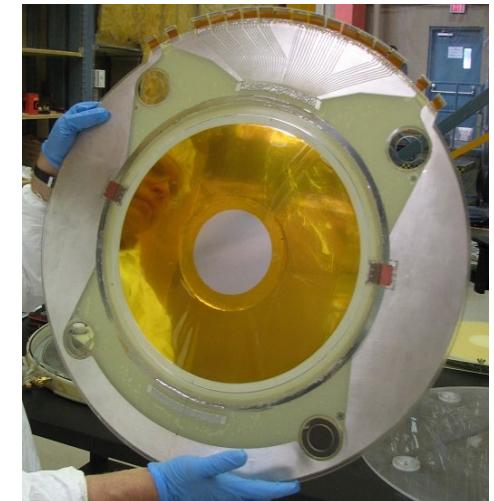
Все плоскости в модулях и модули касаются друг друга только сигналовыми кольцами и дисками. Наружные катоды из майлара 6.35 мкм одновременно служат разделяльным окном между рабочим газом и внешним объемом.

Конструкция камер и технология изготовления

Конструкции индивидуальных плоскостей камер и модулей, технология изготовления основаны на предложенной уникальной технологии с использованием прецизионных компонентов

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), 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 и вклейивание ламели на стеклянную рамку;
- Вклейивание ситалловых колец в стеклянные рамки;
- Подготовка катодных плоскостей;
- Натяжение проволок;
- Контроль натяжения проволок и их положений;
- Сборка камер в модули;
- Предварительное тестирование модулей.



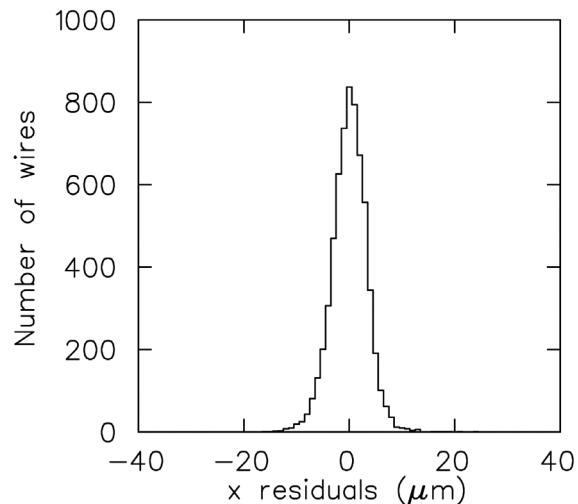
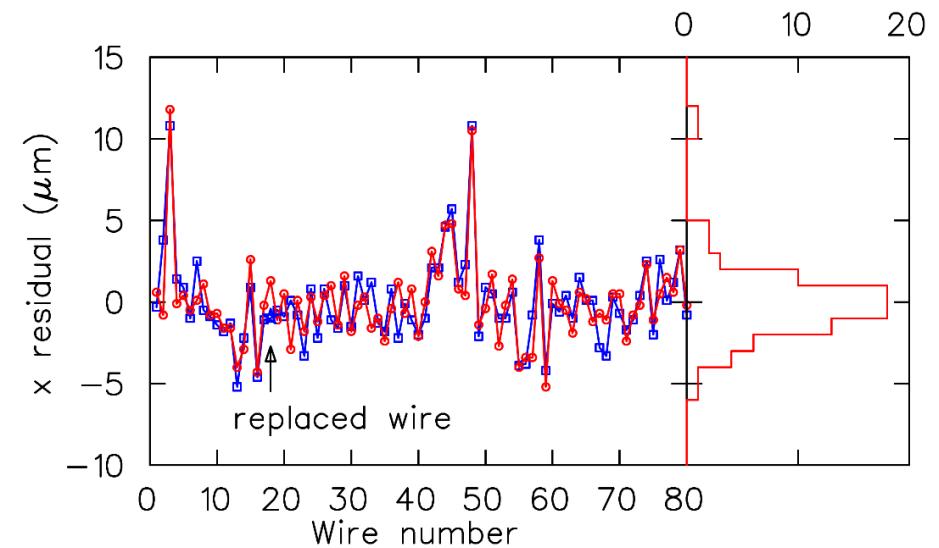
Геометрические точности изготовления

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



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

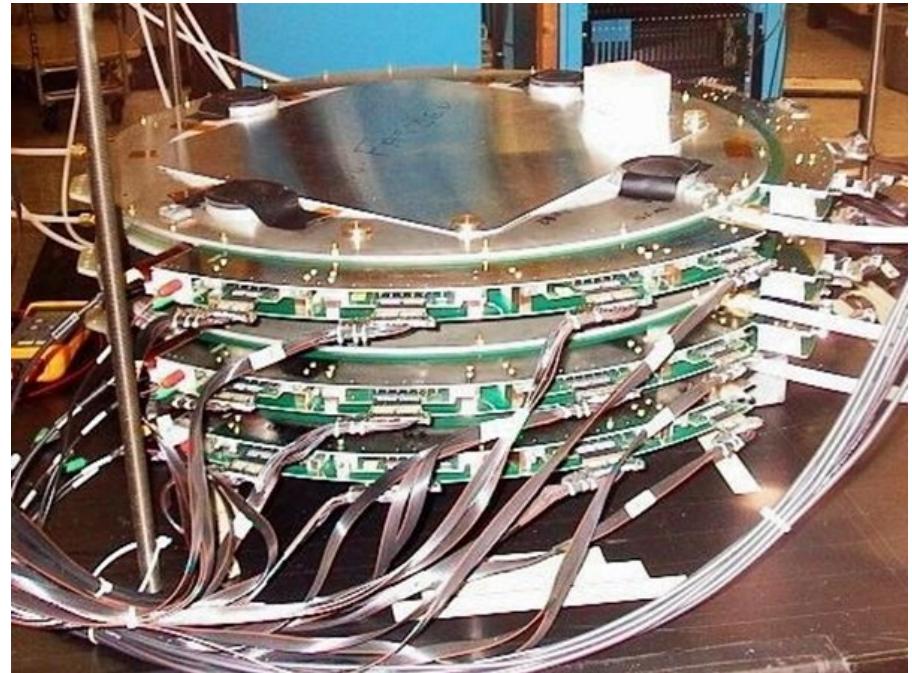
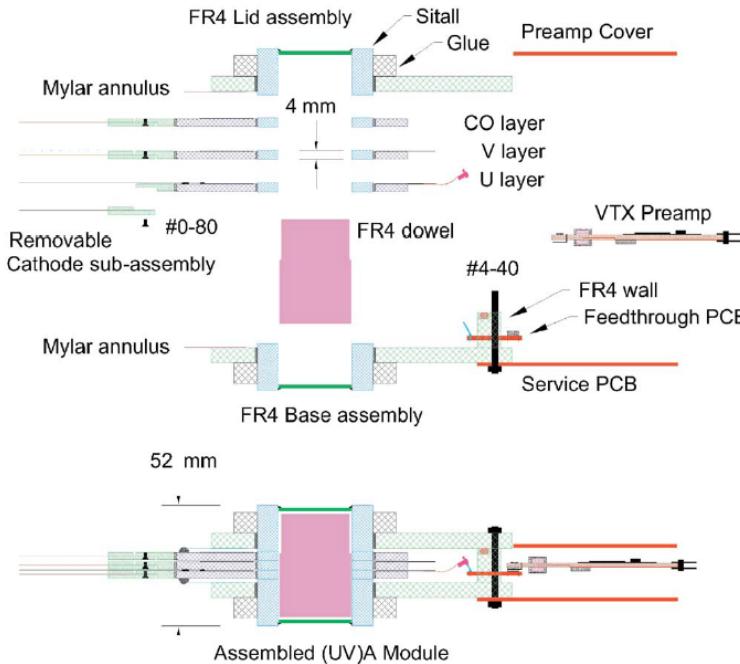
Точность положения проволок в плоскости



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

Модули проволочных 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

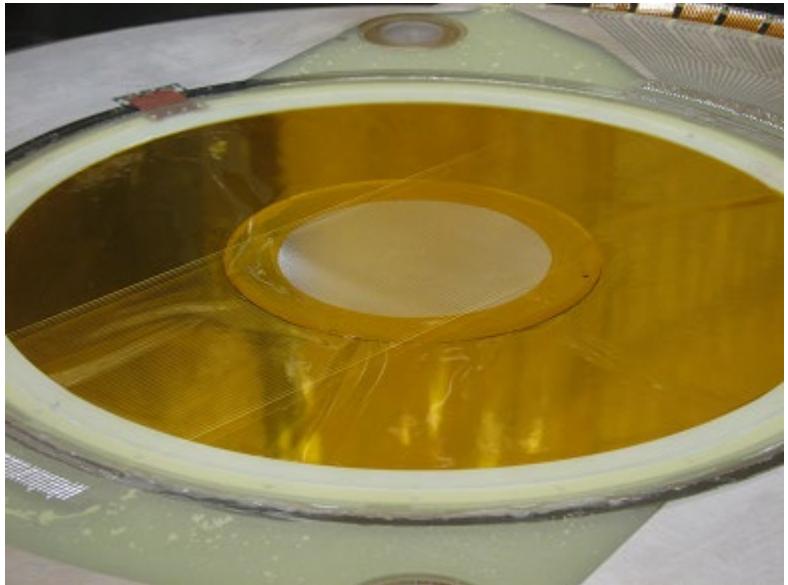


Тестирование модулей:

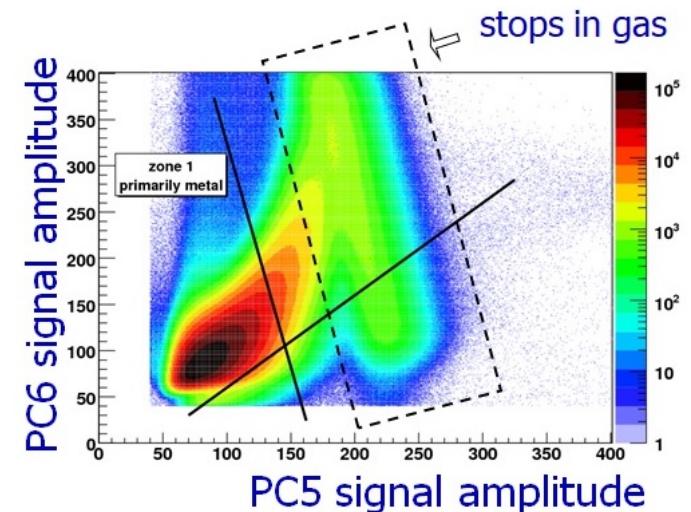
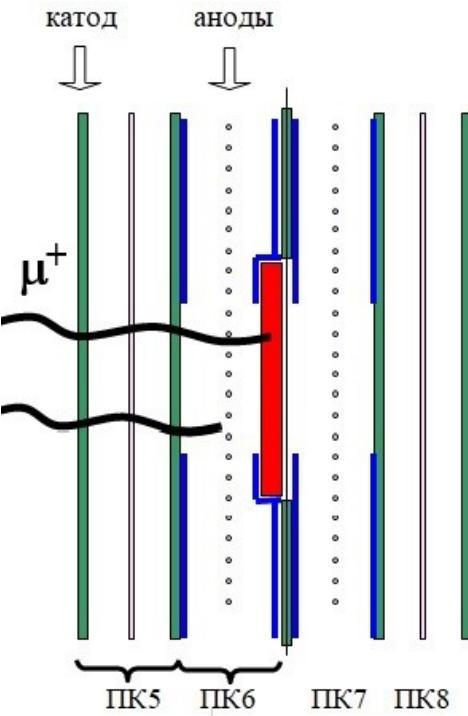
- Тестирование модулей на утечку газа (не более 0.3 см^3 в минуту)
- Однородность газового усиления по площади камер (^{55}Fe)
- Тесты при повышенной загрузке на способность держать ток
- Измерение эффективности регистрации на пучке пионов 120 МэВ/с

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.

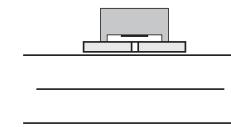
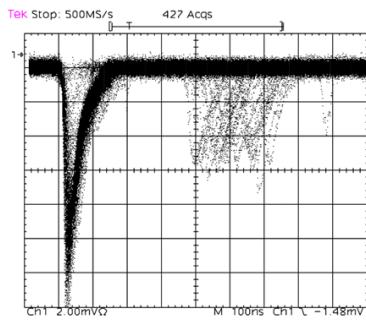


Энерговыделение в камерах ПК5 и ПК6 позволяет выделить остановки мюонов в газе и в мишени

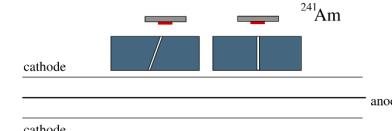
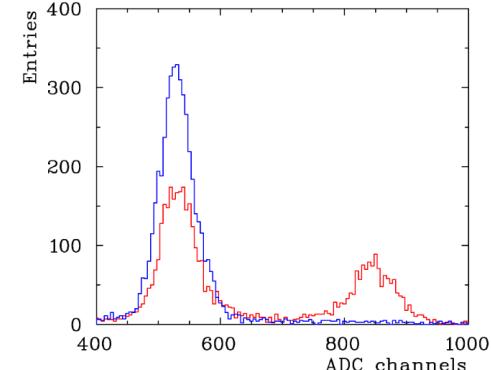
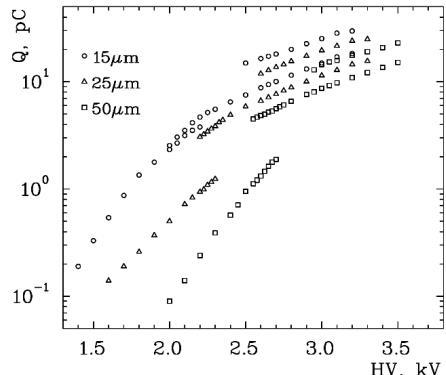


Особенности газа DME

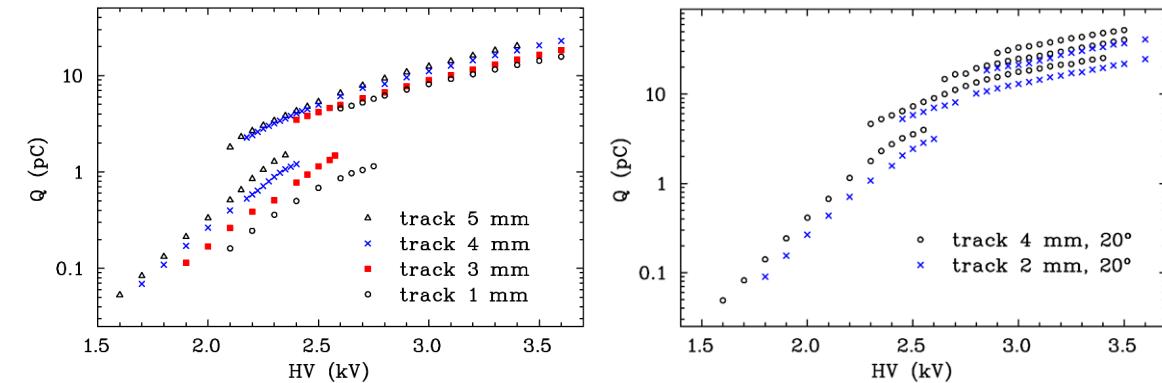
- Агрессивный газ, необходим выбор материалов конструкции
- Малый угол Лоренца
- Ненасыщенная скорость дрейфа
- Хорошие гасящие свойства:
 - Однопроволочные камеры, 12x12 мм²
 - Проволоки диаметром 15, 25 и 50 мкм
 - Альфа источники ¹⁴⁸Gd (3.183 МэВ) и ²⁴¹Am (5.44 и 5.48 МэВ)
 - Программа SRIM для определения пробегов альфа частиц



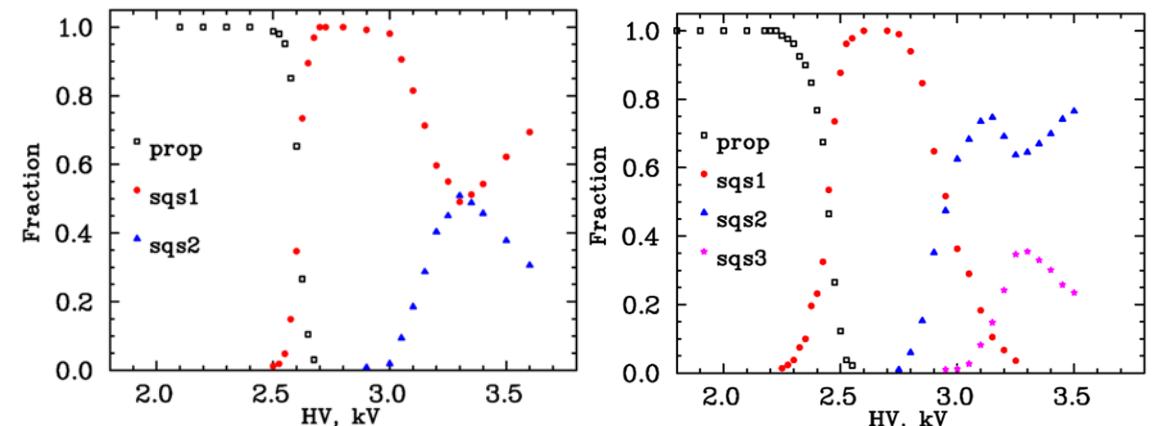
¹⁴⁸Gd, коллиматор ø1 мм и щелевой
0.5x3 мм²



При нормальном падении альфа частиц от ²⁴¹Am наблюдаются только одиночные СГС сигналы, независимо от длины трека



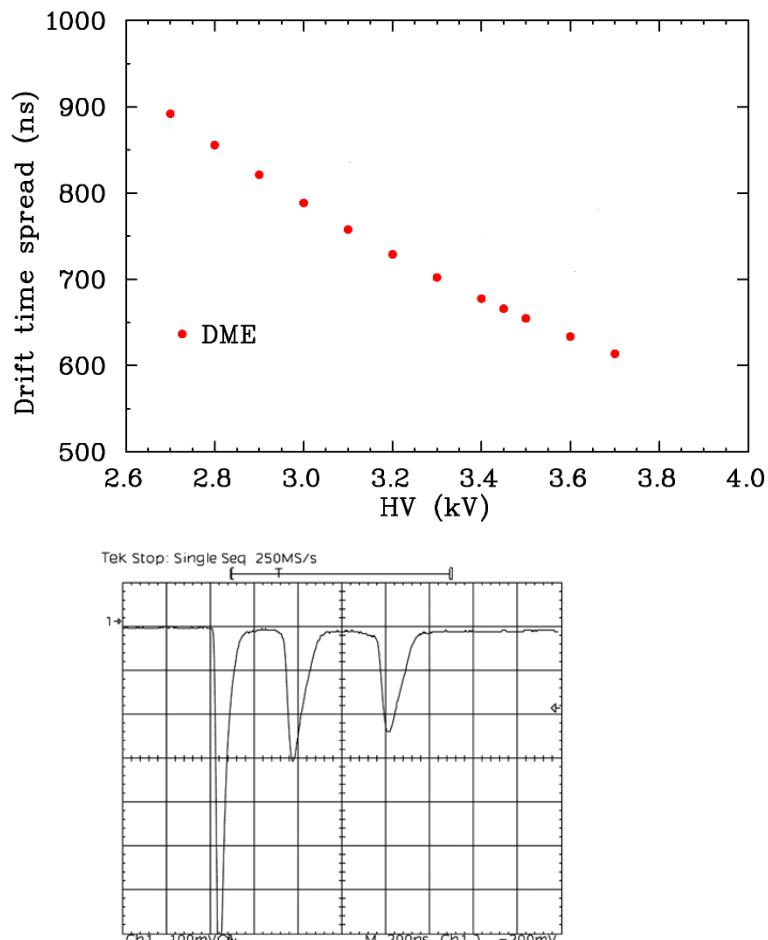
Зарядовые характеристики при облучении альфа частицами с разной длиной треков при падении перпендикулярно и под углом 20°. Диаметр проволоки 50 мкм



Доли пропорциональных и СГС сигналов при длине наклонных треков 2 мм (слева) и 4 мм (справа)

Особенности газа DME (2)

Разность времен дрейфа электронов с трека альфа частицы длиной 4 мм при падении под углом 20° в зависимости от приложенного напряжения



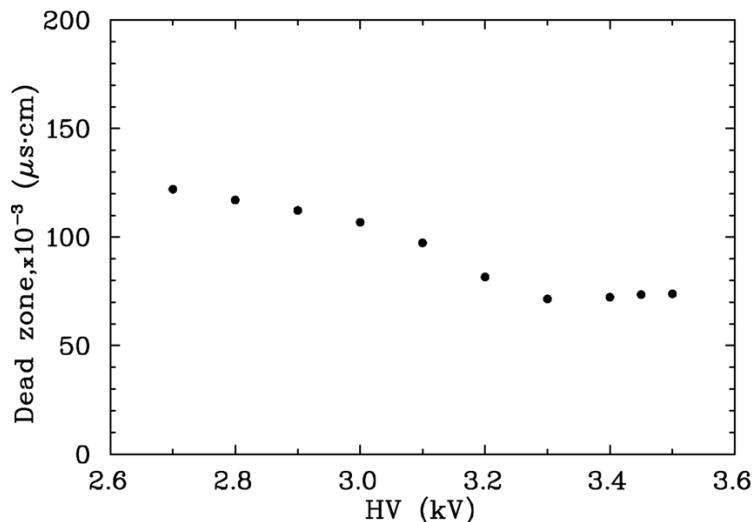
G.D. Alekseev et al. Nucl. Instrum. Meth., 153, p.157 (1978)

$$\eta = l_d \cdot t_d \quad - \text{определение мертвых зон}$$

$$\eta = \sum f_i \cdot \delta_i \cdot t_{di} \quad \begin{aligned} f_i & - \text{доля событий с } i \text{ стримерами} \\ \delta_i & - \text{длина нечувствительной зоны} \\ t_{di} & - \text{мертвое время} \end{aligned}$$

Проекция трека длиной 4 мм на проволоку при 20° равна 1.37 мм

Оценка величины мертвых зон в камере с диаметром проволоки 50 мкм

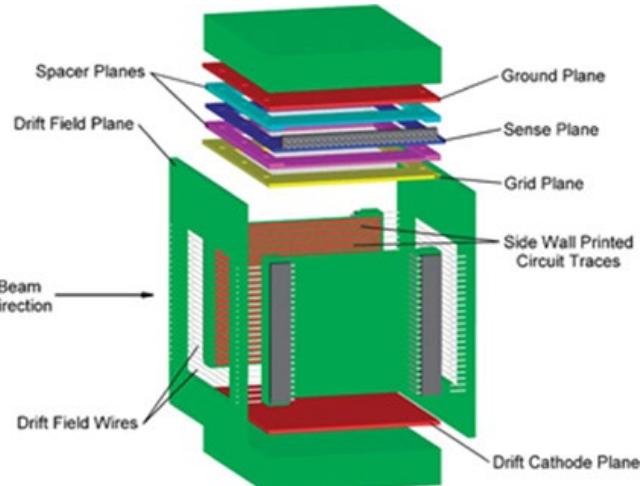
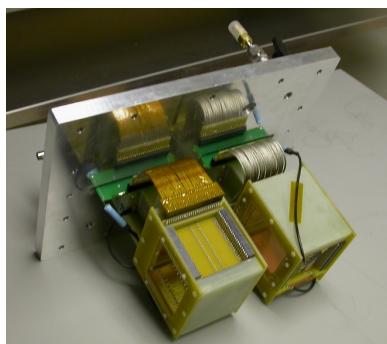
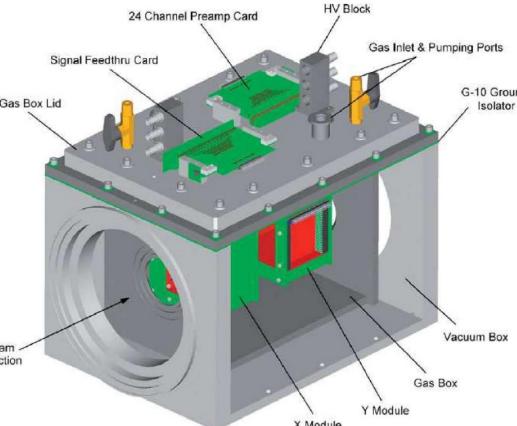


Оценка мертвых зон дает значение около 70×10^{-3} мкс×см при 3.3 кВ. Эта величина на 3 порядка меньше величины мертвых зон, полученной в газовых смесях на основе благородных газов

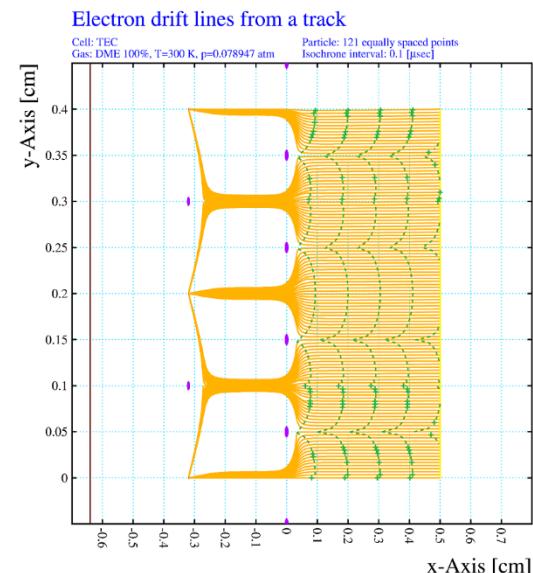
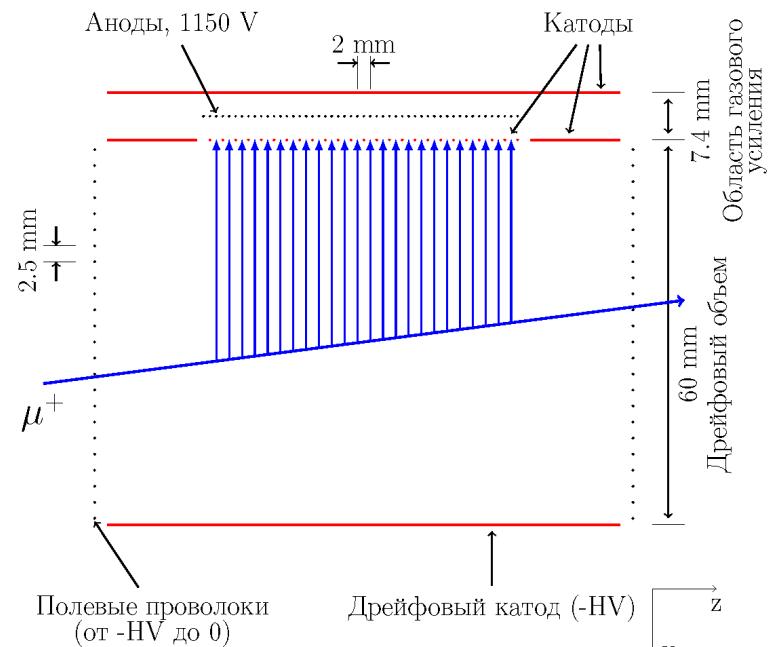
Камеры низкого давления для контроля пучка мюонов

Блок времяпроекционных камер для контроля пучка мюонов:

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

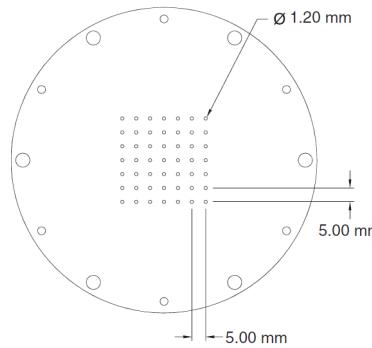


Электрическое поле в дрейфовом промежутке искажается за счет проникновения более сильного поля из области газового усиления, а также за счет влияния соседней камеры блока

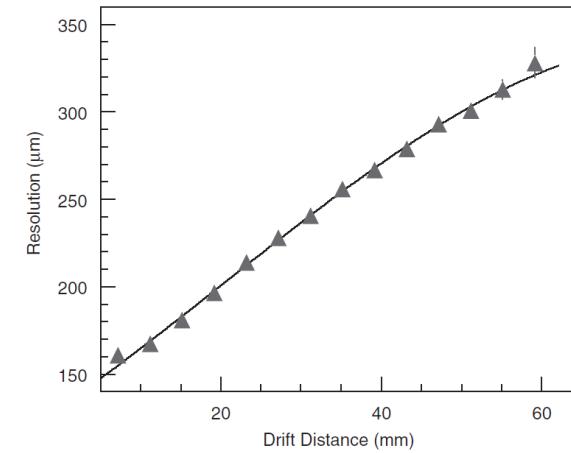
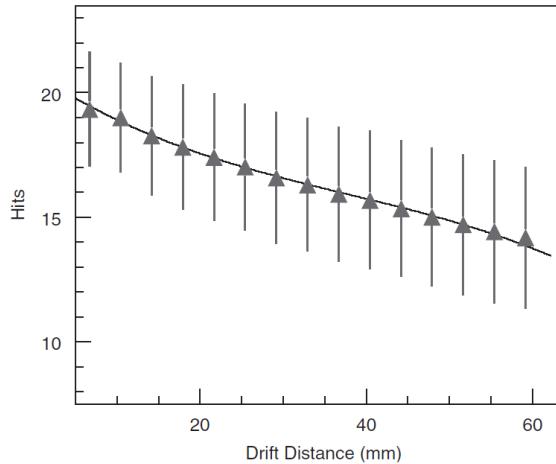


Камеры низкого давления для контроля пучка мюонов (2)

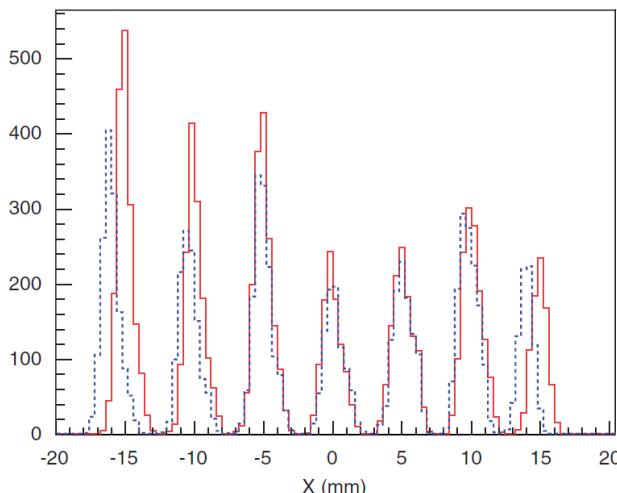
- ВПК имели 100% эффективность восстановления треков мюонов с сигналами в среднем на 18 каналах из 24



Коллиматор для исследования дрейфовых характеристик ВПК



Измеренное разрешение отдельной ячейки как функция расстояния трека мюона от анодной проволоки



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

Особенности газового усиления при высоких значениях E/p

$$\ln M = \int_{r_1}^{r_2} \alpha(r) dr$$

- Газовое усиление
в общем виде

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

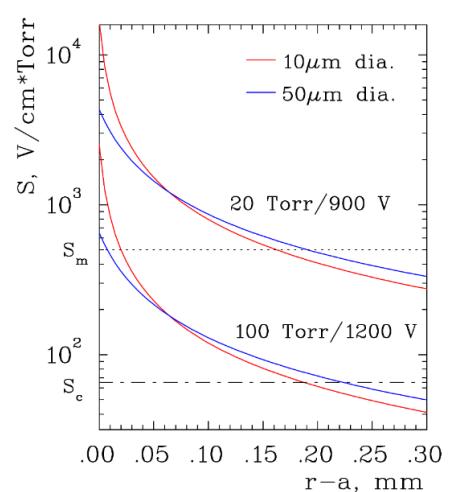
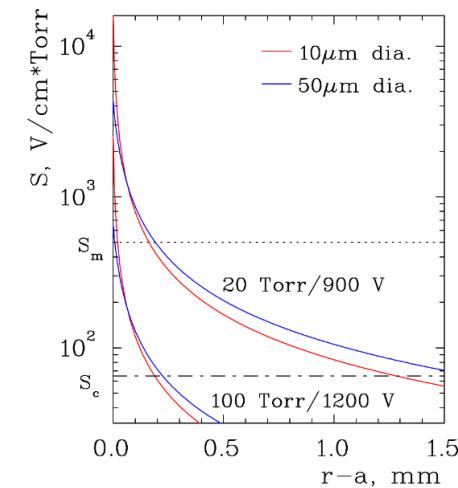
$$\frac{\alpha}{P} = A e \exp\left(\frac{-B P}{E}\right)$$

α - первый
коэффициент
Таунсенда

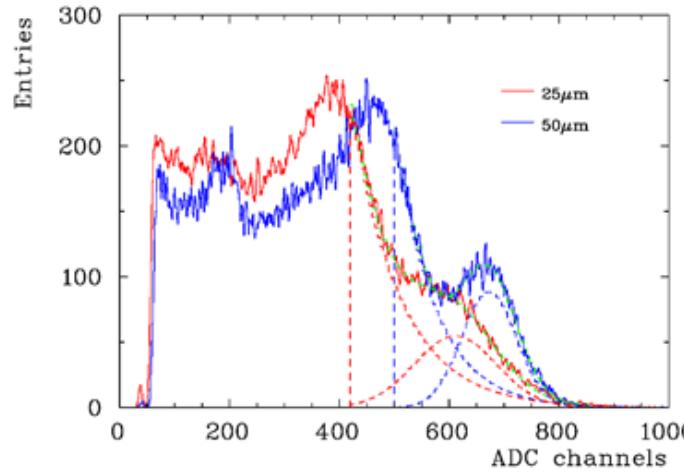
$$S_m = E_m/p \approx 350\text{-}520 \text{ В/см}\cdot\text{Torr}$$

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

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



- Однопроволочные камеры, 12x12 мм²
- Проволоки диаметром 15, 25, 50 и 100 мкм
- iso-C₄H₁₀, 92, 52, 32 и 12 Торр
- Источник ⁵⁵Fe

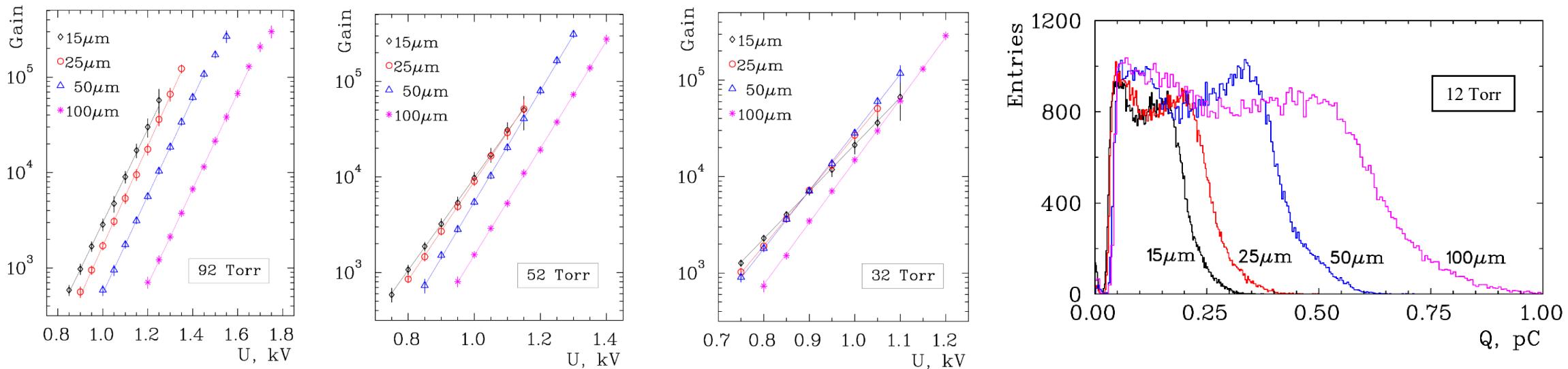


Пробег электрона в iso-C₄H₁₀
при фотопоглощении:

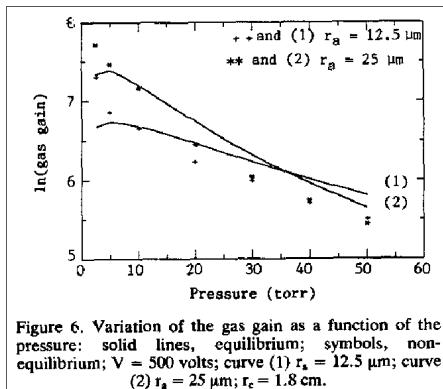
1 атм: 700-750 μm
92 Торр: ~ 6 mm
52 Торр: ~ 11 mm
32 Торр: ~ 17 mm
12 Торр: ~ 45 mm

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

Газовое усиление при различных давлениях газа



На основе этих измерений принято решение в ВПК использовать проволоки диаметром 25 мкм вместо планировавшихся 10 мкм



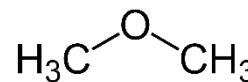
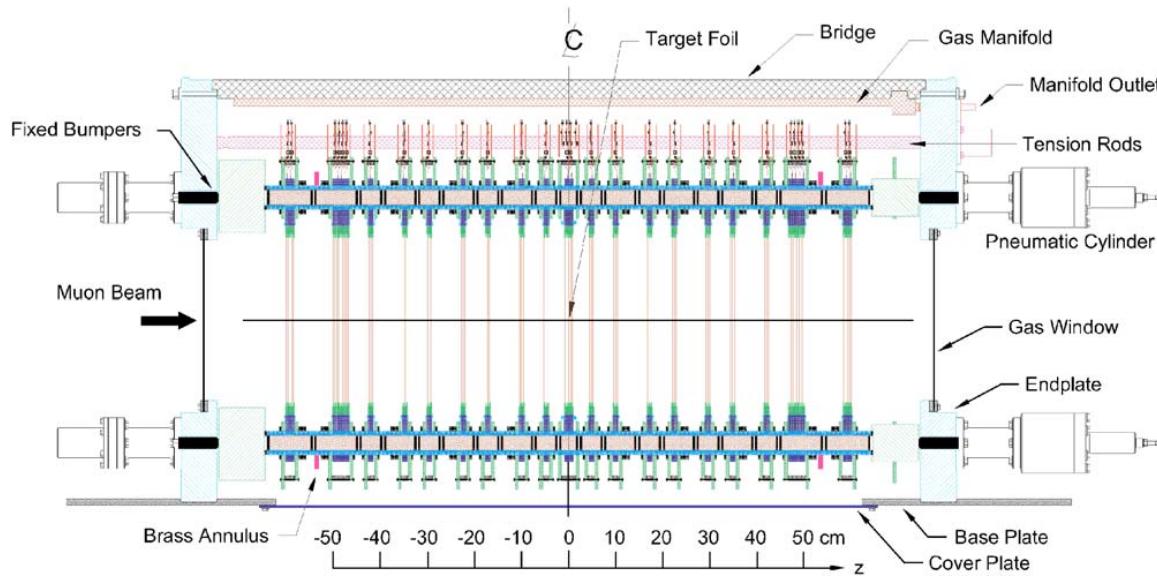
В работах P.Segur et al. проведены микроскопические расчеты первого коэффициента Таунсенда и газового усиления при низких давлениях:

- 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

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)

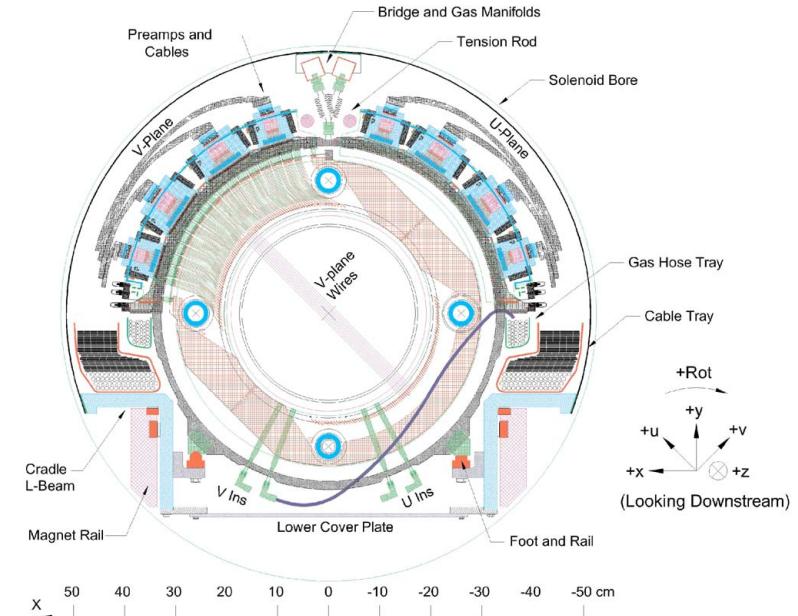
Сборка проволочных детекторов в TWIST



CH₃OCH₃ – диметил эфир, DME

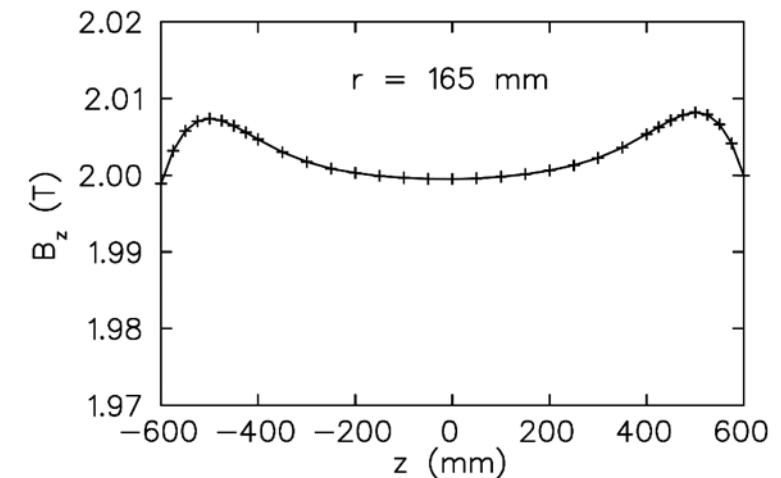
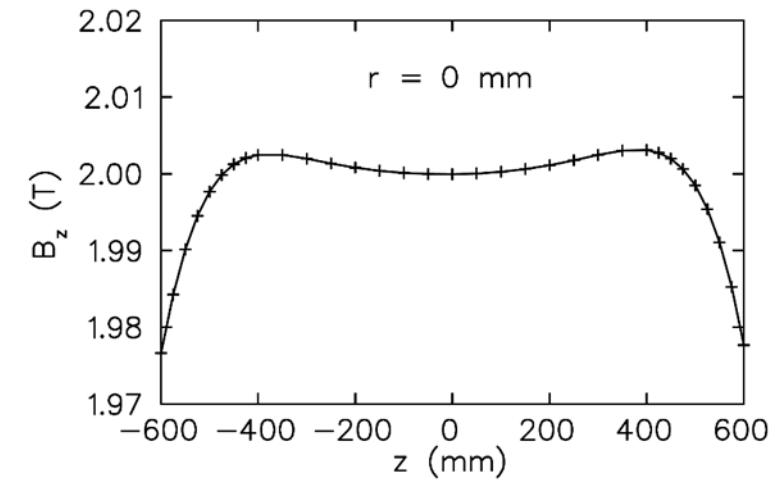
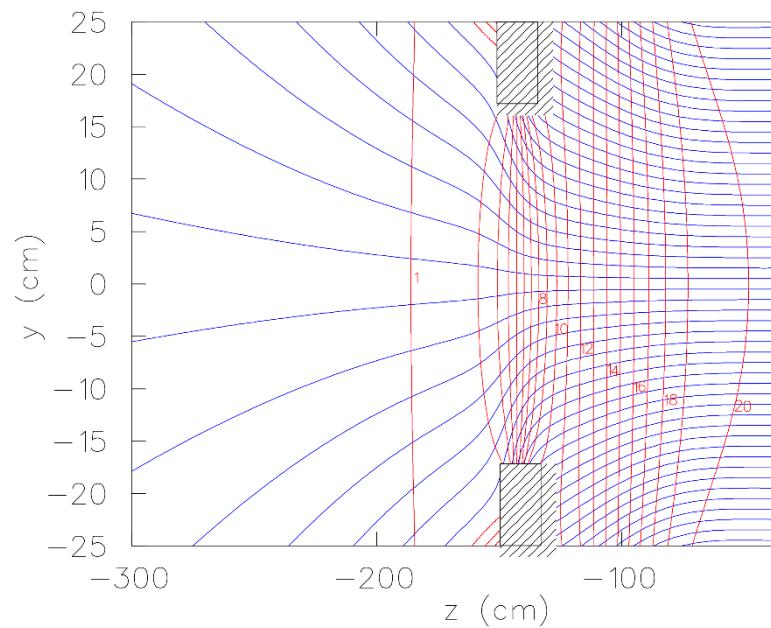
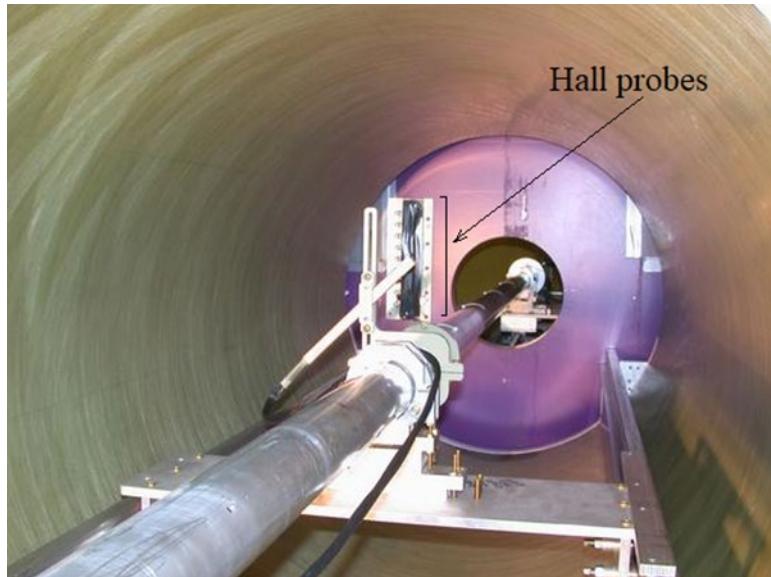
- Сжатие сборки с усилием 1470 N на каждую колонку ситалловых колец обеспечивало оптический контакт между кольцами и точность определения длины всей сборки лучше 50 микрон на длине 1000 мм
- Все плоскости и модули касаются друг друга только поверхностями ситалловых колец/спейсеров
- Положения всех анодных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

- 16 модулей ДК и 3 модуля ПК
- Наружные катоды модулей служили разделительным окном с внешним объемом
- Пространство между модулями заполнялось газовой смесью He+3%N₂
- Все ДК продувались газом DME, все ПК – смесью CF₄/iso-C₄H₁₀ (80/20)
- Газовая система поддерживала дифференциальное давление в модулях и гелий-азотном объеме



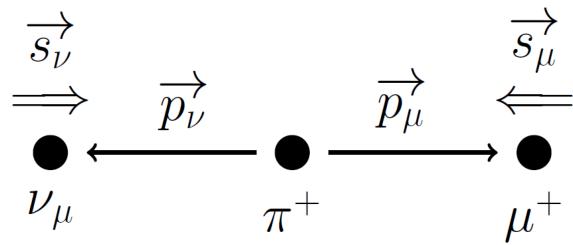
Магнитное поле спектрометра

- 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



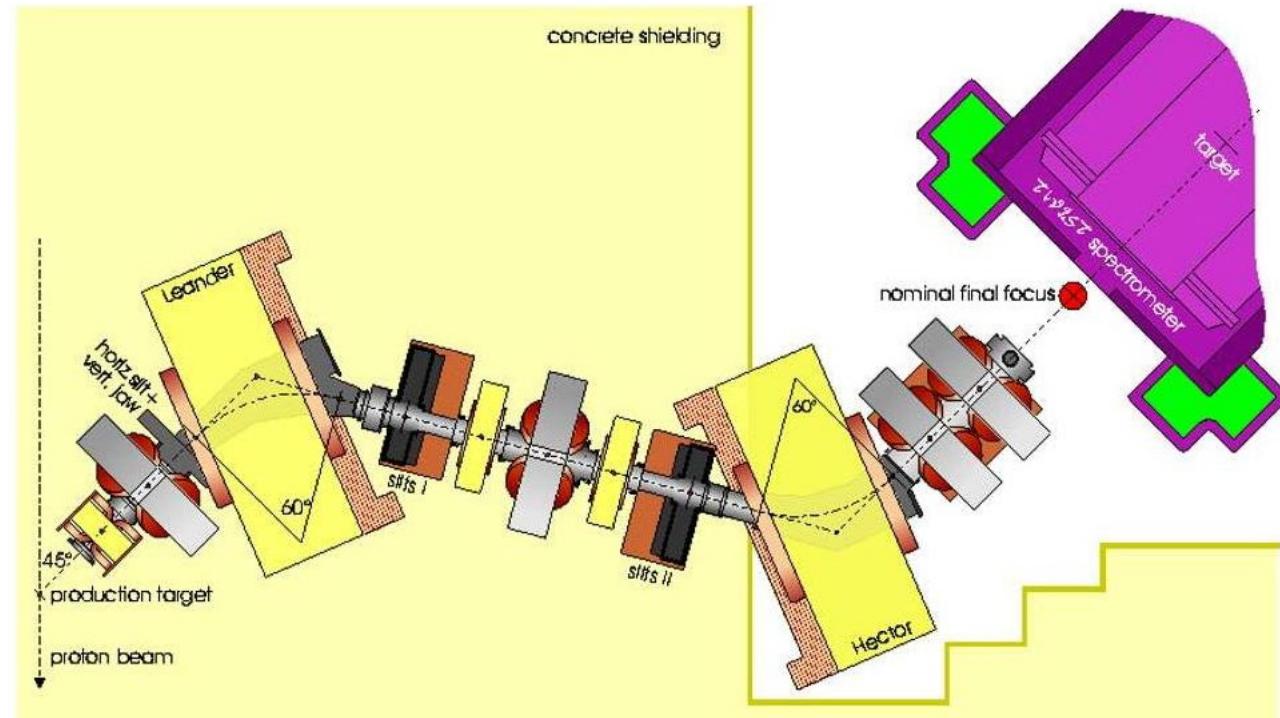
Пучок мюонов: канал M13

- Протонный циклотрон ТРИУМФ: $E_p = 520$ МэВ, баничи длительностью около 4 нсек, период 43 нсек
- Углеродная мезонообразующая мишень
- Канал M13 захватывал заряженные частицы, вылетающие из мишени T1 под углом 135°
- Импульсное разрешение канала составляет 0.7% (FWHM)



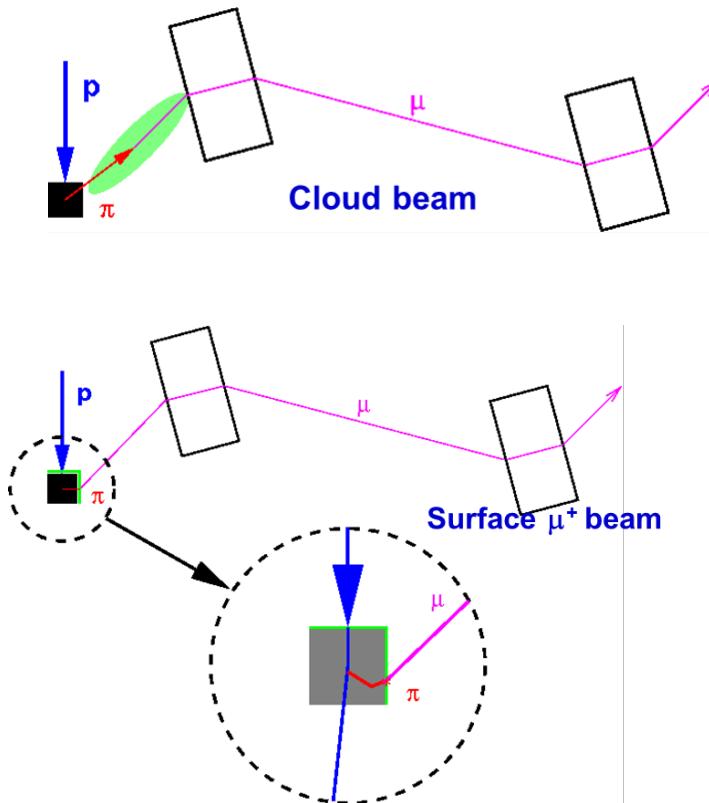
$$p_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} = 29.792 \text{ MeV/c}$$

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

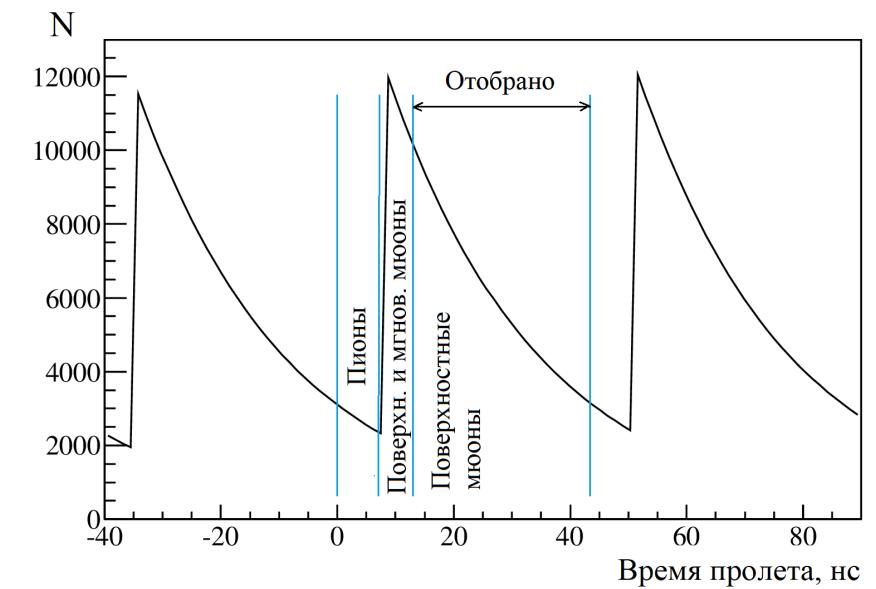
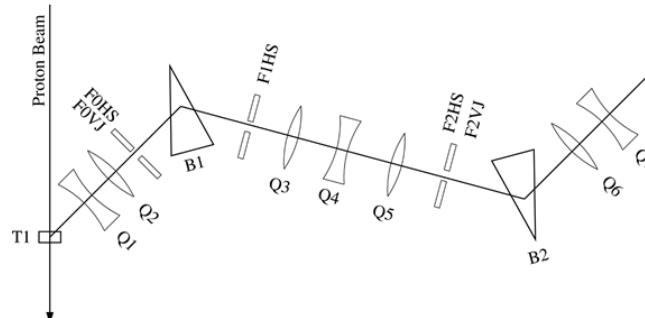


Выделение пучка поляризованных мюонов

- 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

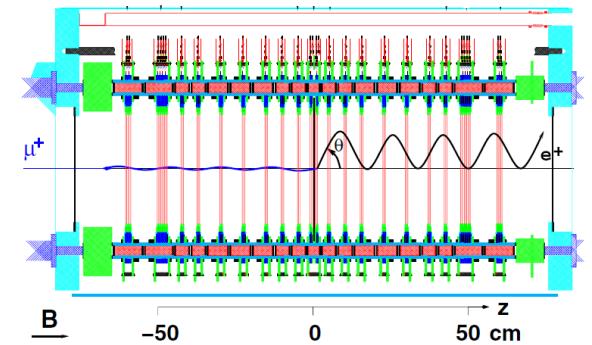
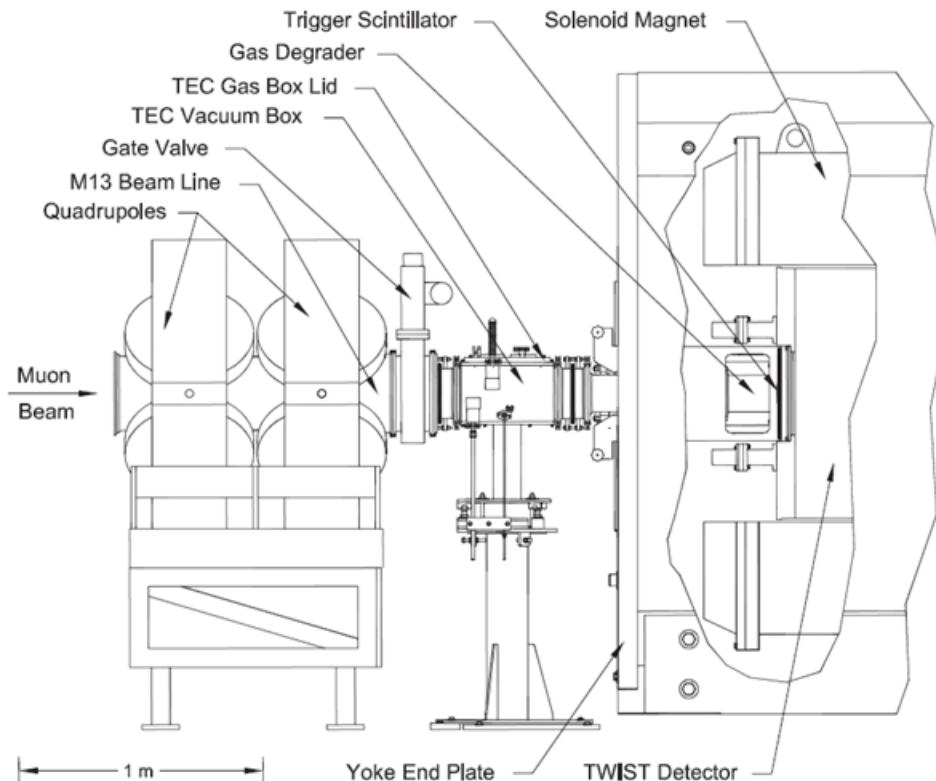
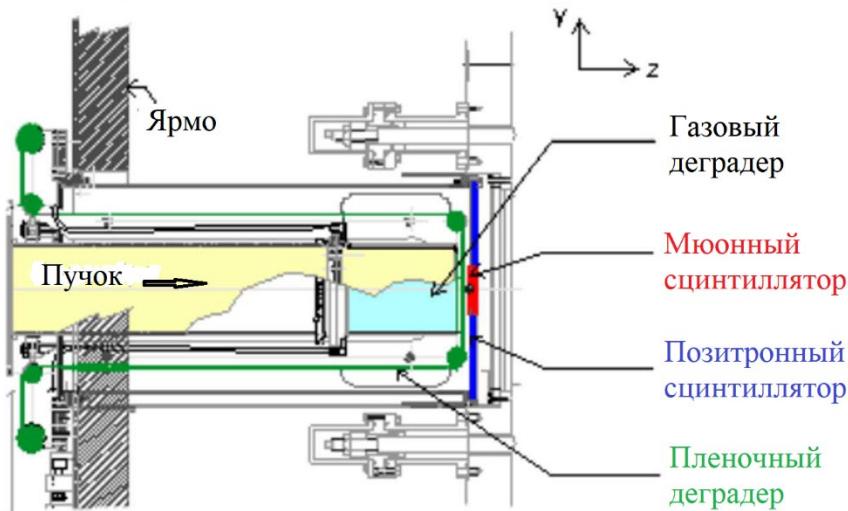


Мюоны с импульсом 29.6 МэВ/с захватываются из тонкого слоя мезонообразующей мишени (до 15 микрон) и практически не теряют поляризацию за счет многократного рассеяния.
Такие мюоны называются поверхностными.



Контроль остановок пучка

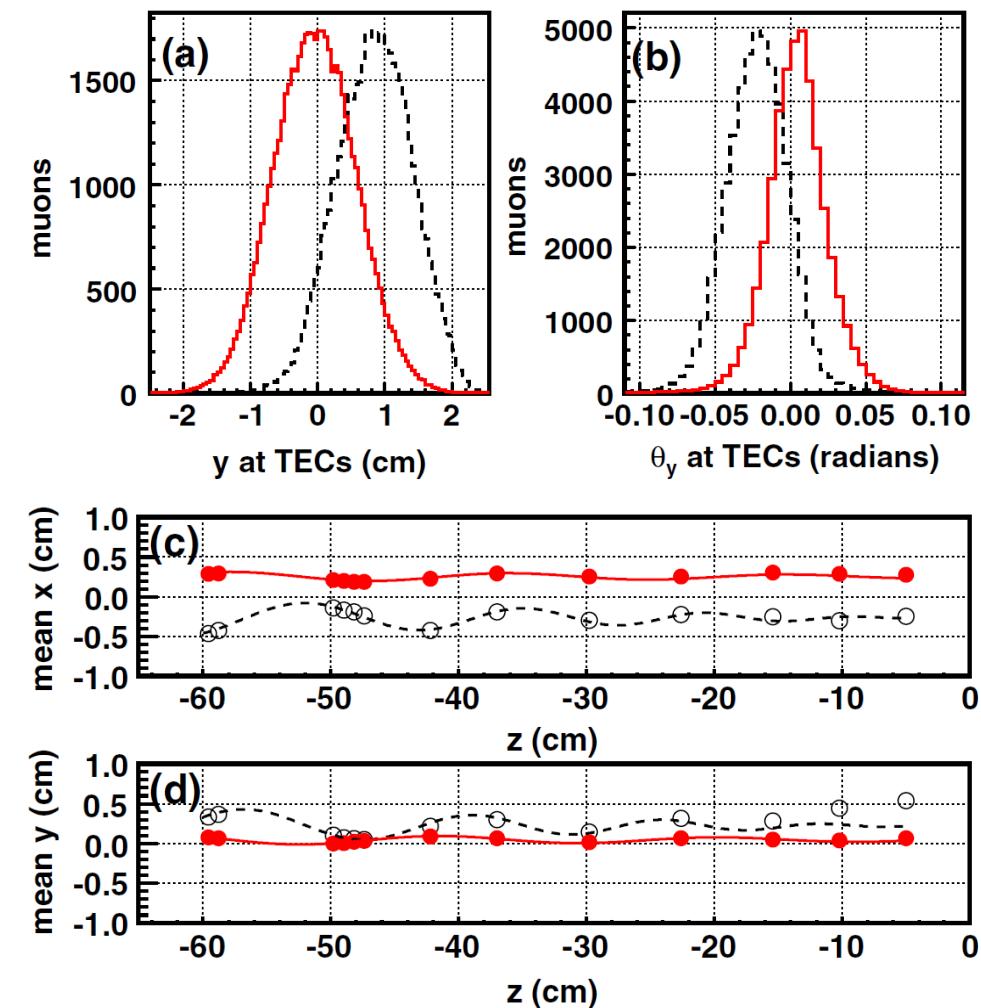
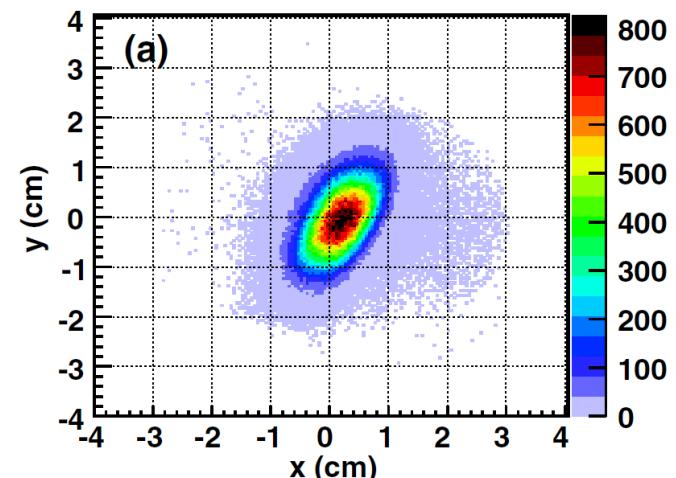
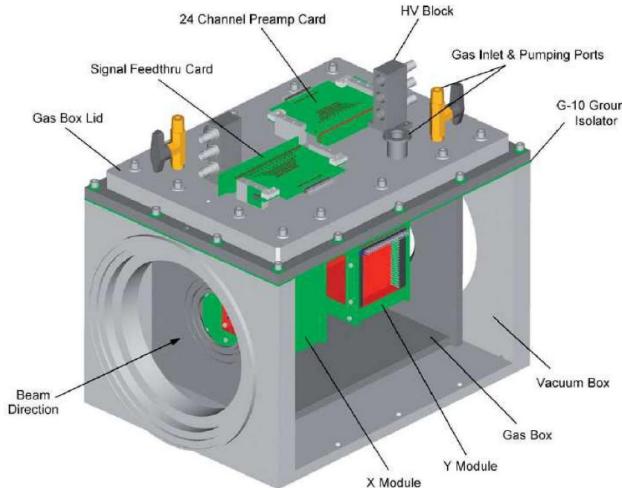
- Мюоны, входящие в спектрометр, пересекают специальный модуль, включающий газовый деградер, пленочный деградер, мюонный и позитронный сцинтилляционные счетчики
- Пленочный деградер выполнен в виде ленты, на которой были закреплены пленки различной толщины от 0 (открытое окно) до 1 мм
- Газовый деградер 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 поляризации пучка

Блок времяпроекционных камер использовался для контроля пучка мюонов:

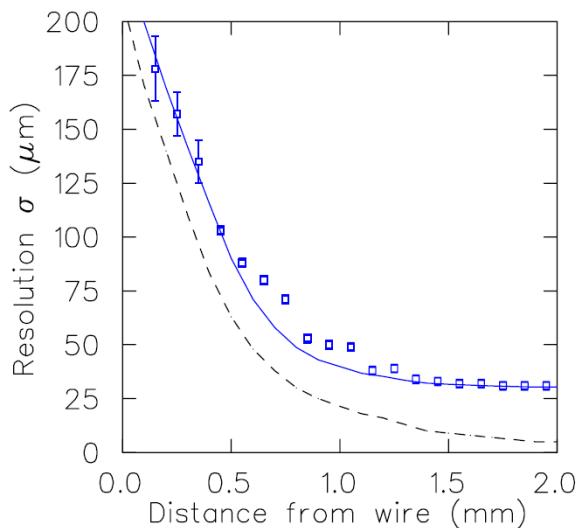
- Каждая камера имеет поперечное сечение чувствительной области $60 \times 60 \text{ мм}^2$ и длину по пучку 46 мм
- ВПК наполнены газом DME при давлении 60 Торр
- ВПК имели 100% эффективность восстановления треков мюонов с сигналами в среднем на 18 каналах из 24
- Угловое разрешение ВПК составляет ~ 3 мрад, пространственное разрешение, экстраполированное в середину зоны между X и Y модулями, равно ~ 150 мкм



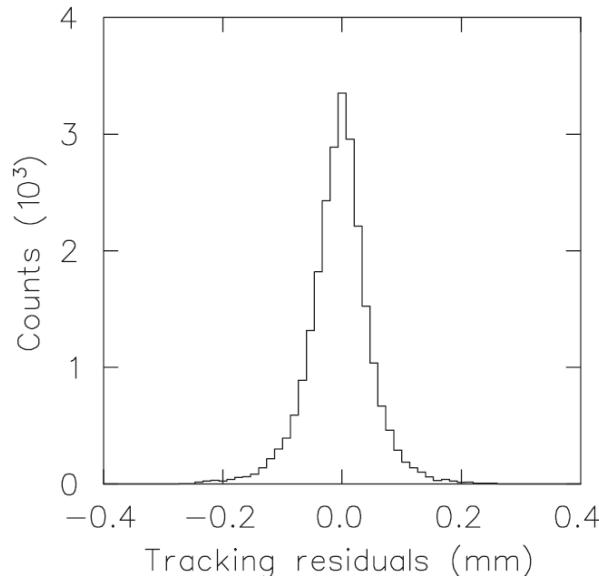
ВПК устанавливались в канале в начале и в конце набора данных

Пространственное разрешение

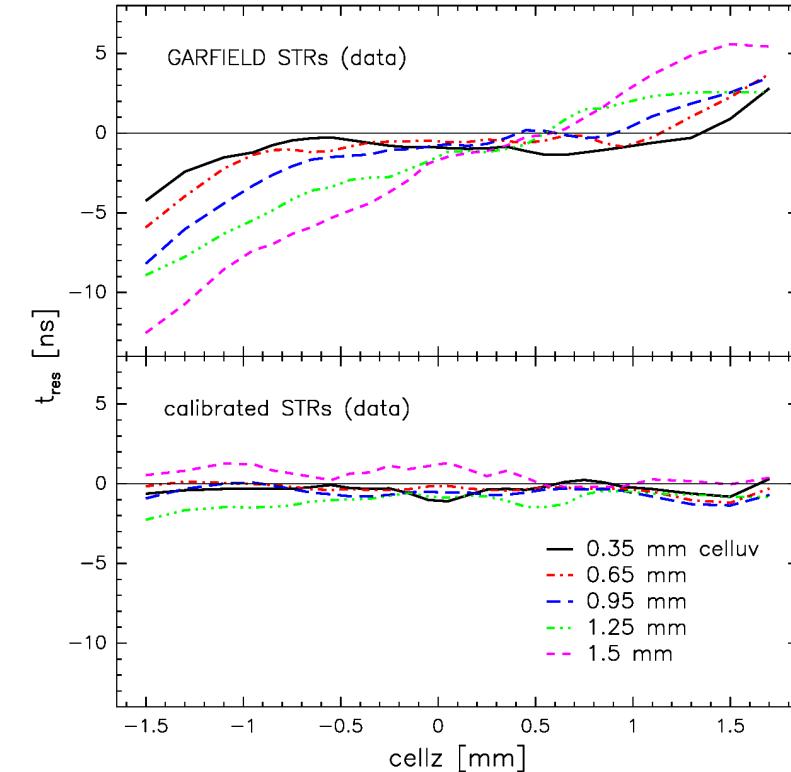
Пучок пионов с импульсом 120 МэВ/с при выключенном магнитном поле
Для уменьшения многократного рассеяния пионов использовались 8
плоскостей для построения треков и определялось разрешение девятой
плоскости



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



Точность восстановления
треков в одной из камер для
расстояний более 0.5 мм от
проводки. Полная ширина на
половине высоты составляет 80 мкм.



Временное разрешение в ячейке вдоль оси Z
для различных расстояний от проводки
при расчете пространственно-временных
соотношений при помощи GARFIELD
(вверху) и после калибровки при помощи
пучка (внизу).

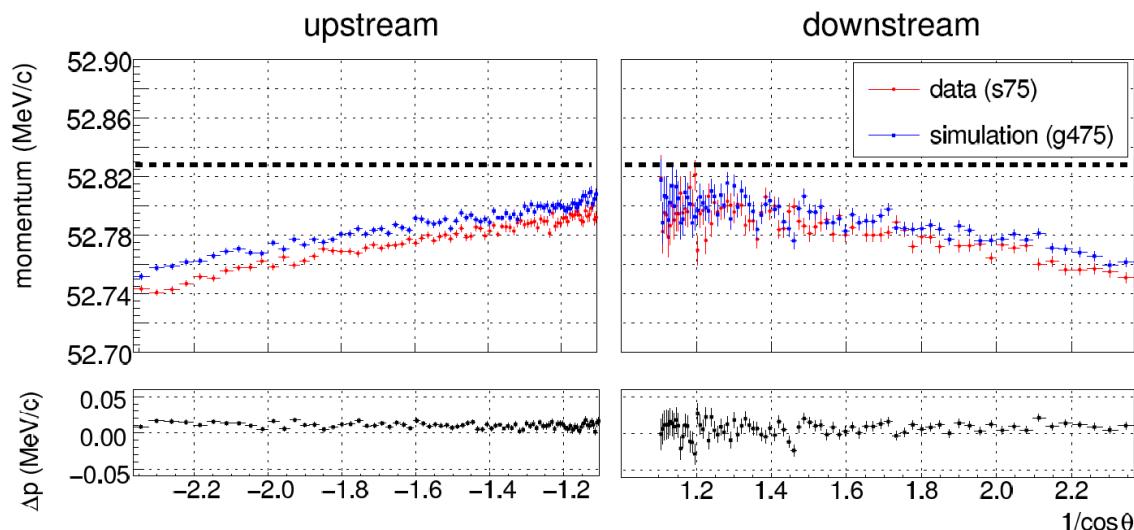
Получено пространственное разрешение
камер в диапазоне 50-100 мкм практически во
всем дрейфовом промежутке

Импульсное разрешение спектрометра

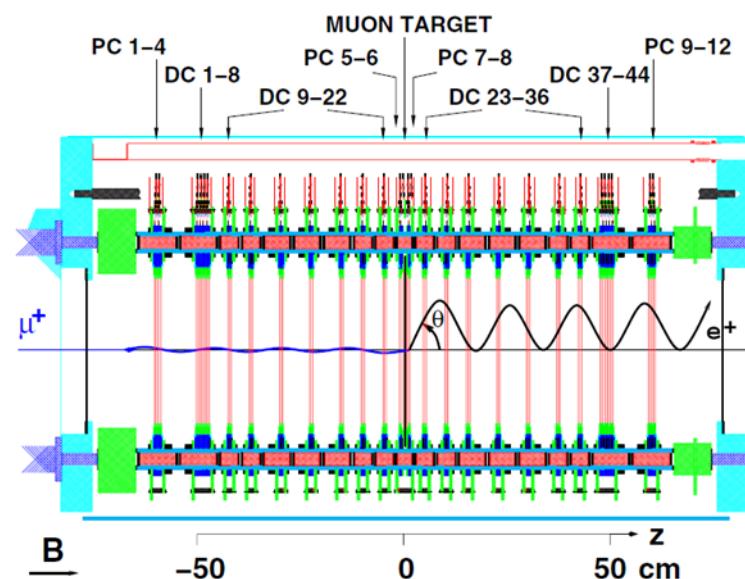
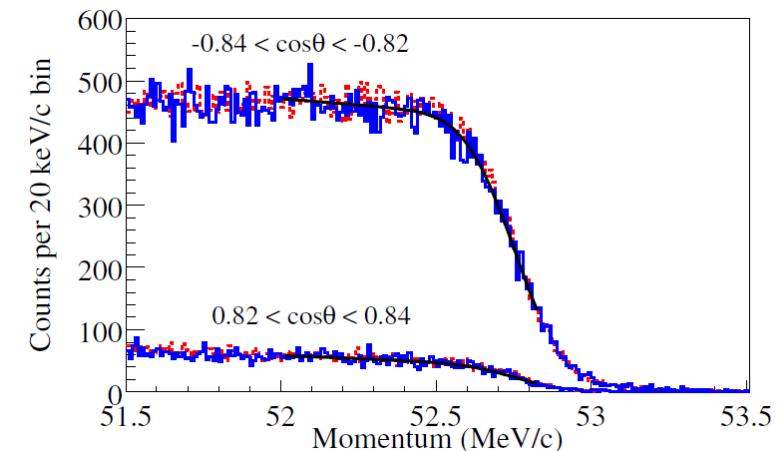
Энергетическая калибровка при любых углах θ определяется с использованием граничной энергии позитронов $E = 52.8$ МэВ и заключена в самом спектре.
Внешние калибровки в прежних экспериментах давали систематику $> 10^{-3}$.
Импульсное разрешение спектрометра определялось с использованием позитронов распада с импульсом $p > 52$ МэВ/с

Разрешение является функцией $1/\cos\theta$

Импульсное разрешение в пределах рабочего объема (70-160) кэВ/с



Моделированный спектр имеет большую величину по сравнению с измеренным спектром примерно на 10 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 проведке 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.



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 $\rho = 0.75 \pm 0.01$, $\eta = 0$, $P_{\mu\xi} = 1 \pm 0.01$, $\delta = 0.75 \pm 0.1$.

Параметры Мишеля, использовавшиеся при моделировании спектра позитронов, 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

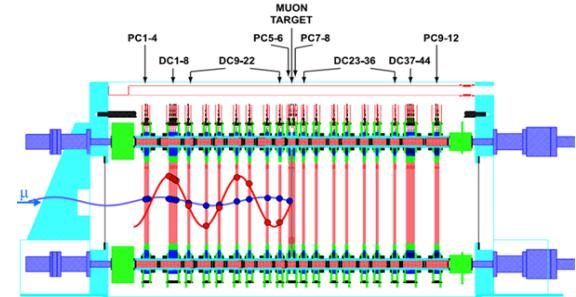
Моделированные данные

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 $z=-195\sim$ см определялись при помощи блока ВПК

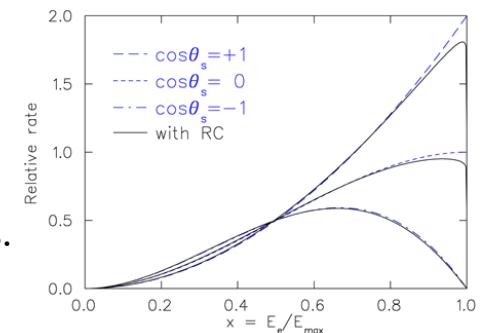


2. Моделирование отклика детектора

Монте-Карло моделирование включало полную геометрию установки с точным положением каждой проволочки камер и катодных плоскостей, материал конструкций камер. При моделировании треков мюонов и позитронов в детекторе использовалась измеренная карта магнитного поля

3. Спектр позитронов распада

При моделировании спектра позитронов распада брались сгенерированные 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 трех первых порядков.



4. Отклик камер

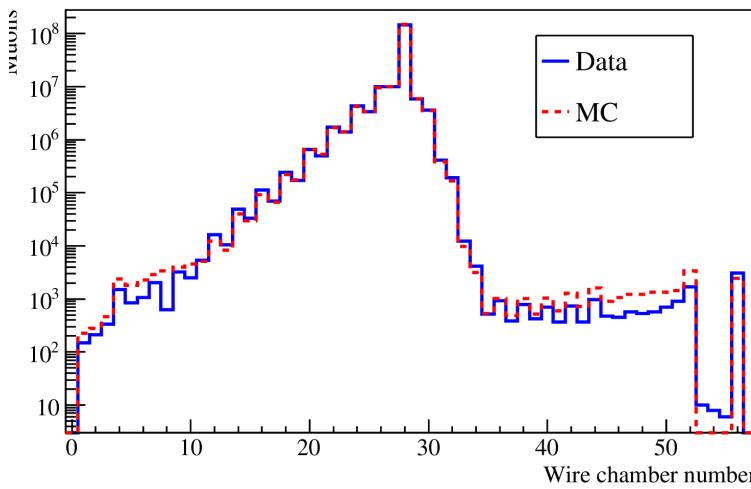
Включены параметры газа, газовое усиление для точного воспроизведения экспериментальных данных. Длина нечувствительной зоны проволоки 0.06 см и среднее время восстановления чувствительности 3 мкс. Время дрейфа электронов и координаты треков определялись при помощи программы GARFIELD с уточнением при помощи пучка.

Верификация моделированных данных

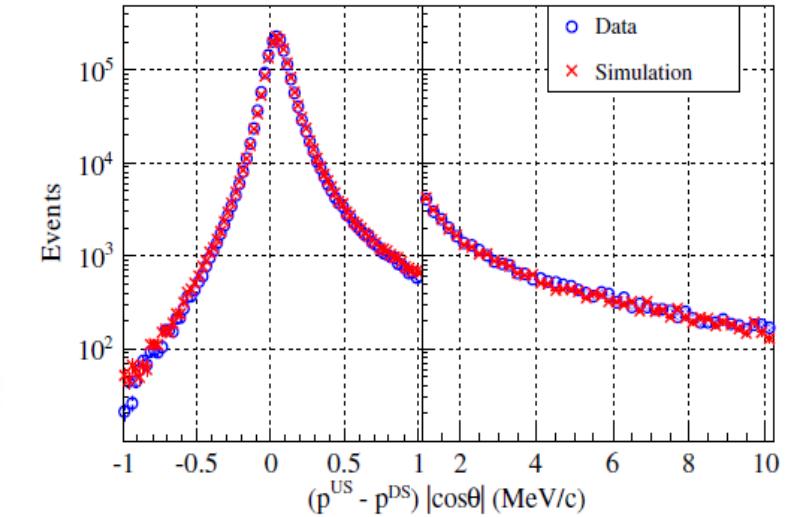
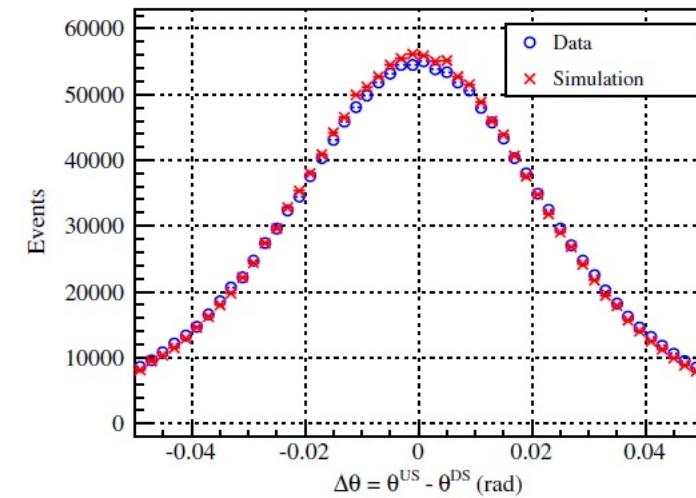
Моделированные и экспериментальные данные сверялись на всех этапах

Для сравнения экспериментальных и моделюемых 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



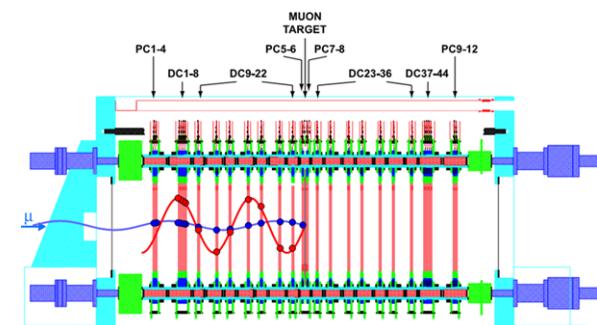
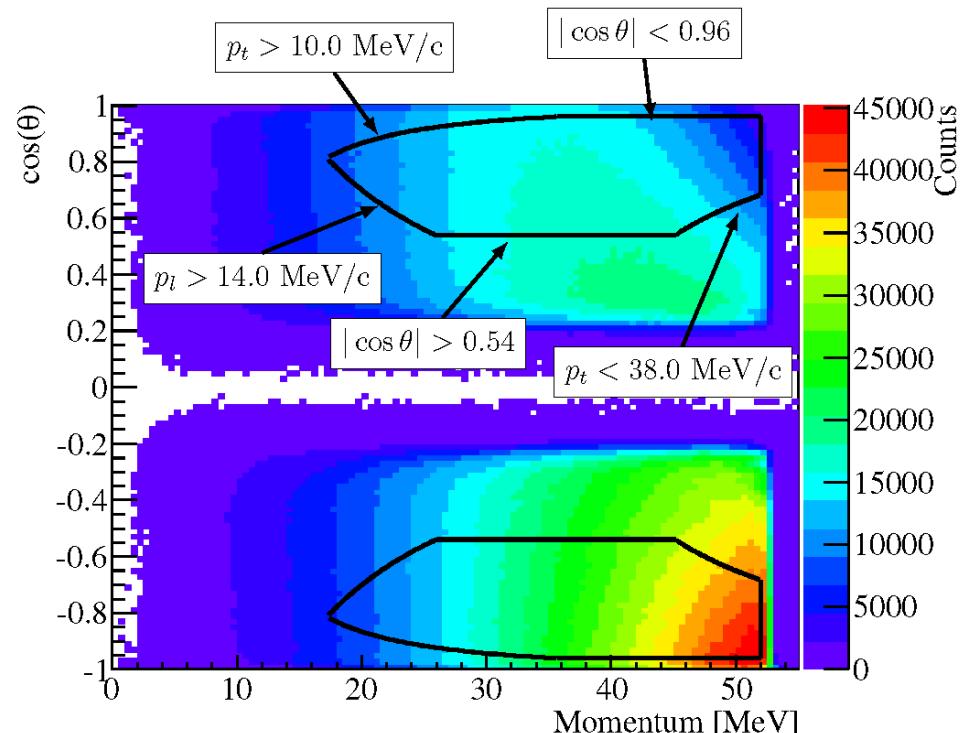
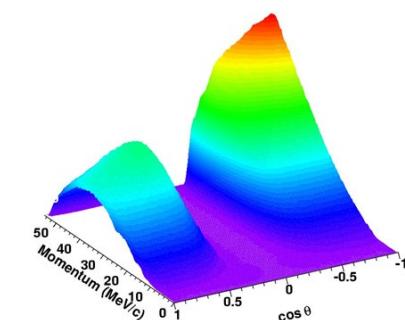
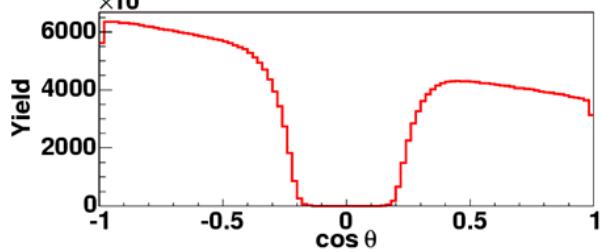
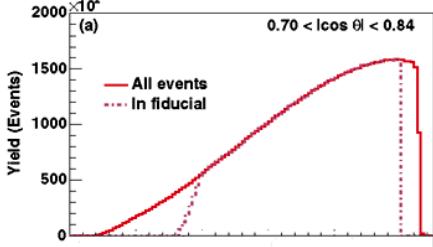
Взаимодействие позитронов в Ag мишени:
Остановка мюонов в начале спектрометра
Восстановление треков в двух частях независимо



Рабочий объем

Отбор спектра по рабочему объему:

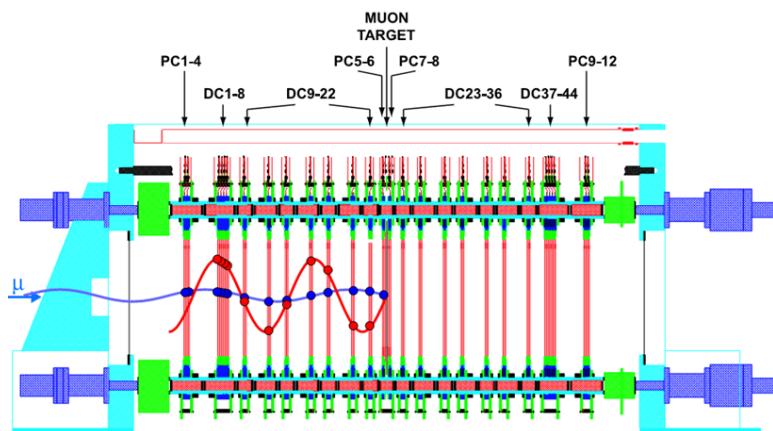
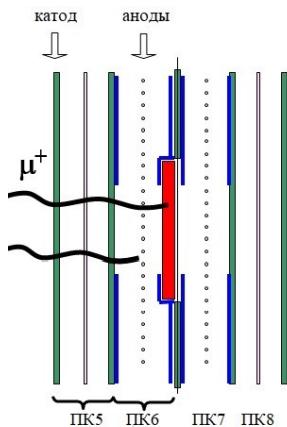
- $0.54 < |\cos\theta| < 0.96$: при малых и больших углах вылета позитронов реконструкция треков будет ненадежна
- $p < 52.0 \text{ МэВ/с}$: треки позитронов с импульсом $p > 52.0 \text{ МэВ/с}$ используются в энергетической калибровке и поэтому исключены из фильтрации параметров распада.
- $p_l > 14.0 \text{ МэВ/с}$: такое обрезание по продольной компоненте импульса исключает область с потенциальными неопределеностями в связи с геометрией расположения плоскостей
- $p_t < 38.0 \text{ МэВ/с}$: треки позитронов с большим поперечным импульсом могут выйти за пределы области чувствительности детекторов.
- $p_t > 10.0 \text{ МэВ/с}$: это ограничение исключает из анализа треки с малым радиусом спиралей треков.



Отбор событий

Отбор индивидуальных событий:

- Время пролета мюонов
- Тип события
- Остановка в ПК
- Радиус остановки в мишени (< 2.5 см)
- Длительность сигнала в ПК5 и ПК6
- Наличие трека позитрона
- Статус фита
- Заряд частицы (позитрон)
- Парное соответствие (наличие излома или пучкового позитрона)
- Расстояние между вершинами в мишени
- Время распада мюона (1050 – 9000 нс)



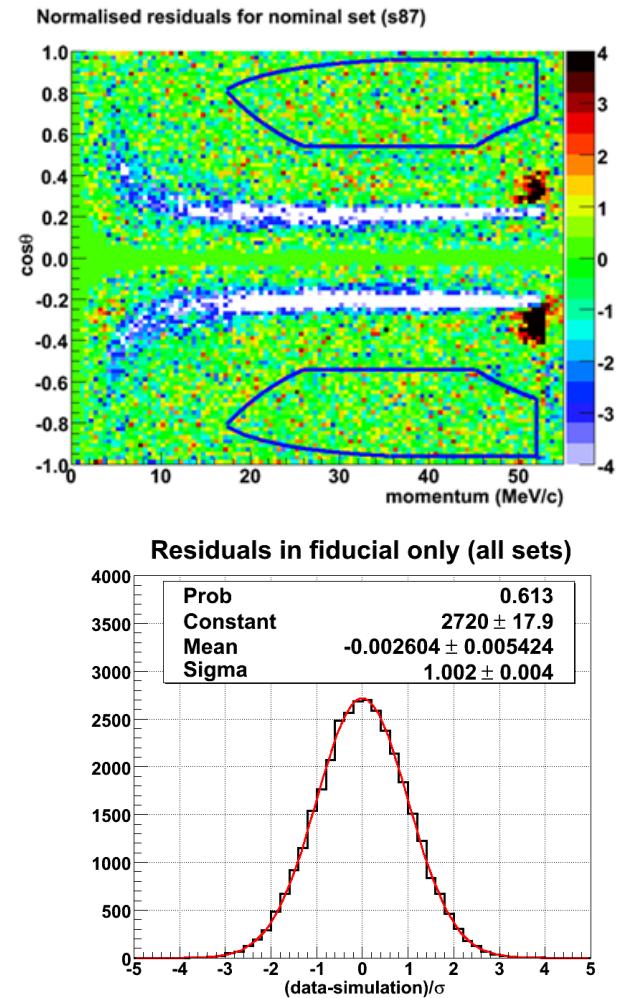
После отбора в спектрах для анализа оставались около 7% событий в экспериментальных данных и около 12% - в моделированных

Метод определения параметров Мишеля

- Метод определения параметров Мишеля использует линейную зависимость спектра позитронов от параметров Мишеля ρ и η и от произведения параметров $P_\mu \xi$ и $P_\mu \xi \delta$.
- При анализе использовались события, отобранные в спектре в рабочем объеме. Создается базовая гистограмма, содержащая бины данных Монте Карло и взвешенные бины производных спектров. Спектр делился на 2442 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

$$S_D = S_{MC} + \frac{\partial S}{\partial \eta} \Delta\eta + \frac{\partial S}{\partial \rho} \Delta\rho + \frac{\partial S}{\partial P_\mu \xi} \Delta(P_\mu \xi) + \frac{\partial S}{\partial P_\mu \xi \delta} \Delta(P_\mu \xi \delta)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial S}{\partial \eta} \right|_{\rho, P_\mu \xi, P_\mu \xi \delta} &= \frac{m_\mu}{4\pi^3} W_{e\mu}^4 G_F^2 \sqrt{x^2 - x_0^2} \cdot \frac{2}{9} (4x^2 - 3x - x_0^2), \\ \left. \frac{\partial S}{\partial \rho} \right|_{\eta, P_\mu \xi, P_\mu \xi \delta} &= \frac{m_\mu}{4\pi^3} W_{e\mu}^4 G_F^2 \sqrt{x^2 - x_0^2} \cdot x_0 (1 - x), \\ \left. \frac{\partial S}{\partial P_\mu \xi} \right|_{\eta, \rho, P_\mu \xi \delta} &= \frac{m_\mu}{4\pi^3} W_{e\mu}^4 G_F^2 (x^2 - x_0^2) \cdot \frac{1}{3} \cos\theta (1 - x), \\ \left. \frac{\partial S}{\partial P_\mu \xi \delta} \right|_{\eta, \rho, P_\mu \xi} &= \frac{m_\mu}{4\pi^3} W_{e\mu}^4 G_F^2 (x^2 - x_0^2) \cdot \frac{2}{9} \cos\theta (4x - 4 + \sqrt{1 - x_0}) \end{aligned}$$

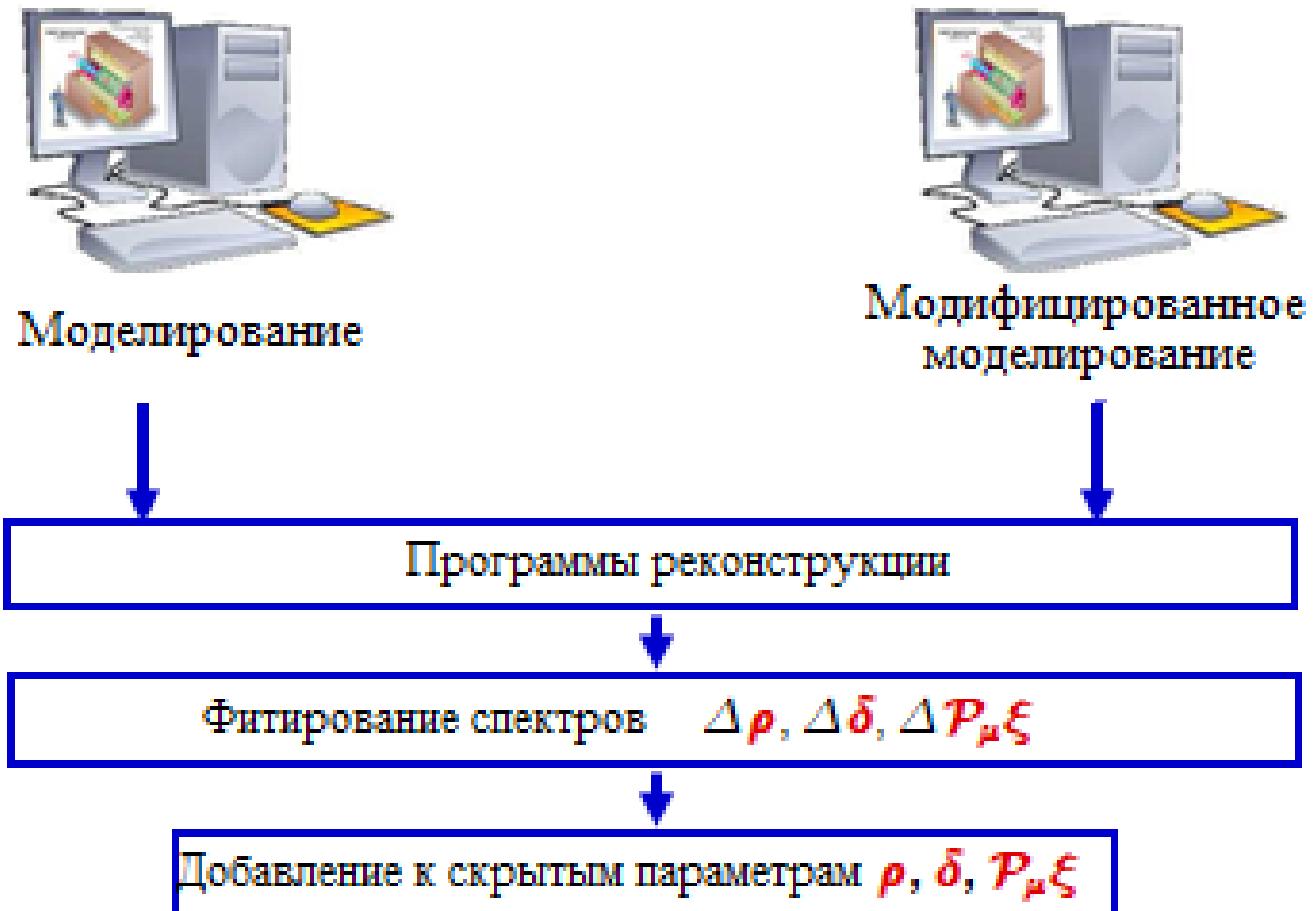


Систематические неопределенности

- 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

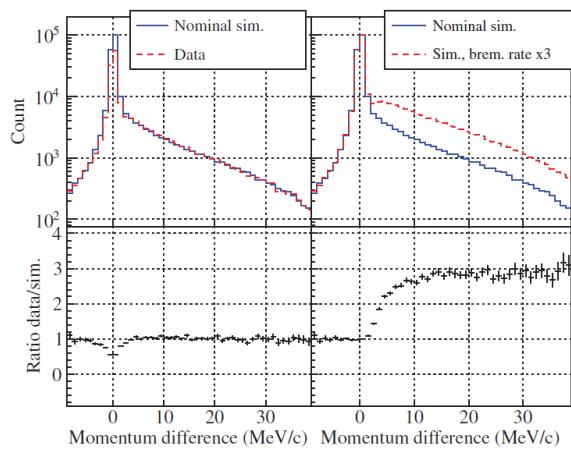
λ - один из параметров Мишеля (ρ , δ или ξ)

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

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

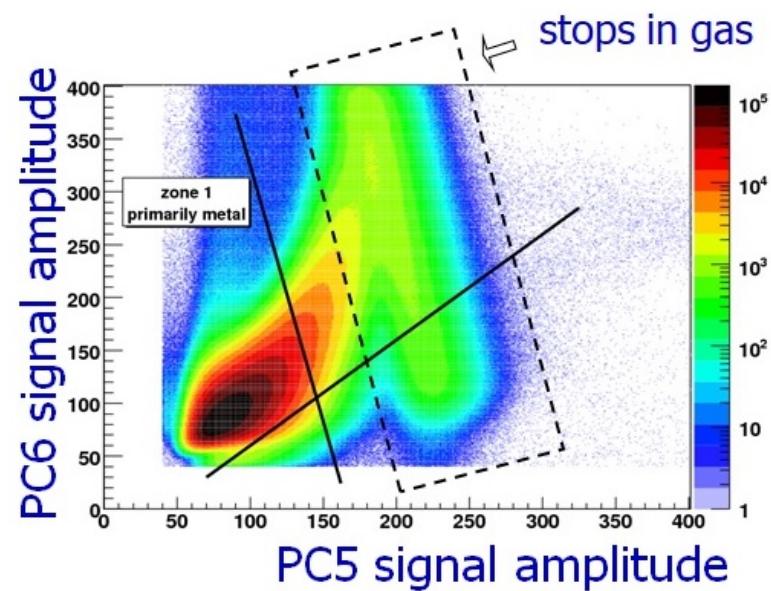
Остановки в начале спектрометра

Сравнение экспериментального и моделированного, моделированного и моделированного с 3x-кратной частотой тормозного излучения



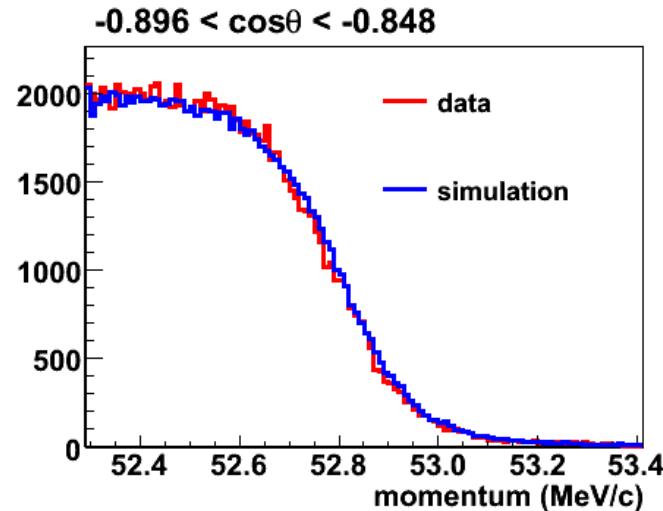
величина
неопределенности
параметров Мишеля
 ρ , δ и $R\xi$
составляет
 $\pm 1.8 \times 10^{-4}$,
 $\pm 1.6 \times 10^{-4}$ и
 $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ для Ag
мишени

2. Остановки в мишени/газе ПК6



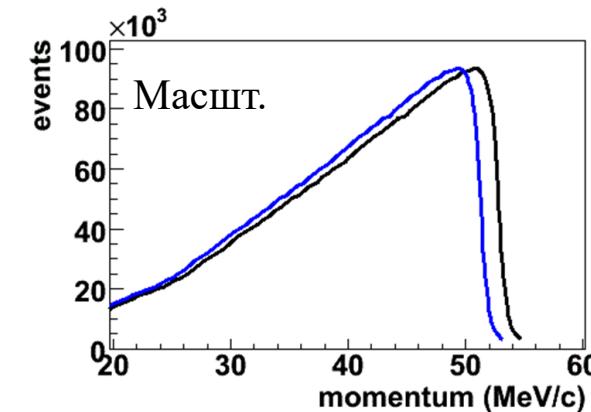
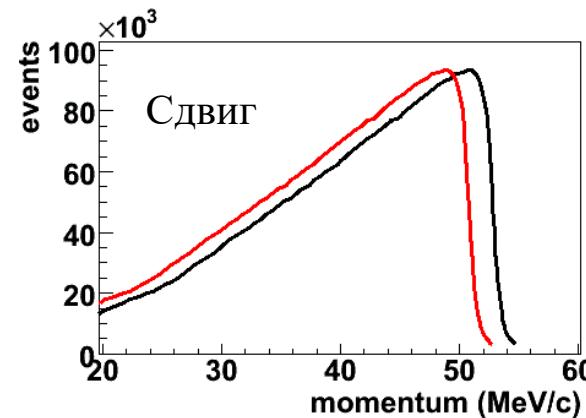
Отсутствие отбора остановок в мишени приведет к изменению калибровок. Для проверки этого эффекта проводился анализ данных с учетом длительности сигнала с ПК6 и без такого отбора. Это приводит к изменению параметров ρ и δ на 0.04×10^{-4} и 0.04×10^{-4} соответственно

Оценка систематических неопределенностей



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 $\approx 2\text{-}3$ кэВ/с после калибровки



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

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:

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

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

Раунд II:

Мишенный 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:

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

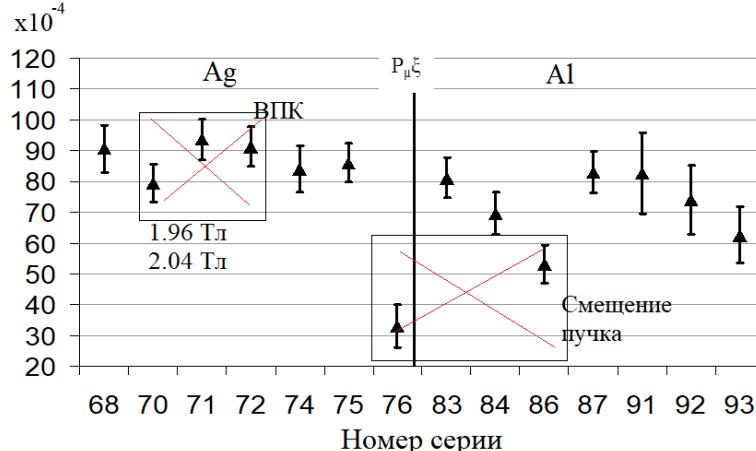
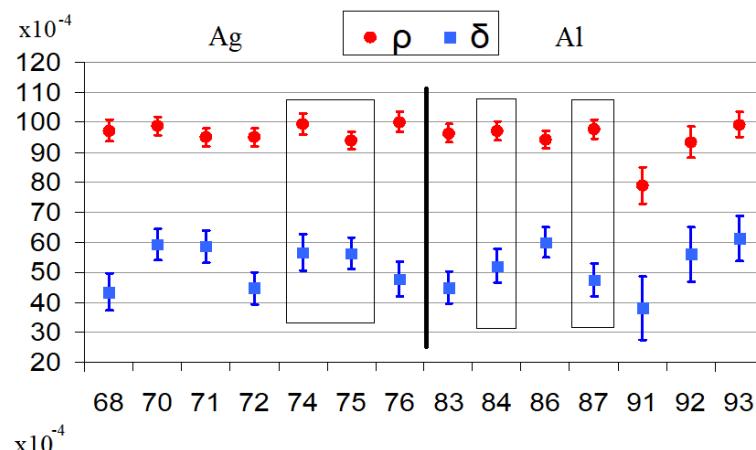
Результаты были включены в данные Particle Data Group в 2008 году как наиболее точные

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:



Источник неопределенности	Величина неопределенности ($\times 10^{-4}$)		
	ρ	δ	$P_\mu\xi$
<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:

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

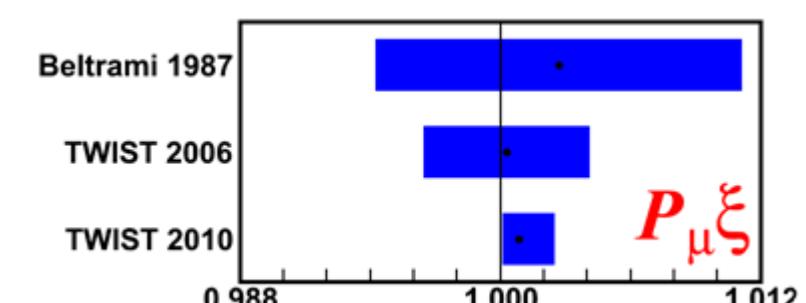
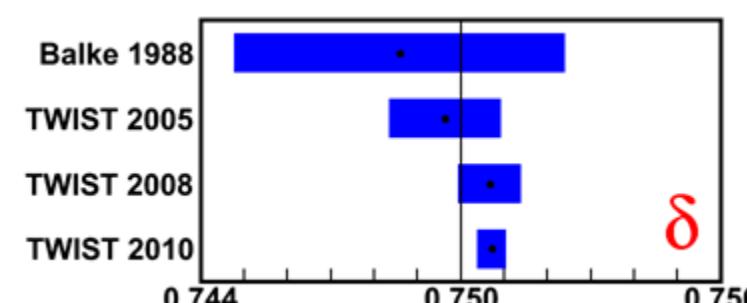
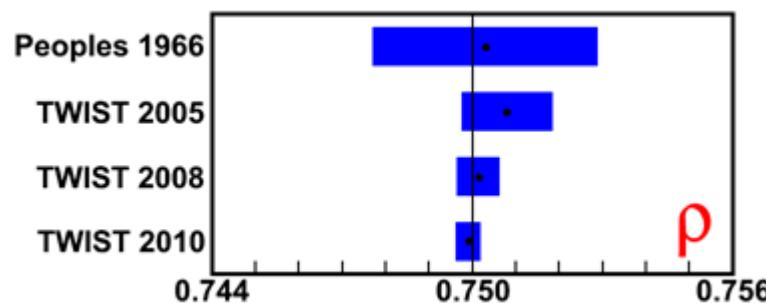
$$\delta = 0.75049 \pm 0.00021(\text{stat}) \pm 0.00027(\text{syst})$$

$$P_\mu \xi = 1.00084 \pm 0.00029(\text{stat}) \pm 0.00165(\text{syst})$$

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 (W_L) бозон Стандартной модели и правый массивный калибровочный бозон W_R с массовыми собственными состояниями W_1 и W_2 связаны соотношениями

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

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

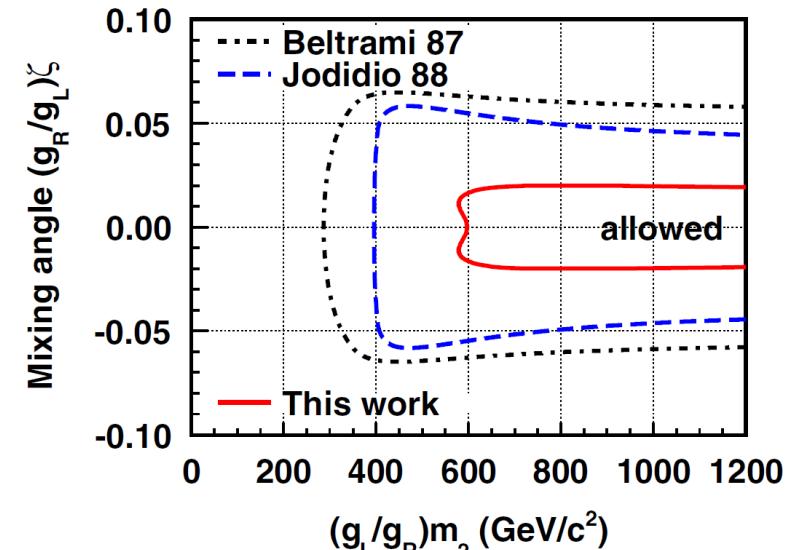
$$\begin{aligned} P_\mu &\simeq 1 - 2t_\theta^2 - 2\zeta_g^2 - 4t_\theta\zeta_g \cos(\alpha + \omega) \\ \xi &\simeq 1 - 2(t^2 + \zeta_g^2) \\ \rho &\simeq \frac{3}{4}(1 - 2\zeta_g^2) \end{aligned}$$

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 существовавшим 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 существовавшим 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 $g_{\mu e}$

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

$$Q_R^\mu = Q_{RR} + Q_{LR} = \frac{1}{4}(|g_{LR}^S|^2 + |g_{RR}^S|^2) + |g_{LR}^V|^2 + 3|g_{LR}^T|^2 + |g_{RR}^V|^2$$

$$Q_R^\mu = \frac{1}{2}(1 + \frac{1}{3}\xi - \frac{16}{9}\xi\delta)$$

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

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

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

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

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)

Другие результаты, полученные на спектрометре TWIST

Кроме определения с рекордной точностью параметров Мишеля на спектрометре TWIST был проведен поиск процесса с нарушением лептонного числа в двухчастичном распаде $\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$ и установлены новые пределы на рождение массивных и безмассовых X^0 бозонов [R. Bayes, J.F. Bueno, Yu.I. Davydov et al. *Search for two body muon decay signals*. Phys. Rev. D, Vol. 91, 052020 (2015). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.91.052020>]. В ходе этого поиска не было обнаружено доказательств существования распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$. Ограничения на эти распады для диапазона масс $13 \text{ МэВ}/c^2 < m_{X^0} < 80 \text{ МэВ}/c^2$, где распад X^0 не наблюдается, были улучшены в 10 раз по сравнению с ранее опубликованными ограничениями.

Также было проведено исследование распадов отрицательно заряженных мюонов, захватываемых на оболочку атомов алюминия [A. Grossheim, R. Bayes, J.F. Bueno et al. *Decay of negative muons bound in ^{27}Al* . Phys. Rev. D, Vol. 80. P. 052012 (2009)]. В данной работе спектрометром измерялся спектр электронов распада вплоть до 70 МэВ и получено время жизни отрицательных мюонов, захватываемых на оболочку атомов ^{27}Al , $t = (864.6 \pm 1.2) \text{ нс}$. Это было первым измерением времени жизни мюонов, захваченных на оболочку атомов алюминия, и одним из наиболее точных измерений спектра электронов от распада захваченных на орбиту мюонов.

Положения выносимые на защиту

- Новая методика построения проволочных камер, разработанная и использованная для экспериментальной установки для измерения параметров Мишеля, позволила создать прецизионные планарные камеры для работы в магнитном поле. Изготовленные на основе данной методики 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 $\sigma=3.5\text{мкм}$.
- Метод калибровки пространственно-временных соотношений на основе пакета GARFIELD и измерений с пучком позволил получить пространственное разрешение менее 100 мкм во всем дрейфовом промежутке камер, наполненных газом DME, при напряженности магнитного поля 2 Тл.
- Методика оценки мертвого времени при переходе камеры в самогасящийся стримерный (СГС) режим, разработанная при выполнении эксперимента, позволила оценить мертвую зону на проволоке после прохождения мюона. Продемонстрировано, что при переходе камер в СГС режим газ DME не теряет гасящих свойств и имеет мертвую зону на уровне $70 \cdot 10^{-3} \text{ мкс}\cdot\text{см}$, что на три порядка меньше, чем в традиционных газовых смесях на основе благородных газов. Полученные оценки мертвого времени и зоны нечувствительности камер использованы при моделировании отклика камер после прохождения мюонов.
- Методика исследования камер низкого давления в условиях высокой приведенной напряженности электрического поля была разработана и использована в процессе работы с пучком мюонов. В ходе исследований независимо обнаружено, объяснено и, по нашим данным, впервые экспериментально продемонстрировано, что при увеличении приведенной напряженности электрического поля в камерах с одинаковой геометрией и равными приложенными напряжениями газовое усиление становится большим на проволоке большего диаметра. Обнаружение этого эффекта позволило использовать в ВПК проволоки диаметрами 25 мкм и 50 мкм вместо планировавшихся 10 мкм, что повысило надежность и стабильность работы детектора.

Положения выносимые на защиту (2)

- Впервые создана экспериментальная установка для одновременного измерения параметров Мишеля ρ , δ , $P_\mu\xi$ в распадах положительных мюонов. 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} . Это стало возможным благодаря выбранной геометрии камер и всей установки. Высокая точность геометрических параметров камер существенно упростила моделирование отклика детекторов и позволила уменьшить систематические ошибки при определении параметров Мишеля. Импульсное разрешение спектрометра является функцией $1/|\cos\theta|$, где θ - угол вылета позитрона относительно оси магнитного поля, и вблизи кинематической границы, экстраполированное к $p=52.83$ МэВ/с, составляет 58 кэВ/с. Все предыдущие измерения параметров Мишеля в распадах мюонов, проводившиеся до нас другими группами, выполнены на экспериментальных установках, позволявших измерять только один из параметров.
- 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 , $P_\mu\xi$:

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

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

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

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

Заключение

- В результате выполнения диссертационной работы решена задача по разработке новой методики изготовления планарных проволочных камер с рекордными характеристиками и создания на их основе установки для определения нескольких параметров Мишеля с предельно высокой чувствительностью в распадах положительных мюонов, позволившая провести измерение трех параметров Мишеля с рекордной точностью и получить новые данные для проверки Стандартной модели.
- Измеренные с рекордной точностью параметры Мишеля позволили в рамках обобщенной LRS модели установить новый предел на угол смешивания в мюонном секторе $|g_R/g_L)\zeta|<0.020$ (90% C.L.) и новое рекордное ограничение на вероятность распада правого мюона в любой тип электрона $Q_R^\mu < 0.00082$ (90%CL), запрещенный в Стандартной модели
- Созданный спектрометр фактически был многофункциональной установкой. Кроме определения с рекордной точностью параметров Мишеля на нем был проведен поиск процесса с нарушением лептонного числа в двухчастичном распаде $\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$ и установлены новые пределы на рождение массивных и безмассовых X^0 бозонов. Также было проведено исследование распадов отрицательно заряженных мюонов и получено одно из наиболее точных измерений времени жизни отрицательных мюонов, захватываемых на оболочку атомов ^{27}Al , $t=(864.6\pm1.2)ns$ и одно из наиболее точных измерений спектра электронов от распада захваченных на орбиту мюонов.

Спасибо за внимание!