

Гуцин Евгений Николаевич

Разработка и исследование слоеного  
свинец/сцинтиллятор калориметра и  
предливневого детектора для экспериментов  
на LHC

( По материалам диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук )

## Структура и объем работы

- Непосредственно по материалам диссертации было опубликовано 6 печатных работ в реферируемых журналах.
- Результаты также были представлены на международных конференциях:
  - *The 5th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics, Upton, NY, 25 Sep - 1 Oct 1994.*
  - *The 8th International Conference on Calorimetry in High-Energy Physics (CALOR 99), Lisbon, Portugal, 13-19 Jun 1999.*
  - *The 11th International Conference on Calorimetry in High-Energy Physics (Calor 2004), Perugia, Italy, 28 Mar - 2 Apr 2004.*
  - *The 5th International Conference on New Developments In Photodetection 2008, Aix-les-Bains, France, June 15-20, 2008*

## Положения, выносимые на защиту

- Предложена оригинальная конструкция и проведены исследования прототипов многоканальных модулей электромагнитного калориметра типа «шашлык» для эксперимента CMS.
- Разработан вариант регистрации света с калориметра «шашлык» с помощью кремниевых фотодиодов. Разработаны низкошумящие усилители для прототипов модулей коллаборации RD36.
- Предложена и разработана конструкция сцинтилляционных ячеек размерами 4x4, 6x6 и 12x12 мм<sup>2</sup> с многовитковым расположением спектросмещающего волокна для сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов (PS/SPD) эксперимента LHCb. Получен световыход с ячейки более 500 фотонов на минимально-ионизирующую частицу.
- Исследованы варианты регистрации света для сцинтилляционных ячеек PS/SPD детектора с многоанодными ФЭУ и лавинными фотодиодами разных типов.
- Разработана конструкция и произведены исследования модулей PS/SPD детектора LHCb на тестовых пучках CERN.
- Разработан и построен PS/SPD детектор эксперимента LHCb. По результатам работы при энергии 3.5 ТэВ на LHC в 2010-2011 г.г. характеристики PS/SPD детектора удовлетворяют всем требованиям эксперимента LHCb.

## План доклада

- Программа разработки и исследования электромагнитного калориметра типа «шашлык» для эксперимента CMS. Результаты исследования прототипов многоканальных модулей.
- Регистрация света с калориметра «шашлык» с помощью кремниевых фотодиодов. Низкошумящие усилители для прототипов модулей коллаборации RD36.
- Конструкция сцинтилляционных ячеек с многовитковым расположением спектросмещающего волокна для сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов (PS/SPD) эксперимента LHCb.
- Исследование вариантов регистрации света для сцинтилляционных ячеек PS/SPD детектора с многоанодными ФЭУ и лавинными фотодиодами разных типов.
- Модули PS/SPD детектора LHCb. Экспериментальные результаты на тестовых пучках CERN.
- Экспериментальные характеристики PS/SPD детектора эксперимента LHCb по результатам работы при энергии 3.5 ТэВ на ускорителе LHC в 2010-2011 г.г.

## Электромагнитный калориметр типа «шашлык» в экспериментах на LHC

В середине 1980-х - оригинальная идея считывать свет из слоистого калориметра с помощью спектросмещающих волокон, [H. Fessler et al., Nucl. Instr. and Meth. 228 \(1985\) 303.](#)

Первый калориметр типа «шашлык» создан в 1991 -1992 г.г. в ИЯИ РАН для эксперимента E-865 (BNL) [G.S. Atoyan et al., Nucl. Instr. and Meth. A 320 \(1992\) 144, Preprint INR-736/91, INR, Moscow \(1991\).](#)

Калориметр типа «шашлык» - вариант ECAL в эксперименте CMS в 1992-1994 г.г. и в эксперименте LHCb (с 1996 г.)

**R&D-36** (1993-1996 г.г.) - специализированная программа в CERN по разработке и исследованию калориметра типа «шашлык»

# Требования к электромагнитному калориметру в экспериментах на LHC

- Высокие загрузки → требуется локализация ливней: маленький мольеровский радиус и радиационная длина
- 40 МГц частота взаимодействий → короткий по времени сигнал
- H →  $\gamma\gamma$  в CMS → отличное энергетическое и пространственное разрешение, маленький шум электроники
- 10 лет эксплуатации → устойчивость к радиационным повреждениям и старению
- При работе в магнитном поле → ограничение на применение ФЭУ

## Требования к ECAL (CMS) в LoI (CERN-LHCC-92-3, 1992):

Calorimeter Requirement	ECAL
Energy Resolution $\ast \frac{\Delta E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$	e, $\gamma$
stochastic a	$\leq 0.03$
noise b	0.15
constant c	$\approx 0.005$
Angular resolution $\Delta\theta_\gamma$ (mrad)	$\approx 40/\sqrt{E}$
Two shower separation $\Delta\theta_{\gamma\gamma}$	$\approx 5$ mrad
Lateral granularity $\Delta\eta \times \Delta\phi$	$0.025 \times 0.025$
Longitudinal segmentation	2-fold
Depth	$\geq 25 X_0$
Rapidity coverage	$\leq 2.5$
Timing	$\leq 5$ ns
Dynamic range (bits)	16
Radiation resistance <sup>†</sup>	
dose (Mrad)	$\approx 6$ at $\eta=2.6$
neutron fluence (n/cm <sup>2</sup> )	$1.3 \cdot 10^{14}$

Высокое энергетическое разрешение при малой радиационной длине – трудная задача для калориметров типа «шашлык». Калориметр на кристаллах (CeF<sub>3</sub>, PbWO<sub>4</sub>) имеет бесспорное преимущество, но **значительно** более высокую стоимость.

## Потенциал калориметрии на основе слоев свинца и сцинтиллятора:

- быстрое время высвечивания (<25 нсек)
- радиационная длина (~1-2 см)
- относительно простая и дешевая конструкция
- хорошая радиационная стойкость (~1 Мрад)
- энергетическое разрешение зависит от тонкости структуры

$$\frac{\sigma_{\text{sampl}}(\%) }{E} = \frac{3.5}{\sqrt{E}} \cdot \left(\frac{t}{X_t}\right)^{0.67} \cdot \left(\frac{s}{X_s}\right)^{-0.3}$$

t, X<sub>t</sub>, s, X<sub>s</sub> – толщина и рад. длина слоя сцинтиллятора и свинца

# Коллаборация RD36

## Программа коллаборации RD36 (CERN):

- Разработка модулей калориметра типа «шашлык» и предливневого детектора для эксперимента CMS
- Оптимизация конструкции и изучение энергетического и пространственного разрешения
- Изучение эффектов работы в магнитном поле
- Изучение радиационной стойкости

## Основные результаты:

- Разработаны прототипы модулей калориметра типа «шашлык» непроективной и проективной формы разных поперечных размеров (47 мм, 52 мм, 42 мм и др.)
- Изучена продольная и поперечная неоднородность модулей
- Достигнуто энергетическое разрешение:  
$$\sigma_E / E(\%) = 8.1 / \sqrt{E} \oplus 0.33 / E \oplus 0.5$$
- Достигнуто угловое разрешение:  
$$70 \text{ mrad} / \sqrt{E}$$
- Изучено влияние сигналов от заряженных частиц в Si-фотодиодах на разрешение калориметра
- Изучено влияние магнитного поля на работу с предливневым детектором
- Изучена работоспособность до 1-5 Мрад

## Вклад ИЯИ РАН:

- Разработка и изготовление прототипов модулей калориметра типа «шашлык» (совместно с ИФВЭ)
- Разработка и изготовление малошумящих усилителей для тестов всех прототипов (часть 2)
- Участие в тестовых измерениях, разработка программного обеспечения и обработка данных
- Предложение метода, изготовление и изучение модулей с многоканальным светосбором

# Особенности применения PIN фотодиодов

Из-за магнитного поля (>4Т) ФЭУ не подходит для CMS ECAL.  
 В 1992 г. ИЯИ РАН был предложен для «шашлык» калориметра установки CMS метод считывания света с помощью Si фотодиода, разработаны и изготовлены и малошумящие усилители для прототипов модулей.

## Особенности PIN фотодиодов:

1. Нечувствительность к магнитному полю
2. Малые размеры и потребление
3. Усиление = 1 → нужен малошумящий усилитель
4. Чувствительность к прямой ионизации

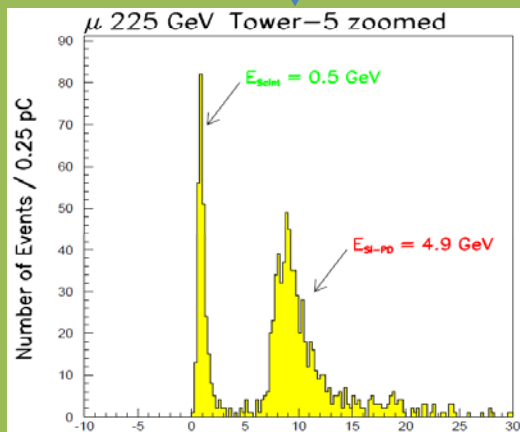
## PIN photodiode:

The scintillation light signals are detected with a silicon photodiode (**Hamamatsu S3590-05**) which has an area of  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  (active area  **$9 \times 9 \text{ mm}^2$** ) with a reverse bias voltage of 80 V to get full depletion. The PIN photodiode has a thickness of **500  $\mu\text{m}$**  which corresponds to a detector capacitance of **27 pF** at full depletion bias voltage. The leakage current is small, below **8 nA**. The quantum efficiency of this photodiode is **68%** at the WLS fibre output  $\lambda = 550 \text{ nm}$ .

Шумы усилителя определяются, в основном, свойствами головного транзистора. Выбор транзистора зависит от условий применения:

1. *Емкость и шумы детектора*
  2. *Длительность сигнала и способа фильтрации*
- Для PIN фотодиодов с площадью  $1 \text{ cm}^2$  и характерна емкость 30 пФ и маленькие токи утечки <10 nA. Длительность сигнала на LHC ~25 нсек.

Для данных условий был найден оптимальный входной транзистор КП341А: JFET N-типа.



Сигнал от мюонов. Толщина PIN диода 500  $\mu\text{m}$ . Можно уменьшить до 300  $\mu\text{m}$ , но вырастет емкость (и шум).

Типичные характеристики транзистора КП341А. Делался отбор по крутизне >20 mA/V и шуму.

Drain current	10mA
Transconductance	20mA/V
Input capacitance	6pF
Frequency bandwidth	1GHz
Leakage current	10pA



# Дискретный малозумящий усилитель для PIN фотодиода

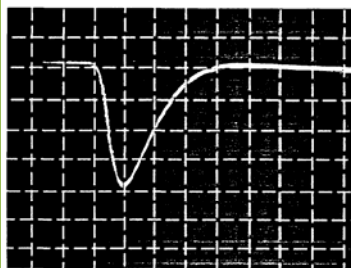
Для прототипов непроективных модулей группой ИЯИ РАН были изготовлены малозумящие усилители на дискретных компонентах. Вклад шума усилителя в энергетическое разрешение составил 80 МэВ на канал.

- energy resolution (Fig. 4.7)  $\frac{\sigma}{E} = \frac{8.4\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.08}{E} \oplus 0.9\%$  ( $10 \leq E \leq 150$  GeV)
- light yield 10 700 photons/GeV
- lateral uniformity  $\sigma \approx 1.2\%$

J.Badier, C. Charlot and All. "Shashlik calorimeter – beam test results." CERN CMS TN/93-66, INR-821/93, X-LPNHE/93-4, March 1993.

## Shashlik calorimeter

Si Photodiode readout



10 ns / div.

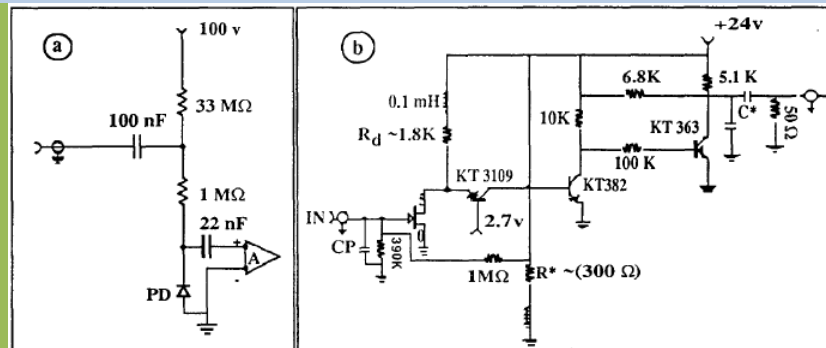
Preamp.

$C_D = 30$  pF  
 $\tau_{RC-CR} = 10$  ns  
 gain = 200 mV/10<sup>6</sup> e<sup>-</sup>

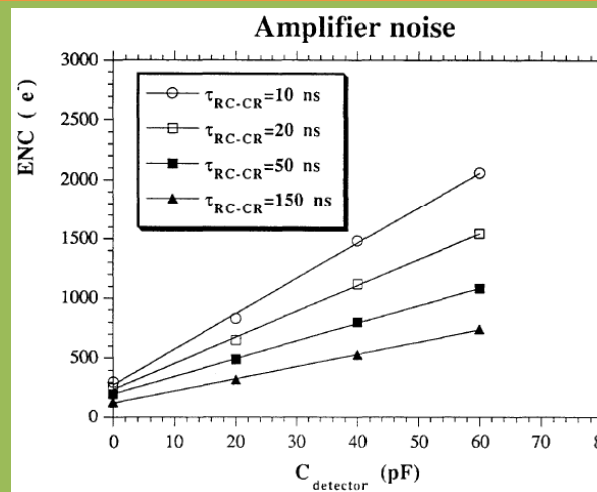
Отклик усилителя на  $\delta$ -импульс с фотодиодом S3590-05 на входе.

J.Badier, G.Bonnuer .. E.Guschin..et al. "Shashlik calorimetry. RD proposal" CERN DRDC 93-28 Aug 1993

J.Badier, G.Bonnuer .. E.Guschin..et al. NIMA 348 (1994) 74-86



Принципиальная схема (ИЯИ РАН) малозумящего усилителя для прототипов модулей калориметра с PIN фотодиодом.



Шум (ENC, e<sup>-</sup>) усилителя в зависимости от емкости и времени формирования. Измерено интегрированием заряда за полное время  $5 \cdot \tau_{RC-CR}$ . Для емкости фотодиода 27 пФ и времени 10 нсек шум = 1100 e<sup>-</sup>.

# Гибридный малошумящий усилитель для PIN фотодиода

Для гибридного усилителя использовался транзистор КП341А в вариант корпуса **SOT-23**. Схема усилителя показана на рис.1. Входная часть представляет зарядочувствительный усилитель, вторая часть дает дополнительное усиление и формировку длительности сигнала 30 нсек. Дизайн усилителя позволяет увеличить время формирования с помощью внешней емкости. Максимальная амплитуда выходного сигнала -2.5В. Потребляемая мощность ~400 мW. Интегральная линейность для интегрирования сигнала в воротах 50 нсек лучше 1% для входного сигнала  $10^3$ - $2 \cdot 10^6$  e<sup>-</sup>. Результат измерения шума для емкости детектора до 70 пФ показан на рис.2. Измеренная чувствительность усилителя 5.4 мV/fC.

**Для НАМАМАТСУ PIN фотодиода S3590-05 с емкостью 27 пФ измеренный шум ENC составляет 1300 e<sup>-</sup>(r.m.s.).**

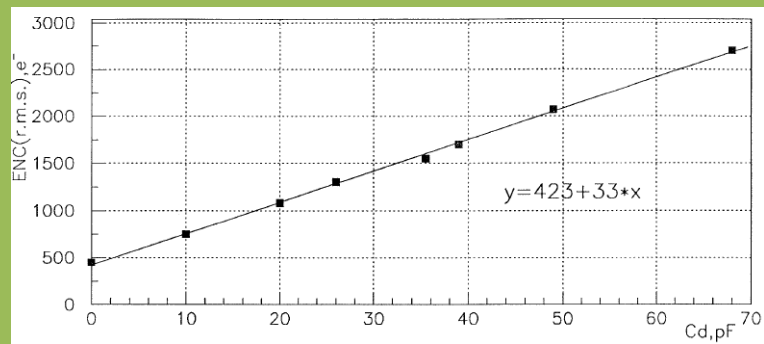


Рис.2. Зависимость шума гибридного усилителя от емкости детектора.

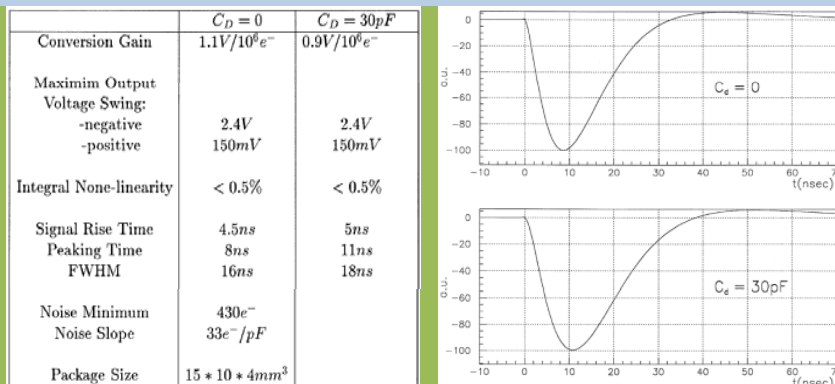


Рис.2. Характеристики гибридного усилителя.

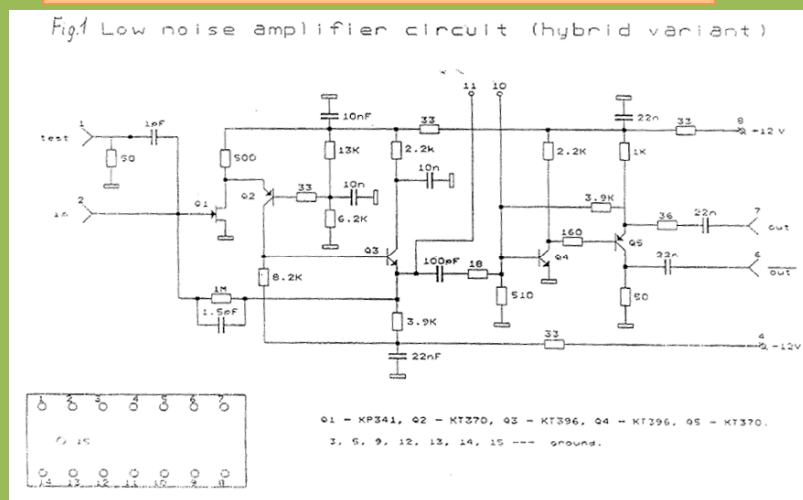


Рис.1. Схема гибридного усилителя.

E.Guschin et al. CERN CMS-TN 93-108

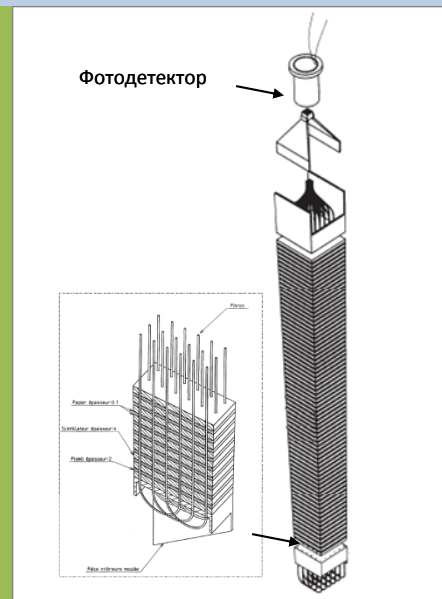
P.Aspell, E.Bates ...E.Guschin et al. NIM A376(1996) 17-28

# Конструкция проективных модулей

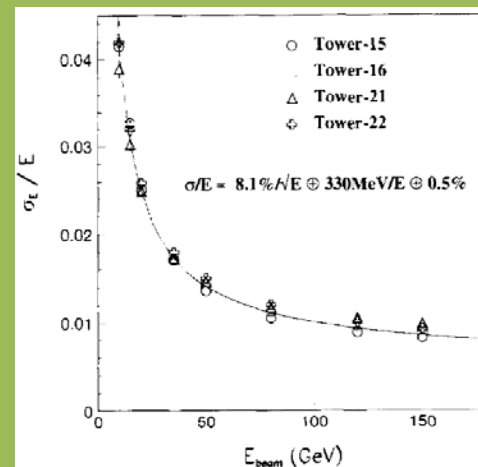
В 1993 г. были разработаны (ИЯИ и ИФВЭ) проективные модули поперечным размером  $47 \times 47 \text{ мм}^2$  и  $52.5 \times 52.5 \text{ мм}^2$

Параметры проективных (29 мрад) модулей

Tower lateral sizes	$52.5 \times 52.5 \text{ мм}^2$	$42 \times 42 \text{ мм}^2$
Number of planes	75	70
Total depth	(465 мм) 27.5X 0	(416 мм) 25.7X 0
Mean radiation length ( $X_0$ )	16.9 мм	16.2 мм
Moliere radius	34 мм	34 мм
Lead thickness	2 мм	2 мм
Scintillator type	polystyrene + 5% POPOP + 2% paraterphenyl	polystyrene + 5% POPOP + 2% paraterphenyl
Scintillator thickness	4 мм	3.75 мм
Type of WLS fibres	K27/Y7	Y11
Number of fibres	36	36
Fibre diameter	1.2 мм	1 мм
Pitch between fibers	9.5 мм	7 мм



Конструкция проективных модулей



# Многоканальные модули: исследуемая проблема

Калориметр типа «шашлык»: можно ли улучшить координатное разрешение и разделить ливней не меняя размер модуля?

Светоизолированные ячейки	Однородный калориметр: ячейки сформированы пучками волокон, без светоизоляции между собой
Размер э-м ливня = размер кластера, лучше локализация ливней	Размер кластера > размера ливня, ухудшено разделение ливней
Нет чувствительности к положению источника света внутри модуля.	Есть позиционная чувствительность к точечному источнику света, возможна коррекция неоднородности светосбора вокруг волокон.
Потери света на границах ячеек, утечки ливня в зазорах между ячейками, дороже сборка модулей	Нет границ ячеек: меньше потерь света и лучше однородность, дешевле производство

**E.Guschin** "Multi-bundle shashlik calorimeter for CMS", Proceedings of The 5th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics, Upton, NY, 25 Sep - 1 Oct 1994.  
**J.Badier, Ph.Bloch, ..E.Gushchin, et al.** 'Multi-bundle shashlik calorimeter prototypes beam-test results', NIM A 354 (1995) 328-337  
**O.Dubois, O.Ganel, R.Wigmans et al.** 'Beam test results from the SPAKEBAB electromagnetic calorimeter', NIM A 368 ( 1996) 640-652

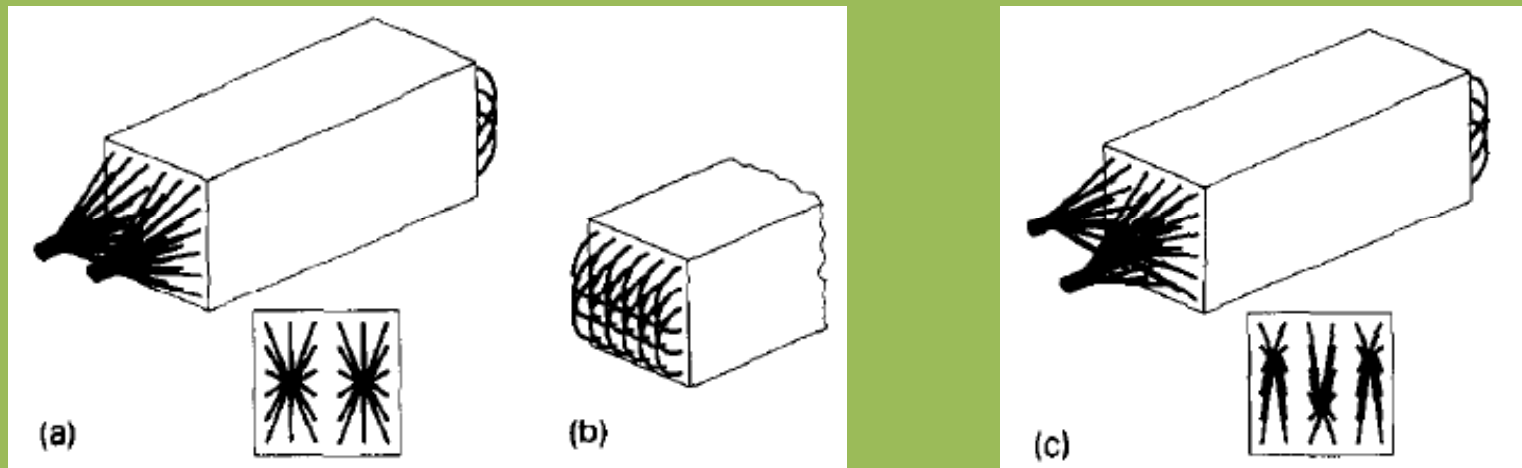
## Увеличение гранулярности калориметра типа «шашлык» для CMS ECAL

Для конкуренции с кристаллическим калориметром требовалось **уменьшение радиационной длины** и **мольеровского радиуса** за счет **увеличения плотности** (уменьшения толщины сцинтиллятора) и соответствующее увеличение гранулярности.

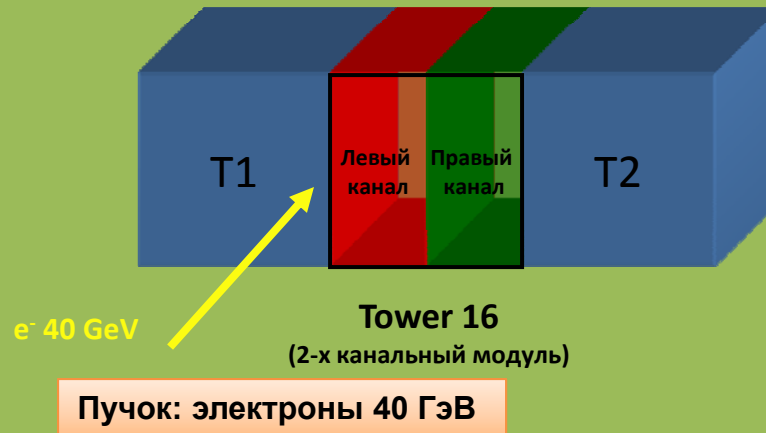
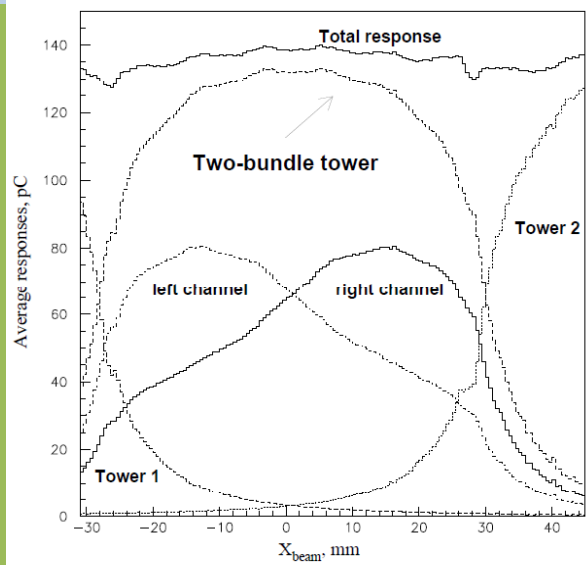
Дальнейшее уменьшение размера ячейки требовало увеличения количества модулей (**дорого и трудоемко**) или применения других способов формирования ячеек.

ИЯИ РАН (1993 г.) для CMS был предложен способ формирования ячеек за счет разделения светового сигнала по нескольким пучкам волокон без физического дробления сцинтилляционных ячеек, рис. (a) – 2 канала; рис (c) – 3 канала. В RD36 коллаборации были изготовлены экспериментальные модули:

- Проективная геометрия: размер модуля спереди  $\square$  52.5 мм, сзади  $\square$  64 мм
- 6 x 6 волокон  $\varnothing$ 1.2 мм, шаг 9.5 мм
- Тип волокна: K-27 (2-К модуль) ; Y-7 (3-К модуль) – без УФ фильтра

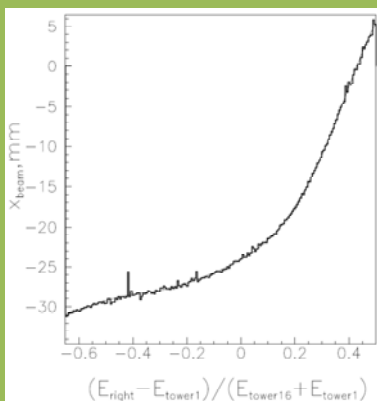


# Исследование пространственного разрешения: 2-х канальный модуль

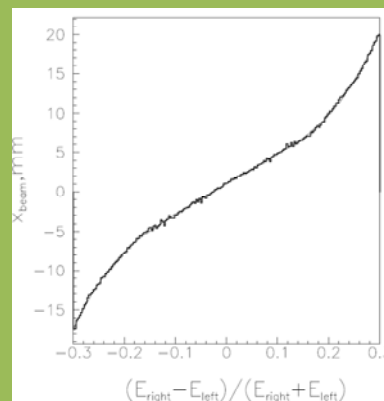


Аналогично стандартной "S-shape" координатной функции были использованы асимметричные комбинации сигналов в каналах модулей:

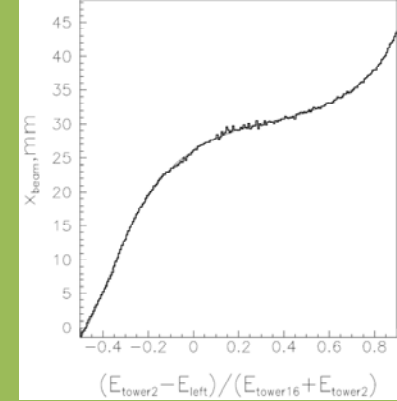
$$x_2 = f_2\left(\frac{E_{\text{right}} - E_{\text{tower1}}}{E_{\text{tower1}} + E_{\text{tower16}}}\right)$$



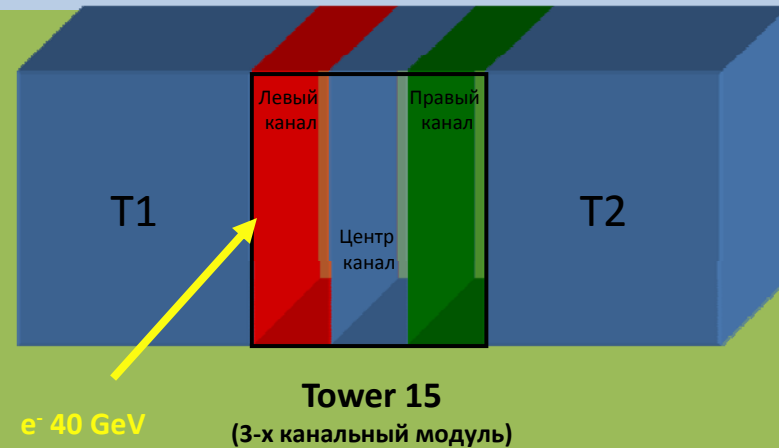
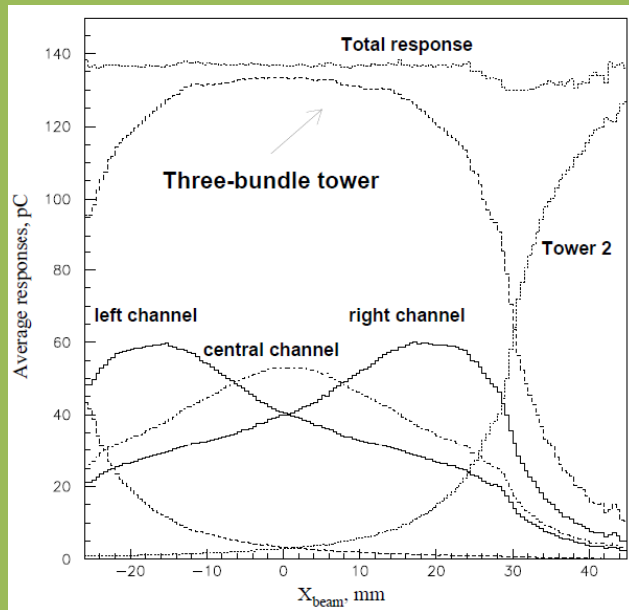
$$x_1 = f_1\left(\frac{E_{\text{right}} - E_{\text{left}}}{E_{\text{right}} + E_{\text{left}}}\right)$$



$$x_3 = f_3\left(\frac{E_{\text{tower2}} - E_{\text{left}}}{E_{\text{tower2}} + E_{\text{tower16}}}\right)$$



# Исследование пространственного разрешения: 3-х канальный модуль



Координатные функции:

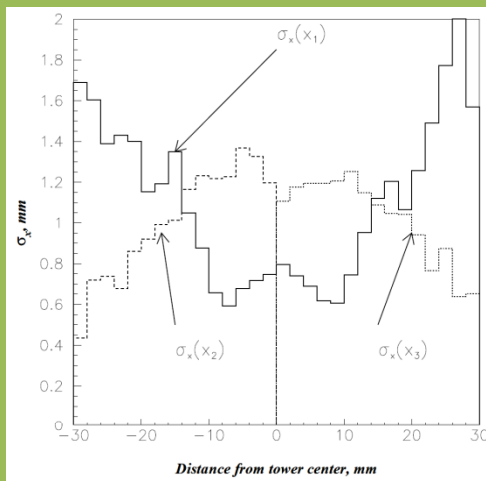
$$x_1 = f_1((E_{\text{right}} - E_{\text{left}})/E_{\text{tower15}})$$

$$x_2 = f_2((E_{\text{right}} - E_{\text{tower1}})/(E_{\text{tower1}} + E_{\text{tower15}}))$$

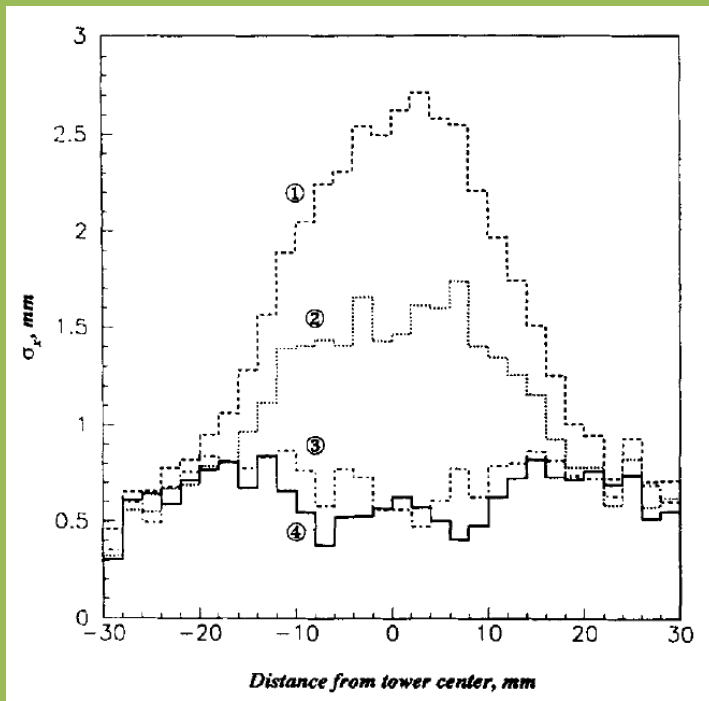
$$x_{2a} = f_{2a}((E_{\text{center}} - E_{\text{tower1}})/(E_{\text{tower1}} + E_{\text{tower15}}))$$

$$x_3 = f_3((E_{\text{tower2}} - E_{\text{left}})/(E_{\text{tower2}} + E_{\text{tower15}}))$$

$$x_{3a} = f_{3a}((E_{\text{tower2}} - E_{\text{center}})/(E_{\text{tower2}} + E_{\text{tower15}}))$$

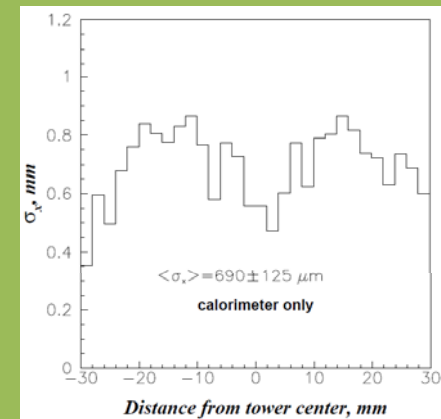
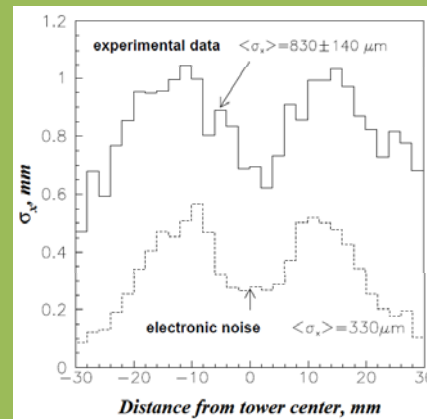


## Сравнение результатов по пространственному разрешению

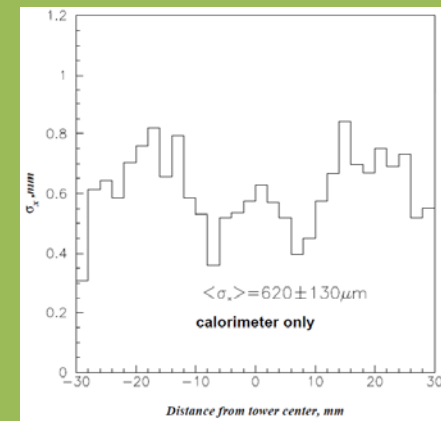
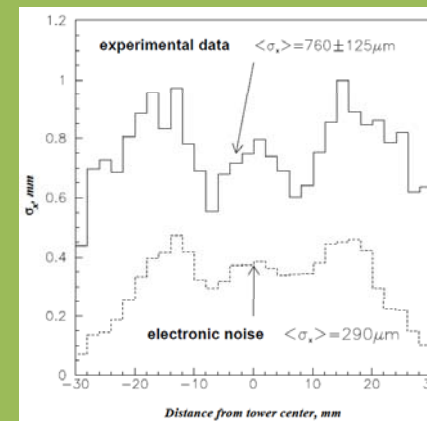


Координатное разрешение, e- 40 ГэВ:

- 1) В модуле с одним каналом
- 2) Один канал с вычитанием вклада шума электроники
- 3) 2 канала, с вычетом шума
- 4) 3 канала, с вычетом шума



Координатное разрешение в 2-х канальном модуле  
 $\langle \sigma_x \rangle = 830 \mu\text{m}$ ; вклад шума электроники  $\langle \sigma_x \rangle_{\text{noise}} = 330 \mu\text{m}$ ;  
 с вычетом шума  $\langle \sigma_x \rangle = 690 \mu\text{m}$ .



Координатное разрешение в 3-х канальном модуле  
 $\langle \sigma_x \rangle = 760 \mu\text{m}$ ; вклад шума электроники  $\langle \sigma_x \rangle_{\text{noise}} = 290 \mu\text{m}$ ;  
 с вычетом шума  $\langle \sigma_x \rangle = 620 \mu\text{m}$ .

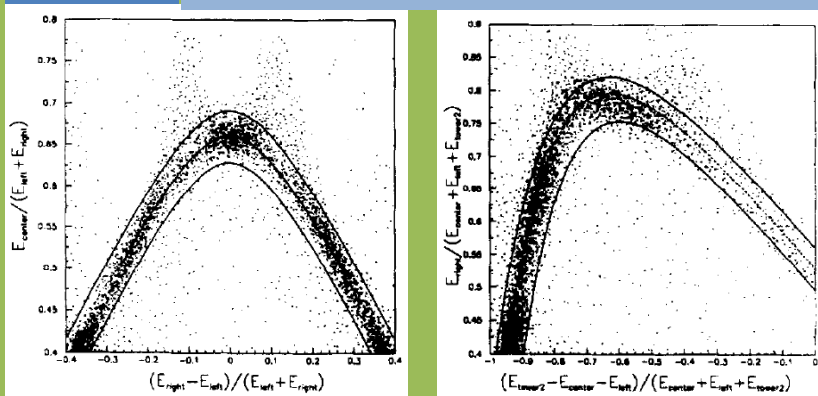


# Коррекция локальной неоднородности светосбора

- Сигнал вблизи волокон (рис. 1) возрастает из-за неоднородности светосбора и дополнительного вклада черенковского света. Применялся тип волокна Y-7 (Kuraray) без UV фильтра.
- Как видно на рис. 1, эффект неоднородности светосбора возле волокон возникает только в канале, к которому относится рассматриваемое волокно.
- Координатные кривые определяются геометрическими параметрами, условиями светосбора и параметрами э.-м. ливня, т.е. слабо зависят от энергии ливня, могут быть измерены
- Таким образом возможна коррекция неоднородности светосбора вблизи волокна, как показано на рис. 2. Результат коррекции приведен на рис.3.

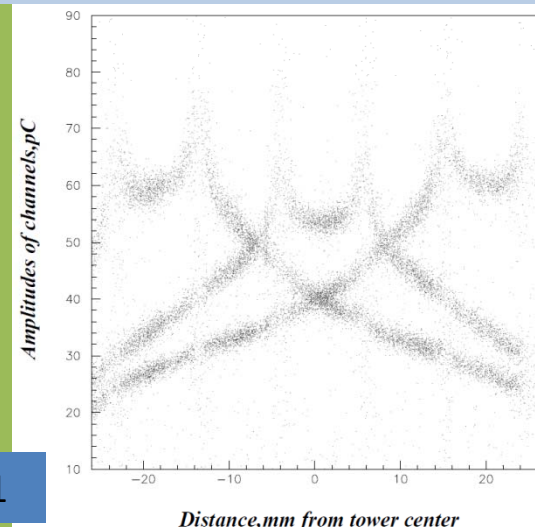
Аналогичным образом может быть выполнена коррекция сигналов от заряженных частиц в фотодиоде, а также поврежденного канала.

**Рис. 2.** Коррекция центрального и правого каналов



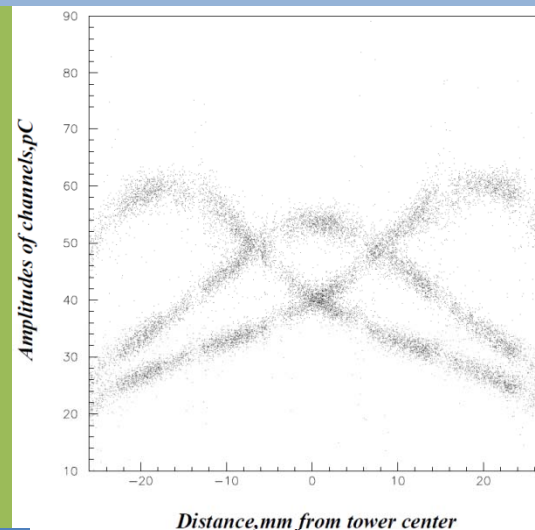
Коррекционные кривые определяются формой ливня и условиями светосбора, то есть слабо зависят от энергии ливня.

**Рис. 1**



срез событий по ряду волокон  $\Delta_y = \pm 1.5$  мм

**Рис. 3**

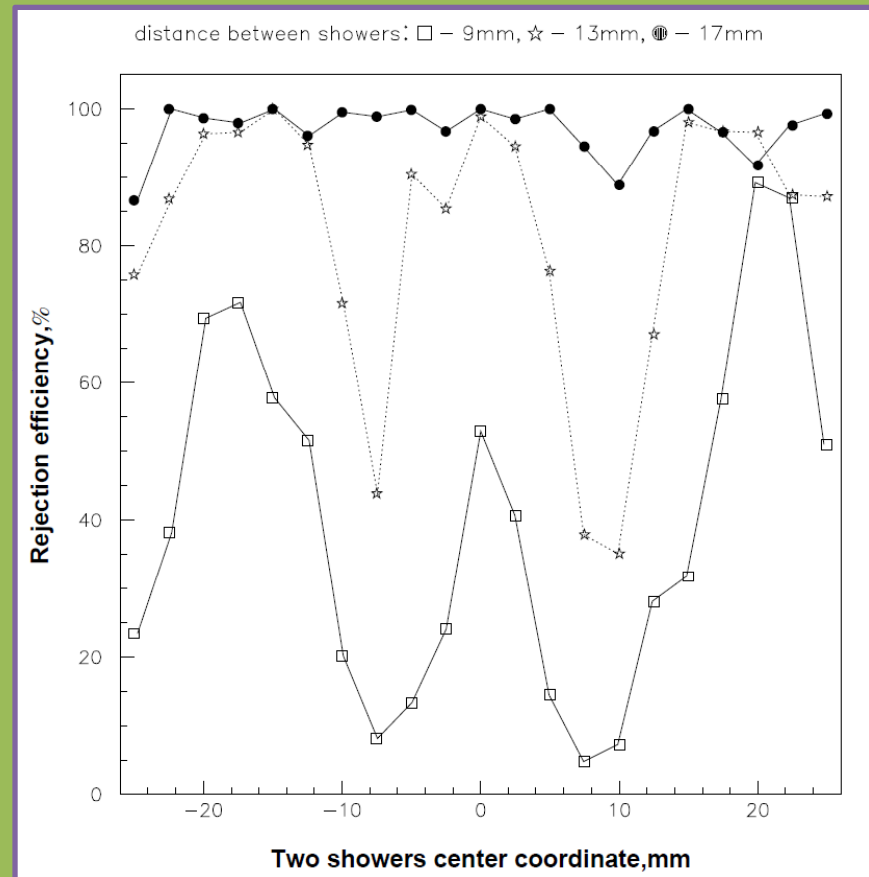


Те же события после коррекции

# Разделение близких ливней

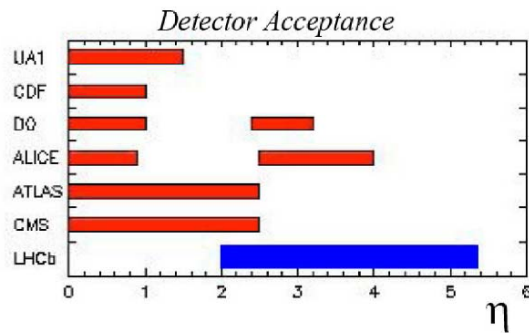
Разделение близлежащих ливней от  $e^-$  энергии 40 ГэВ в модулях с несколькими каналами возможно при использовании корреляции между сигналами в каналах аналогично методу коррекции сигналов вблизи волокон.

На рисунке показан результат отсеивания событий с двумя ливнями энергии 40 ГэВ, расположенных на расстоянии  $\Delta_x = 9, 13$  и 17 мм друг от друга. Видно, что при расстоянии 17 мм ливни разделяются с вероятностью  $>90\%$ .



# LHCb detector

LHCb is forward spectrometer optimized for studies of CPV and B-meson rare decays

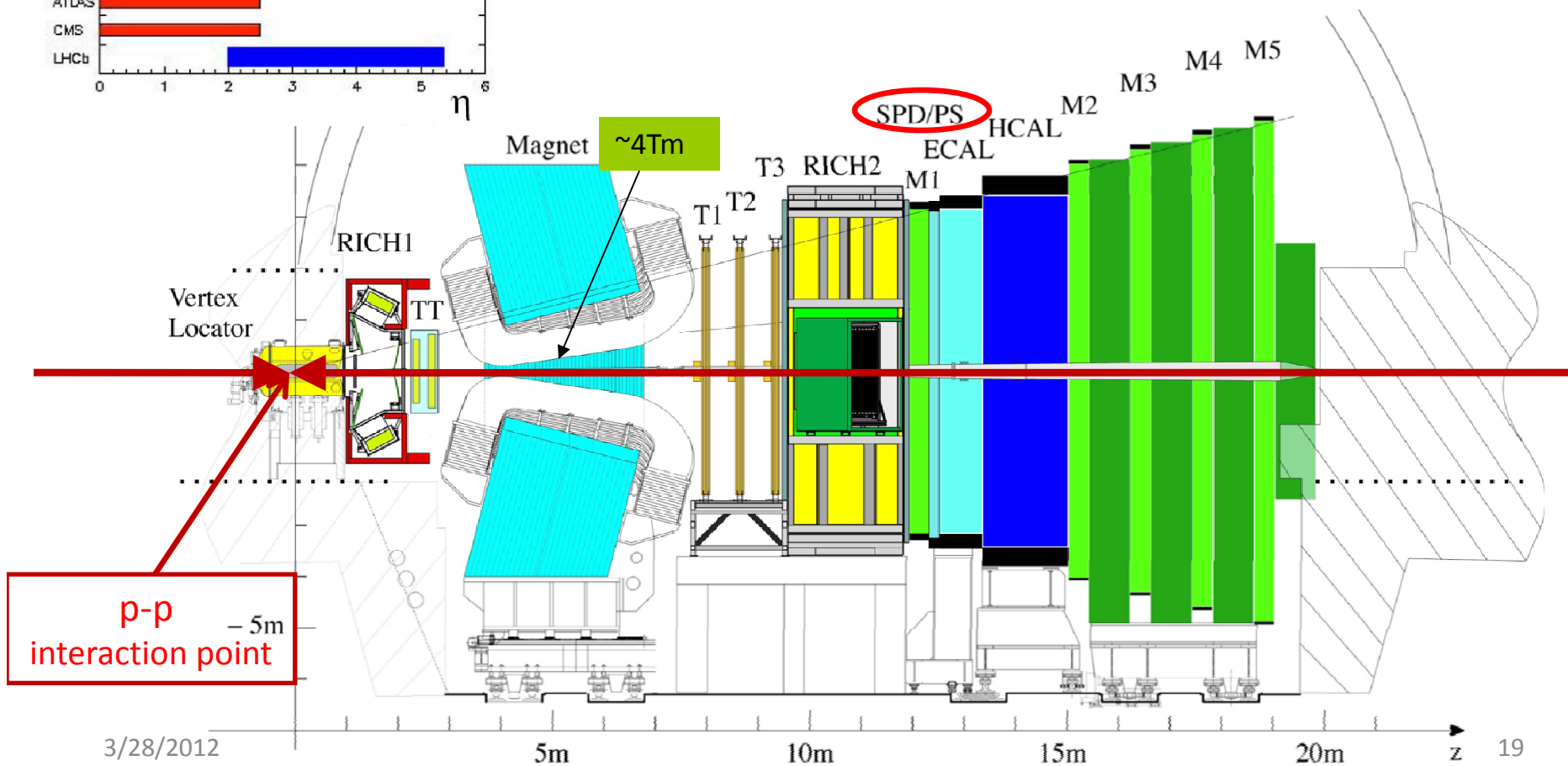


## LHCb key performances:

Vertex/proper time resolution : VELO

PID: RICH, Calorimeter, Muon system

Mass resolution: Tracker



# Калориметрическая система эксперимента LHCb

Калориметр LHCb состоит из:

Подсистема калориметра	Функция
сцинтилляционно-падовый детектор (SPD)	Разделение заряженных и нейтральных частиц
предливневый детектор (PS)	
Электромагнитный калориметр (ECAL)	Измерение энергии электромагнитных ливней
Адронный калориметр (HCAL)	Измерение энергии адронных ливней

## ИЯИ РАН:

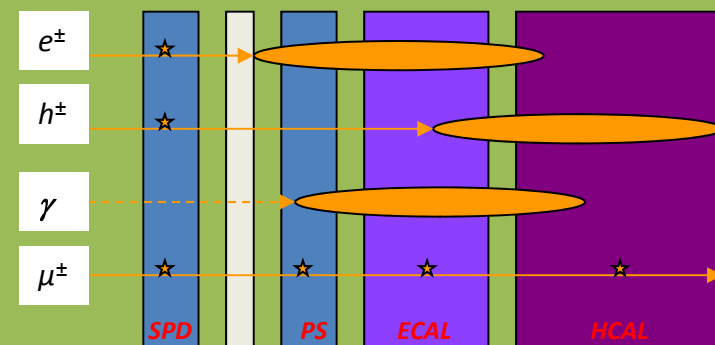
- Разработка методики и элементов конструкции
- Механический дизайн
- Производство ячеек, модулей и супермодулей
- Система мониторинга

## Основные требования к калориметрическим подсистемам LHCb

sub-detector	SPD/PS	ECAL	HCAL
number of channels	2×5952	5952	1468
overall lateral dimension in x,y	6.2 m×7.6 m	6.3 m×7.8 m	6.8 m×8.4 m
depth in z	180 mm, 2 X <sub>0</sub> , 0.1 λ <sub>I</sub>	835 mm, 25 X <sub>0</sub> , 1.1 λ <sub>I</sub>	1655 mm, 5.6 λ <sub>I</sub>
basic requirements	20-30 photoelectrons per MIP	$\sigma(E)/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$	$\sigma(E)/E = 80\%\sqrt{E} \oplus 10\%$
dynamic range	0-100 MIPs 10 bits (PS), 1 bit (SPD)	0-10 GeV E <sub>T</sub> 12 bits	0-10 GeV E <sub>T</sub> 12 bits

## SPD/PS in L0 trigger:

to select electrons/hadrons/γ/μ at high p<sub>T</sub>



# Структура PS/SPD детекторов

- Две плоскости ячеек сцинтиллятора, разделенных плоскостью свинцового конвертера (2.5 X0)
- Общая площадь около 2 x 45 м<sup>2</sup>
- Количество ячеек: 12032
- Количество модулей: 412 + 4\*1/3
- Количество супермодулей: 16

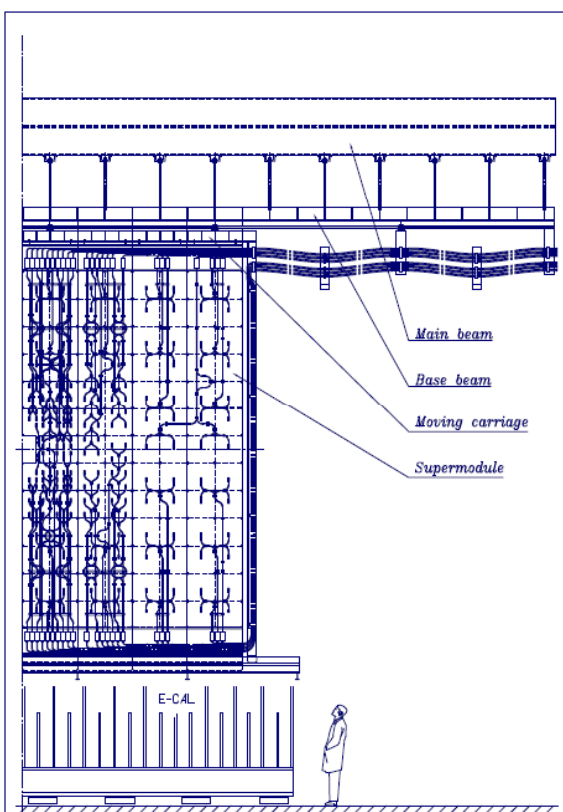


Figure 1: The layout of one half of SPD/PS detector. Optical and signal cables routing is shown.

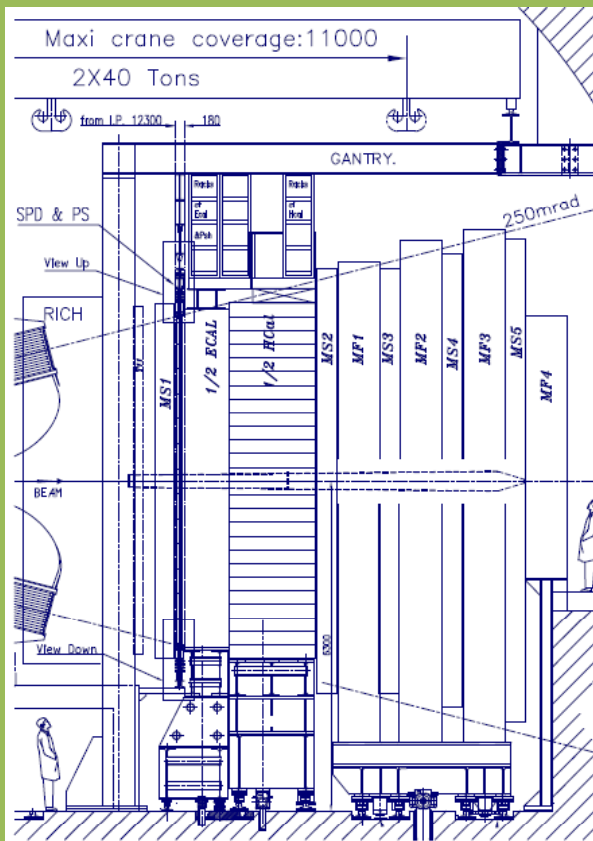
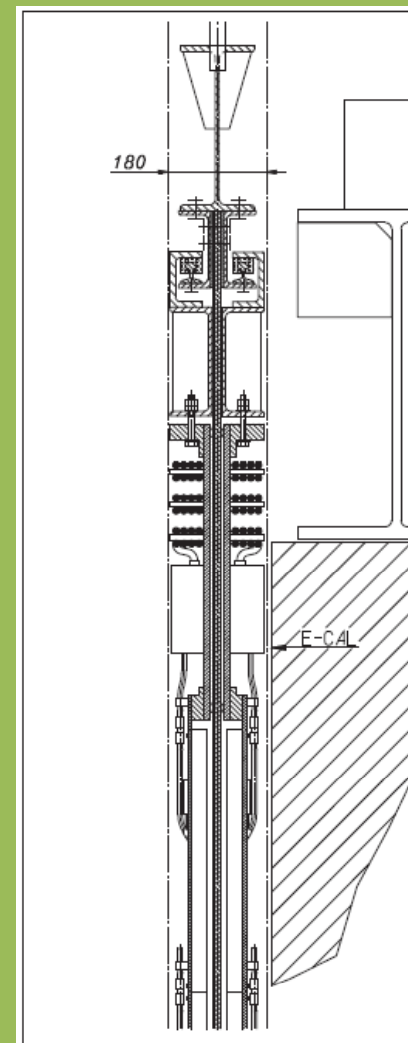


Figure 2: The side view of SPD/PS detector.



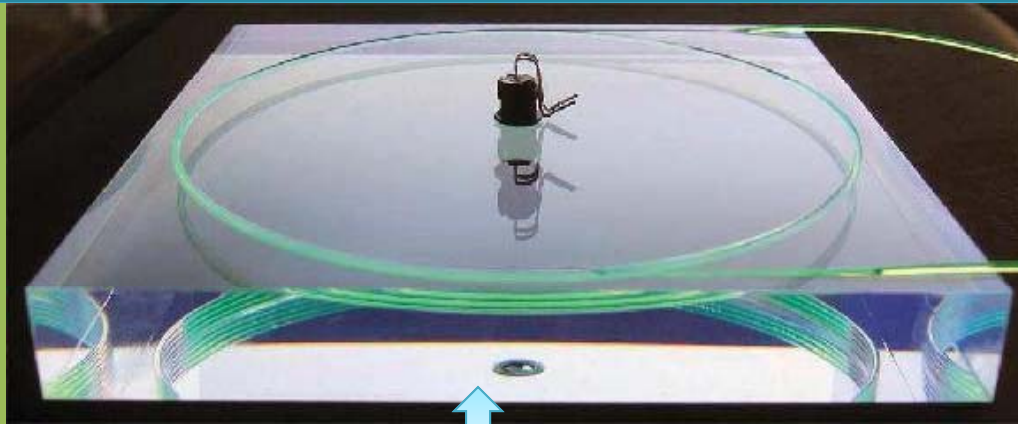
## ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОСБОРА В ЯЧЕЙКЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА

S.Filippov, E.Guschin..et al. CERN LHCb-CALO-2000-31

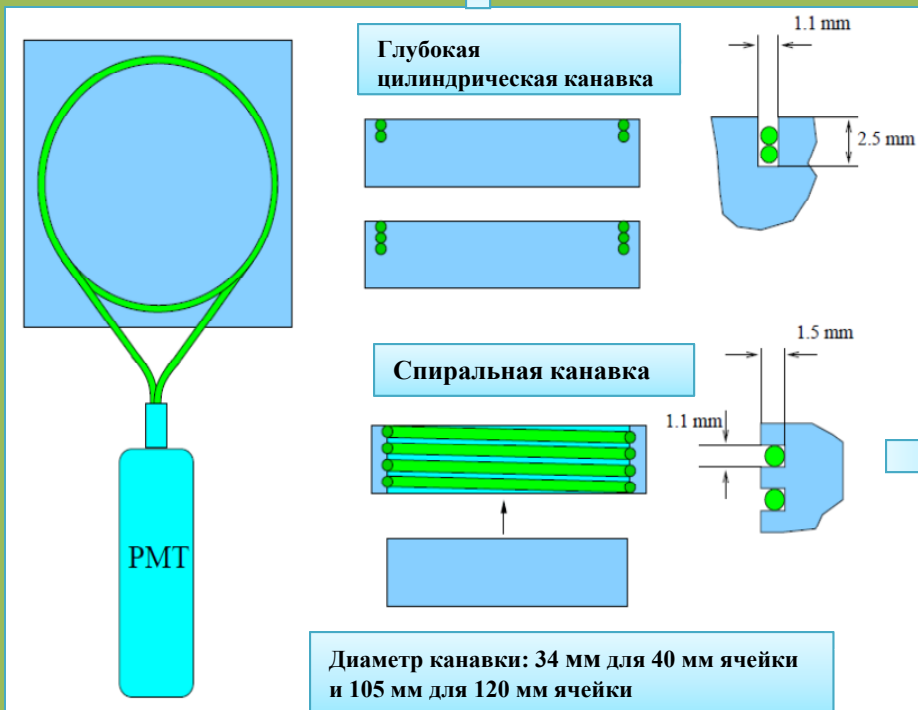
Ю.Гаврилов, Е.Гущин..и др. ПТЭ 2012 №4/2

- **Оптимальный вариант конструкции ячейки:**
  - максимальный светосбор
  - короткий (~25нсек) **временной отклик**
- **Были изготовлены и измерены около 100 разных ячеек:**
  - с различными **конфигурациями канавки**,
  - типами волокна и сцинтиллятора,
  - вариантами светоотражающих оберток,
  - оптического контакта между сцинтиллятором и волокном.
- Основная идея заключалась в оптимизации следующих параметров конструкции ячейки:
  - **количества витков** волокна в кольцевой канавке: учитывались, с одной стороны, эффективность светосбора, а с другой – длительность сигнала по времени, возрастающая с увеличением длины волокна в сцинтилляторе;
  - **геометрии канавки**: сравнивались два варианта (рис. 1): кольцевая канавка с витками волокна, уложенными один на другой по глубине канавки, и спиральная канавка, проходящая сквозь ячейку сцинтиллятора (рис. 2);
  - **толщины сцинтиллятора**: сравнивались два варианта – 10 и 15 мм;
  - **типа сцинтиллятора**: BC408 [5] на основе поливинилтолуола и сцинтиллятор российского производства на основе полистирола;
  - **типа волокна**: сравнивались два типа: Y11(250)MSJ [6] и VCF91A-MS [5];
  - **способа обработки поверхности** сцинтиллятора: а) **полированная поверхность**, обернутая светоотражающей бумагой типа TYVEK, б) полированная поверхность с **алюминизированными** боковыми сторонами и в) **химически обработанная поверхность** с диффузным внутренним отражением света;
  - **вида оптического контакта** между волокном и внутренней поверхностью канавки сцинтиллятора: а) **оптический клей BC-600** [5], б) **оптическая смазка BC-630** [5] и в) **воздушный контакт**.
- Для измерений использовались ячейки размерами **40×40 мм** и **120×120 мм**.

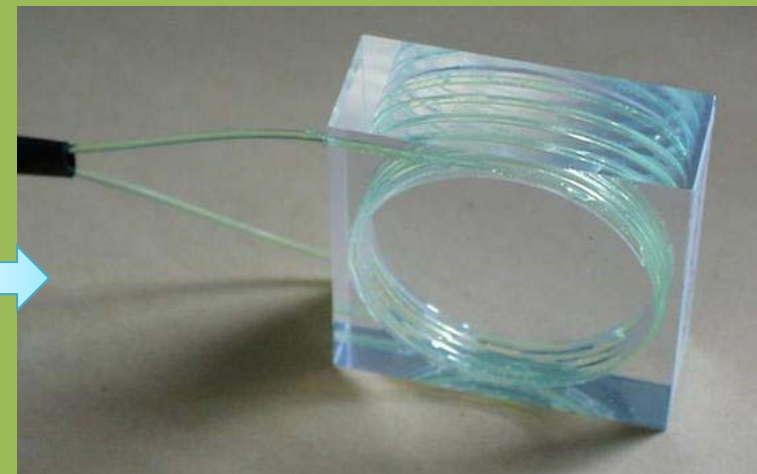
# Варианты канавки



**Глубокая цилиндрическая канавка**  
Количество витков: 1-4



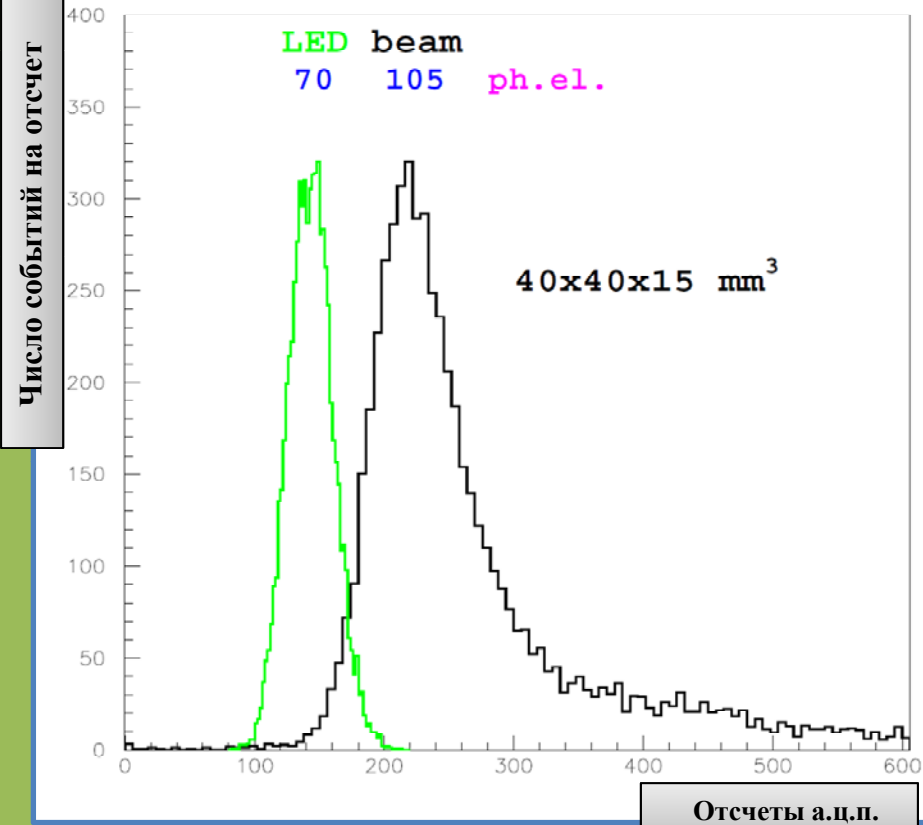
**Спиральная канавка**  
Количество витков: 4-8



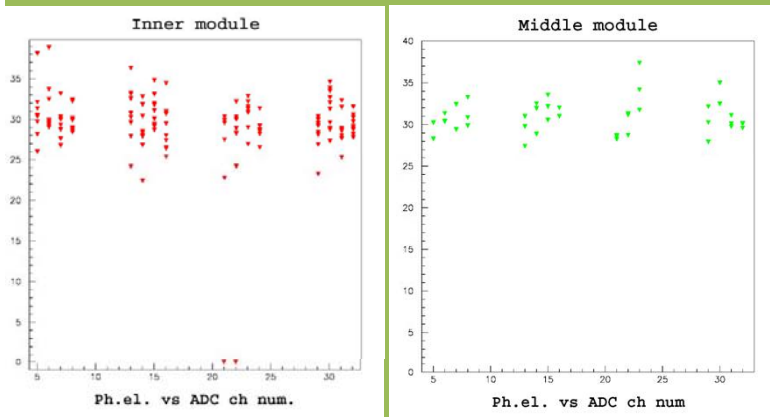
# Измерения световыхода прототипов ячеек - II

Электроны с энергией 50 ГэВ  
в ячейке  $40 \times 40 \times 15$  мм<sup>3</sup> из  
сцинтиллятора на основе полистирола.  
4.5 витка волокна Y11(250)MSJ  
диаметром 1 мм клеены в спиральную  
канавку.  
Сигнал от светодиода (а) соответствует  
~70 ф.э., для наиболее вероятного  
значения сигнала от частиц (б) оценка  
световыхода даёт ~105 ф.э.  
Фотоприемник – ФЭУ85.

Итоговый световыход в модулях после 3  
метров прозрачного волокна с  
многоанодным ФЭУ составил 25-30 ф.э.



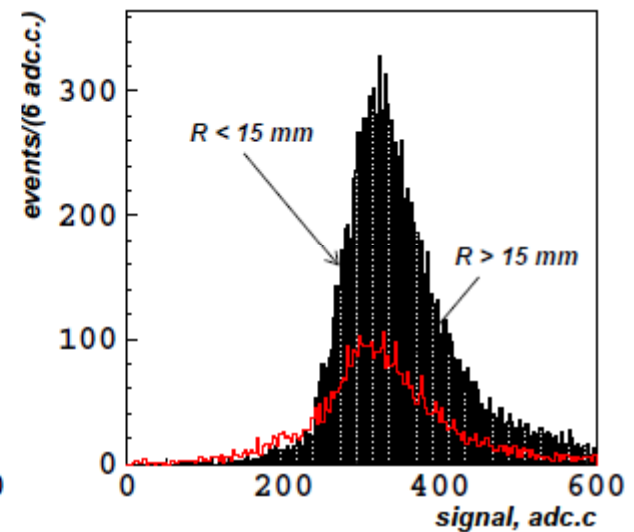
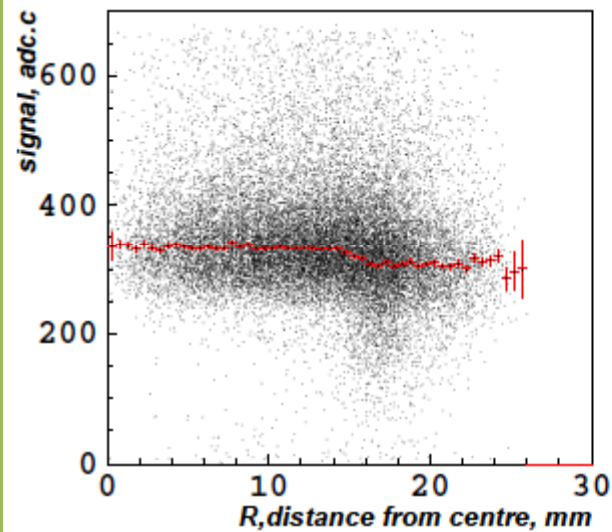
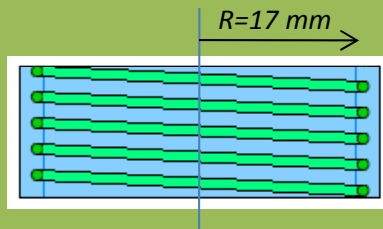
Распределение сигналов от электронов с энергией  
50 ГэВ и калибровочного светодиода.



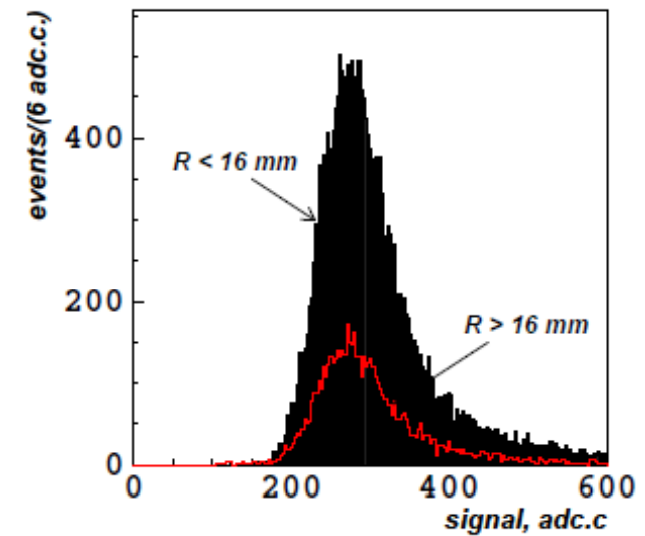
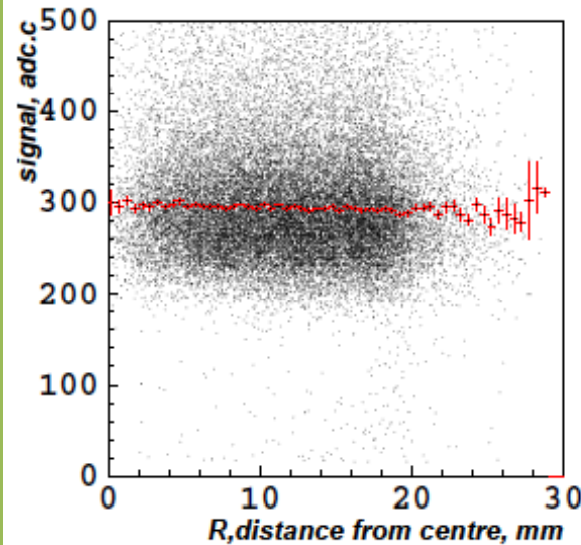
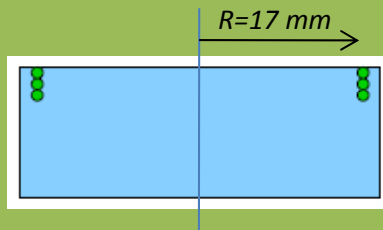


# Однородность отклика ячеек на частицы

Есть неоднородность в районе спиральной канавки:  
4.5 витка волокна

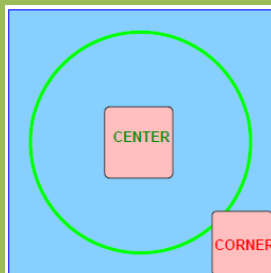


Хорошая однородность в случае глубокой цилиндрической канавки:  
2.5 витка волокна



## Однородность отклика ячеек на частицы - II

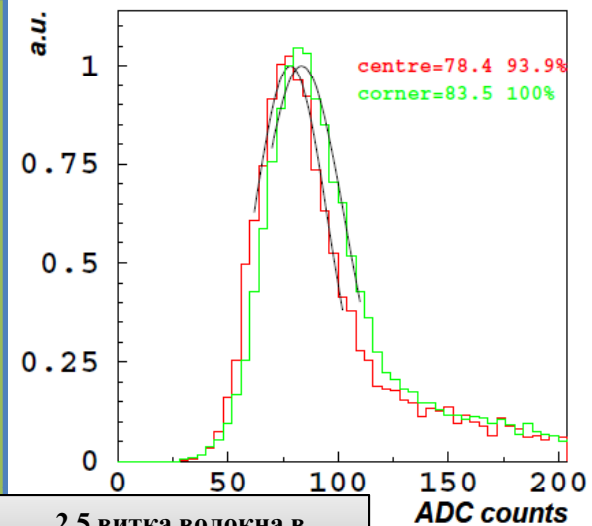
«Глобальная» неоднородность отклика в ячейках  $120 \times 120 \times 10$  мм ожидается большей, чем в ячейках меньшего размера. На рисунках показаны результаты измерений с 2.5 и 3.5 витками волокна в глубокой канавке.



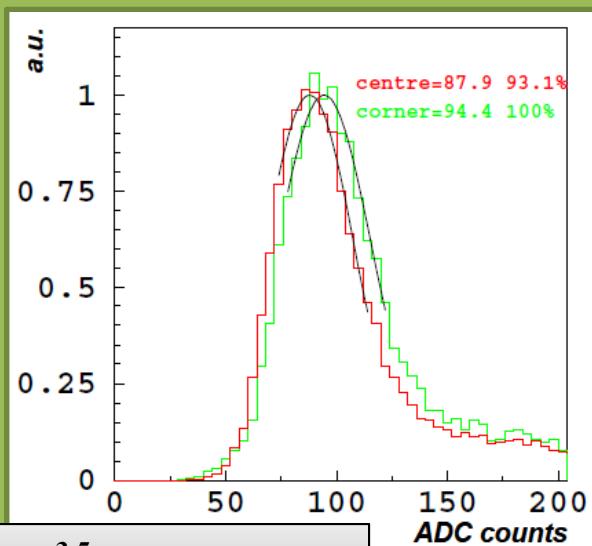
Из-за удаленности от волокна отклик в центре ячейки  $120 \times 120 \times 10$  мм на 6-7% меньше, чем в углу, что удовлетворяет требованиям эксперимента. Для более толстых ячеек, например, выбранных в конечном варианте толщиной 15 мм, эффект еще меньше.

**По результатам измерений неоднородности отклика в исследованных ячейках можно сделать следующие выводы:**

- 1) изменение среднего отклика по ячейке  $120 \times 120$  мм не превышает 3% (r.m.s.), средний отклик в центре ячейки на ~7% меньше, чем в углу;
- 2) общая неоднородность светосбора в ячейках размером  $40 \times 40$  мм меньше, чем в ячейках  $120 \times 120$  мм;
- 3) падение сигнала в области канавки тем меньше, чем больше толщина ячейки, меньше глубина канавки и меньше число витков волокна;
- 4) эффект падения сигнала в области спиральной канавки несколько больше из-за дополнительных потерь толщины пластика и утечек в зазоре между частями сцинтиллятора;
- 5) конструкция ячейки с 2.5–4.5 витками волокна в глубокой канавке обеспечивает однородность световыхода >97% и эффективность регистрации >95% при пороге 0.5 м.и.ч..



2.5 витка волокна в цилиндрической канавке



3.5 витка волокна в цилиндрической канавке

## ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ЯЧЕЙКИ ДЕТЕКТОРА

### **Выбор типа сцинтиллятора**

Световой выход сцинтиллятора BC-408 на основе *PVT* в  $\sim 1.5$  раза больше, чем на основе *PS*. Однако *PS* - сцинтиллятор существенно дешевле в производстве, проще в обработке и более устойчив к образованию микротрещин. Поэтому **предпочтительнее использовать сцинтиллятор на основе *PS***, увеличив толщину ячейки с 10 до 15 мм.

### **Выбор толщины ячейки**

Измерения прототипов детекторов толщиной 10 и 15 мм подтвердили, что световой выход приблизительно пропорционален толщине сцинтиллятора. Механическая конструкция *PS/SPD* позволяет увеличить толщину сцинтиллятора до 15 мм. Световой выход является наиболее критичным параметром, поэтому выбрана **толщина сцинтиллятора 15 мм**.

### **Выбор типа канавки**

Измерения показали, что светосбор для исследованных вариантов канавки различается незначительно, поэтому был **выбран вариант с кольцевой канавкой** как более технологичный.

### **Выбор типа спектрсмещающего волокна**

Волокно **Y11(250)MSJ** (Kuraray,JP) являлось единственным на рынке, удовлетворяющим требованиям: а) высокого световыхода, б) механической устойчивости к изгибам радиусом до 17.5 мм, в) радиационной стойкости до 1 Мрад и г) достаточно быстрого времени высвечивания.

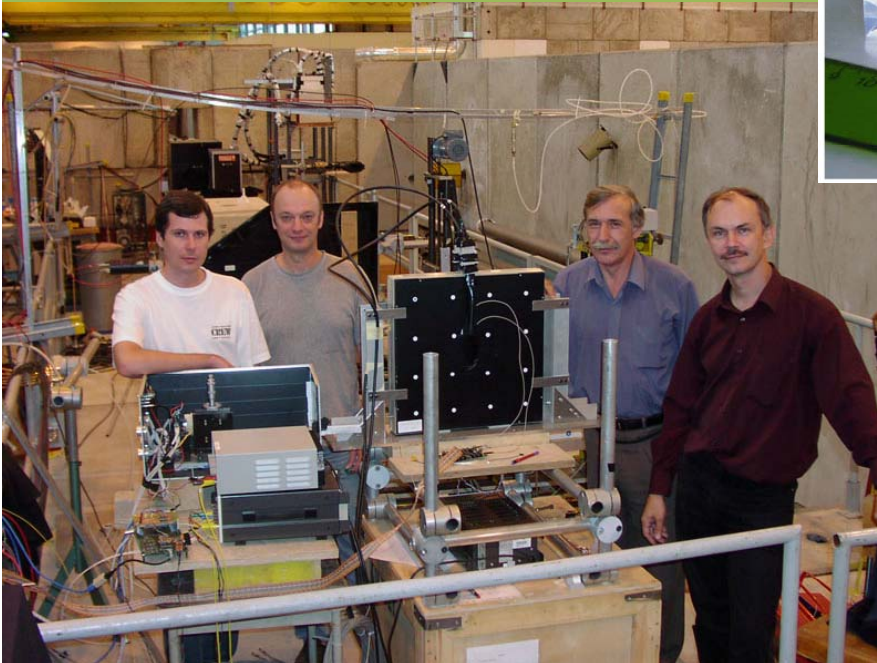
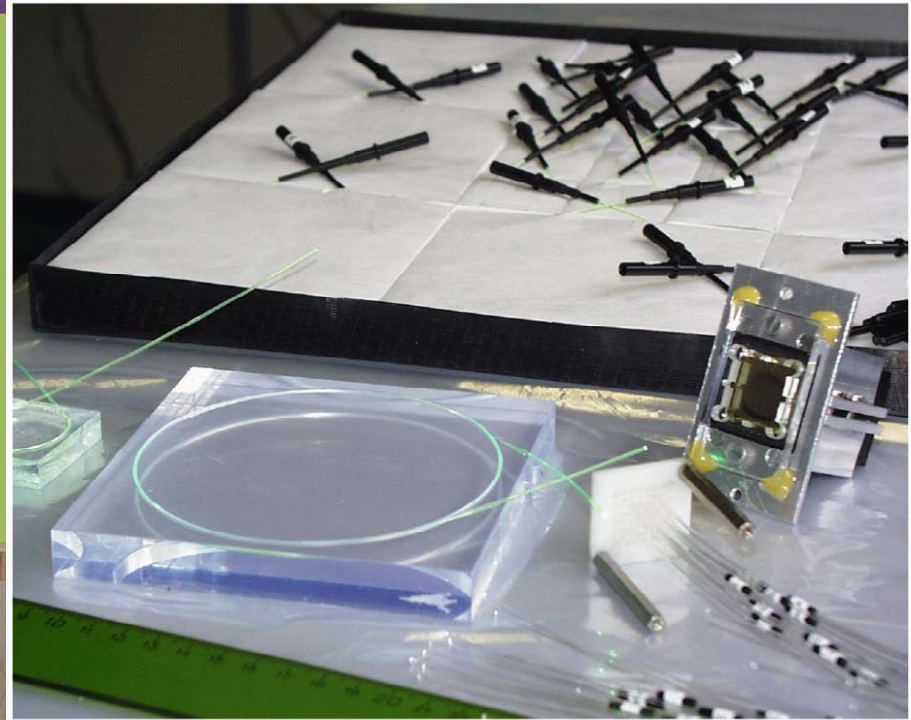
### **Выбор числа витков волокна в канавке**

С ростом числа витков количество перехватываемого волокном света увеличивается, но начинает быстро насыщаться при числе витков более трех. Также учитывая ограничение на длительность сигнала, нами выбрано **оптимальное число витков волокна 3.5**.

## Прототипы модулей PS/SPD и измерения на пучке X7 SPS (CERN)

Были изготовлены прототипы модулей:

- размером 36x36 см – 2 шт:
  - ✓ из полистирола толщиной 1.5 см
  - ✓ VC-408 толщиной 1 см
  - ✓ с ячейками 12x12 и 4x4 см в центре
  - ✓ Корпус из углепластика, толщина стенки 250  $\mu\text{m}$
- из полистирола размером 48x48 см с ячейками 12x12x1.5 см – 2 шт.

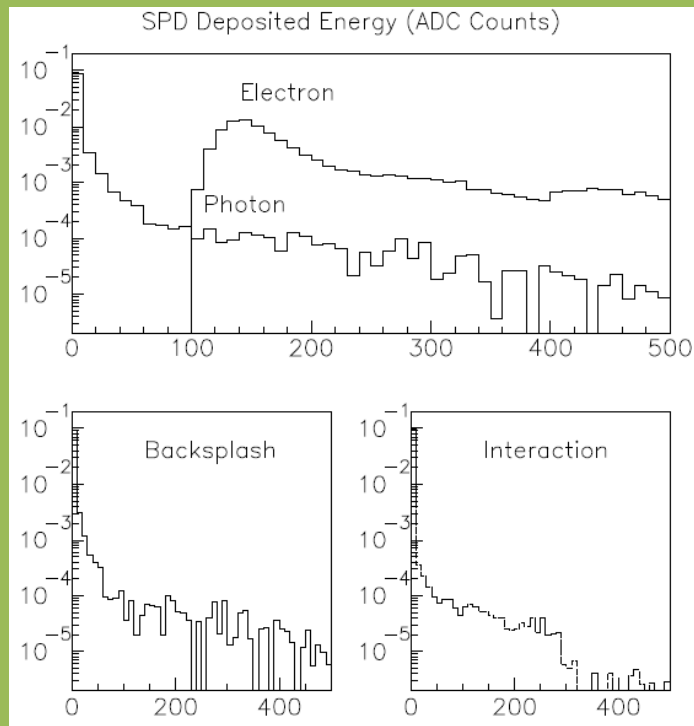


Программа испытаний на тестовом пучке:

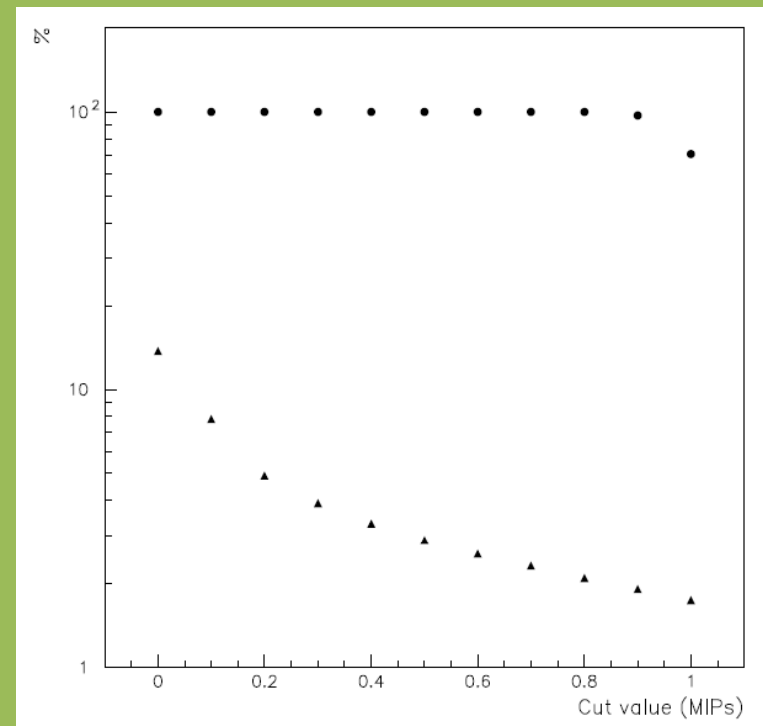
- Регистрация заряженных частиц
- $\pi/e$  разделение
- Энергетическое разрешение с ECAL
- Линейность и оптическая связь между каналами многоанодного ФЭУ

# Разделение электронов и $\gamma$ -квантов в SPD

Вероятность для фотона дать сигнал выше порога регистрации электрона была измерена на пучках электронов и меченных фотонов энергией 20-50 ГэВ. Свет с ячейки SPD регистрировался напрямую ФЭУ без волокон, чтобы понизить статистические флуктуации сигнала.



Экспериментальные данные: (вверху) нормализованные распределения сигналов в SPD для электронов и фотонов 46-48 ГэВ; (внизу) разделение сигналов от фотонов по их механизму: (слева) от частиц, летящих назад из-за взаимодействия фотона в свинце; (справа) из-за взаимодействия в сцинтилляторе.



Доля электронов и фотонов энергии 20 ГэВ, триггерующих ячейку SPD 4x4 см в зависимости от порога регистрации в единицах сигнала от минимально-ионизирующей частицы  $E_{\text{mip}} \approx 2.85$  МэВ.

# $\pi/e$ разделение в предливневом детекторе

- Пучок электроны и пи-мезоны 10-50 ГэВ
- Тестовая установка, все прототипы калориметров LHCb:

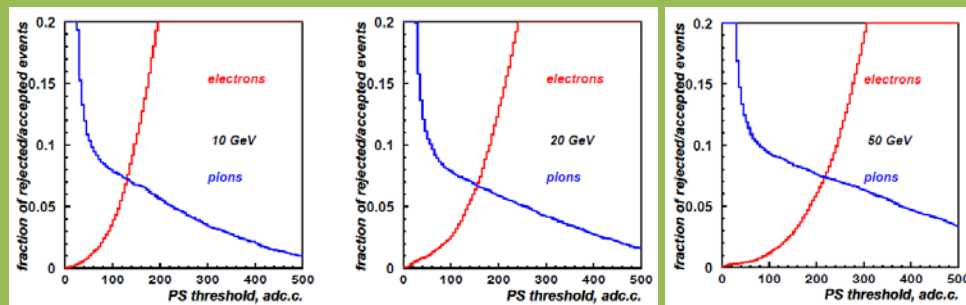
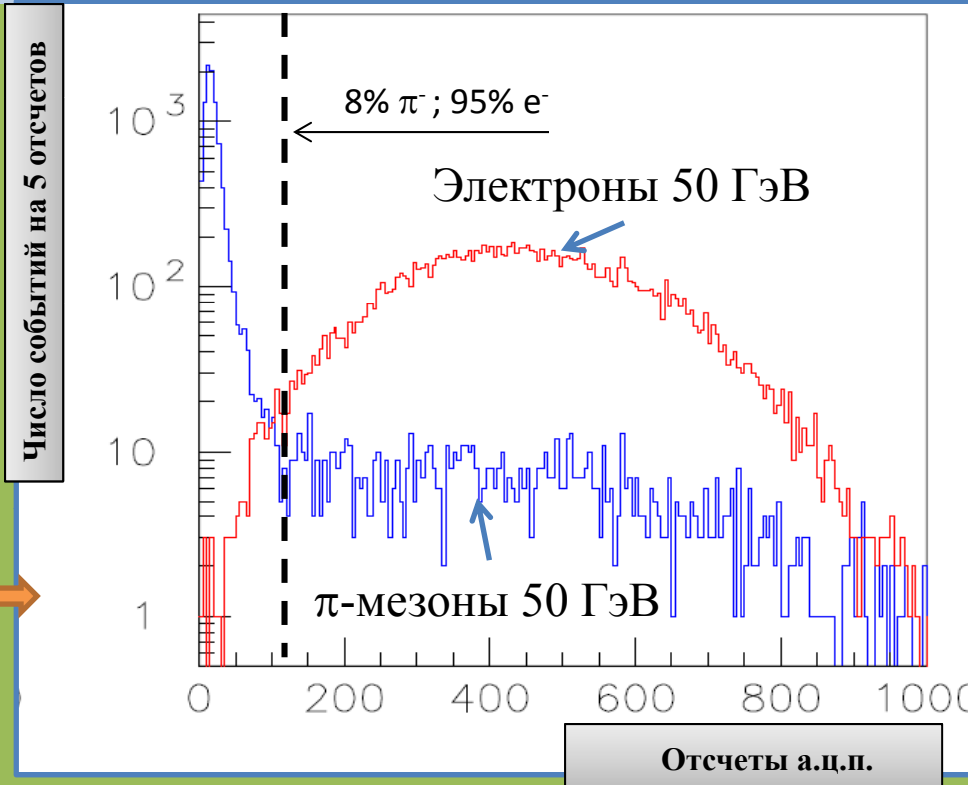


$\pi/e$  разделение:

- Только в PS детекторе
- PS + ECAL
- PS + ECAL + SPD

$\pi/e$  разделение в PS детекторе, 1 см свинца:

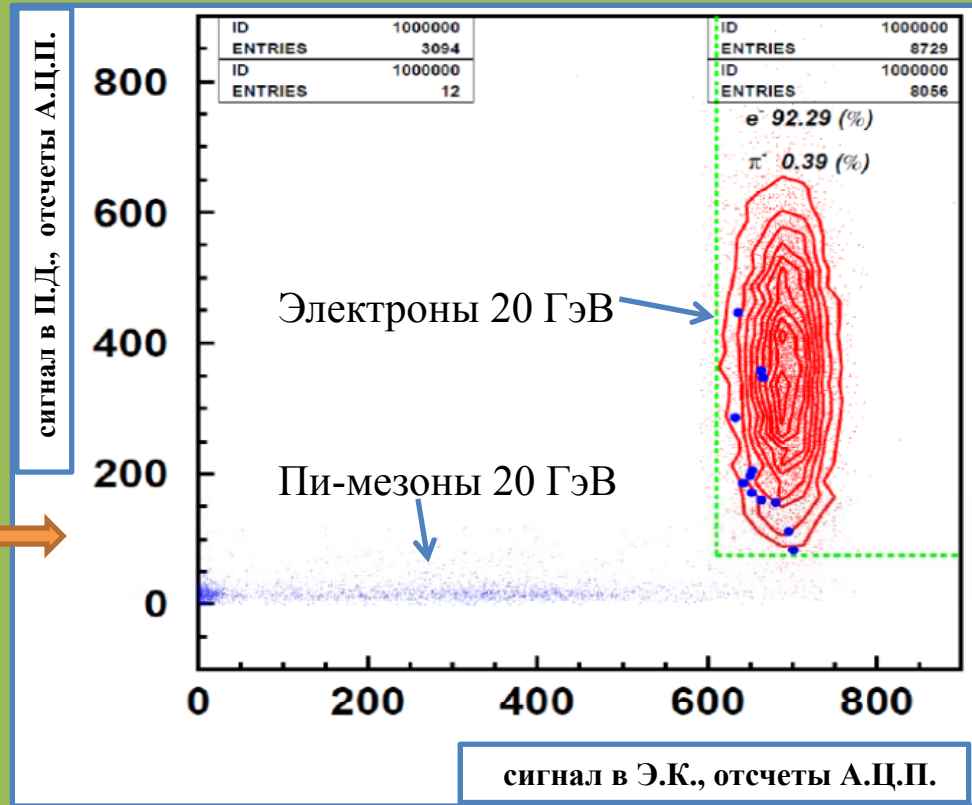
энергия	10 ГэВ	20 ГэВ	50 ГэВ
Доля $\pi$	7.5 %	7 %	8 %
Доля $e$	95 %	95 %	95 %



# $\pi/e$ разделение в PS + ECAL

Совместное  $\pi/e$  разделение PS + ECAL:

- Известен импульс частицы (магнит + трекер)
- Измеряется энергия в PS
- **+**
- Измеряется энергия э-м ливня
- Область выделения электронов в  $\{E_{ECAL}, E_{PS}\}$  зависит от энергии



$\pi/e$  разделение в PS + ECAL:

энергия	10 ГэВ	20 ГэВ	50 ГэВ
Доля $\pi$	0.4 %	0.4 %	0.3 %
Доля $e$	91 %	92 %	97 %

# $\pi/e$ разделение в PS + SPD

Совместное  $\pi/e$  разделение PS + SPD:

- Измеряется размер кластера в SPD = количество соседних сработавших ячеек (размером 4x4 см)
- Измеряется энергия в SPD
- Измеряется энергия в PS

Гипотеза  
электрона

Кластер<sub>SPD</sub> < 5

$E_{SPD} < 10 \text{ mip}$

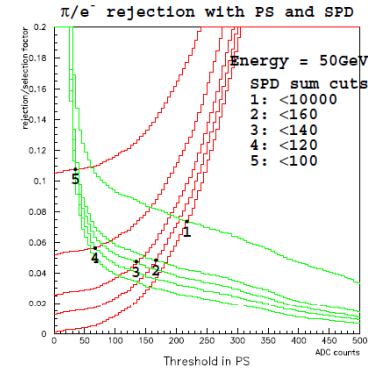
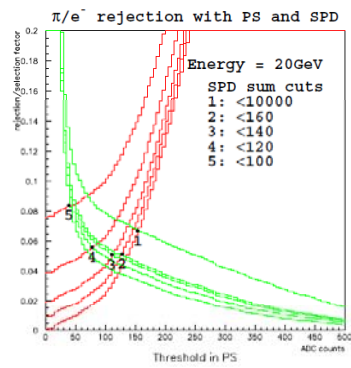
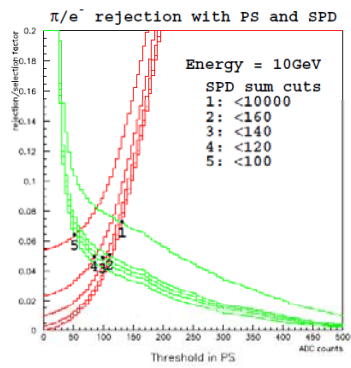
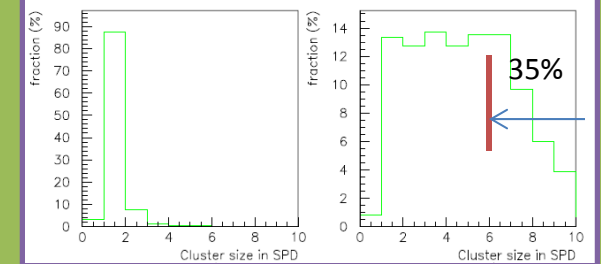
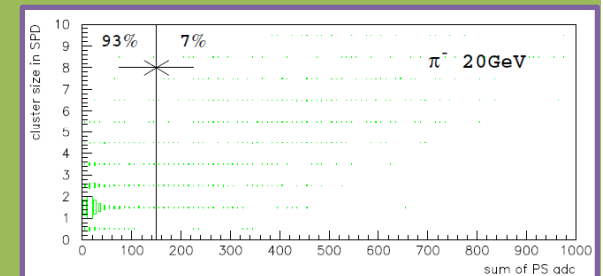
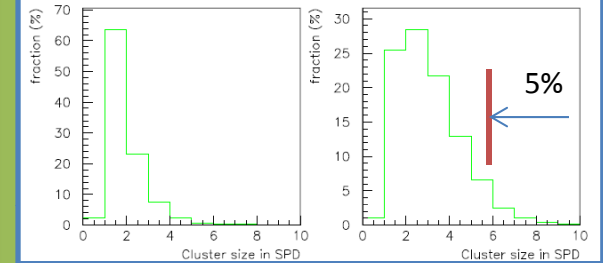
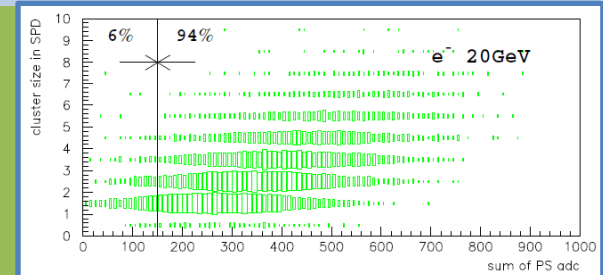
$E_{PRS} > 3-5 \text{ mip}$

Взаимодействие пи-мезонов с ядрами Pb дает выход нейтронов с энергией несколько МэВ, переносящих до 40% неэлектромагнитной компоненты энергии адронного ливня\*. Нейтроны упруго взаимодействуют в сцинтилляторе с протонами  $\lambda_{\text{пробег}} \sim 10 \text{ см}$ . За счет этого происходит образование широкого гало адронного ливня.

Нами было измерено, что размер кластера и энергия в SPD для пи-мезонов, выделевших энергию в PS выше порога регистрации электронов, больше, чем для электронов той же энергии. Это может быть использовано для дополнительного подавления пи-мезонов на 20-50 % в зависимости от энергии.

Следует отметить, что в условиях эксперимента LHCb возможность такого подавления будет ограничена из-за высокой множественности треков и перекрытия сигналов от соседних частиц.

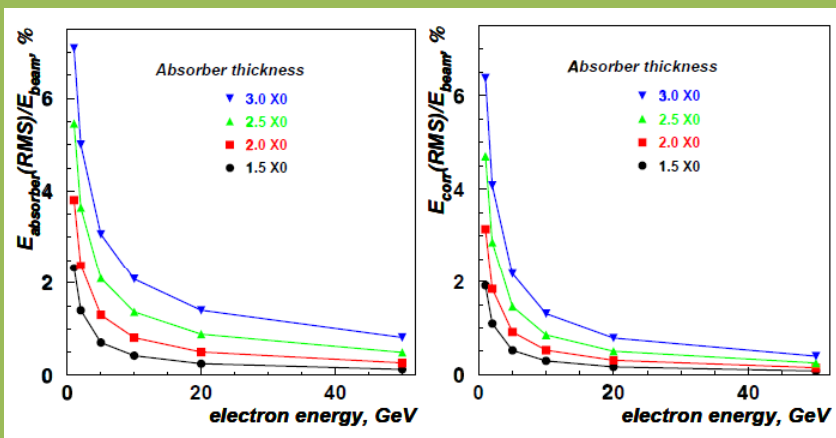
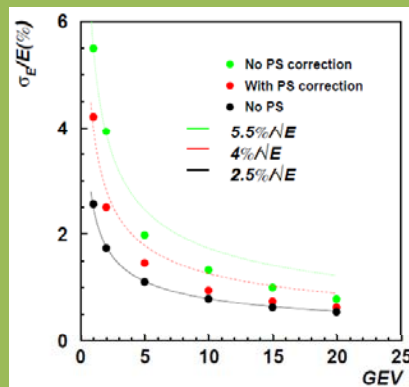
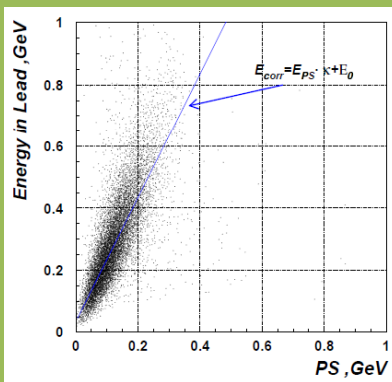
\*) R. Wigmans, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 41 (1991) 133, and references therein.





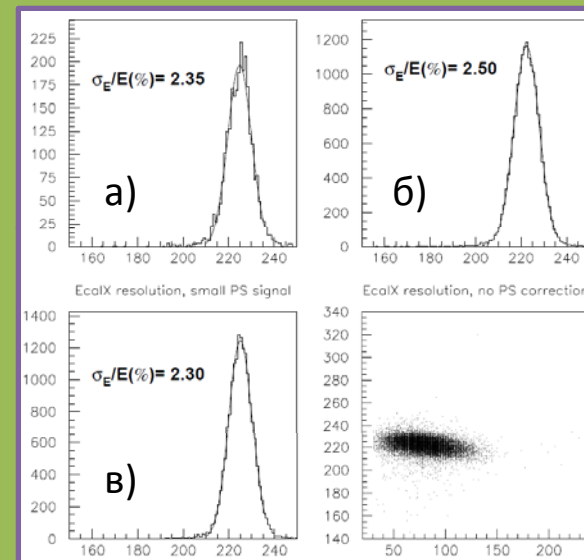
# Энергетическое разрешение PS + ECAL

Моделирование методом Монте-Карло (Geant3). Линейная коррекция энергии, потерянной в 1 см свинца ( $\approx 2X_0$ ), показывает, что в случае идеального ECAL + PS разрешение лучше, чем  $4\%/\sqrt{E}$ .



E.Guschin, S.Laptev. CERN LHCb-CALO-2000-30

Пучковые измерения, электроны 20 ГэВ.  
Коррекция энергии в ECAL с PS, 1 см свинца.

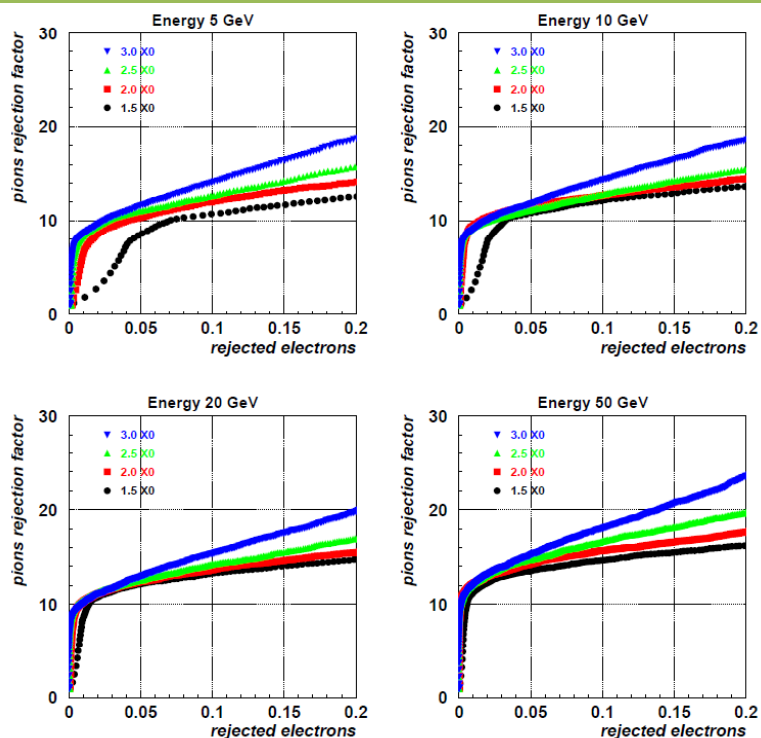


Энергетическое разрешение:  
а) один ECAL без PS, б) ECAL + PS без коррекции,  
в) ECAL + PS с коррекцией.

# Выбор толщины конвертора: моделирование методом Монте-Карло.

Выбор толщины конвертора:

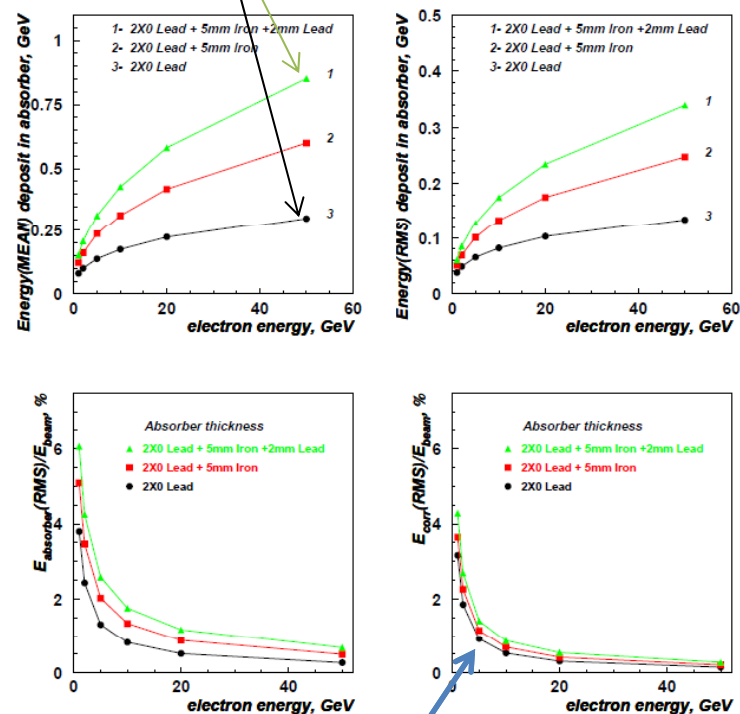
При выборе порога с эффективностью к электронам 90-95% подавление  $\pi$  мезонов слабо зависит от толщины 2-3 X0. Энергетическое разрешение более чувствительно к толщине свинца (см. предыдущий слайд). В итоге для PS LHCb выбрана толщина свинца 14 мм = 2.5 X0.



E.Guschin, S.Laptev. CERN LHCb-CALO-2000-30

LHCb CALO Technical Design Report. CERN-LHCC-2000-36

Моделирование также показало, что потери энергии ливня происходят не только в конверторе PS, но и в переднем слое пассивного материала модуля «шашлыка». Так в случае, если передняя пластина модуля = 5 мм железа и первый слой структуры – 2 мм свинца, то невидимая часть энергии ливня возрастает почти в 3 раза:



При правильном выборе коэффициента коррекции потери энергии в передних пассивных слоях модуля ECAL также могут быть значительно скомпенсированы.

# Лавинные фото-диоды (InterQ, София)

## Преимущества лавинных фотодиодов:

- Нечувствительность к магнитному полю
- Диапазон линейности  $> 10^6$
- Быстрый отклик  $< 1$  нсек
- Высокая чувствительность  $\lambda=200-1100$  нм
- Маленькие размеры
- Низкая стоимость

## Недостатки:

- Нужен низкошумящий усилитель (вещество, рад. стойкость)
- Требуется большое усиление ЛФД (100-400) (шум утечки)

## ЛФД\* (InterQ Ltd, София, Болгария)

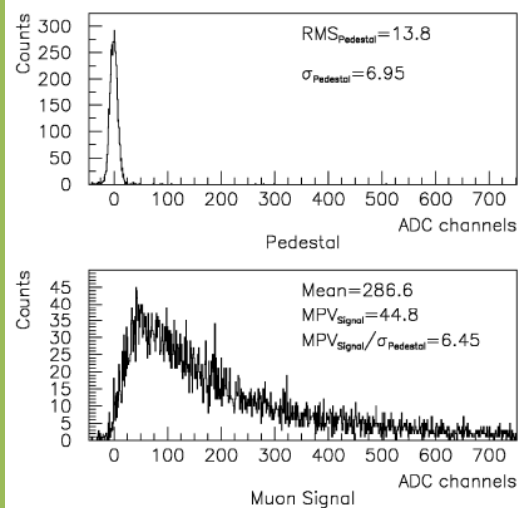
структура 'reach-through':  $n^+ p \pi p^+$

### Avalanche photodiode characteristics at room temperature

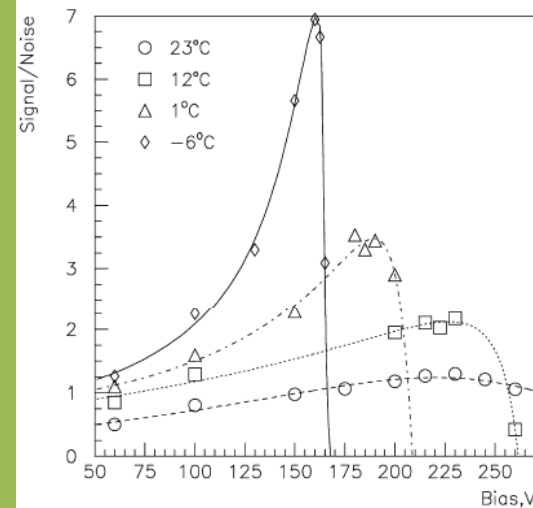
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	140
Active dia. (mm)	0.8
Capacity (pF) at 100 V	0.92
Breakdown voltage (V)	250-380
Dark current (nA) at 100 V	$< 1$

Распределение сигналов и пьедесталов при измерении на мюонах ячеек LHCb PS/SPD с ЛФД при  $T=-6^\circ\text{C}$ ,  $U=155\text{V}$ . Волокно BCF99-172.

	LHCb Preshower
размер	4x4x1 cm <sup>3</sup>
Кол-во витков	10
Тип волокна	Y11( $\varnothing 0.84\text{mm}$ ) BCF91A ( $\varnothing 1\text{mm}$ ) BCF99-172 ( $\varnothing 1\text{mm}$ )
Оптический контакт	«сухого» типа: без клея и смазки Свет считывается с одного конца волокна
Сравнение световыхода	BCF99-172 : BCF91A = 1.5-2 BCF99-172: Y11 = 1.25-1.5
Сигнал/шум (мюоны), $T=-6^\circ\text{C}$	6.45 BCF99-172



Signal/noise ratio for different temperature  $T=[-6, 1, 12, 23]^\circ\text{C}$   
LED signal = 35 photons



\*C.Cheshkov, G.Georgiev, E.Gouchtchine et al. "Application of avalanche photodiodes as a read-out for scintillator tile-fiber systems", NIM A 440 (2000) 38-45

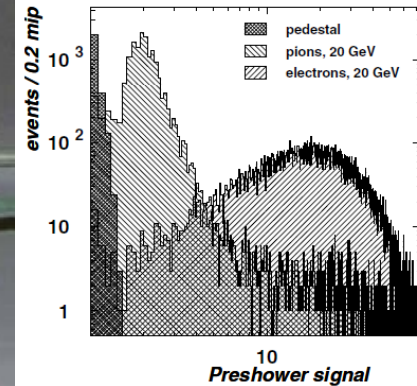
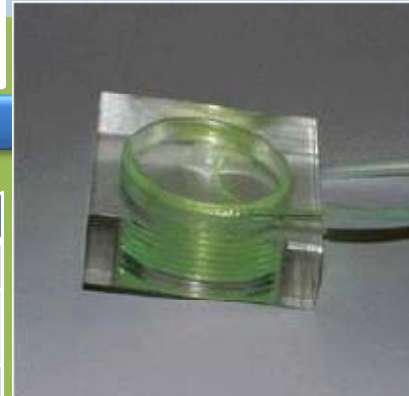
# Лавинные фото-диоды (ITE, Польша)

ЛФД (ITE, Польша), коммерческий номер ВРУР-59, использовался нами в тестах прототипа предливневого детектора при подготовке LHCb TR\*.

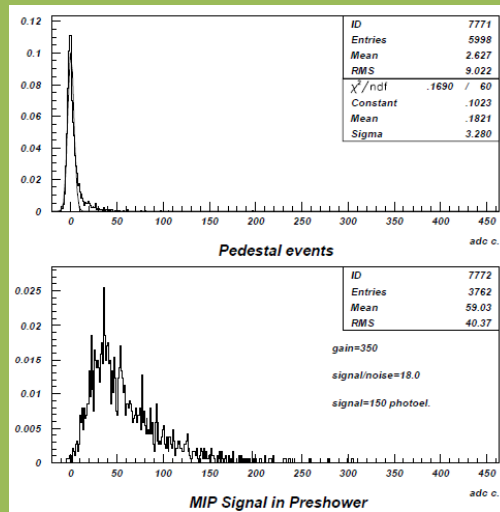
\*)The LHCb Collaboration, The LHCb Technical Proposal, CERN-LHCC-98-4.



параметр	значение
размер	7 мм <sup>2</sup>
Q.E. (500 nm) Gain = 1	70%
Тип структуры	$p^+p-p-p^+$
усиление	200-400
емкость	40 пФ

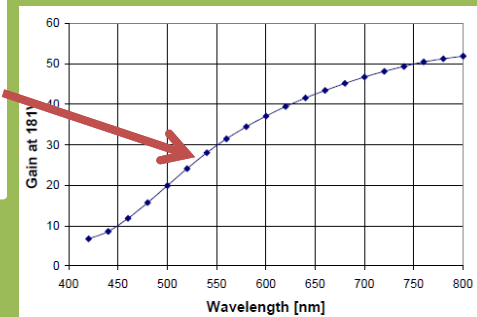
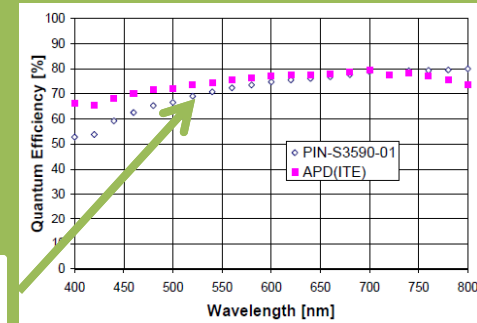


Слева: прототип ячейки 4x4x1 см<sup>3</sup>, справа: спектры пьедесталов и сигналов от  $\pi^-$ ,  $e^-$  (20 ГэВ), полученные после конвертора 1 см Pb.



Спектры пьедесталов и сигналов от МІР в ячейке с ЛФД при 193V. При большом усилении эквивалент шума усилителя может быть <10 фотонов и доминирует шум утечки ЛФД.

В диапазоне  $\lambda=400-800$  нм QE ~70-80%. Особенность «reach-through» лавинных фотодиодов: происходит усиление электронов, образованных глубже зоны усиления, поэтому количество усиленных фотоэлектронов зависит от длины волны.



# Multi-pixel Geiger mode APD

## Гейгеровские лавинные фотодиоды :

«+»:

- **Большое усиление  $> 10^5$**
- **Быстрый отклик  $< 1$  нсек**
- **Низкое рабочее напряжение 20-100 В**
- **Маленькие флуктуации единичного усиления**
- **Низкая стоимость**

«-»:

- **Диапазон линейности ограничен количеством ячеек, обычно  $< 10^2$ - $10^3$**
- **Чувствительность (геометрический фактор) ниже, чем у обычных ЛФД**
- **Большой шумовой счет**
- **Ограниченная радиационная стойкость**

**Хорошо подходит для счетчиков частиц!**

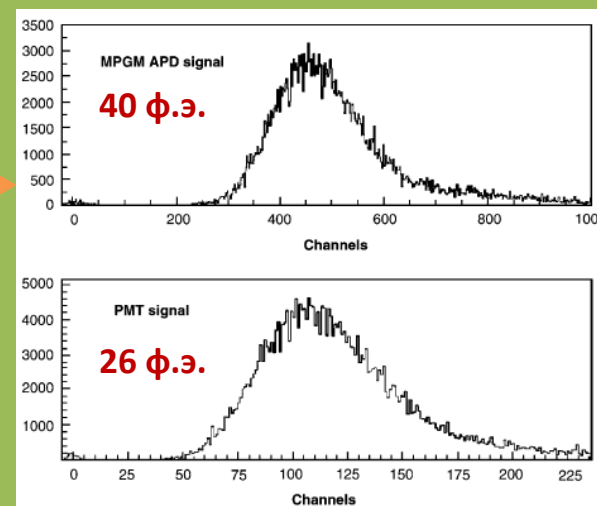
**Но массовое производство отсутствовало до 2004-2005 г.г.**

## Гейгеровские лавинные фотодиоды\*, чувствительные в зеленом спектре (ЦПТА, Москва):

параметр	значение, T=22C°
размер	1 мм <sup>2</sup>
Кол-во ячеек	556
Тип структуры	n <sup>+</sup> -p-p <sup>+</sup>
PDE ( $\lambda_{max}$ ), U=40.6V	30% (600-700 nm)
Шумовой счет (порог=0.5 ячейки)	~1 МГц
Усиление, U=40.6V	$7 \cdot 10^5$
X-talk, U=40.6V	10%

Распределение сигналов из ячейки PS/SPD LHCb 120x120x1.5 см при измерении на мюонах 20 ГэВ: а) с ГЛФД (ЦПТА) при T=22C°, U=40.6V; б) ФЭУ XR2961. Сигналы снимались с одного конца волокна.

Характеристики ГЛФД могут быть значительно улучшены при понижении температуры за счет понижения шумов и возможности увеличения перенапряжения.

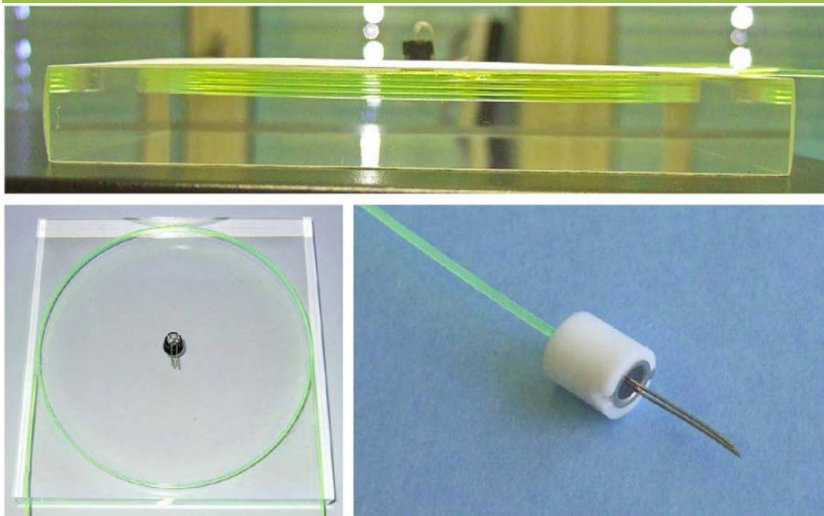


\*E.Gushchin, M.Khabibullin, Yu.Kudenko et al. "Multi-pixel Geiger-mode avalanche photodiodes with high quantum efficiency and low excess noise factor" , NIM A 567 (2006) 250-254

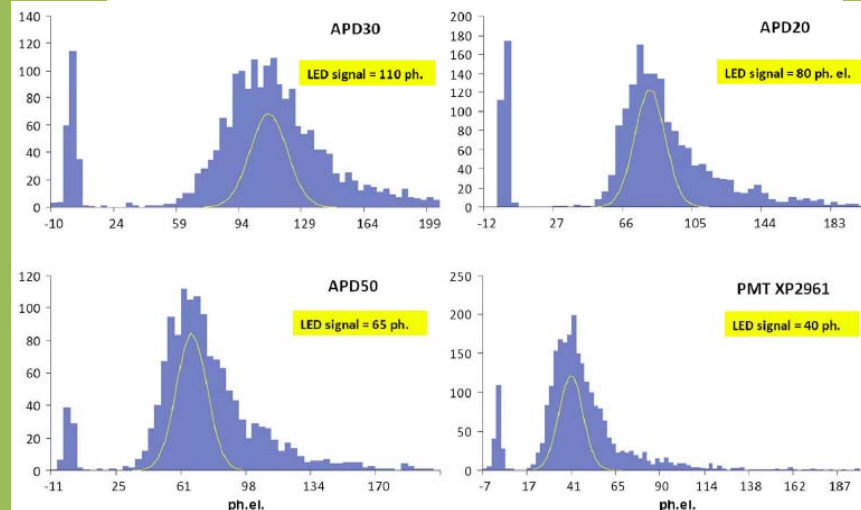
# Исследование других вариантов Г-ЛФД (ЦПТА) с ячейками PS/SPD LHCb

Три типа гейгеровских лавинных фотодиодов (ЦПТА, Москва), изученных в 2008 г.\*:

	APD20	APD30	APD50
Operation voltage (V)	~20	~30	~50
PDE(%) @ 520 nm (%)	~25	~35	~20
Noise frequency (MHz)	3	2	5
X-talk, % with "fast" shaping	7	11	8
After-pulses, % with "fast" shaping	2	11	0.7
Threshold for 1 kHz noise, pixels	4	5	4.6
Threshold for 100 Hz noise, pixels	5.2	6.6	6
Signal of 100 photons/threshold for noise 1 kHz	6.2	7	4.3
S/T @ 100 Hz	4	5.3	3.3



Сцинтилляционная ячейка PS/SPD LHCb размером 120x120x1.5 см с 3.5 витками волокна, вклеенного в кольцевую канавку. В центре ячейки вклеен светодиод мониторинговой системы. Измерения сигналов от космических мюонов были выполнены с помощью трех типов гейгеровских ЛФД. Один из ЛФД, закрепленный на конце волокна при помощи капсуля, показан на фотографии.



Распределение сигналов из ячейки PS/SPD LHCb 120x120x1.5 см при измерении на космических мюонах с ГЛФД (ЦПТА) и ФЭУ XP2961. Сигналы снимались с одного конца волокна длиной 5 см при этом другой конец был закрыт зеркалом из алюминизированного майлара. По количеству фотоэлектронов в сигнале ЛФД превосходят ФЭУ (XP2961, QE=13% @500 nm) в 1.6, 2 и 2.75 раза.

\*E.Gushchin, S.Filippov. "Application of multi-pixel avalanche photodiodes operating in Geiger mode for scintillator pad detector read-out", NIM A 610 (2009) 404-409

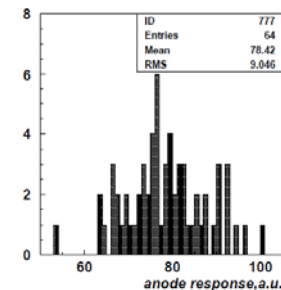
# Изучение много-анодного ФЭУ

Основной вариант фото-приемника для PS/SPD был выбран 64-анодный ФЭУ H7546 (серия R5900-00-64, Hamamatsu, JP). Среди недостатков, характерных для данного ФЭУ нужно отметить:

- Небольшой диапазон линейности усиления <50 ф.э.
- Оптическая связь между каналами 20%
- Неоднородность усиления по каналам min/max ~ 2

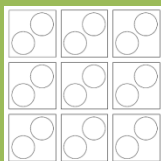
В процессе тестовых испытаний прототипов детектора были изучены эти характеристики ФЭУ для рекомендованного производителем 10-динодного делителя: 3-2-2-1...1-2-5 и напряжения HV=850 V.

HV INPUT									
77	85	83	90	96	90	100	92		
63	78	82	75	76	81	92	79		
63	78	74	66	70	75	89	75		
64	76	75	69	68	72	84	76		
66	79	76	67	67	53	79	73		
73	82	82	73	71	74	81	72		
66	87	85	80	69	81	86	76		
76	80	78	87	94	92	90	79		

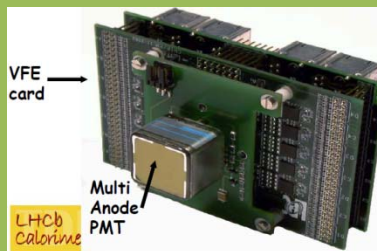


Однородность отклика анодов тестового ФЭУ H7546 по данным производителя. Отношение max/min ~ 2, r. m. s. 12%.

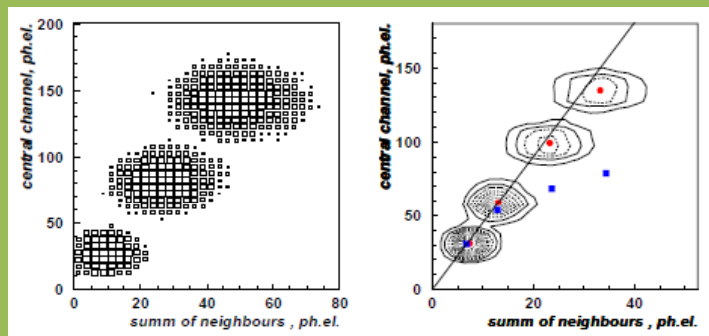
Типичная оптическая связь между каналами тестового ФЭУ H7546 :



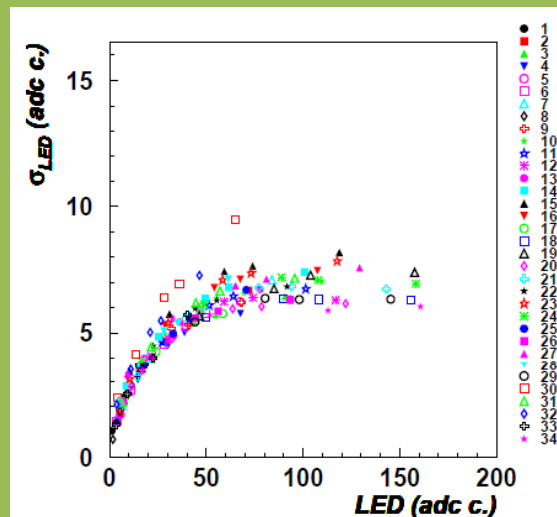
0.6%	4.4%	0.6%
4.4%	80%	4.4%
0.6%	4.4%	0.6%



Линейность отклика анодов тестового ФЭУ H7546 .



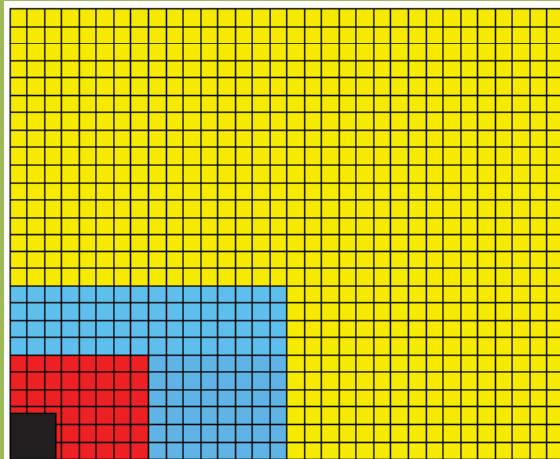
Зависимость сигнала светодиода в центральном пикселе (а) от суммы сигналов в соседних 8 пикселях. На (б) показано контурами то же но для другого пикселя, квадратными точками показаны оценки количества ф.э. из г.т.с. сигналов. Видна нелинейность при сигналах > 50 ф.э. Утечка света в соседние каналы достигает 20%.



Зависимость ширины сигнала светодиода от амплитуды для 34 пикселей ФЭУ H7546 при HV=850V. Усиление насыщается при ~50 отсчетах АЦП (~50-60 ф.э.)

# Структура ячеек PS/SPD

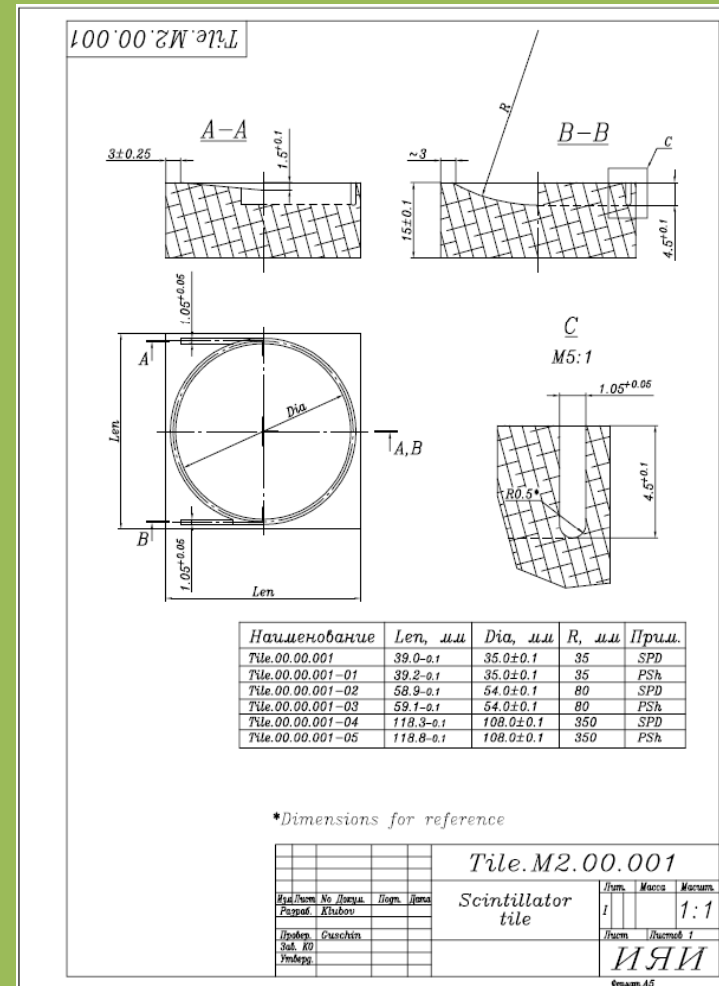
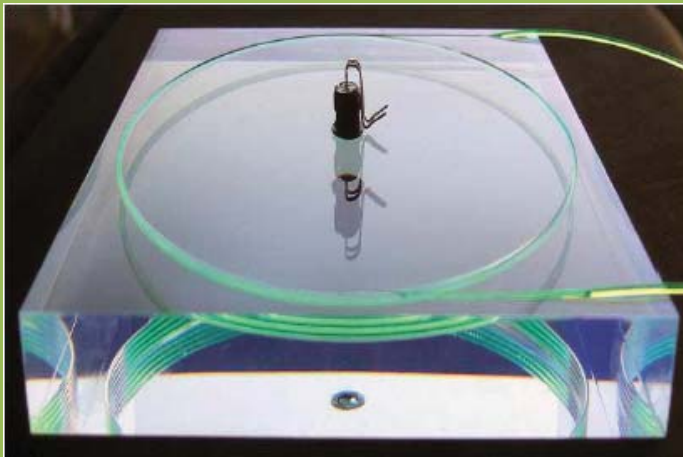
- Три зоны: внешняя, средняя и внутренняя
- Размер ячеек: 12x12, 6x6 и 4x4 см
- Фотодетекторы (ФЭУ) вынесены на верхний и нижний края, соединены с ячейками прозрачными волокнами



**Outer section :**  
121.2 mm cells  
2688 channels

**Middle section :**  
60.6 mm cells  
1792 channels

**Inner section :**  
40.4 mm cells  
1536 channels





## Изучение долговременной стабильности параметров сцинтиллятора

- По заказу ИЯИ РАН в ИСМА НАН Украины производилось сравнение различных типов сцинтиллятора и изучение долговременной стабильности параметров, таких как объемная и линейная прозрачность, световыход, устойчивость полированной поверхности к образованию микротрещин. Применялся метод ускоренного старения при температурах 55 и 75°C (200 часов). На основании полученных данных сделана оценка времени падения света в ячейках на 20%. Время падения для выбранного типа сцинтиллятора UPS-923A соответствует ~ 10 годам (данные из отчета ИСМА НАН) :

Таблица 2.2. Время изменения светового выхода тайлів в процессе теплового старения при 55 и 75°C ( $\tau_1$  и  $\tau_2$ ) и долгосрочная стабильность (прогнозуемый время 20% уменьшение светового выхода для 20°C ( $\tau_{20}$ )).

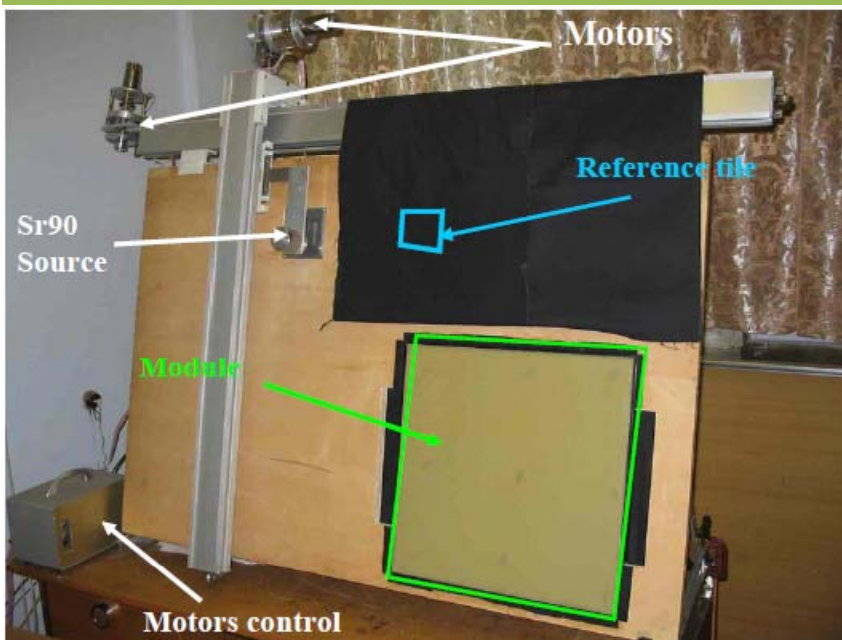
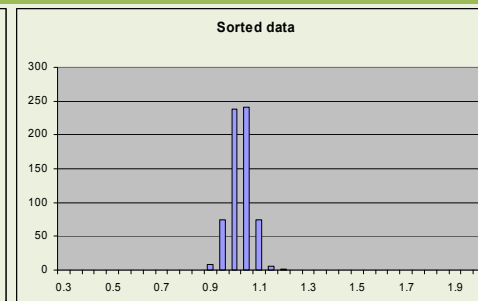
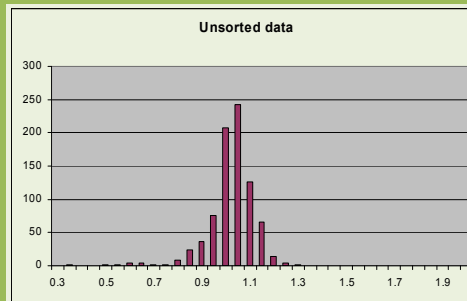
№	Испытанные образцы ПС	Размер, мм	Світловий вихід системи tile-fiber, відн.од.		Время изменения светового выхода на 20%		
			Без ОК Y-11	ОК, Y11	$\tau_1$ , ч 55(С)	$\tau_2$ , ч 75(С)	$\tau_{20}$ , ГОД 20(С)
1	UPS-923A	118.3×118.3×15	27.0	–	1960	560	10.5
		– / –	–	38.5	1440	410	7.8
2	UPS-96G	– / –	23.0	–	2450	740	11.0
		– / –	–	30	1730	490	9.3
3	UPS-96GM	– / –	25.0	–	3100	960	12.7
		– / –	–	33.0	2070	610	10.3
4	UPS-923A	39.2×39.2×15	34	–	3000	960	10.9
		– / –	–	45,5	1670	480	8.6
5	UPS-96G	– / –	27.5	–	2670	890	12.0
		– / –	–	37.0	2130	610	11.0
6	UPS-96GM	– / –	30.5	–	3630	1170	13.5
		– / –	–	40.5	3360	1120	11.3
7	UPS-923A*	125×125×4 мм	9.5	–	2010	580	10.3
8	SCSN-81*	– / –	7.5	–	2050	600	10.1
9	BC-408*	– / –	10,2	–	1270	370	6.4

\*Сигнал регистрировался с двух концов одного витка світловоду Y11.

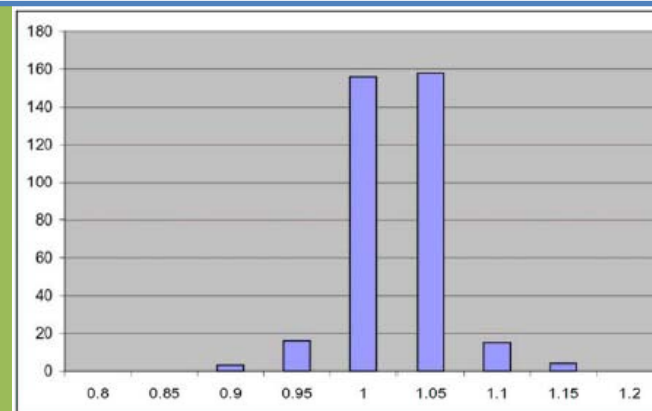
# Контроль качества сцинтилляционных ячеек



До сборки модулей измерялся отклик каждой ячейки с помощью радиоактивного источника Sr90 токовым методом. Ячейки сортировались для комбинирования в группы по 16 для последующей сборки модулей.



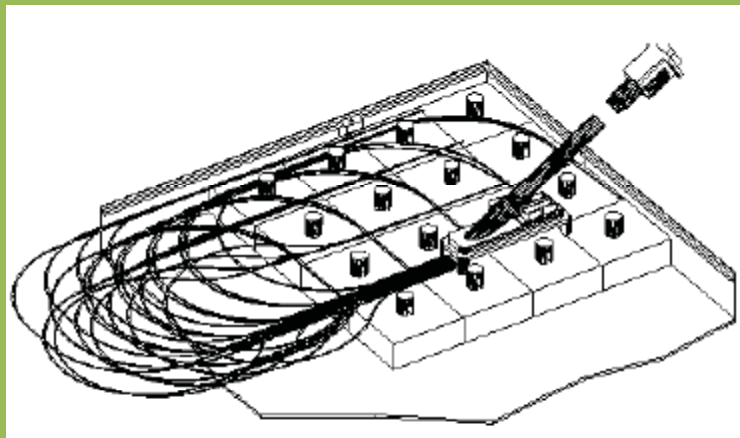
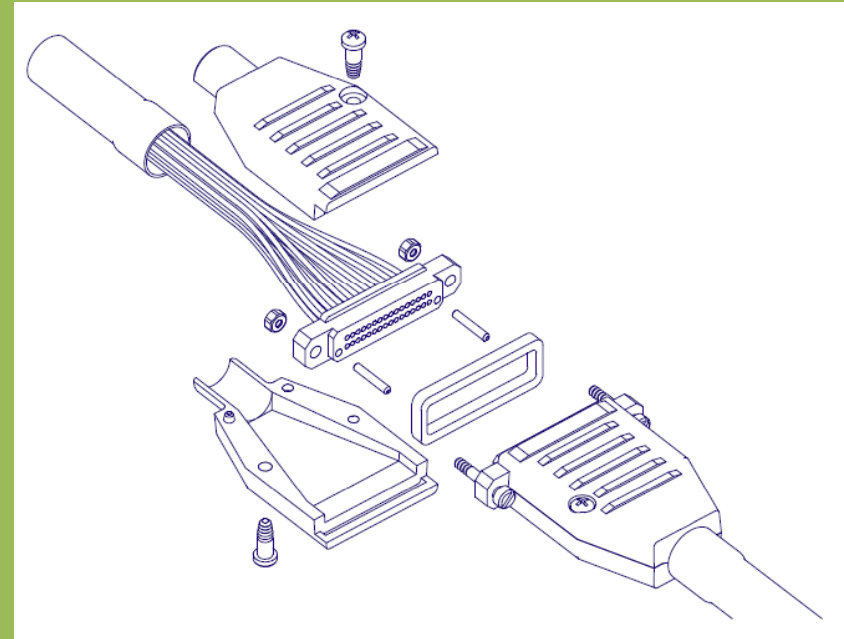
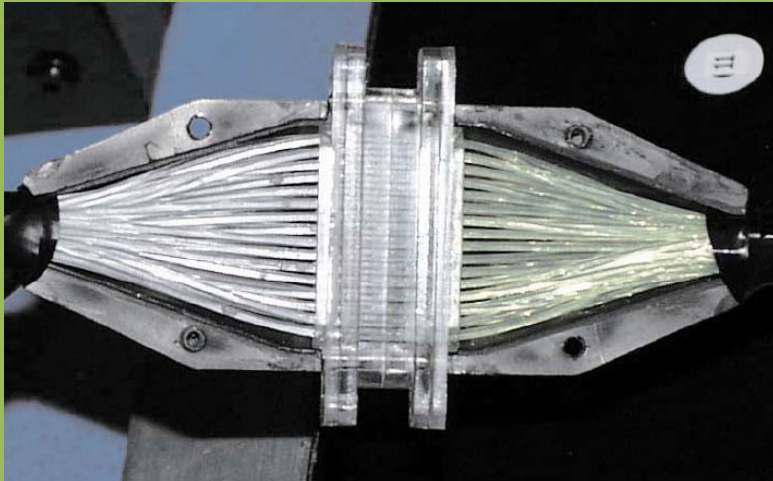
После сборки модулей измерялся в автоматическом режиме отклик каждой ячейки с помощью радиоактивного источника Sr90 токовым методом. Разброс откликов составил 3.3% (r.m.s.).



Разброс откликов ячеек в первых 22 модулях.

# Оптический разъем на 32 волокна

- В ИЯИ РАН разработаны и изготовлены оптические разъемы для соединения спектросмещающих и прозрачных волокон от матрицы 4x4 ячейки
- Общее количество пар разъемов в детекторе: 752 пар



Точность совмещения волокон < 50  $\mu\text{m}$ .  
Потери света на оптическом контакте  
составили ~10%.

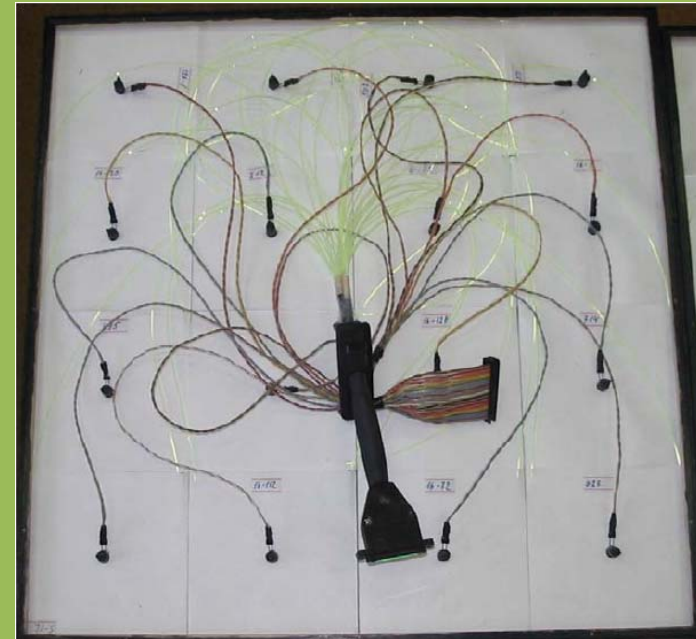
## Модули детектора

- Внешние модули: 336 шт
- Средние модули: 56 шт
- Внутренние модули: 20 + 4\*1/2 шт

Модули упакованы в коробки из  
стеклопластика с толщиной стенки 0.3 мм.  
Два типа размера: 476 (SPD) и 478 (PS) мм.

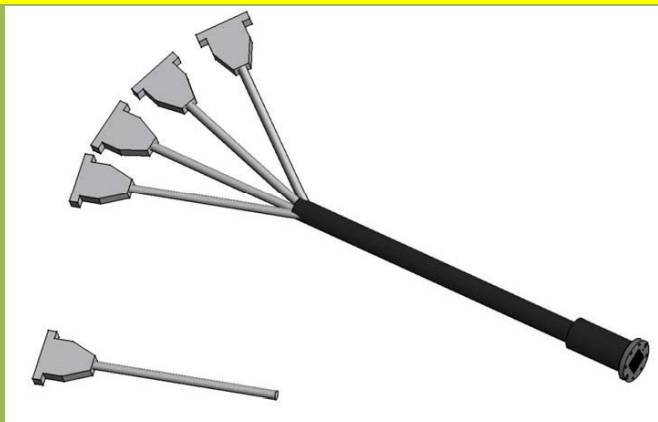
Модули PS/SPD: внутренний, средний и внешний

Модуль внешней части PS/SPD в сборе

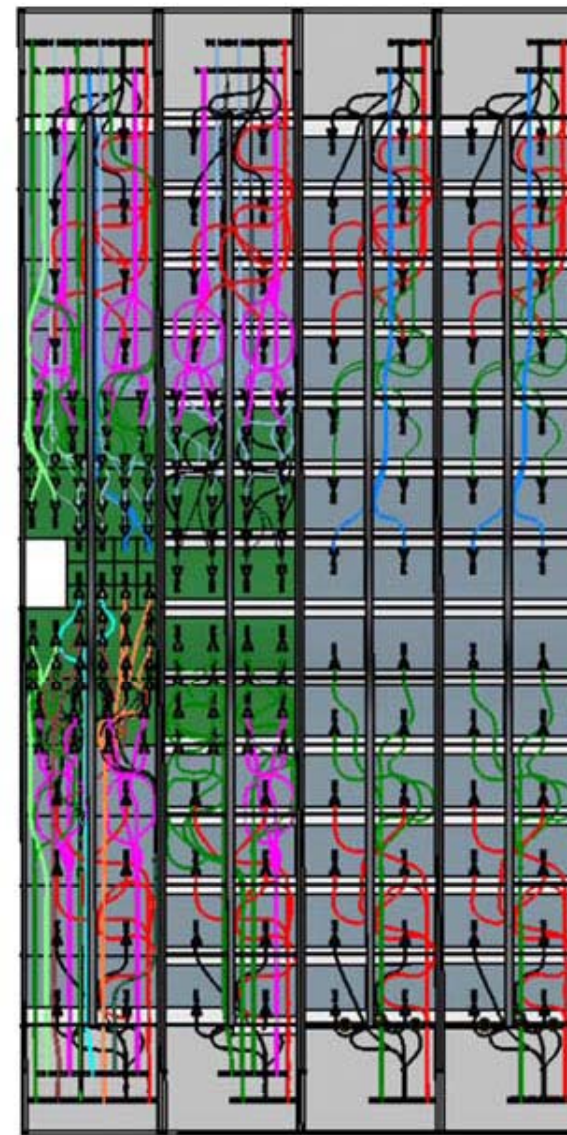


## Кабели с прозрачным волокном

Один кабель соединяет ФЭУ с 64 ячейками (128 волокон)



Всего было изготовлено 200 кабелей + 10% запас; длина в соответствии с позицией в детекторе от 1.5 до 3.5 м.  
Всего 27000 волокон, общая длина 85 км!

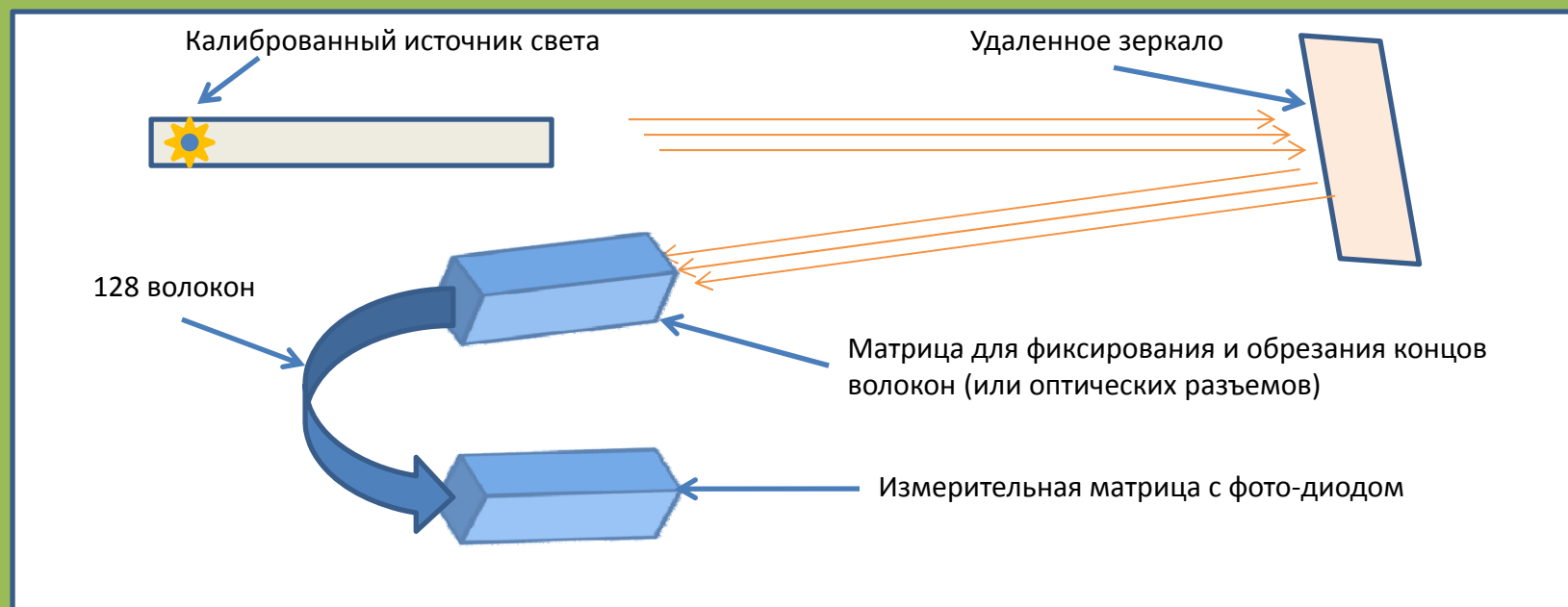


## Контроль качества прозрачного волокна

Контроль качества волокна (ИЯИ РАН) основан на измерении прозрачности волокна. Была разработана система измерений пропускания параллельного света волокном с точностью  $<3\%$ . Для этого концы каждого волокна в сборках по 128 волокон обрезались алмазным резцом. Параллельный свет от калиброванного (удаленного) источника пропускаться через волокна и измерялся в токовом режиме кремниевым фотодиодом. Каждое волокно измерялось два раза: до и после вклейки в оптический разъем. Отбраковывались волокна с пропусканием  $<95\%$ .

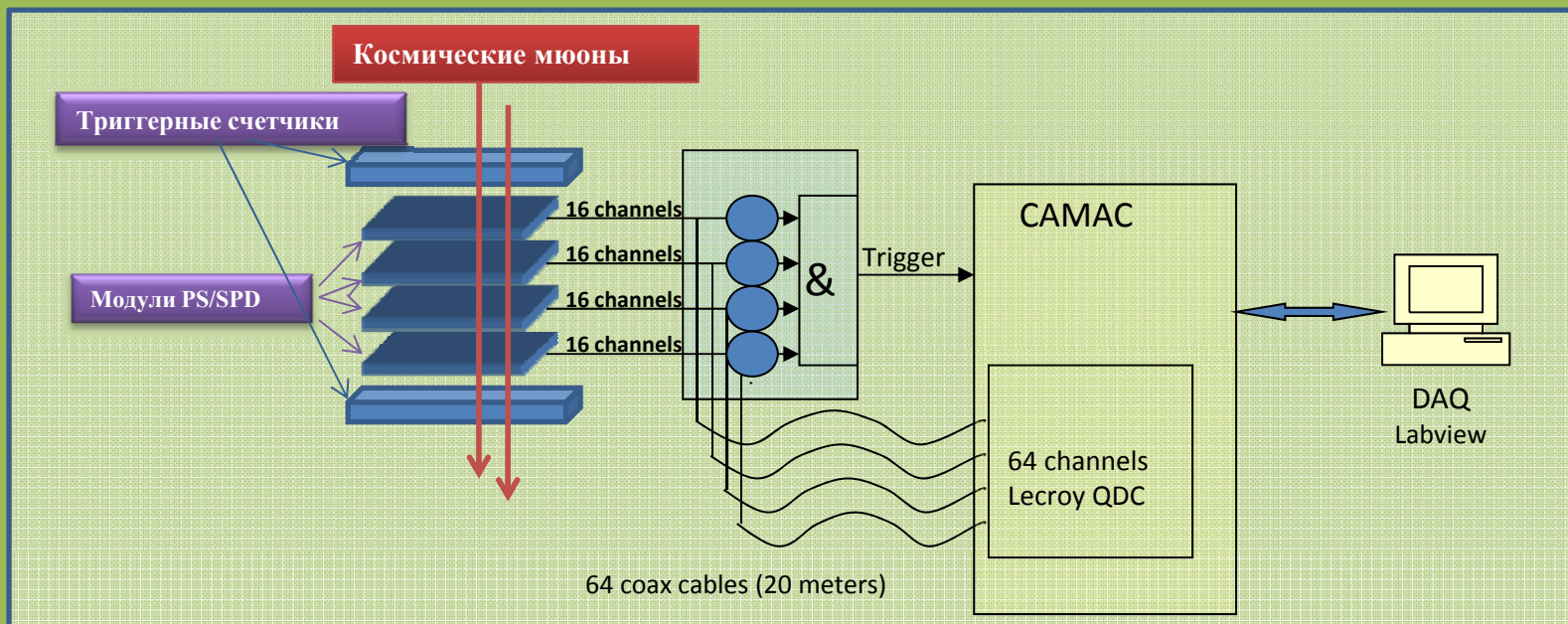
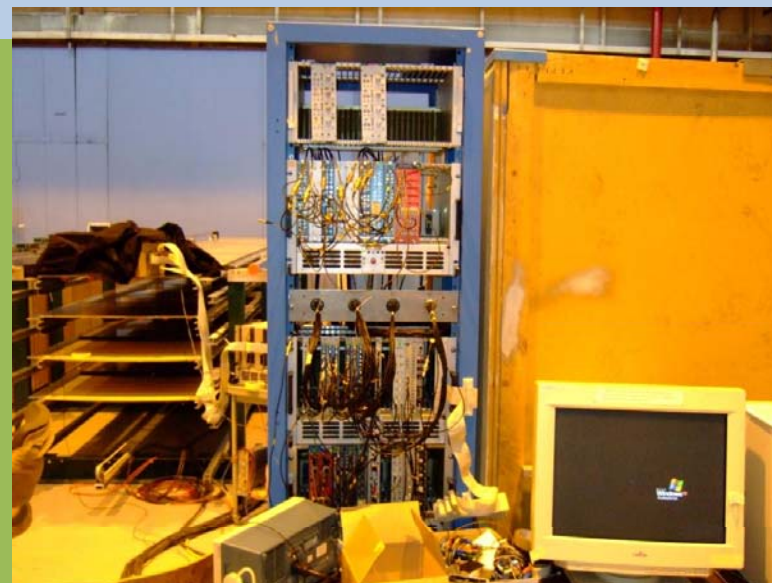
Всего было измерено более 27000 волокон (x 2 раза), общая длина 85 км!

### Схема измерений прозрачности волокна



# Измерения супермодулей на космических мюонах

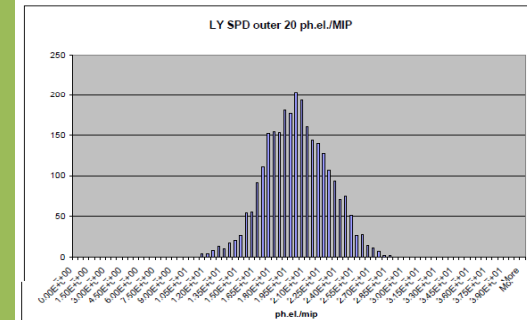
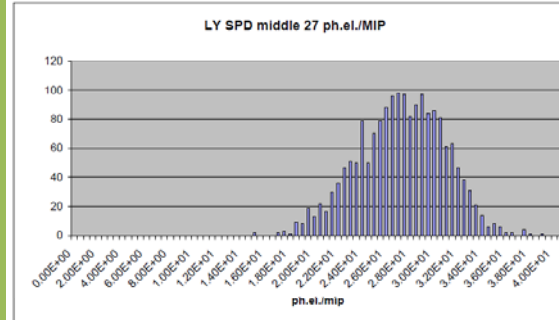
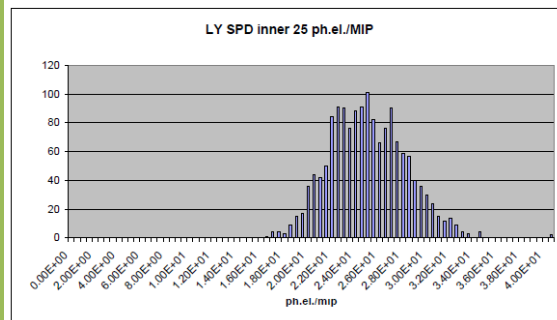
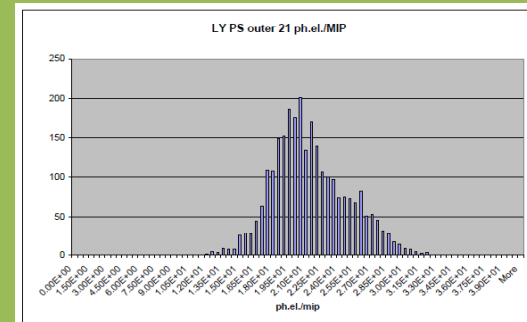
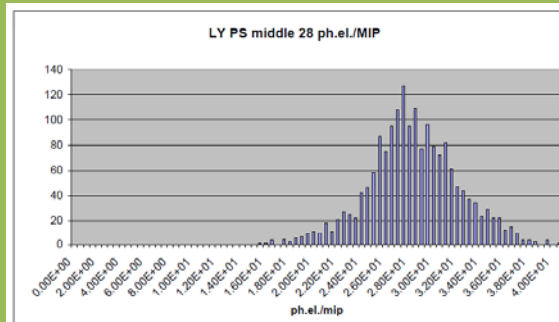
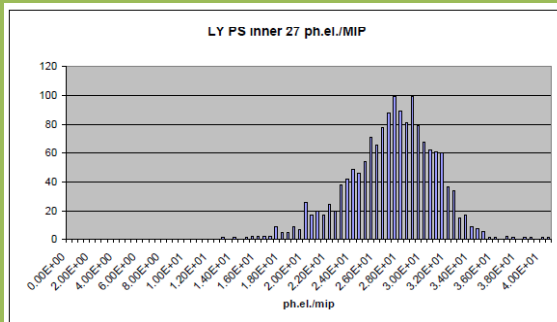
После окончания сборки супермодулей все ячейки детекторов были откалиброваны на космических мюонах с целью измерения световыхода, как числа фотоэлектронов на минимально-ионизирующую частицу.



# Измерения световыхода на космических мюонах

- Результаты измерения световыхода ячеек PS/SPD детекторов на космических мюонах, ф.э.:

	Inner	Middle	Outer
PS	27	28	21
SPD	25	27	20





## Preshower/SPD built in INR (Moscow)



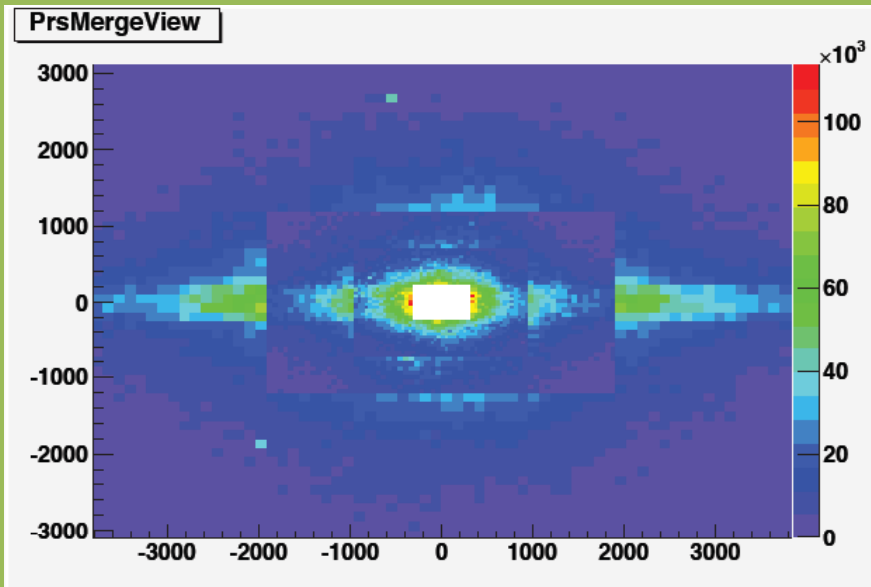
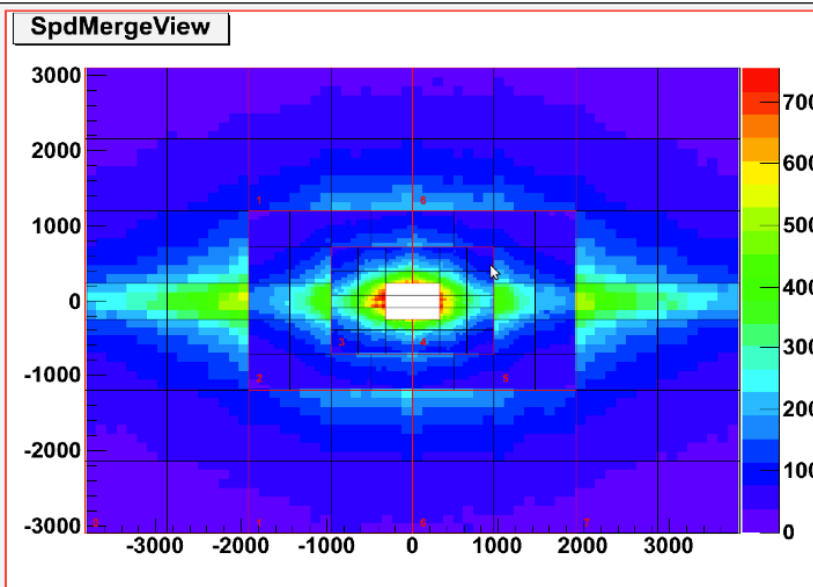
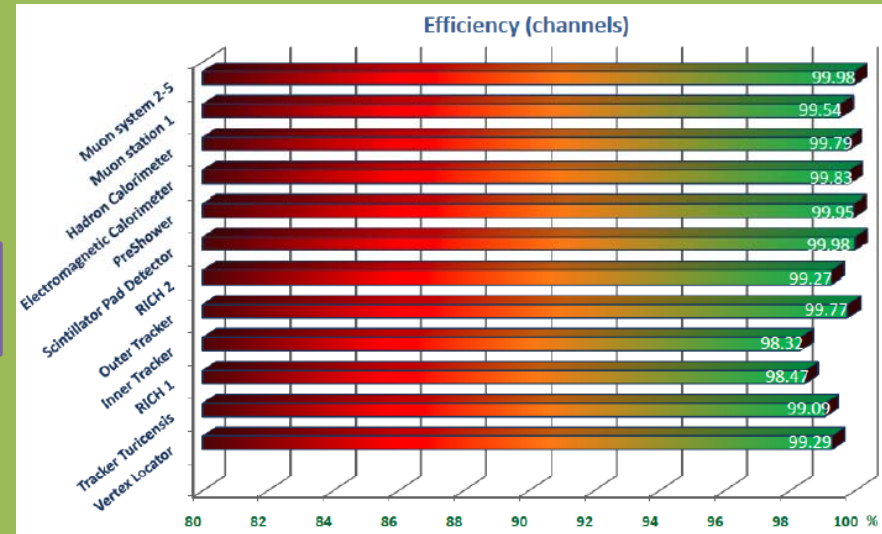
3/28/2012

Е.Гущин, семинар ОФВЭ

49

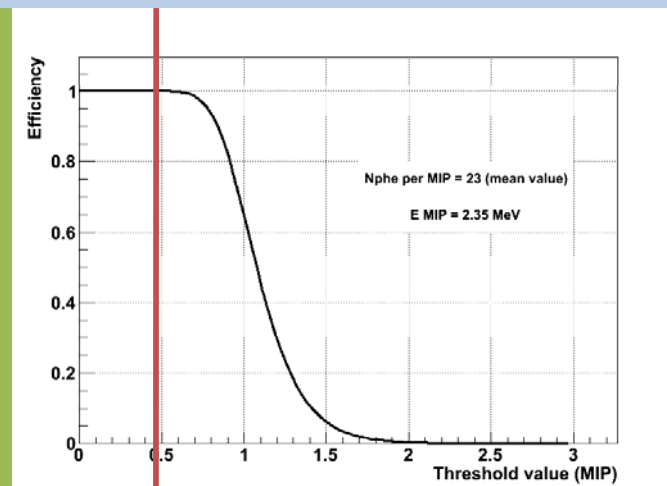
# Эффективность и основные характеристики работы PS/SPD детекторов по данным эксперимента LHCb на LHC.

2010-2011 г.г.:  
100% каналов PS SPD в рабочем состоянии



## Эффективность и калибровка SPD на данных 2011 г.

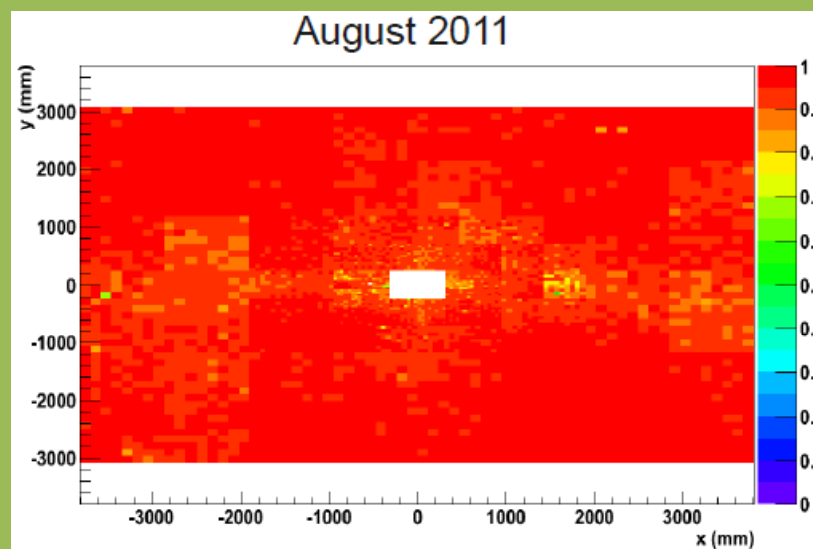
В 2011 г. был проведен набор статистики на заряженных треках со сканированием величины порога регистрирующей электроники. В результате обработки этих данных измерены пороговые кривые для всех каналов. Также измерена эффективность все ячеек.



Эффективность SPD с порогом регистрации 0.5 MIP

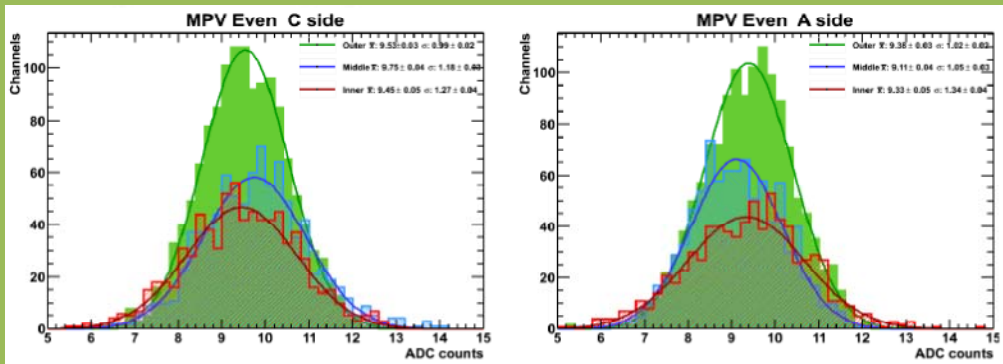
$$\epsilon = \frac{\text{number of SPD hits}}{\text{number of tracks pointing at SPD cell}}$$

Эффективность сцинтиляционного падового детектора измеренная в августе 2011 года на заряженных треках с порогом регистрации 0.5 MIP. Эффективности **внутренней, средней и внешней частей** составляют **93%, 96% и 96%** соответственно. При детальном рассмотрении зон пониженной эффективности видна структура электронных карт, что требует дополнительного изучения.

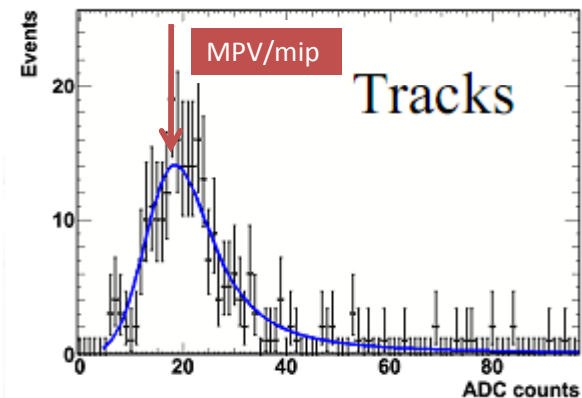


# Калибровка PS на данных 2011 г.

Калибровка (относительная) каналов PS на заряженных треках

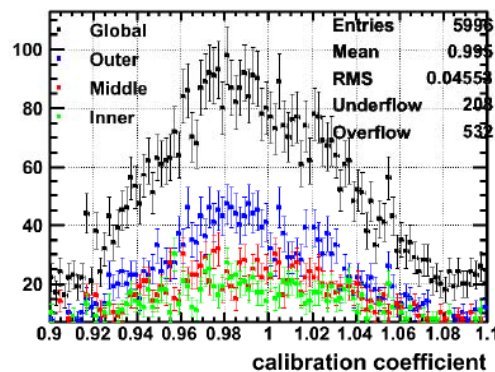
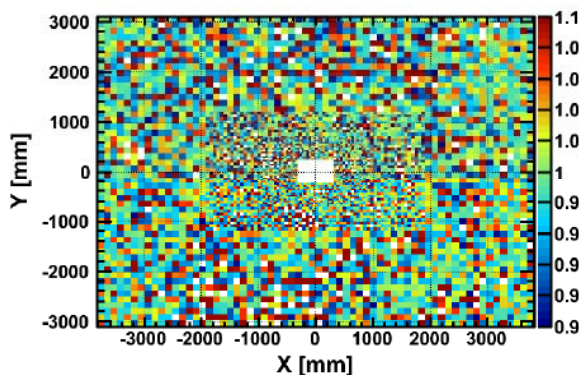


Наиболее вероятные значения сигналов от заряженных частиц в ячейках PS для внутренней, средней и внешней части детектора.



Типичное распределение сигнала в ячейке PS.

Калибровка PS методом «**потока энергии**» на изолированных электронах подразумевает простое суммирование сигналов в каждой ячейке и не требует дополнительных отборов событий. Сравнение коэффициентов, полученных обоими методами дает хорошее совпадение.



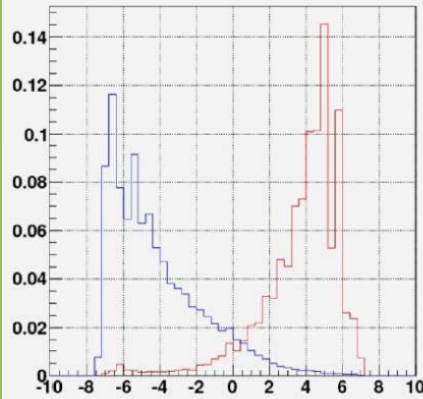
Все ячейки PS калиброваны с точностью <5%.

Распределения калибровочных коэффициентов для PS, полученных методом «потока энергии».

# Идентификация электронов в PRS+ECAL+HCAL

Комбинированная функция правдоподобия для разделения электронов и пи-мезонов в калориметре LHCb:

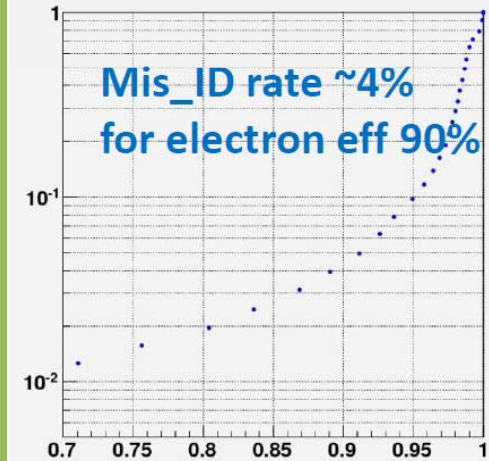
norm DLL comb (Ecal+Hcal+Prs)



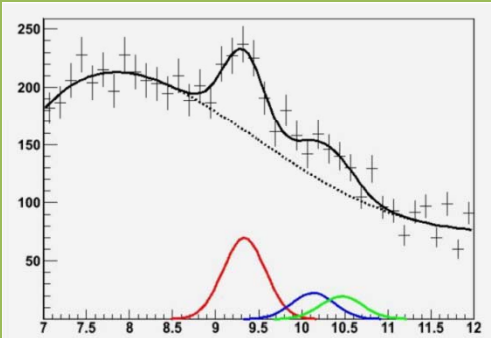
Предварительные данные, вклады в идентификацию  $\pi$ -мезонов как электронов, по подсистемам калориметра LHCb:

detector	Data 2010	Data 2011
ECAL	11%	~12%
PRS	13%	~15%
HCAL	50%	50%
PRS+ECAL+HCAL	4%	6%

misID vs eff (Ecal+Prs+Hcal)

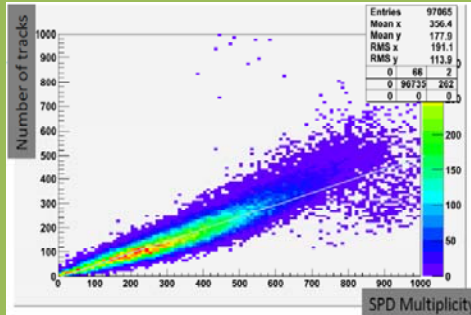


Доля ошибочной идентификации  $\pi \rightarrow e$  в зависимости от эффективности регистрации электронов. 2010 г.

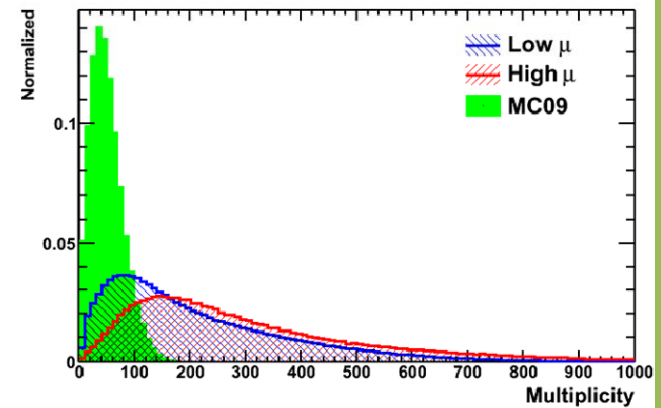
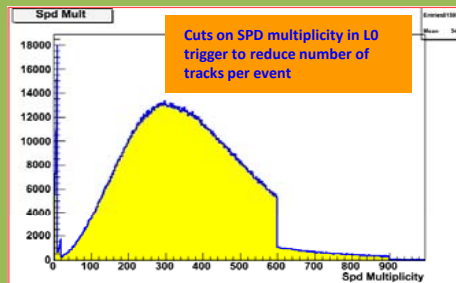


$M(e+e^-)$ ,  $\text{GeV}/c^2$

Реконструкция  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$  состояний в калориметрах.



Множественность событий в SPD пропорционально числу треков. Применяется обрезание  $\text{SPD} < 600$ .



Множественность в PS на реальных событиях в сравнении с Монте-Карло.

# Идентификация фотонов в PRS+ECAL

Фотоны идентифицируются методом максимального правдоподобия по информации из трековой системы, PRS, ECAL.

$\gamma$ -кандидат (без конверсии):

- E-M кластер в ECAL и PS ( $E_{PS} > E_{\text{порог}}$ ) при отсутствии приходящего трека в трековой системе
- $E_{SPD} < E_{0.5 \text{ MIP}}$

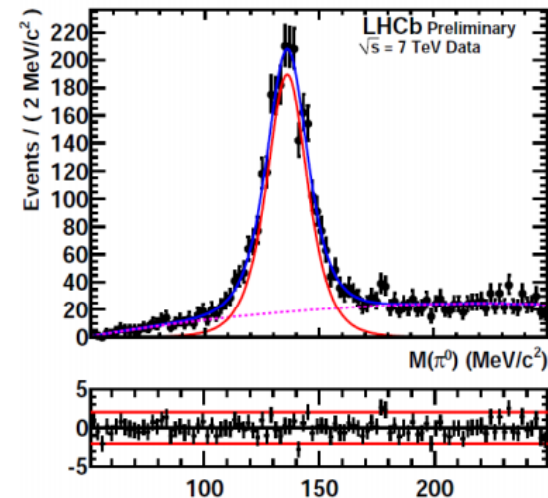
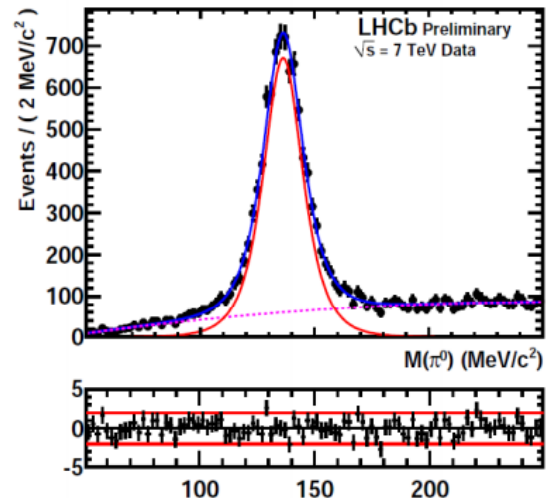
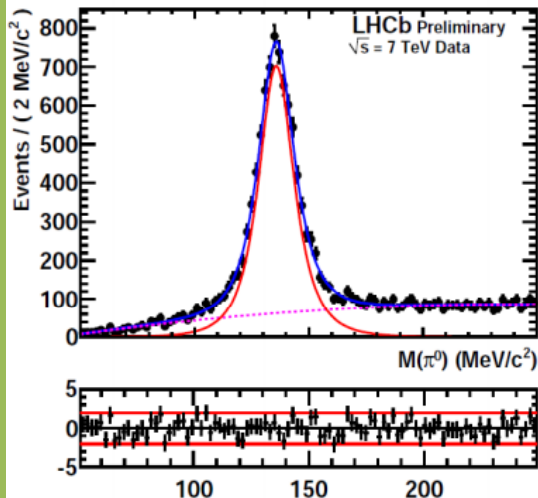
$\gamma$ -кандидат (с конверсией):

- 2 E-M кластера в SPD+PS+ECAL
- 2 приходящих трека из вершины конверсии

Восстановление  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Типичное разрешение массы  $\pi^0$

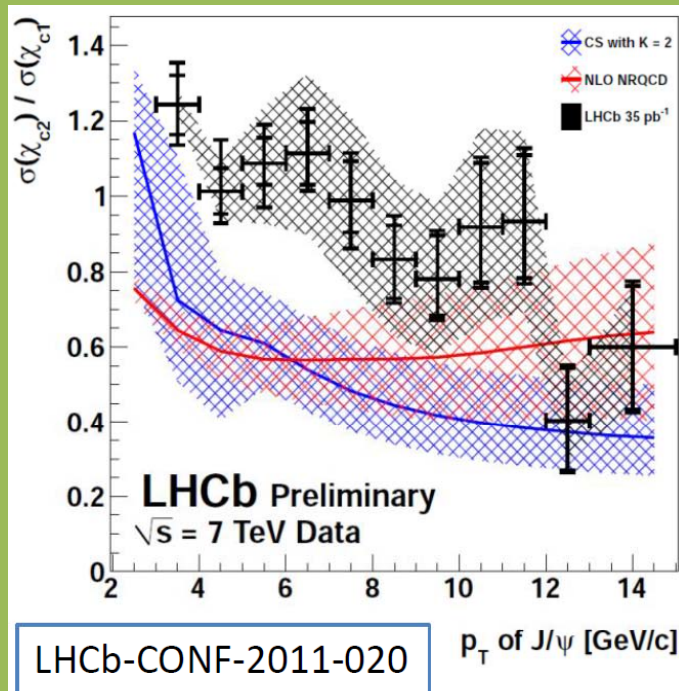
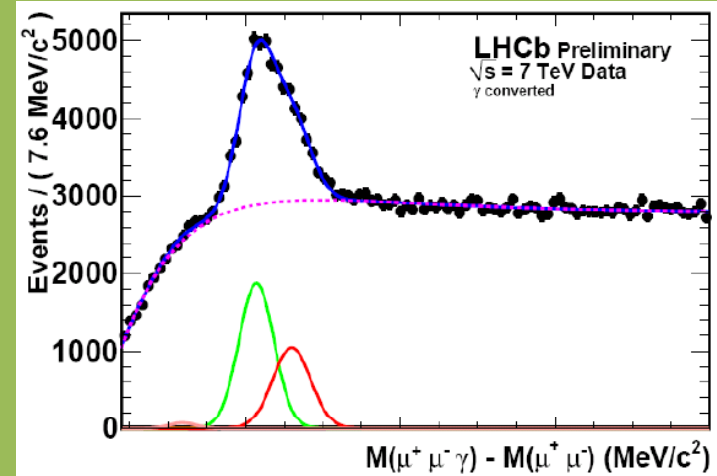
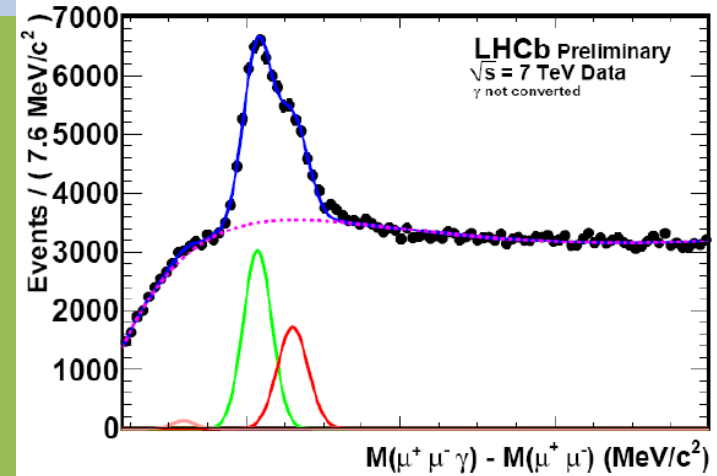
- $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma : 7.2 \pm 0.1 \text{ MeV}/c^2$
- $\pi^0 \rightarrow \gamma(ee) : 8.2 \pm 0.1 \text{ MeV}/c^2$
- $\pi^0 \rightarrow (ee)(ee) : 9.5 \pm 0.1 \text{ MeV}/c^2$



# Идентификация фотонов в PRS+ECAL

Пример применения идентификации фотонов в SPD+PS+ECAL для физического процесса: реконструкция чармониевых состояний  $\chi_c$  как  $J/\psi(\mu^+\mu^-)+\gamma$ .

Измерение отношения вероятностей распадов  $\chi_{c1}/\chi_{c2}$  является ключевой величиной для проверки нерелятивистских моделей NRQCD.



**реконструкция  $\chi_c$  как  $J/\psi(\mu^+\mu^-)+\gamma$ :**

- Восстановление прямого  $J/\psi$  по паре  $\mu^+\mu^-$
- Восстановление фотона (с конверсией и без) в калориметре

## Заключение-I

- ❑ Исследован вариант регистрации света с помощью кремниевых фотодиодов для калориметра типа «шашлык» (CMS). Разработаны низкошумящие усилители для прототипов модулей коллаборации RD36. С гибридным усилителем достигнут шум 1300 e-, что позволило получить вклад в энергетическое разрешение 330 МэВ/(9 каналов).
- ❑ Предложена оригинальная конструкция и проведены исследования прототипов многоканальных модулей электромагнитного калориметра типа «шашлык» для эксперимента CMS.
- ❑ Показано, что пространственное разрешение может быть значительно улучшено в конструкции с несколькими каналами. Так для электронов 40 ГэВ получено разрешение с вычетом шума электроники  $\langle \sigma_x \rangle = 690 \mu\text{m}$  и  $620 \mu\text{m}$  для 2-х и 3-х канальных модулей, что в 1.5-2 раза лучше, чем с одним каналом.
- ❑ Также показано, что использование функции распределения света между каналами позволяет корректировать локальные дефекты сигнала в каналах: неоднородность светосбора, черенковский свет в волокне, сигнал от прямой ионизации заряженной частицей в Si фотодиоде.
- ❑ Аналогичный метод позволяет разделять близко лежащие ливни: при расстоянии 17 мм 40 ГэВ ливни разделяются с вероятностью  $>90\%$ .



## Заключение-II

- ❑ Была разработана конструкция сцинтилляционных ячеек с многовитковым расположением спектросмещающего волокна для сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов (PS/SPD) эксперимента LHCb. Световыход из ячейки составил >500 фотонов/MIP. Изучена неоднородность светосбора в ячейках. Показано, что изменение среднего отклика по ячейке 120×120 мм не превышает 3% (r.m.s.)
- ❑ Была разработана конструкция и проведены испытания модулей PS/SPD на тестовых пучках ЦЕРН. Показано, что с конвертором 10 мм свинца  $\pi/e$  разделение составляет около 7%/95% при энергиях 10-50 ГэВ. Показано, что энергетическое разрешение PS+ECAL соответствует требованиям LHCb.
- ❑ Показано, что в случае изолированных ливней и измерения импульса частицы  $\pi/e$  разделение в PS+ECAL может быть улучшено до 0.3%/97% (50 ГэВ). Использование информации о размере кластера и энергии в SPD также позволяет улучшить подавление  $\pi$ -мезонов.
- ❑ По результатам моделирования методом Монте-Карло  $\pi/e$  разделения и энергетического разрешения в PS+ECAL выбрана оптимальная толщина конвертора 2.5X0.

## Заключение-III

- ❑ Были исследованы варианты фотоприемников для ячеек PS/SPD: многоанодные ФЭУ, лавинные фотодиоды (ITE, InterQ), гейгеровские ЛФД разных типов (ЦПТА).
- ❑ Показано, что отношение сигнал/шум в случае MIP в ячейке сцинтиллятора при считывании света с одного конца волокна  $\varnothing 0.8 \text{ мм}^2$  ЛФД (InterQ) равен  $\sim 6$ , при считывании света с двух концов  $\varnothing 3 \text{ мм}^2$  ЛФД (ITE) достигает  $\sim 18$ .
- ❑ Сигнал MIP с гейгеровскими ЛФД достиг 110 ф.э. при считывании с одного конца волокна и наличии зеркала на другом, что в 2.75 раза превосходит ФЭУ.
- ❑ Результаты исследования 64-анодных ФЭУ H7546 показали, что среди недостатков данного ФЭУ требуют особого внимания:
  - Небольшой диапазон линейности усиления (при использовании стандартной схемы питания ФЭУ, рекомендованной производителем, диапазон линейности усиления ограничен  $\sim 50$  ф.э)
  - Оптическая связь между каналами ( $\sim 20\%$  для соседних 8 пикселей)
  - Неоднородность усиления по каналам (2-3)

## Заключение-IV

- ❑ Была разработана конструкция ячеек, модулей и супермодулей детектора PS/SPD для эксперимента LHCb.
- ❑ Была разработана технология массового производства ячеек и модулей детектора в ИЯИ РАН, собраны модули и супермодули детектора.
- ❑ Измерения на космических мюонах и p-p взаимодействиях на ускорителе LHC при энергии 3.5 ТэВ показали, что основные характеристики PS/SPD детектора удовлетворяют требованиям эксперимента LHCb. В течение 2010-2011 г.г. 100% ячеек детектора в рабочем состоянии и откалиброваны, при пороге 0.5 MIP эффективность SPD > 95%.

## Дополнительная информация

Автор выражает свою признательность всем участникам программы ИЯИ РАН по разработке, исследованию и производству модулей «шашлык» RD36 и предливневого детектора LHCb.

# Производство сцинтилляционных ячеек

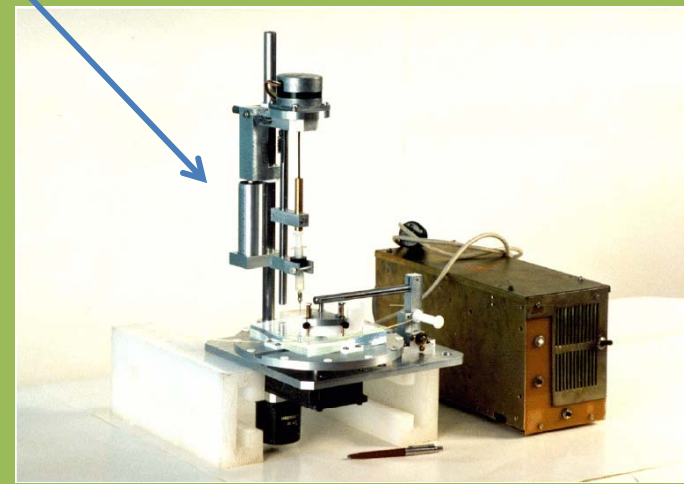
- Ячейки произведены из сцинтиллятора, изготовленного методом блочной полимеризации - UPS-923A (Харьков, Украина), на основе полистирола с добавками РТР (1.5%) и РОРОР (0.04%)
- Вклейка спектросмещающего волокна производилась в [ИЯИ РАН](#) полуавтоматическим методом.
- Всего собрано вместе с запасными около 15000 ячеек



Аппарат для автоматической укладки и вклейки 3.5 витков волокна в ячейку



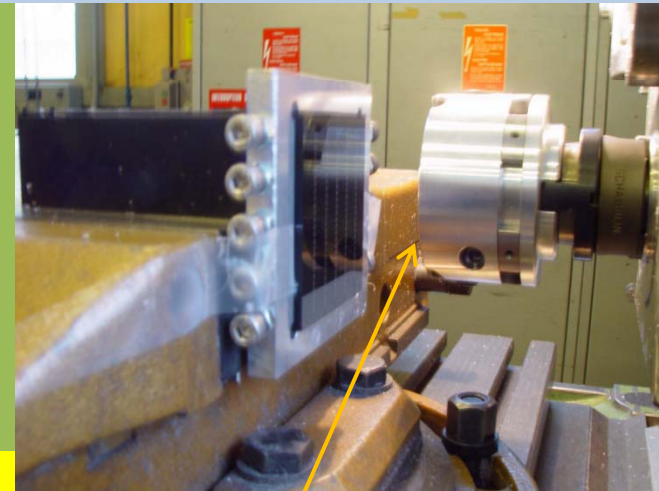
Ячейки с вклеенным волокном



# Контроль качества прозрачного волокна

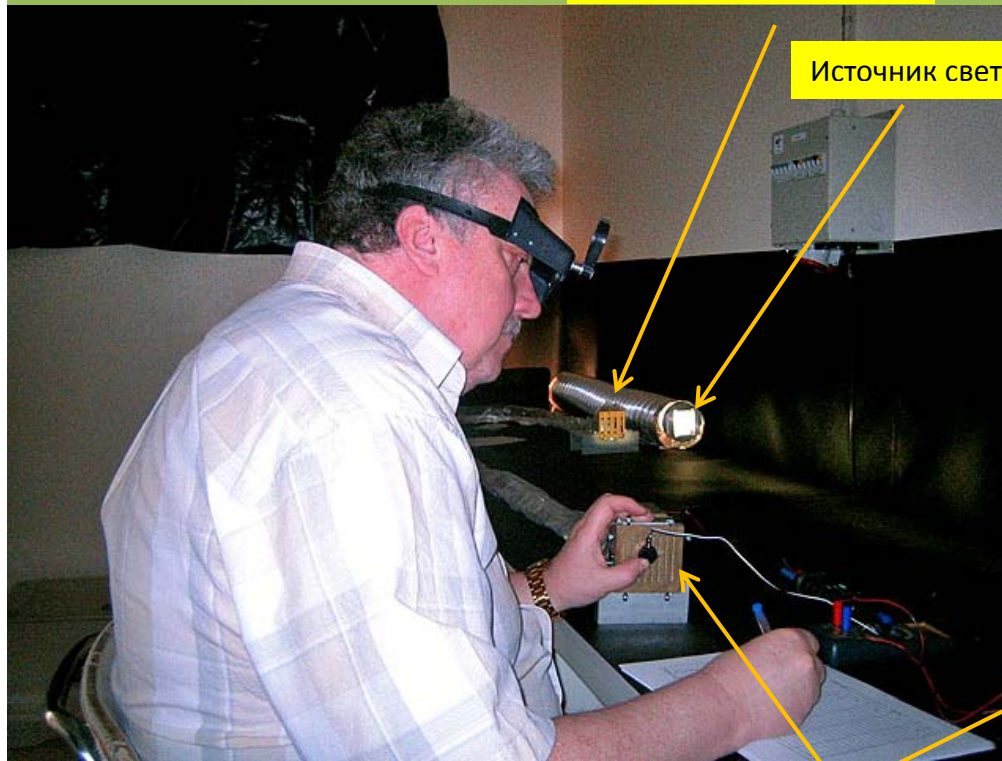
Каждое прозрачное волокно проверялось 2 раза:

1. До вклейки в оптические разъемы
2. После вклейки в оптические разъемы (на рисунке)



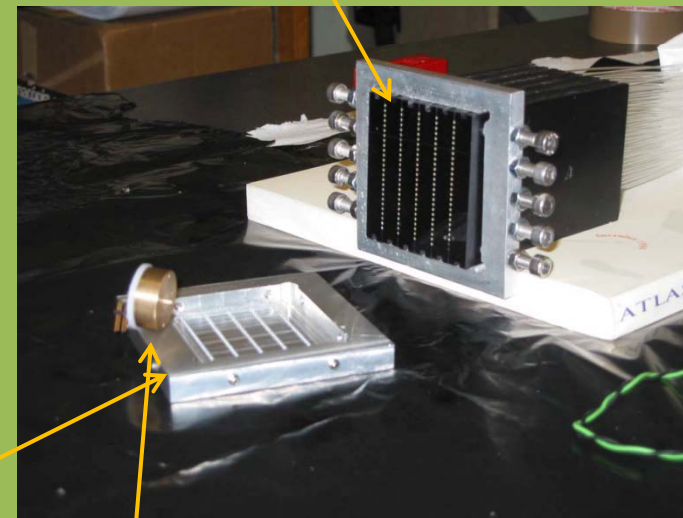
Концы волокон обрезаны алмазным резцом

Оптические разъемы



Источник света

Матрица с фотодиодом  
Е.Гущин, семинар ОФВЭ



Капсюль с фотодиодом

# Сборка оптических кабелей из прозрачного волокна в ЦЕРН



Сборка оптических кабелей в ЦЕРН и вклейка волокон в оптические разъемы

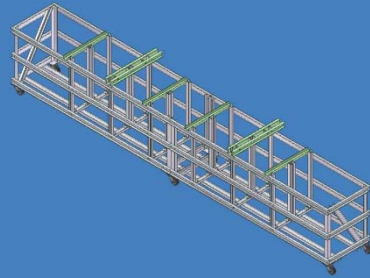


# Супермодули SPD/PS



В ИЯИ РАН были разработаны и изготовлены механические конструкции для сборки, хранения и транспортировки и монтажа супермодулей.

Система перемещения супермодулей.



Система сборки супермодулей.



Система хранения и транспортировки 4 супермодулей.



Супермодуль состоит из 2x13 модулей



## Список основной литературы

- Ю. К. Гаврилов, Е. Н. Гущин, С. В. Лаптев, В. Е. Постоев, С. Н. Филиппов. *Разработка прототипов предливневого детектора эксперимента LHCb*. «Приборы и Техника Эксперимента», 2012 №4/2.
- S.Filippov and E.Gushchin. *Application of multi-pixel avalanche photodiodes operating in Geiger mode for scintillator pad detector read-out*. Nucl. Instr. and Meth. **A** 610 (2009) 404.
- A.Augusto Alves, ... E. Gushchin et al. *The LHCb Detector at the LHC*. J. Instrum. 3 (2008) S08005.
- E. Guschin, M. Khabibullin, Y. Kudenko, et al. *Multi-pixel Geiger-mode avalanche photodiodes with high quantum efficiency and low excess noise factor*. Nucl. Instr. and Meth. **A** 567 (2006) 250
- C. Cheshkov, G. Georgiev, E. Gushchin, L. Litov, I. Mandjoukov, V. Spassov. *Application of avalanche photodiodes as a readout for scintillator tile fiber systems*. JHEP 9909:022,1999, Nucl. Instrum. Meth. **A** 440 (2000) 38-45.
- J. Badier, Ph.Bloch,.. E.Guschin et al. (RD36 Collaboration) *Multibundle shashlik calorimeter prototypes beam test results*. Nucl. Instrum. Meth. **A** 354 (1995) 328-337.