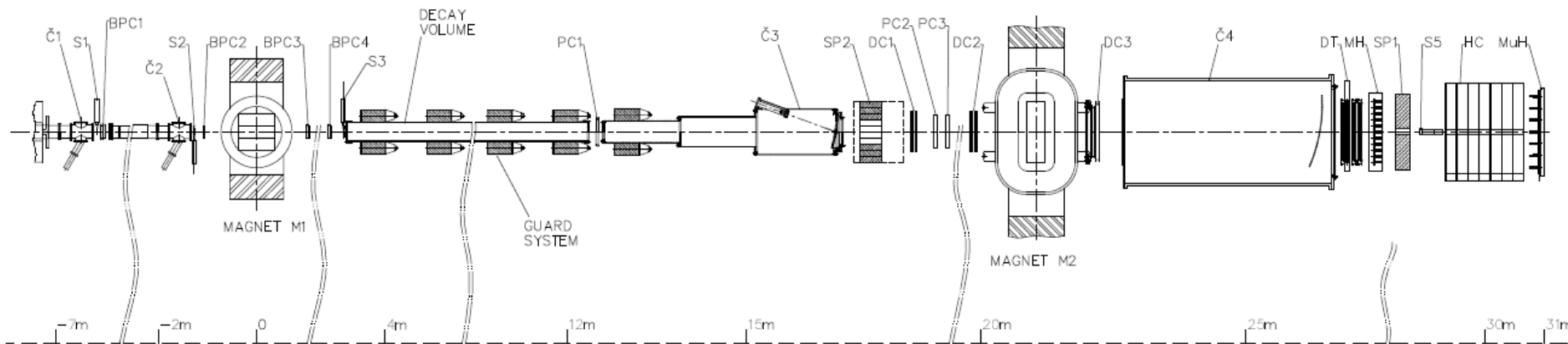


# Каонная физика на У-70

- Анализ данных с установки ИСТРА+
- Статус эксперимента «ОКА»
- R&D по эксперименту «KLOD»

# Исследование распада $K \rightarrow \mu \nu \gamma$ на установке ИСТРА+

Установка ИСТРА+ (ИЯИ-РАН, ОИЯИ, ИФВЭ)



$p \sim -25 \text{ GeV}$  ;  $\Delta p/p \sim 1.5\%$  ;  $K^- \sim 3\%$  ;  $I \sim 3 \cdot 10^6 / 1.9 \text{ sec}$

$$T = S_1 * S_2 * S_3 * \bar{S}_4 * \check{C}_0 * \check{C}_1 * \check{C}_2 * \bar{S}_5 * (\Sigma_{SP1} > \text{mip})$$

Основная статистика набрана в Декабре 2001 г.  $\sim 1000\text{M}$  событий и  $\sim 500\text{M}$  Geant MC

# K<sub>μ2γ</sub> : теория и эксперимент

$$x = \frac{2E_\gamma}{M_K}, y = \frac{2E_\mu}{M_K}.$$

$$\rho(x, y) = \rho_{IB} + \rho_{SD} - \rho_{INT}$$

$$\rho_{IB} = A_{IB} f_{IB}(x, y)$$

$$\rho_{SD} = A_{SD} ((F_V + F_A)^2 f_{SD+} + (F_V - F_A)^2 f_{SD-})$$

$$\rho_{INT} = A_{INT} ((F_V + F_A) f_{INT+} + (F_V - F_A) f_{INT-})$$

$$f_{IB} = \left( \frac{(1-y+r)}{x^2(x+y-1-r)} \right) (x^2 + 2(1-x)(1-r) - \frac{2xr(1-r)}{(x+y-1-r)})$$

$$f_{SD+} = (x+y-1-r)((x+y-1)(1-x) - r)$$

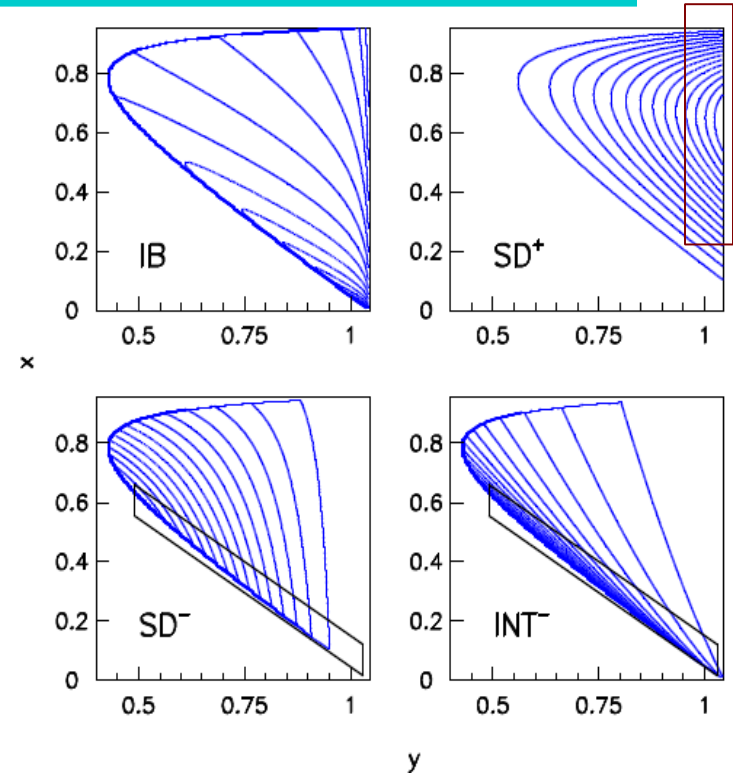
$$f_{SD-} = (1-y+r)((1-x)(1-y) + r)$$

$$f_{INT+} = \left( \frac{1-y+r}{x(x+y-1-r)} \right) ((1-x)(1-x-y) + r)$$

$$f_{INT-} = \left( \frac{1-y+r}{x(x+y-1-r)} \right) (x^2 - (1-x)(1-x-y) - r)$$

$$r = \left( \frac{M_\mu}{M_K} \right)^2, A_{IB} = \Gamma_{K\mu 2} \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{(1-r)^2}$$

$$A_{SD} = \Gamma_{K\mu 2} \frac{\alpha}{8\pi} \frac{1}{r(1-r)^2} \left( \frac{M_K}{F_K} \right)^2, A_{INT} = \Gamma_{K\mu 2} \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{(1-r)^2} \left( \frac{M_K}{F_K} \right)$$



Теория: O(p4)  $\chi$ PT J.Bijnens et al., Nucl.Phys.B396(1993)81

O(p6)  $\chi$ PT+LFQM C.H.Chenet et al., hep-ph/0710297

O(p6)  $\chi$ PT+VDM C.Q.Geng et al., Nucl.Phys.B684(2004)281

$F_V + F_A = 0.137$  ;  $F_V - F_A = 0.055$

$F_V + F_A = 0.116$  ;  $F_V - F_A = 0.048$

$F_V + F_A = 0.142$  ;  $F_V - F_A = 0.070$

Эксп. : E787(BNL) Phys.Rev.Lett.85(2000)2256

$|F_V + F_A| = 0.155 \pm 0.008$ ;  $-0.04 < F_V - F_A < 0.24$

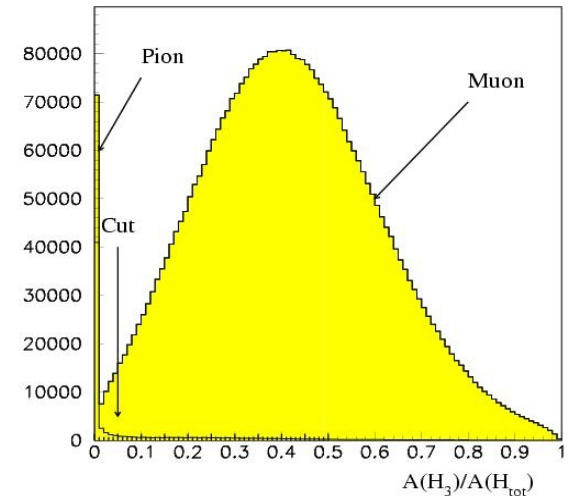
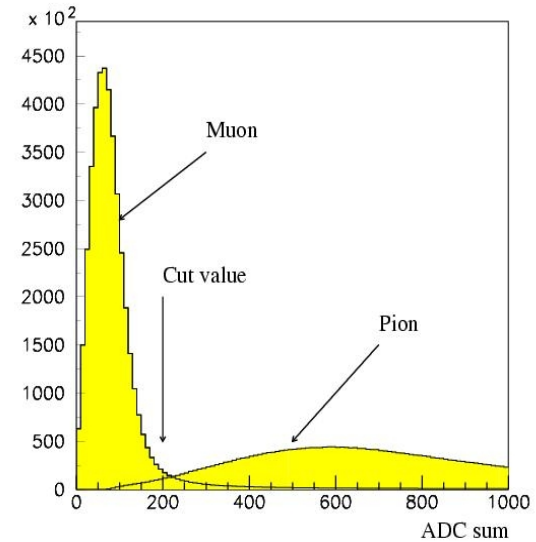
E865(BNL) Phys.Rev.Lett.89(2002)061803 ( $\mu\nu e^+ e^-$ )  $F_V + F_A = 0.147 \pm 0.021$ ;  $F_V - F_A = 0.077 \pm 0.02$

# Отбор событий $K_{\mu 2\gamma}$

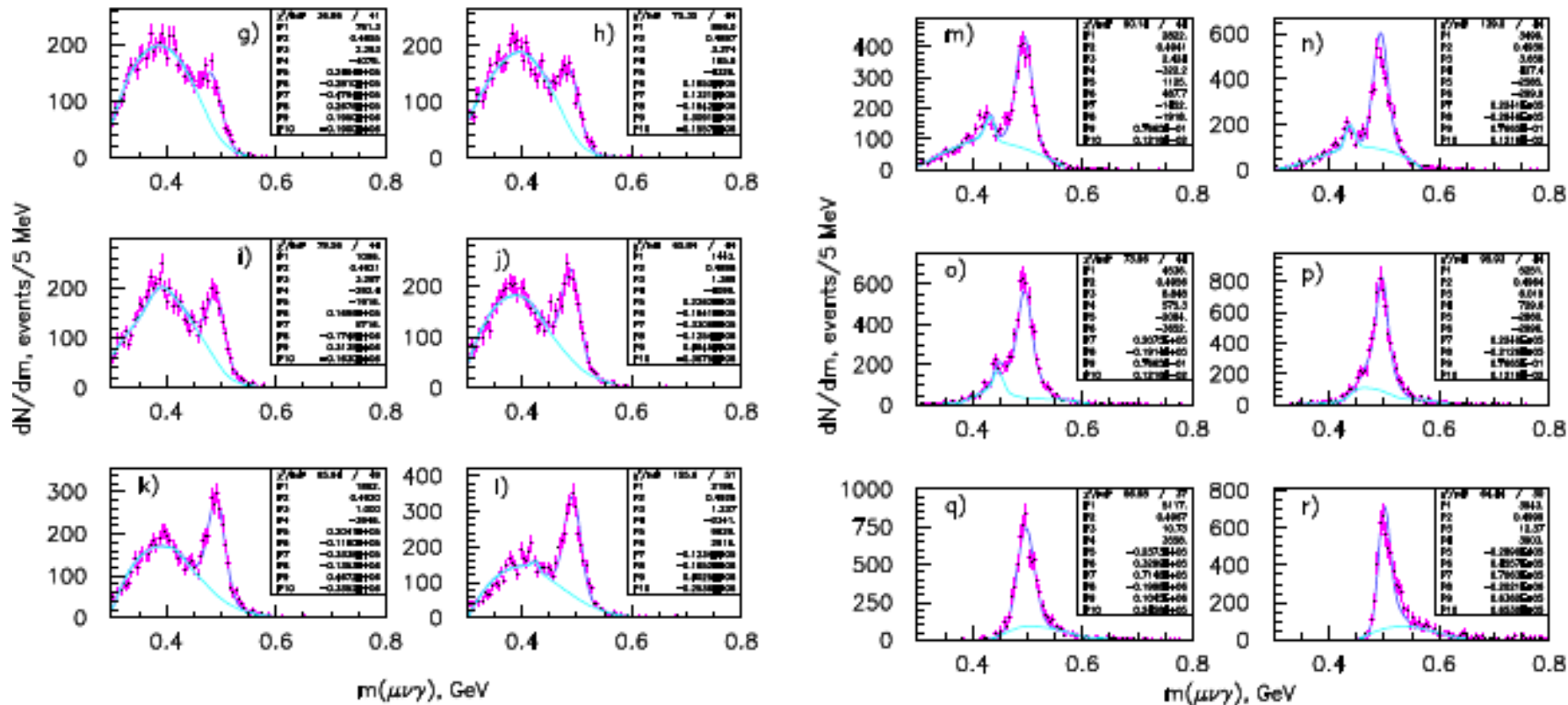
- Один заряженный трек и один ливень в SP1
- $400 < Z_{\text{vtx}} < 1600$  см.
- Идент.  $\mu$  по SP1 и HSCAL  $\text{eff}_{\mu} = 88\%$   $\mu \leftrightarrow \pi = 3\%$
- $E_K - E_{\mu} - E_{\gamma} > 0$
- VETO: нет сигналов в SP2 и GS

Сигнал  $K_{\mu 2\gamma}$  определяется по  $m_{\mu\nu\gamma}$ ,  $\vec{p}_{\nu} = \vec{p}_K - \vec{p}_{\mu} - \vec{p}_{\gamma}$ ,  $m_{\nu} = 0$

Анализ проводился в области  $1.045 < x+y < 1.15$ ,  $\Delta y = 0.03$



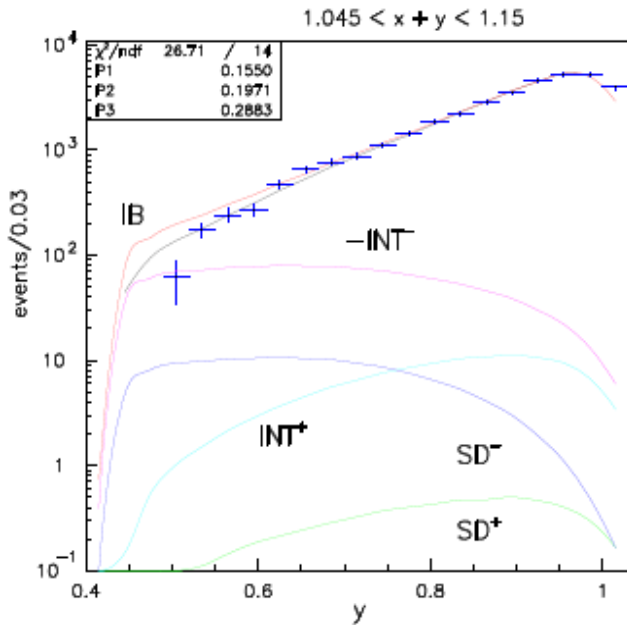
# $M_{\mu\nu\gamma}$ , $1.045 < x+y < 1.15$ , $y=0.49 \div 1$ , $\Delta y=0.03$



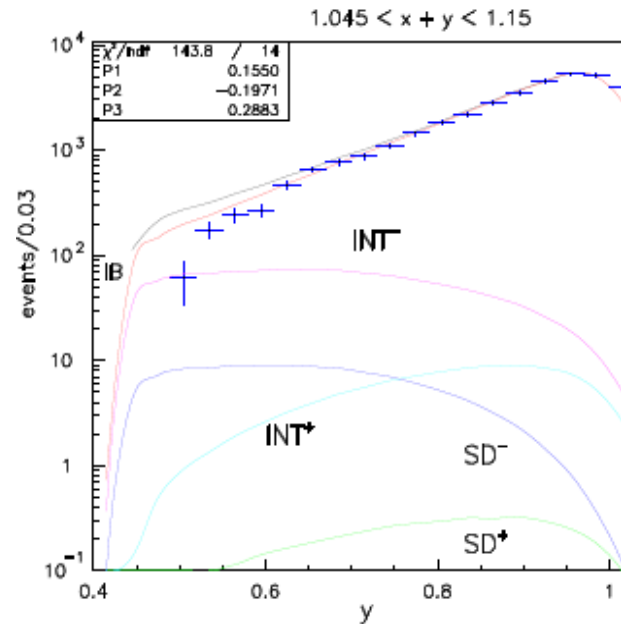
Сигнал параметризуется двумя Гауссианами (параметры из МС); фон- МС+полином

Полное число событий  $K_{\mu 2\gamma} \sim 20K$

# Определение $F_V - F_A$



$$F_V - F_A = 0.197 \pm 0.05$$



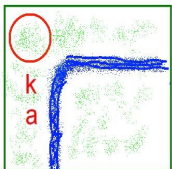
Эффект изменения знака  $F_V - F_A$

Систематика оценивалась путем изменения параметризации фона, изменения диапазона фитирования по  $-y$ - и скейлинга ошибок

$$F_V - F_A = 0.197 \pm 0.05 \pm 0.03$$

Теория:  $F_V - F_A = 0.05 \div 0.07$  отклонение  $\sim 2\sigma$

ИСТРА+ впервые наблюдает интерференцию тормозного и структурного излучения (INT-) в распаде  $K \rightarrow \mu \nu \bar{\gamma}$ , определена разница векторной и аксиальной констант



# Эксперимент ОКА- “Опыты с Каонами” на сепарированном $K^\pm$ пучке У-70

## Совместный эксперимент ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ

«Обычные» эксперименты с каонами ограничены % содержанием каонов в пучке (ИСТРА- 3%).

Два способа увеличения светимости:

- Несепарированные пучки сверхвысокой интенсивности (NA-62  $2.5 \times 10^9 / 4.8 \text{ sec}$ )
- Сепарированные(обогащенные) пучки средней интенсивности

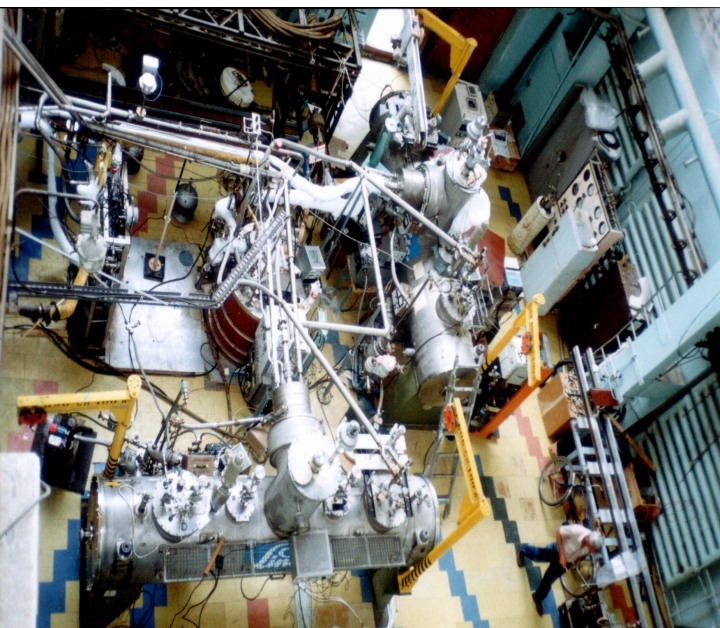
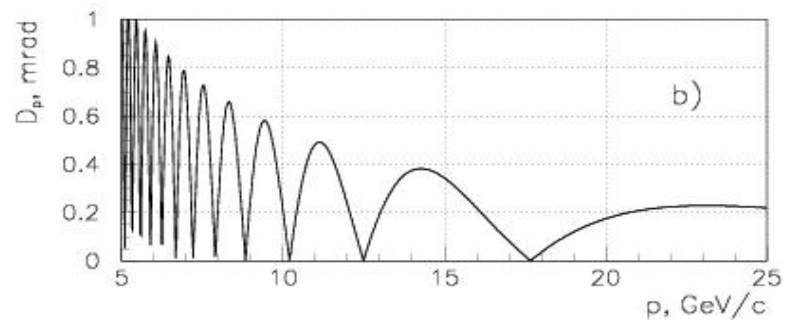
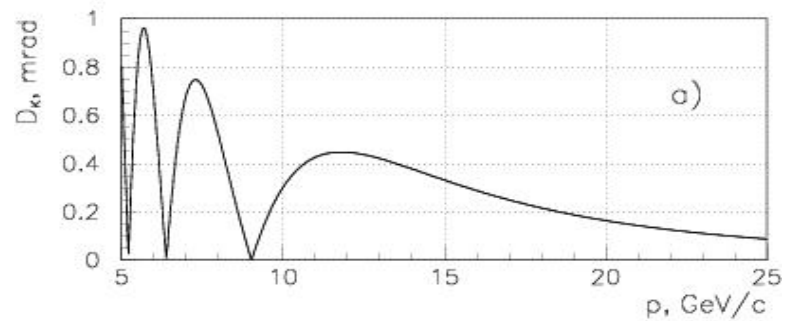
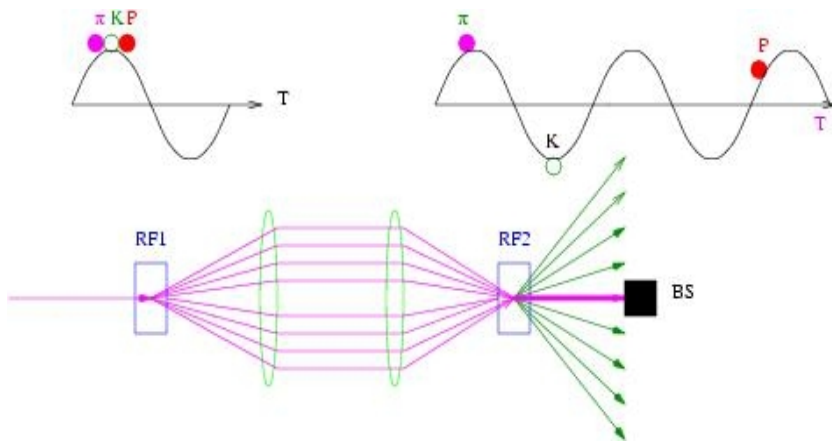
При энергии  $< 1 \text{ ГэВ}$  используются электростатические ЕХВ дефлекторы(Е949)

В эксперименте «ОКА» используются сверхпроводящие СВЧ-дефлекторы построенные в Карслруэ и использовавшиеся в ЦЕРН на SPS:

- Рабочая частота 2865 Мгц
- Рабочая температура  $\sim 1.8 \text{ К}$
- Отклоняющее поле  $\sim 1 \text{ МВ/м}$

В 1998 г. переданы в ИФВЭ - начало проекта (сессия ОЯФ ИТЭФ 17 Ноября 1998г.)

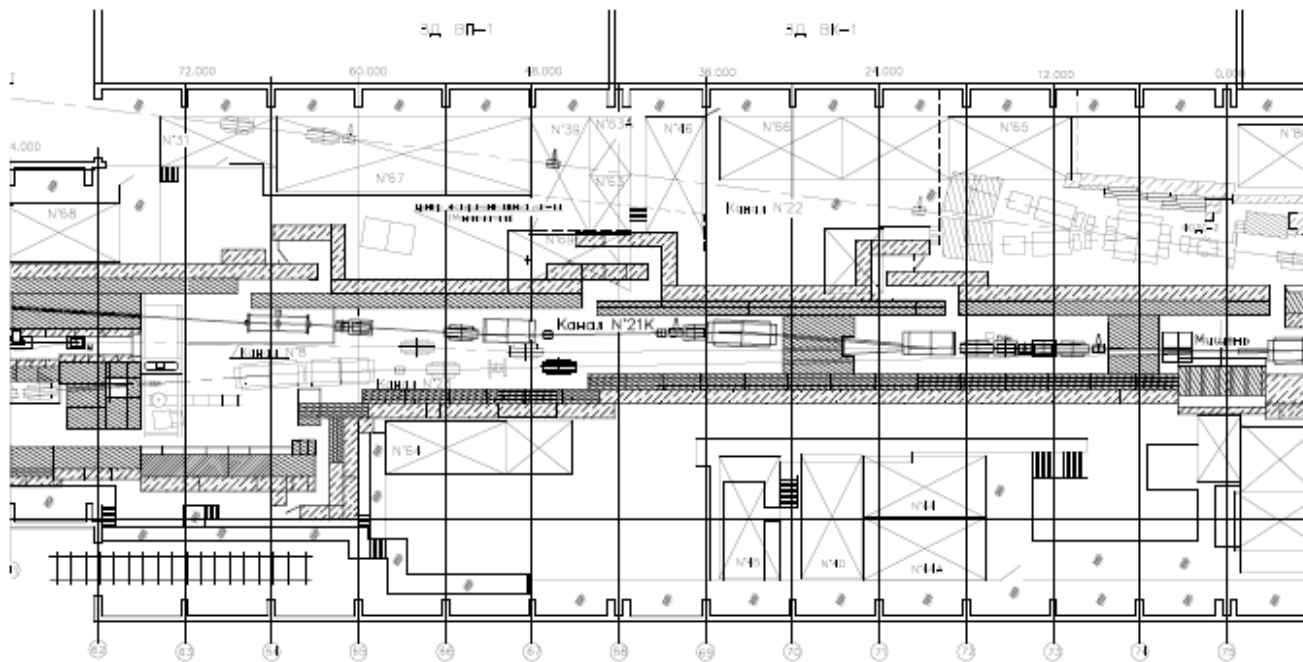
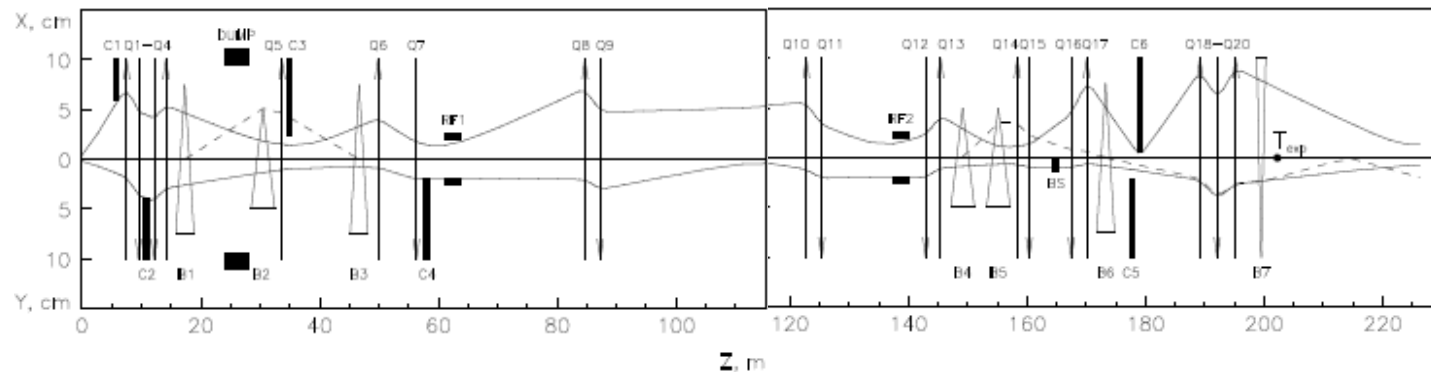
# Схема ВЧ-сепарации (Пановский)



ВЧ-дефлекторы во время испытаний при  $T=1.8K$ (2004 г.)



## Схема канала 21К (Препринт ИФВЭ 2003-4)



### Расчетные параметры пучка:

- Протонный пучок 65 ГэВ  
 $2 \times 10^{13}$  ppp
- вторичный пучок  
12.6 или 18 ГэВ
- Интенсивность  $5 \times 10^6$
- Каонов в пучке ~50%

## Канала 21К (создание завершено в 2006 г.)

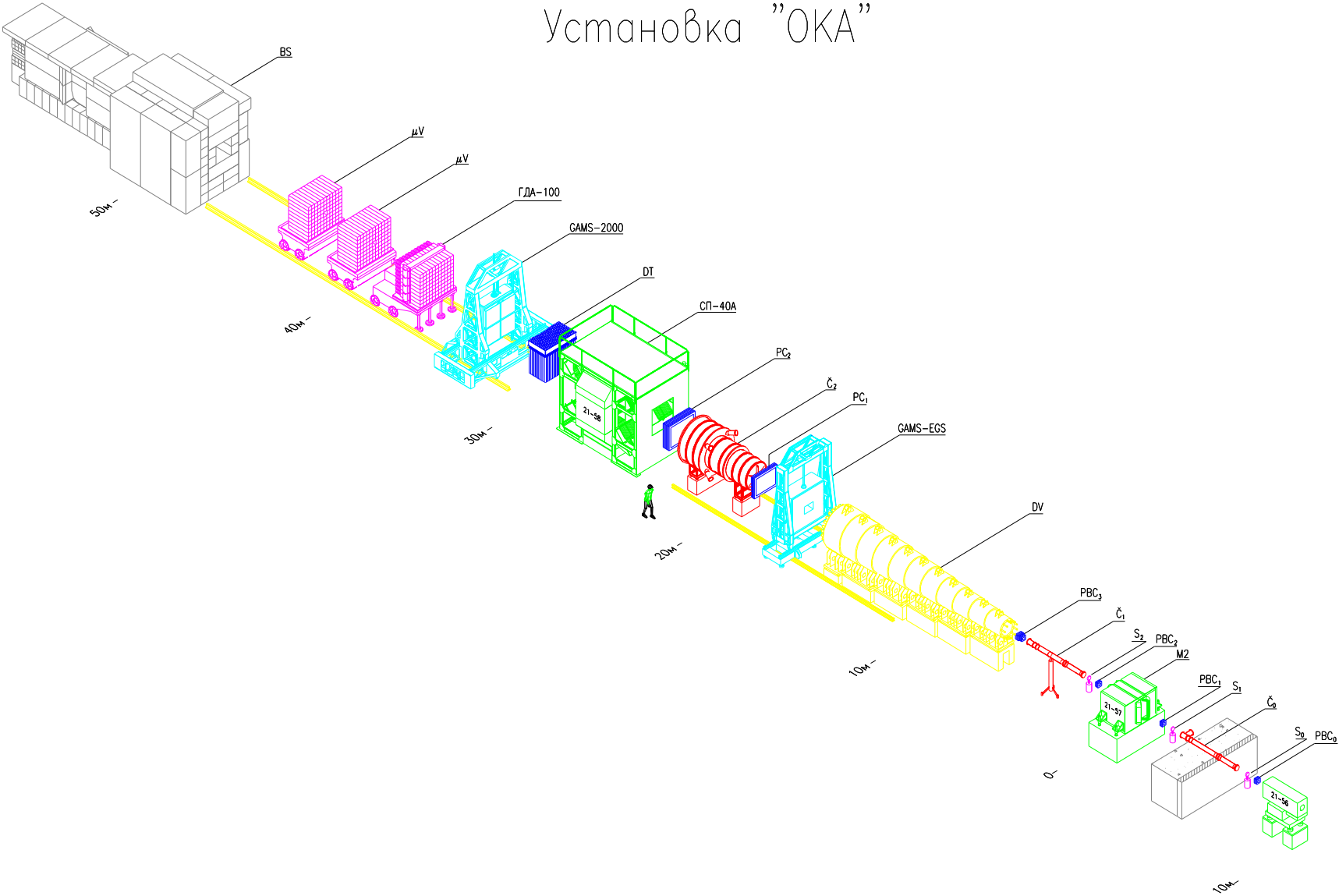


Хвост канала 21К



Криогенная система канала 21К

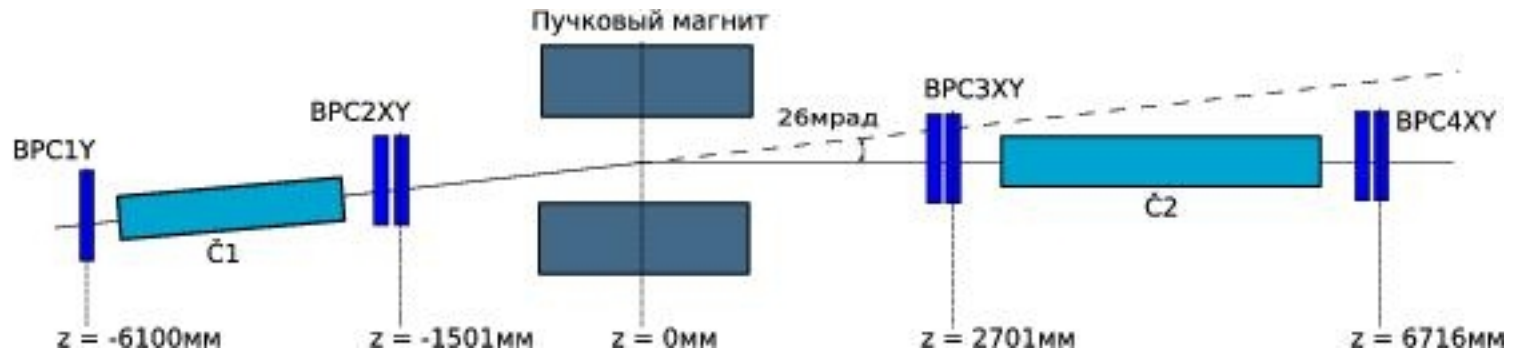
# Установка "ОКА"





На установке «ОКА» с 2006 г. регулярно проводятся сеансы измерений.  
В 2008 г. было 2 сеанса общей продолжительностью ~1 месяц.

# Пучковый спектрометр



- Сцинтилляционные(7) и черенковские(2) счетчики

3 сц., 3 тонких (2мм.) с “щелевыми” ФЭУ

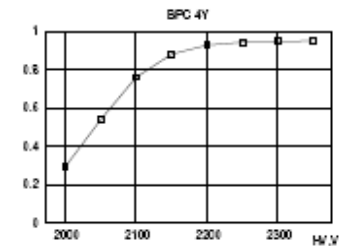
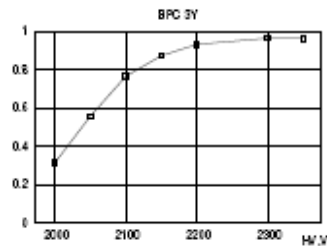
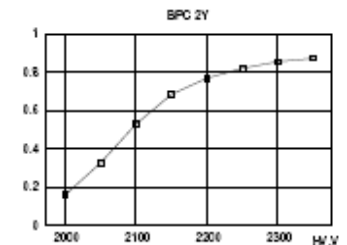
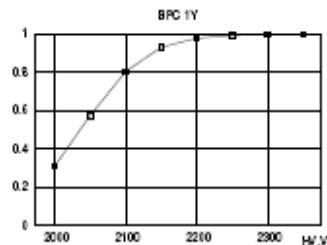
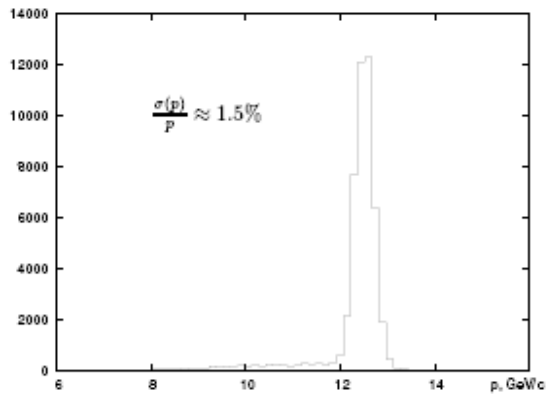
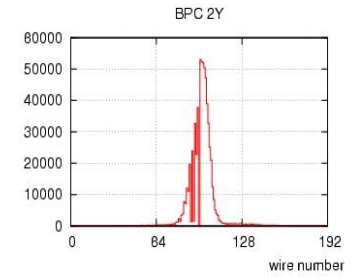
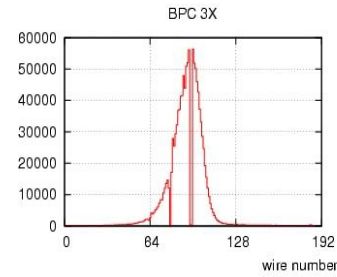
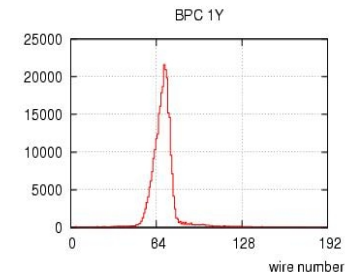
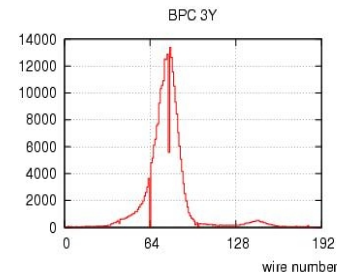
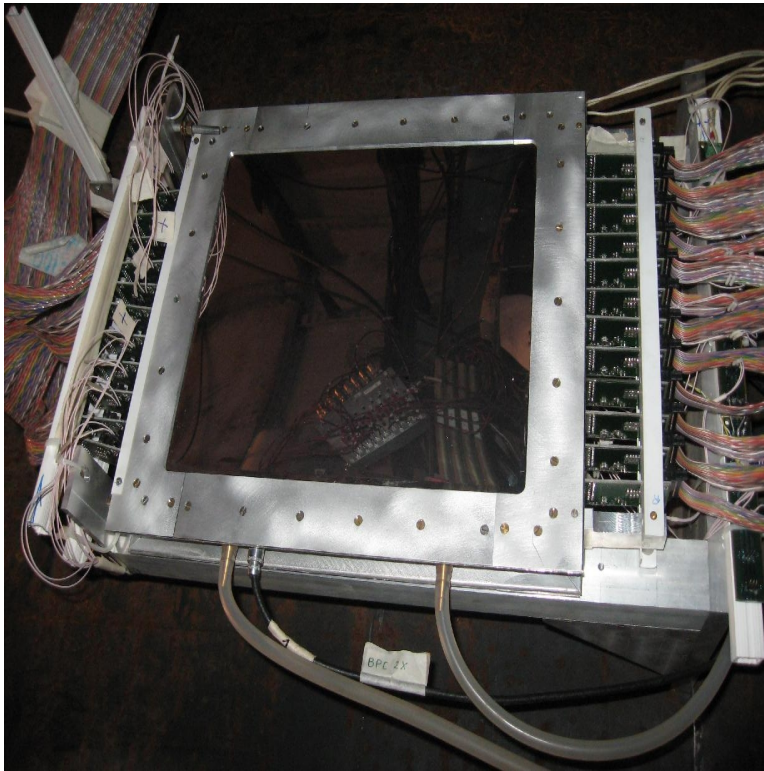
Черенковские счетчики заполнены воздухом (1 атм.) и SF<sub>6</sub> (эле-газ n-1=7,8×10<sup>4</sup> 1,4 атм.)

- Годоскопы 3 годоскопа из сц.-волокна, ф-дет. многоанодный ФЭУ

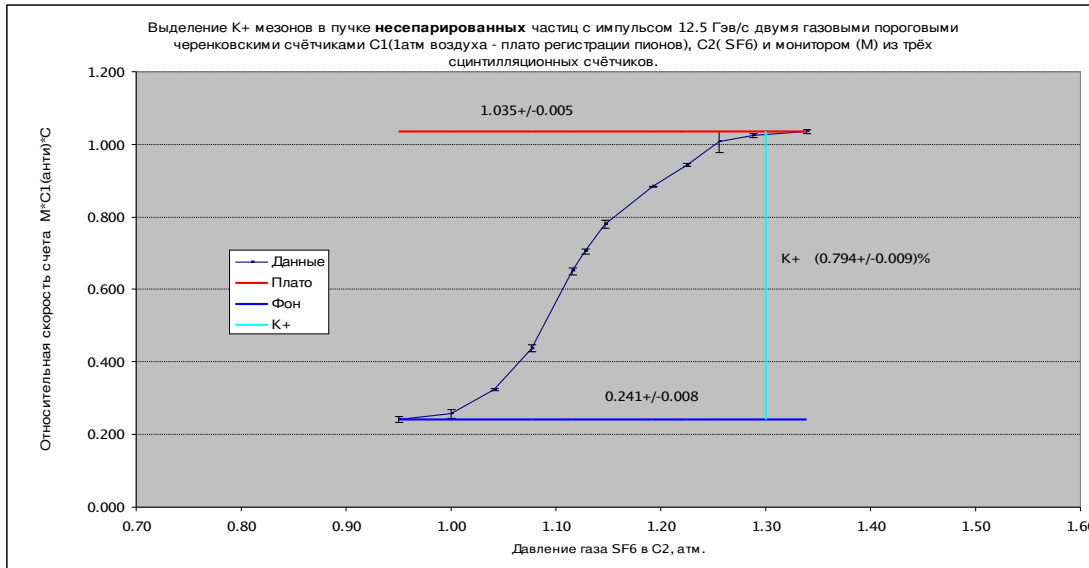
- Узкоззорные пропорциональные камеры, 7 плоскостей 20x20 см<sup>2</sup>, 188 каналов/камеру (шаг 1,084 мм.) ; Газовая смесь: 80% фреона-14(CF<sub>4</sub>) и 20% изобутана(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)

Камеры изготовлены в ЛЯП-ОИЯИ (Б.Ж.Залиханов)

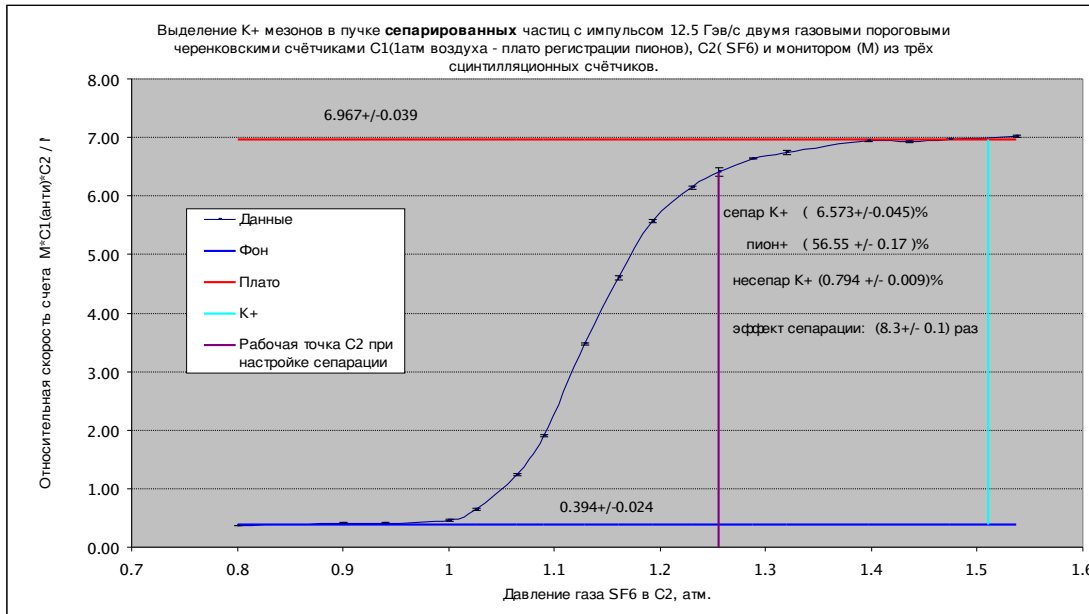
# Пучковый спектрометр



# Определение состава пучка

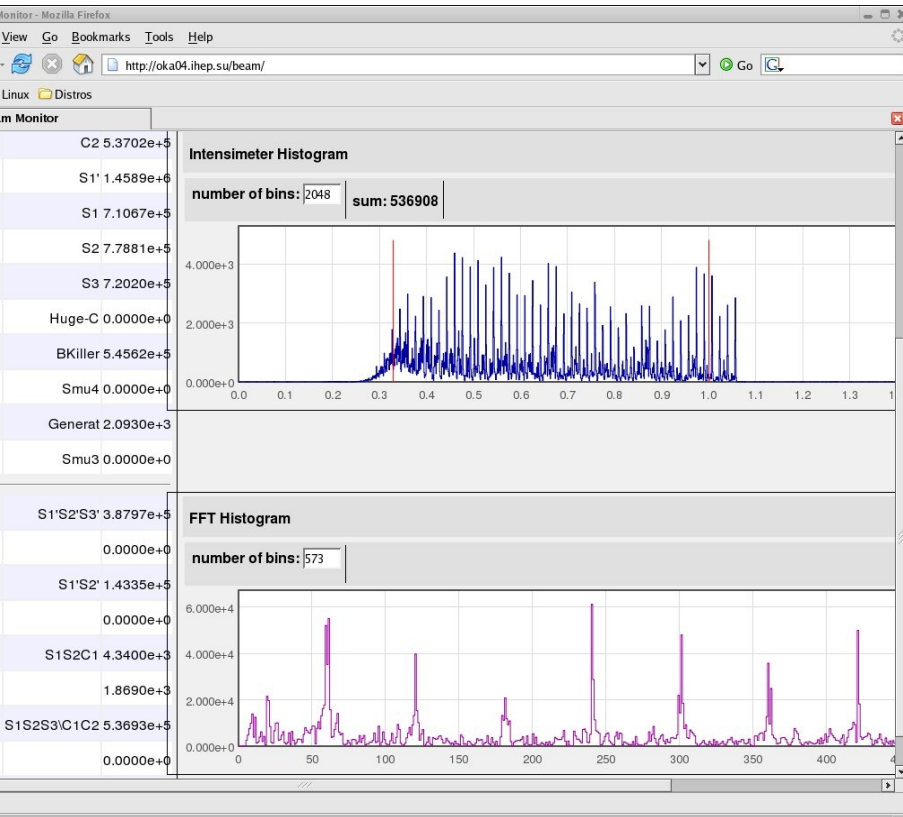


$$S_1 S_2 S_3 C_1 C_2 / S_1 S_2 S_3$$

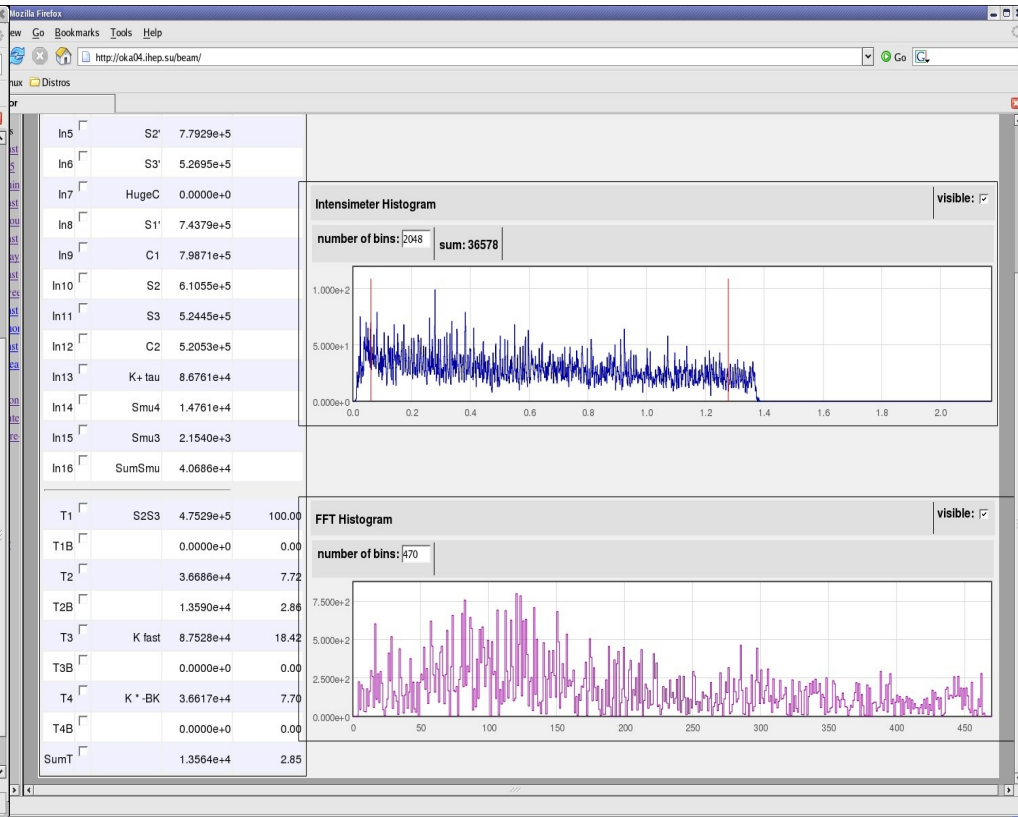


**В Декабре 2008 г. Получена стабильная работа канала 21К с 25% каонов в пучке**

# Диагностика качества медленного вывода



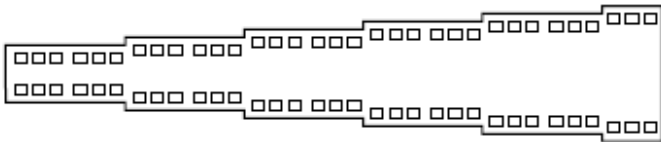
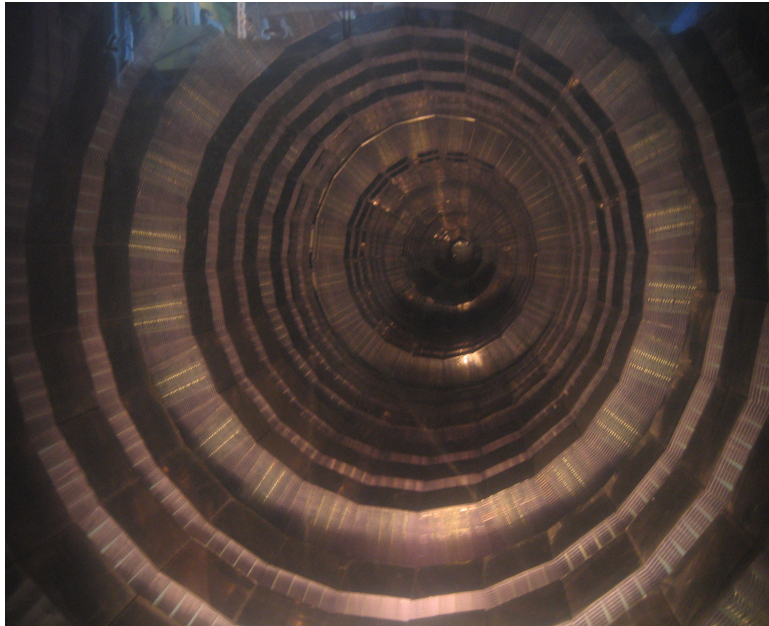
«Обычный» медленный вывод



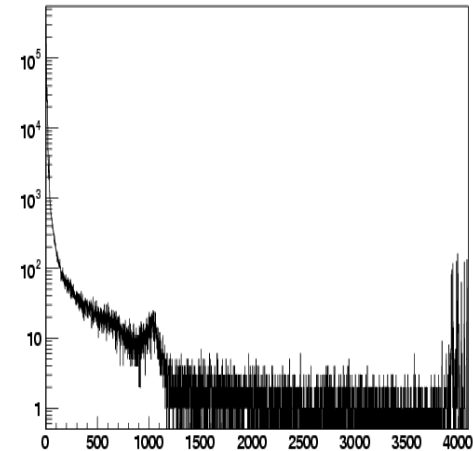
«Стохастический» медленный вывод



# Распадная база с вето-системой

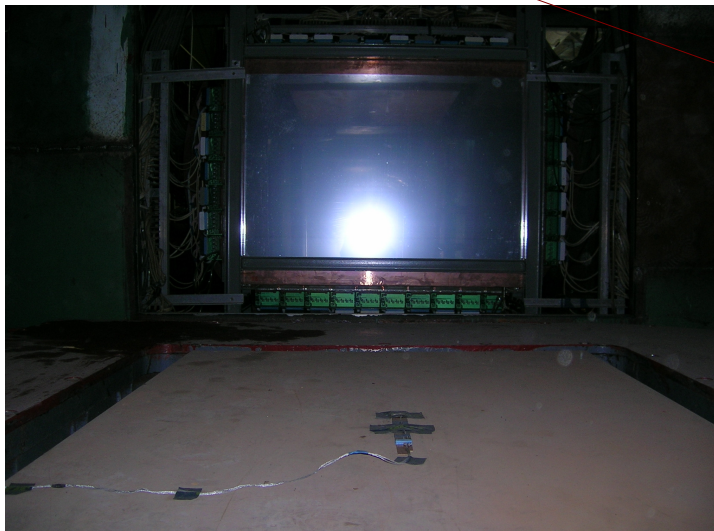
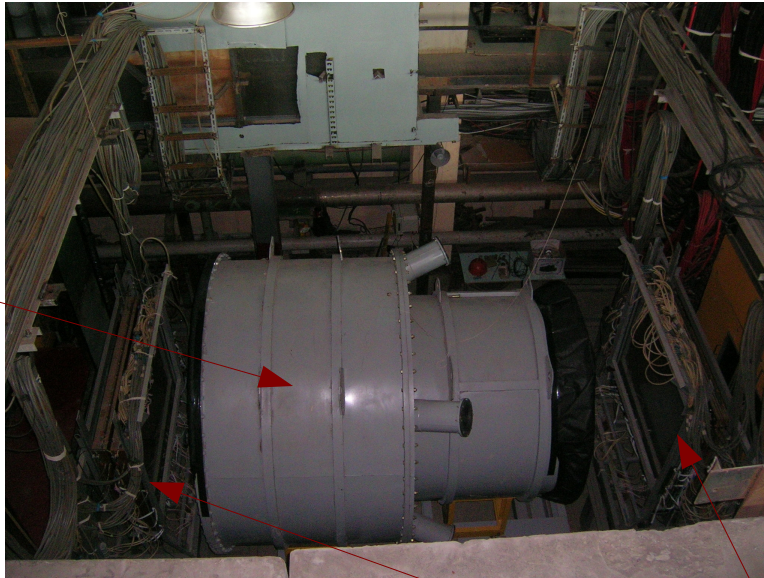


(5мм Сц.+1.5 мм Pb)×21  
Полная длина ~ 11 м., 191 ФЭУ-84

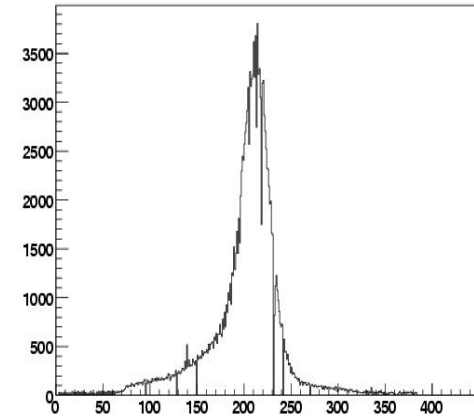


# Большой С-счетчик, Большие ПК

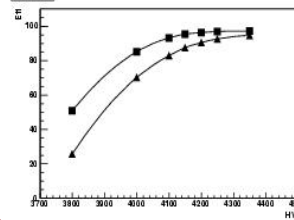
$\epsilon_e \sim 95\%$



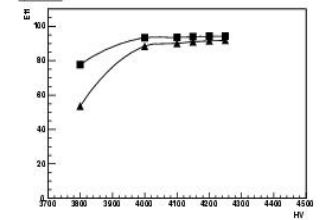
pcd11y prof2



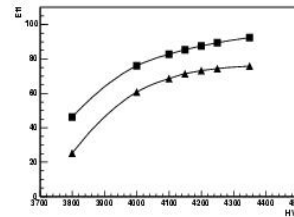
pcd11y



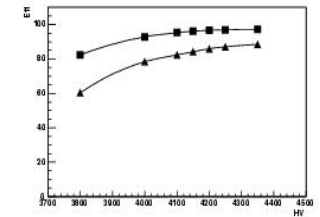
pcd12x



pcd13x



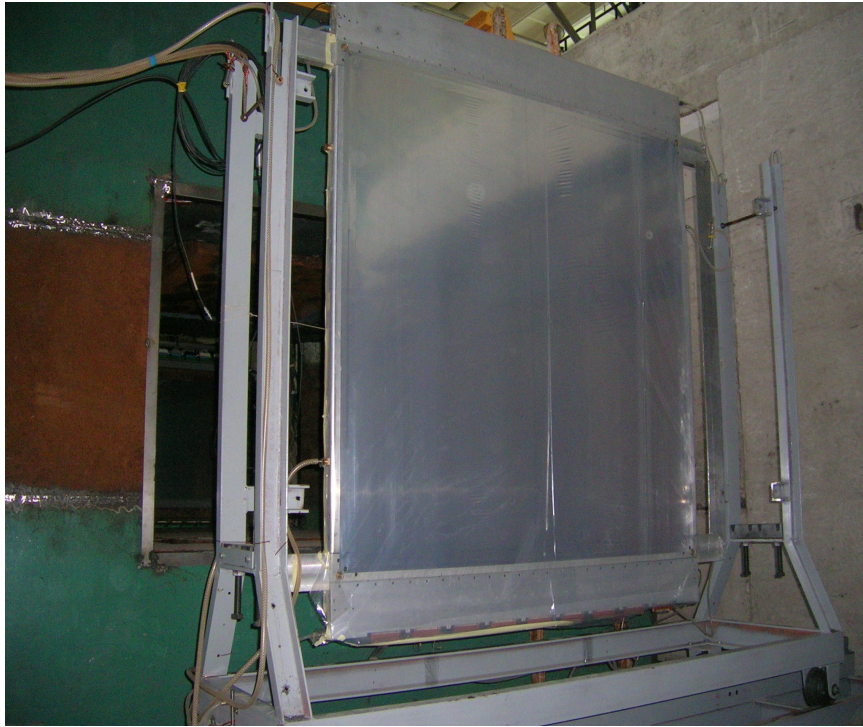
pcd14y



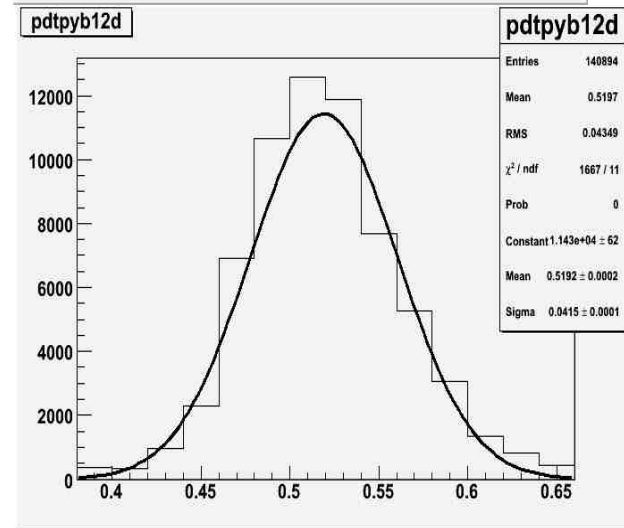
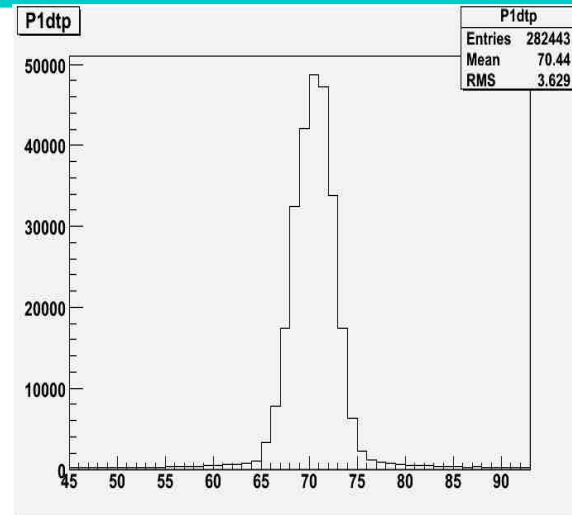
Профиль и пороговые кривые ПК

$Ar:Ib:Fr_{12} = 70\%:28.8\%:0.2\%$

# Straw-трубки

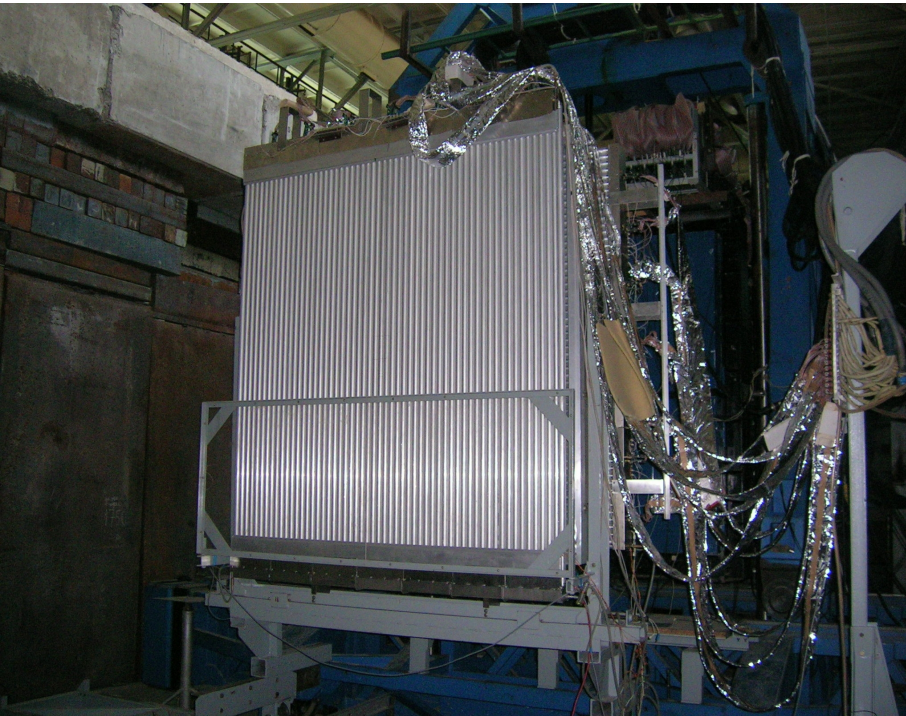


Изготовлены в ЛФВЭ ОИЯИ(В.Д.Пешехонов)  
2 плоскости  $140 \times 140 \text{ см}^2$  + 1 плоскость  $140 \times 140 \text{ см}^2$   
два слоя 9мм straw-трубок , всего 920 каналов  
Рабочий газ Ar:CO<sub>2</sub> 80%:20%



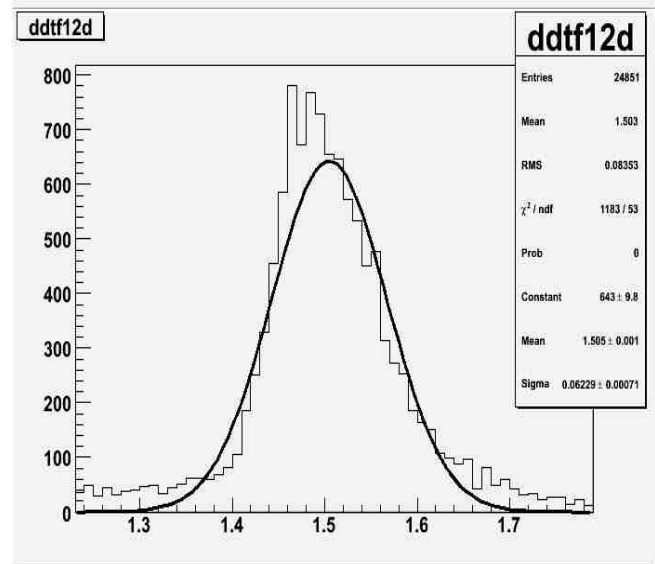
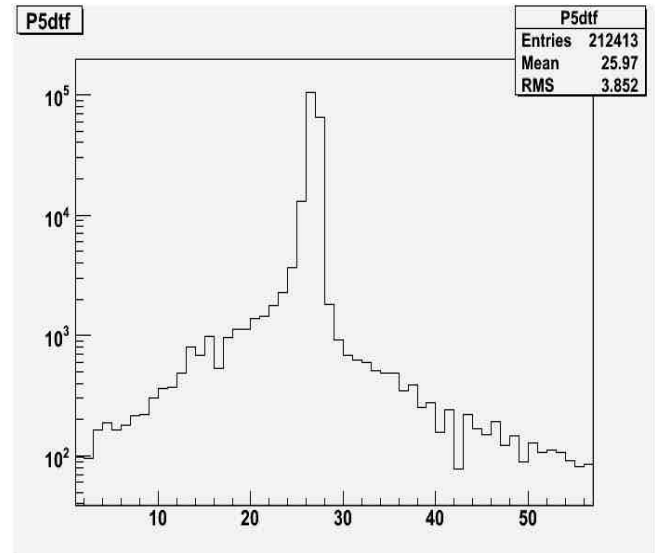
пространственное разрешение  $\sigma \sim 300 \mu\text{мкм}$

# Дрейфовые трубки



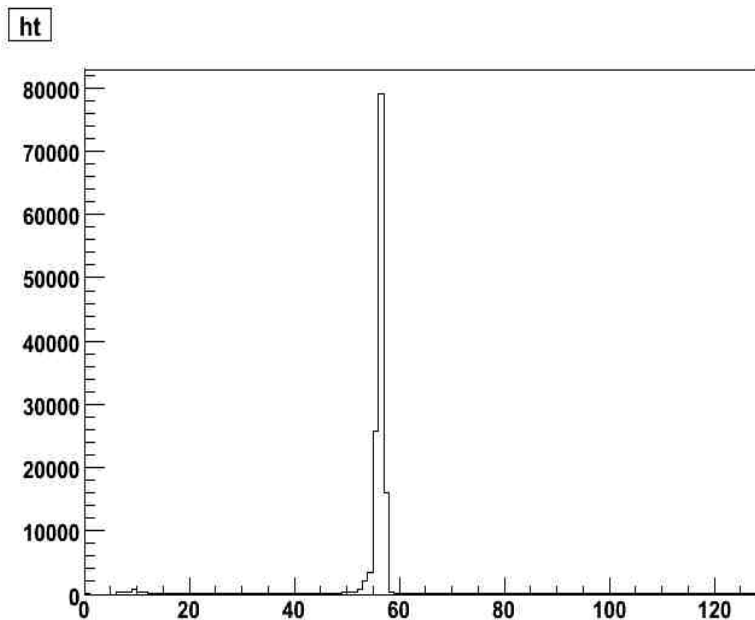
Две плоскости, каждая плоскость — 3 слоя  
по 56 4см трубок, всего 336 каналов  
Рабочий газ Ar:CO<sub>2</sub> 88%:12%

Система полностью запущена

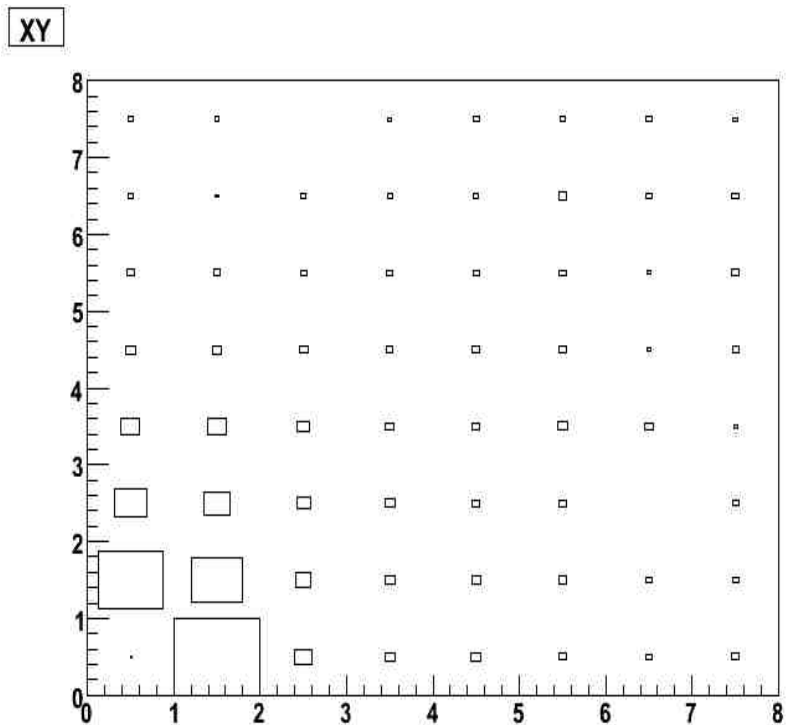


пространственное разрешение  $\sigma \sim 420 \mu\text{мкм}$

# Падовый годоскоп : временной спектр и профиль



Временной спектр (5 нсек./бин)

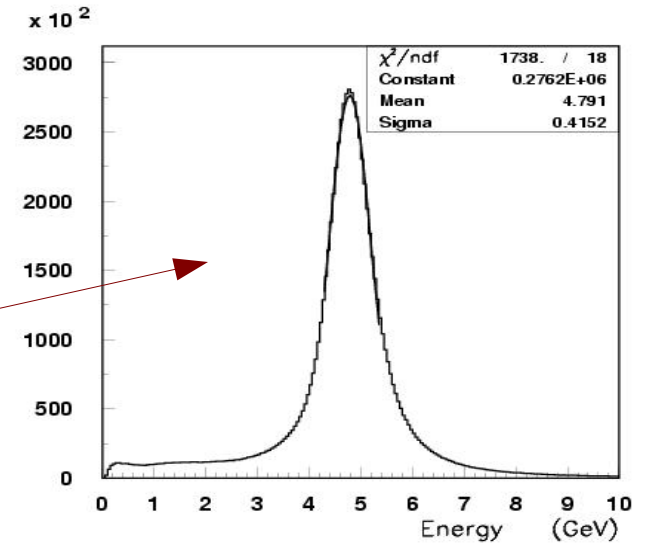
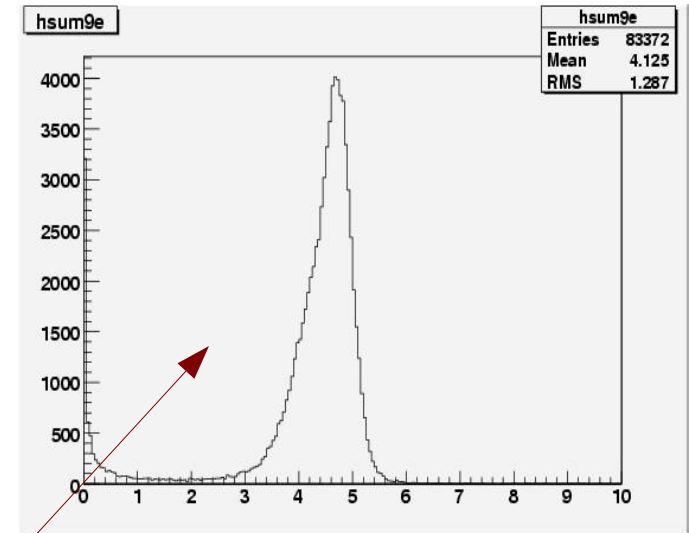
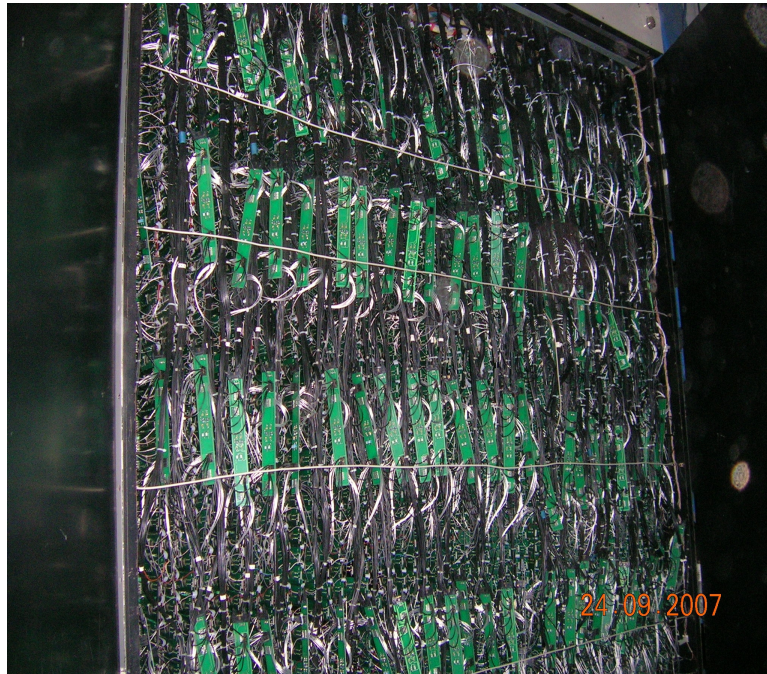


Двумерный профиль (1 квадрант)

Изготовлен в ИЯИ-РАН, 256 каналов; считывание WLS и SiPM

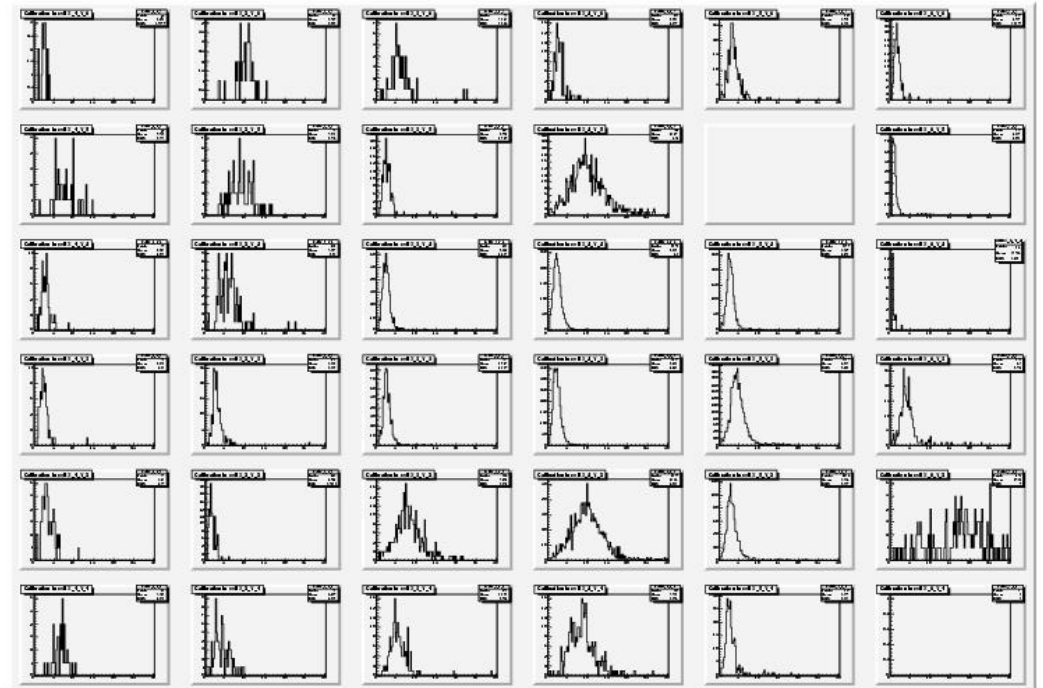
# ГАМС-2000(2300 каналов) и БГД(1100 каналов)

Платы аналогового суммирования:  
формируется 16 сумм 12×12



Калибровка ГАМС и БГД на 5 ГэВ электронах

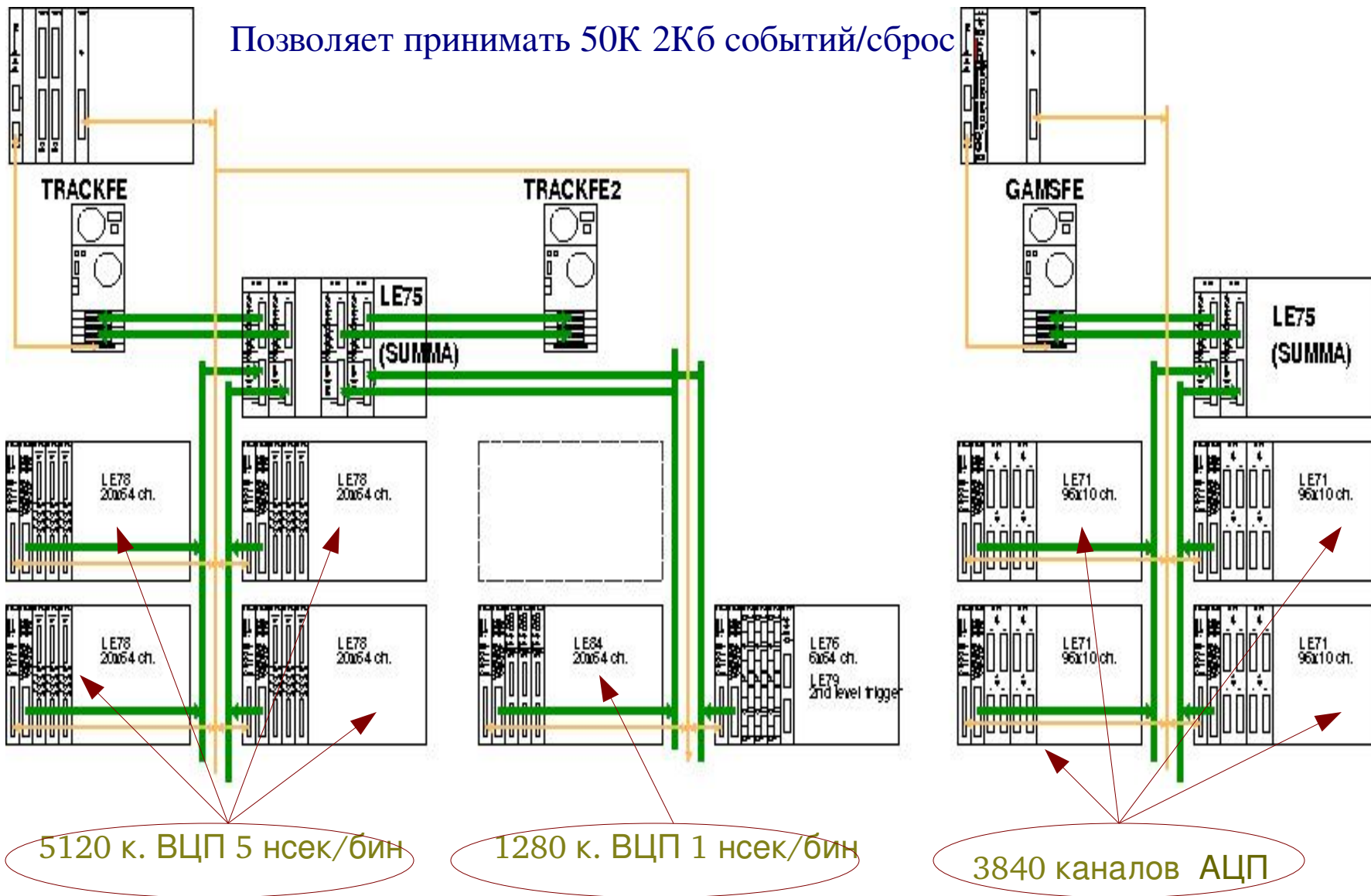
# ГДА-100



Калибровка ГДА-100 на мюонах

# Электроника и система сбора данных

Позволяет принимать 50К 2Кб событий/сброс





# Первоочередная программа исследований

Логика триггера:  $4 \times 10^6$  част./сброс  $\rightarrow 10^6$  К  $\rightarrow 10^5$  распадов К; ~~К<sub>μ2</sub>~~  $\rightarrow 50$  К  $\rightarrow$  запись

- Search for deviations from the SM  
search for T,S,P in  $K^+ \rightarrow e^+ \nu; e^+ \nu \gamma; \mu^+ \nu \gamma; e^+ \nu \pi^0; \mu^+ \nu \pi^0$

- Search for T-odd effects

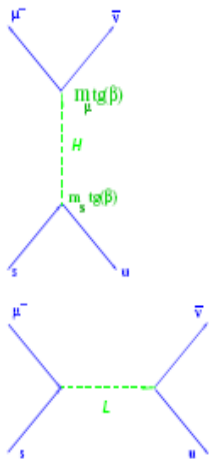
Measurement of the  $\frac{\vec{p}_\gamma \cdot (\vec{p}_\pi \times \vec{p}_\mu)}{|\vec{p}_\gamma| |\vec{p}_\pi \times \vec{p}_\mu|}$ -correlation in the decay  $K^+ \rightarrow e^+ (\mu^+) \nu \pi^0 \gamma$

ISTRA+ has established best limits on  $f_T$  and  $f_S$  formfactors:

$$f_T/f_+(0) = (0.1 \pm 0.65(stat) \pm 0.2(syst))\%$$

$$f_S/f_+(0) = (0.07 \pm 0.15(stat) \pm 0.09(syst) \pm 0.53(theory))\%$$

the last result assumes  $\lambda_0 = 0.017 \pm 0.004$  J.Gasser and H.Leutwyler, Nucl.Phys B250(1985)



$$f_S^{2hdm} = \frac{m_\mu (m_K^2 - m_\pi^2) t g^2 \beta}{2 m_H^2 m_K} f_0(t) \rightarrow$$

$$\frac{t g(\beta)}{m_H} = 0.17 \pm 0.1(stat) \pm 0.26(th) GeV^{-1};$$

Recent Lattice calculations have improved accuracy:  $\lambda_0 = 0.012 \pm 0.002$

D.Becirevic et al., hep-lat/0411016

$$\text{Fiertz transformation : } (\bar{s}\mu)(\bar{\nu}u) = -\frac{1}{2}(\bar{s}u)(\bar{\nu}\mu) - \frac{1}{8}(\bar{s}\sigma_{\alpha\beta}u)(\bar{\nu}\sigma^{\alpha\beta}\mu)$$

The second term- effective T V.V.Kiselev et al., hep-ph/0204066  $\rightarrow$

$$\frac{f_T^{LQ}}{f_+(0)} = \frac{\sqrt{2}}{32 G_F |V_{us}|} \frac{m_K}{m_{K^*}} \frac{1}{\Lambda_{LQ}^2} \Lambda_{LQ} > 3 TeV (90\% CL)$$

OKA will allow to increase statistics of  $K_{l3}$  decays by factor of 100

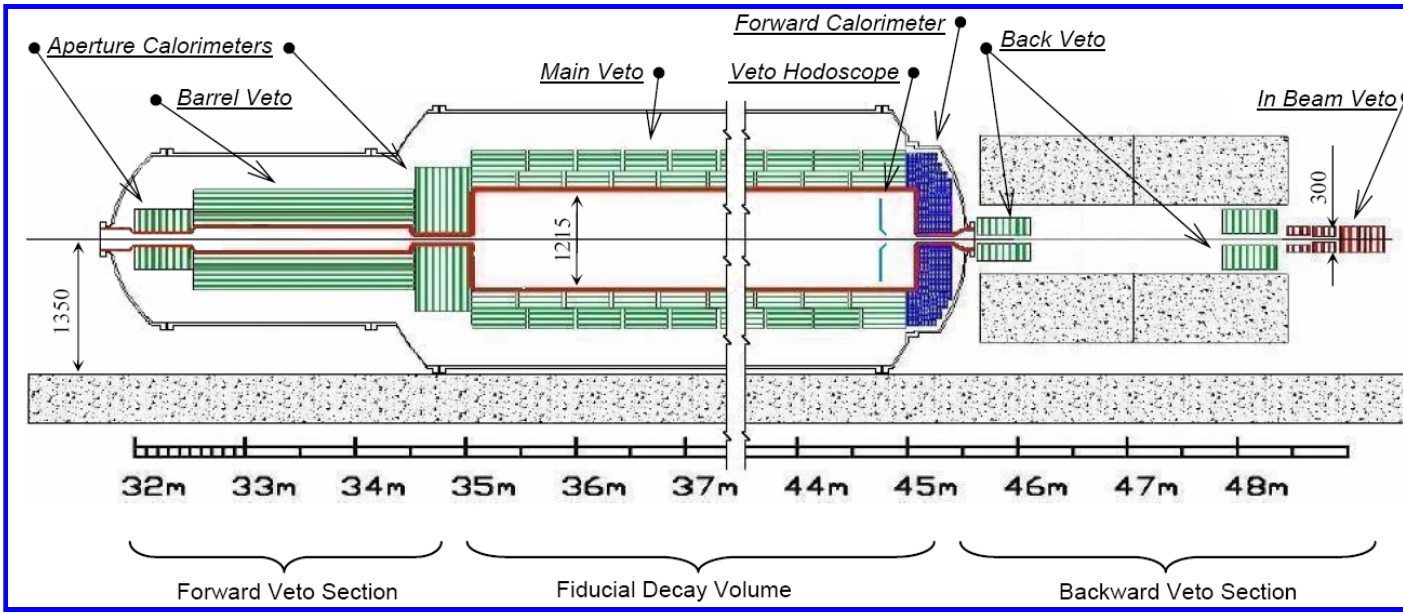
## Заключение

В ходе двух сеансов 2008 г. осуществлен комплексный запуск установки ОКА, начат набор статистики, записано ~150М событий распадов каонов

Есть хорошие предпосылки для набора заметной статистики(1000М) в 2009 г.

**Поиски супер-редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$**   
**Эксперимент KLOD ИФВЭ-ИЯИ-ОИЯИ**

КЕК Е391а  $< 6.7 \times 10^{-8}$   
 Гроссман-Нир  $< 1.7 \times 10^{-9}$   
 CM  $\sim 3 \times 10^{-11}$



**ИФВЭ**  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
 ИЯИ  
 ОИЯИ

ИЯИ 2007-4  
 ОФД

Г.И. Бритвин, Ю.П. Гуз, В.А. Корочкин, А.А. Левин, Ф.И. Новосильцев, А.П. Осипкин, В.Ф. Образцов, В.К. Семенов, О.П. Юденич  
 ФГЭУ «Государственный научный центр РФ – Институт физики высоких энергий»  
 В.Н. Бологов, В.А. Дук, В.А. Лебедев, А.И. Мавров, А.Ю. Паламар, В.Е. Пестов, А.А. Худзин  
 «Институт ядерных исследований, РАН – Академия Наук Российской Федерации»  
 А.Е. Басков, С.И. Бизяков, В.А. Бедняков, В.П. Вольфат, М.Ю. Дорошенко, А.С. Куркин, Е.С. Кузьмин, С.В. Подольский, А.А. Семчинов, В.М. Слесняк, И.В. Сметан, В.В. Тельников, А.А. Шугаев, А.В. Шугин, В.Б. Шугин  
 «Объединенный институт ядерных исследований, Международная организация»

О возможности создания экспериментальной установки для поиска и исследования распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  на ускорителе У-70 ИФВЭ  
**Эксперимент KLOD**

(\*) Руководитель рабочих групп:  
 bolotov.v@gmail.ru  
 kuzling@iep.ru  
 Alexander.Ostankov@iep.ru

Проектировано 2007

Акцептанс – 18 (15) % ; 4.8%  $K_L$  распадов в распадном объеме @  $10^8$  ( $5.4 \times 10^7$ )  $K_L$ /сброс  
**10 дней набора статистики** ( $\sim 10^4$  сбросов/день)

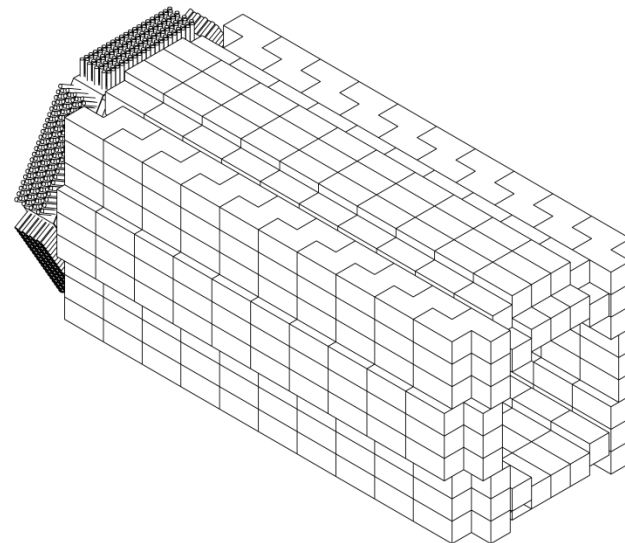
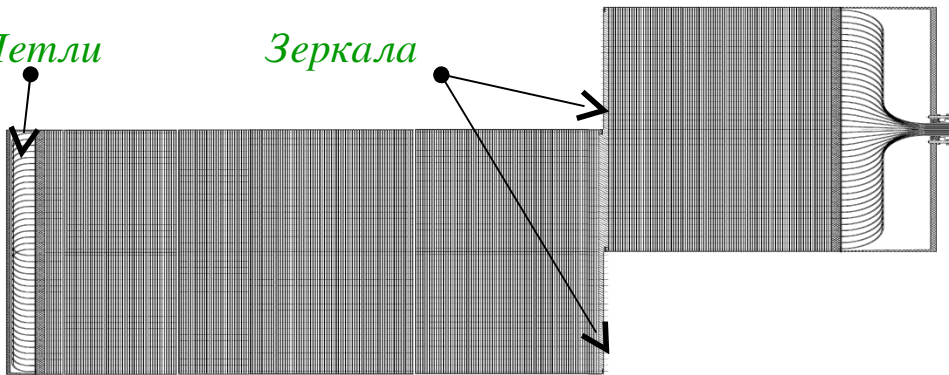
$10 \times (10^4) \times (10^8) \times (4.8 \times 10^{-2}) \times (1.8 \times 10^{-1}) \times Br(2.8 \times 10^{-11}) \approx 2.4 \text{ соб.}$   
 $10 \times (10^4) \times (5.4 \times 10^7) \times (4.8 \times 10^{-2}) \times (1.5 \times 10^{-1}) \times Br(2.8 \times 10^{-11}) \approx 1.1 \text{ соб.}$

**Статус: R&D для двух наиболее критических детекторов**  
**– Основное “Veto” пучковое “Veto”**

# Прототип «Veto»

Петли

Зеркала

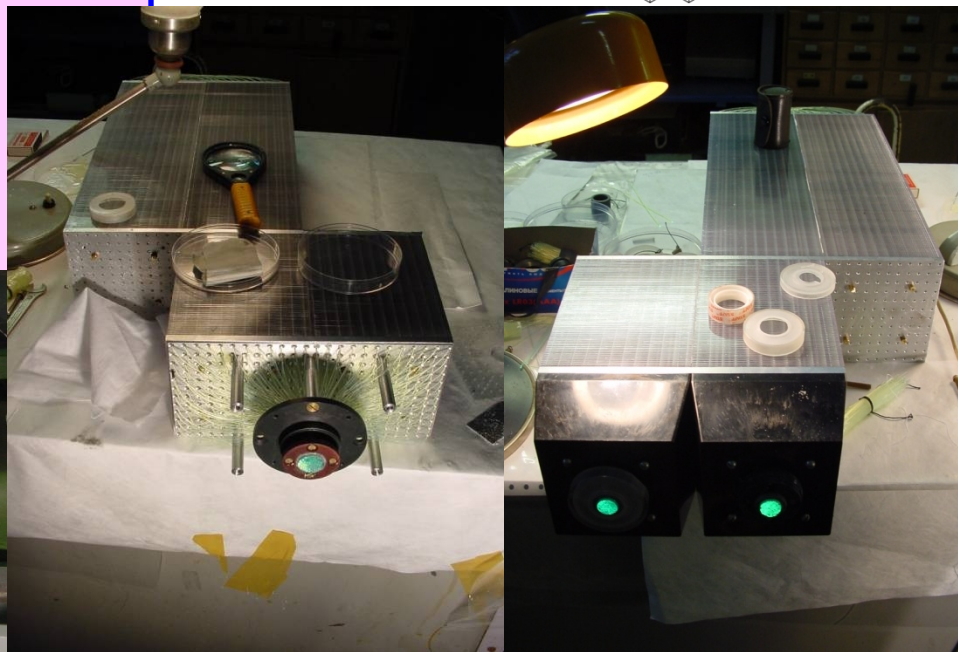
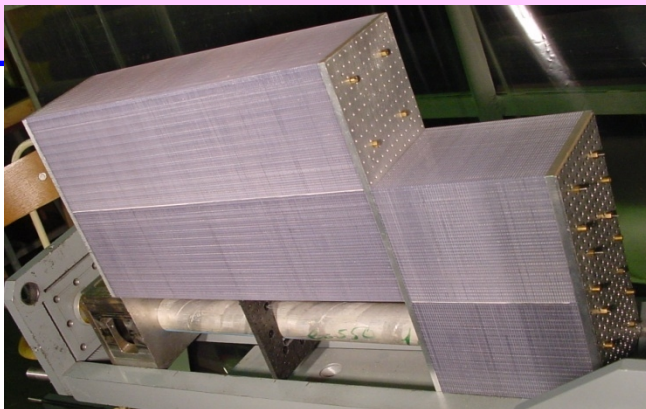


## Калориметр типа «Шашлык»

(0.3мм Pb + 1.5мм литевой Сц.)

Результаты измерений на пучке в 2008 г.:

- 30000 фотонов на 1 ГэВ  $\gamma$ -ливень
- 5.5 ф.э на одну сц. пластину(mip)
- 18 ф.э. на 1 МэВ “видимой” энергии
- $\sigma_E/E \sim 3\%/ \sqrt{E}$



# $\gamma$ - "Veto" калориметр в 300 МГц нейтронном пучке

## Требования

- $\gamma$ -рег./идент.  $(1-\epsilon) \sim 10^{-3} E_{\gamma} > 200 \text{ МэВ}$
- избегать ложного срабатывания от  $n$

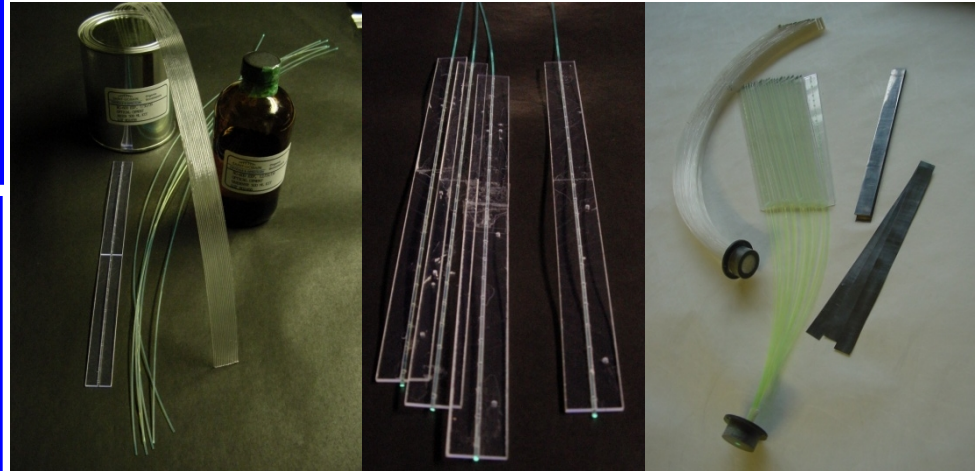
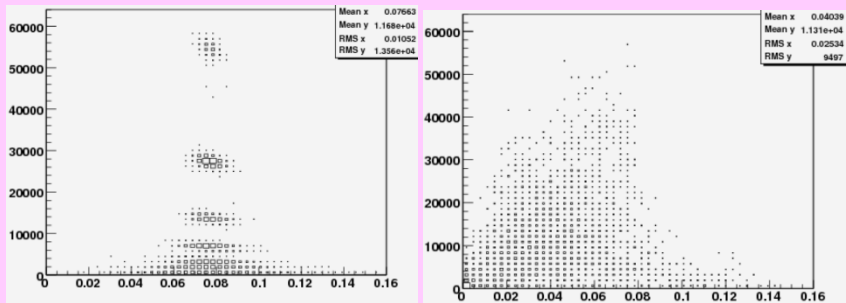
## Решение

Использовать  $\checkmark$ -излучение для регистрации  $\gamma$   
Чистые/Кварцевые волокна чувст. только к  $EM$  комп. ливня

## Двойное Считывание (Сц.+ $\checkmark$ )

Смотреть на  $\checkmark$ /Сц. отношение и его продольный и поперечный профиль

## Расчеты



## Прототип

Структура:  $(0.3 \text{ мм Pb} + 1 \text{ мм Сц.} + 1 \text{ мм } \checkmark) \times 100$

Матрица:  $(5 \text{ поп.} \times 5 \text{ прод.})$  двойных ячеек

Полный размер:  $\sim (1R_M \times 2R_M \times 7.5X_0)$

0.5 ф.э. / слой для 1 мм С-слоя. (@45°  $\text{mir}$ )

хорошая однородность.