

Электромагнитный калориметр детектора КЕДР на основе жидкого криптона

Сергей Пелеганчук

Коллаборация КЕДР, ИЯФ, Новосибирск

Введение

Сжиженные благородные газы широко используются в калориметрии в физике высоких энергий.

- Простота калибровки (нет внутреннего усиление, однородность)
- Стабильность
- Высокая степень сегментации
- Радиационная стойкость

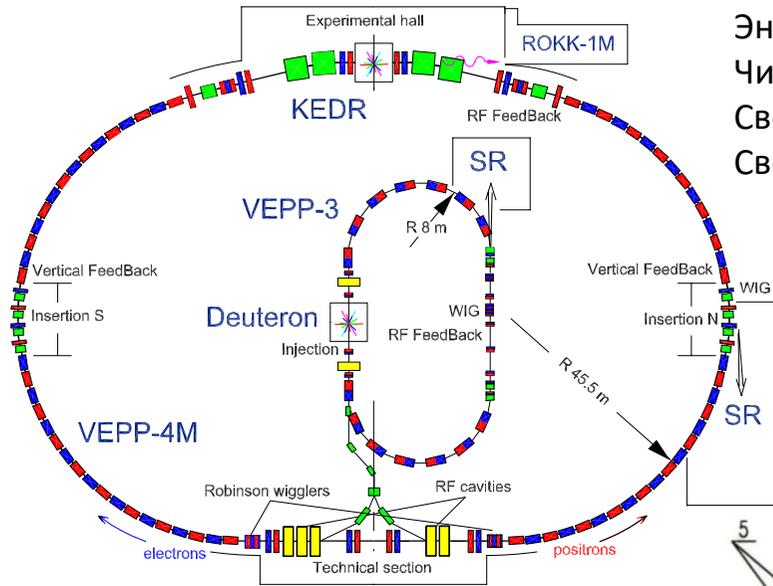
	Ar	Kr	Xe
T boiling, K	87.1	119.6	164.9
T smelting, K	83.6	115.8	161.9
ρ liquid/ ρ gas	784	641	519
V_{dr} , mm/ μ s at 1 kV/cm	1.8	2.4	2.2
W, eV/pair	24.4	18.3	15.6
dE/dx, MeV/cm	2.3	3.4	3.9

	NaI	CsI	BGO	BaF ₂	LAr	LKr	LXe
density, g/cm ³	3.67	4.53	7.13	4.9	1.4	2.43	3.06
X_0 , cm	2.59	1.85	1.12	2.1	13.5	4.6	2.8
Λ_T , cm	41.4	36.5	22	29.9	84	60	55
Rad. resistance	Satis.	Satis.	Satis.	good	fine	fine	fine

Природный криптон содержит β -радиоактивный изотоп ^{85}Kr с периодом полураспада 10.5 лет и энергией края спектра 0.67 MeV. По этой причине жидкий криптон (LKr) считался непригодным для калориметрии.

Однако, эксперименты с прототипами калориметра на основе жидкого криптона, проведенные в ИЯФ (Новосибирск) в начале 1990-х годов, показали, что энергетическое разрешение может быть сопоставимо с разрешением кристаллических калориметров. При этом, пространственное разрешение для фотонов заметно лучше, благодаря возможности измерения координаты точки конверсии фотонов. Результатом этих экспериментов стал проект калориметра детектора КЕДР.

Коллайдер ВЭПП-4М и детектор КЕДР



Энергия пучка	1 – 5 GeV
Число сгустков	2 x 2
Светимость на 1.5 GeV	$2 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Светимость на 5.0 GeV	$2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

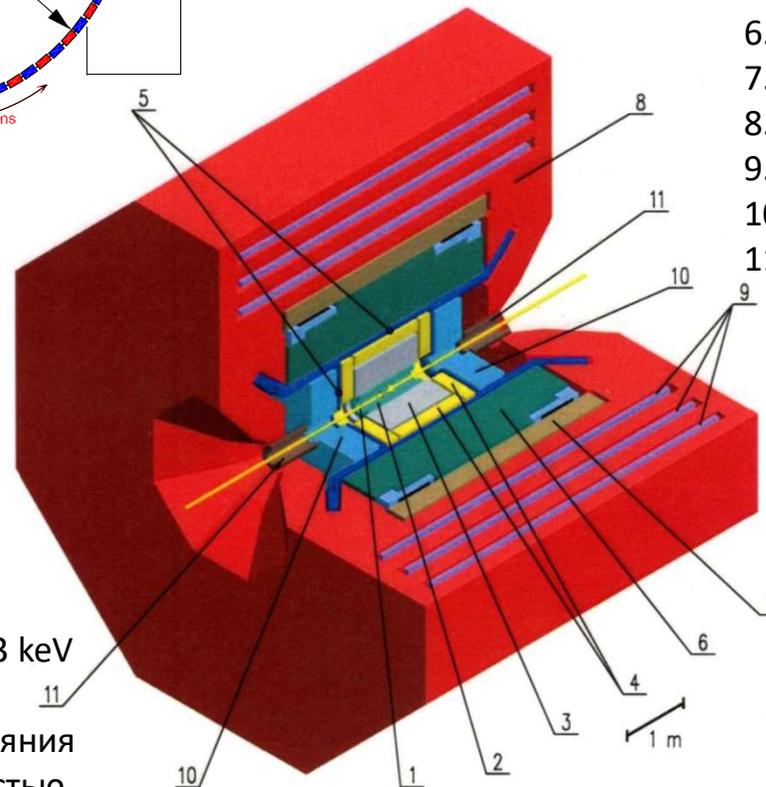
1. Вакуумная камера
2. Вершинный детектор
3. Дрейфовая камера
4. Аэрогелиевые счетчики
5. Время-пролетные счетчики
6. LKr калориметр
7. СП катушка
8. Ярмо магнита
9. Мюонная система
10. CsI калориметр
11. Компенсирующие соленоиды

Физическая программа:

- Измерение масс частиц: семейства кваркониев ψ и Υ , D - мезоны, τ - лептон
- Изучение распадов J/ψ и ψ
- Измерение R в области $2E = 2-7 \text{ GeV}$
- Двухфотонная физика

Измерение энергии пучка:

- Метод резонансной деполяризации
 - Точность единичного измерения 1-3 keV
 - Точность интерполяции 10-30 keV
- Метод обратного Комптоновского рассеяния
 - Мониторирование энергии с точностью $\sim 60-100 \text{ keV}$



LKr калориметр детектора КЕДР

$V_{LKr} = 11 \text{ m}^3$

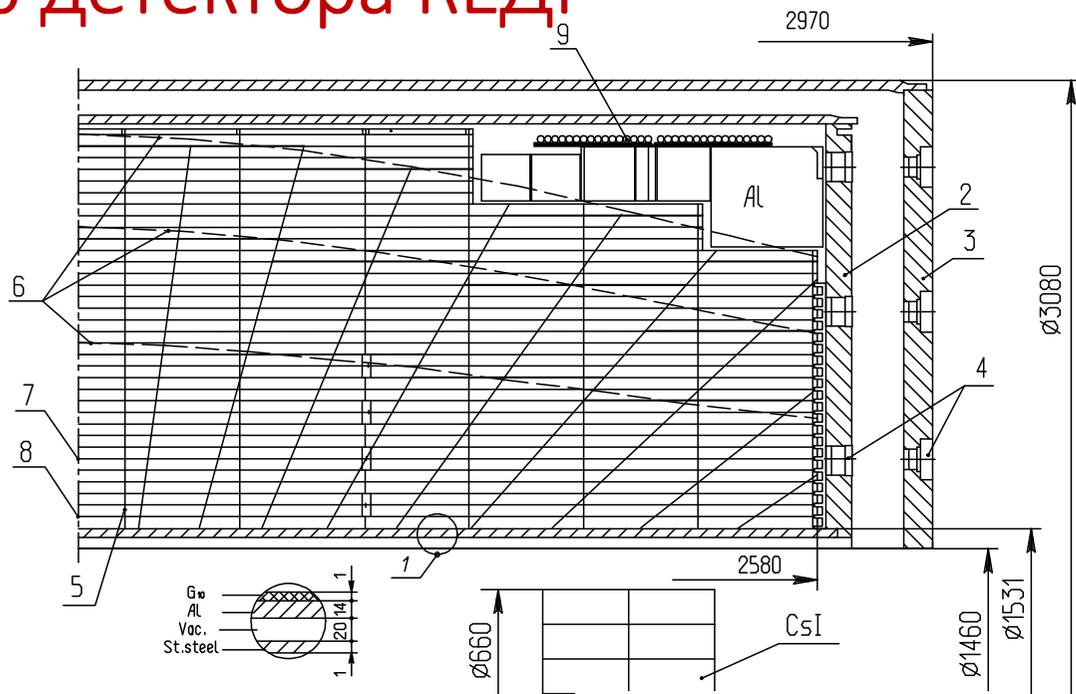
$M_{LKr} = 27 \text{ тонн}$

Толщина калориметра: $14.8 X_0$

Толщина входной стенки: $0.22 X_0$

Число электродов: 35

Полная толщина электродов: $0.33 X_0$



Внутренний \varnothing эл. системы: 1533 mm

Внешний \varnothing эл. системы : 2894 mm

Длина электродной системы : 2600 m

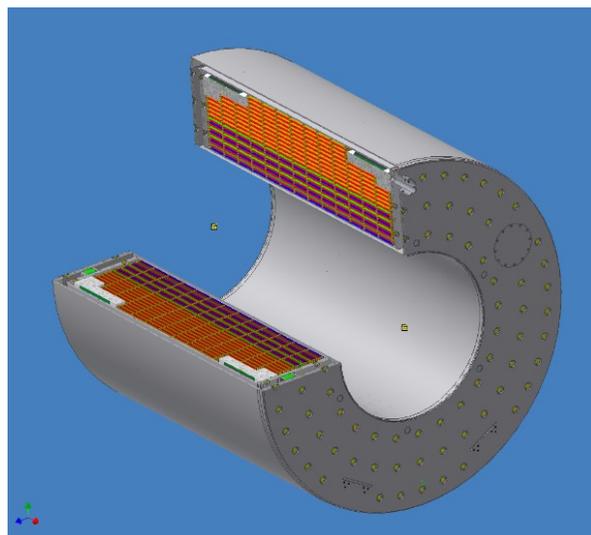
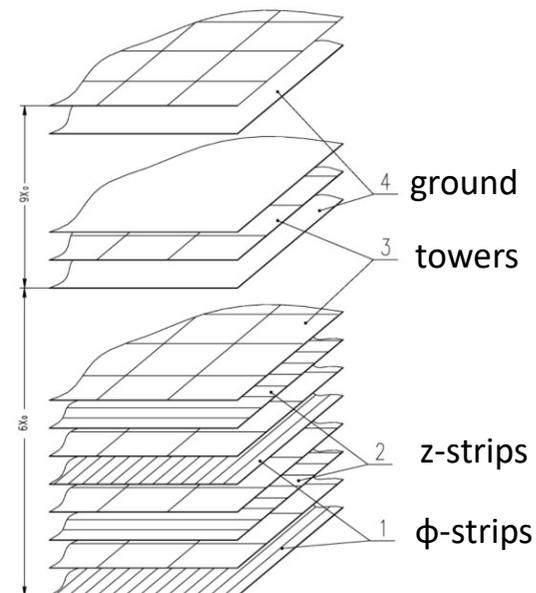
Зазор анод-катод: 19.46 mm

Толщина электродов: 0.54 mm G10

Рабочее HV: 1 kV

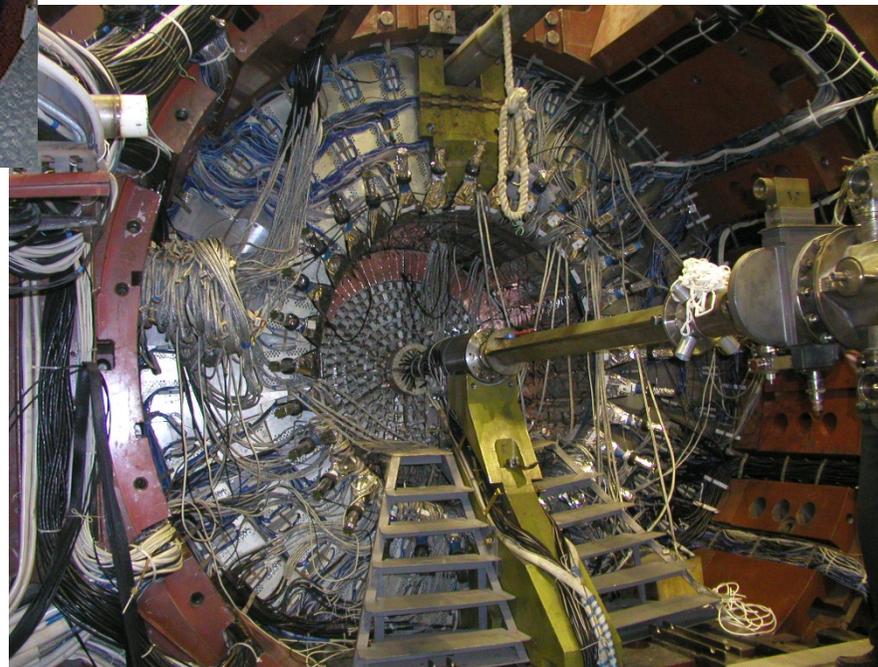
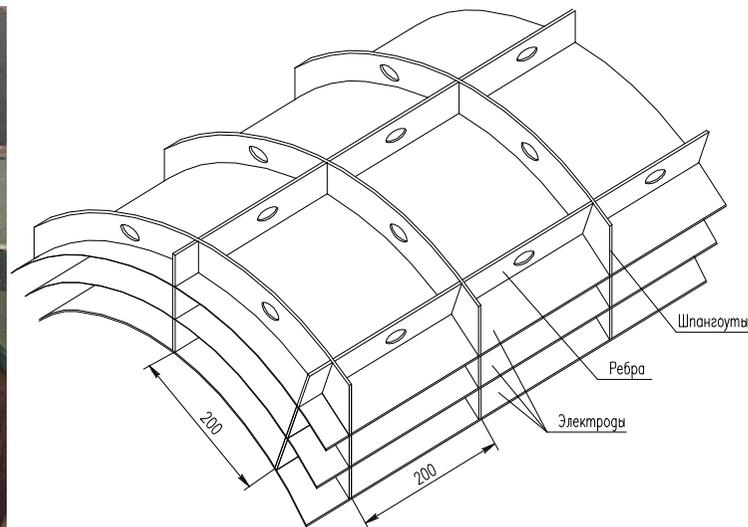
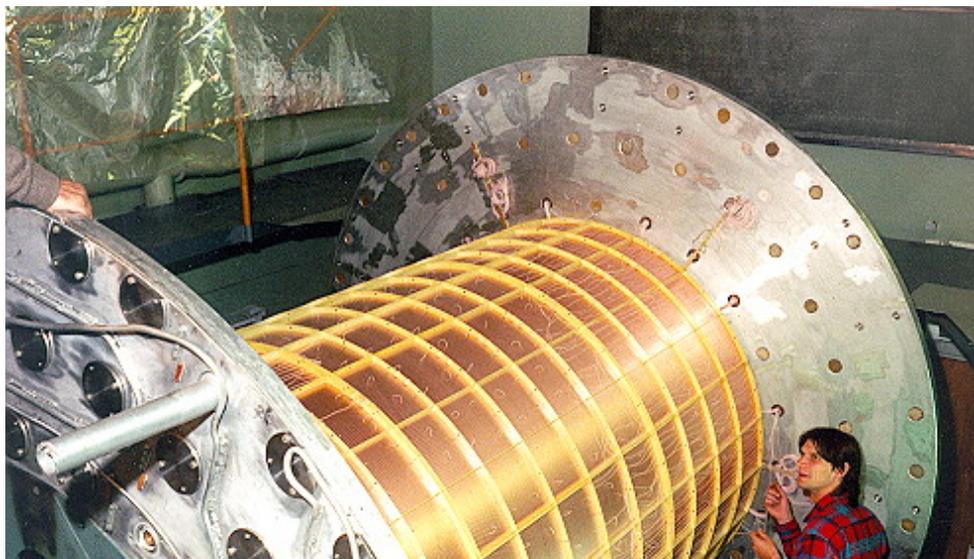
Число «башен»: 2304

Число координатных полосок: 4936

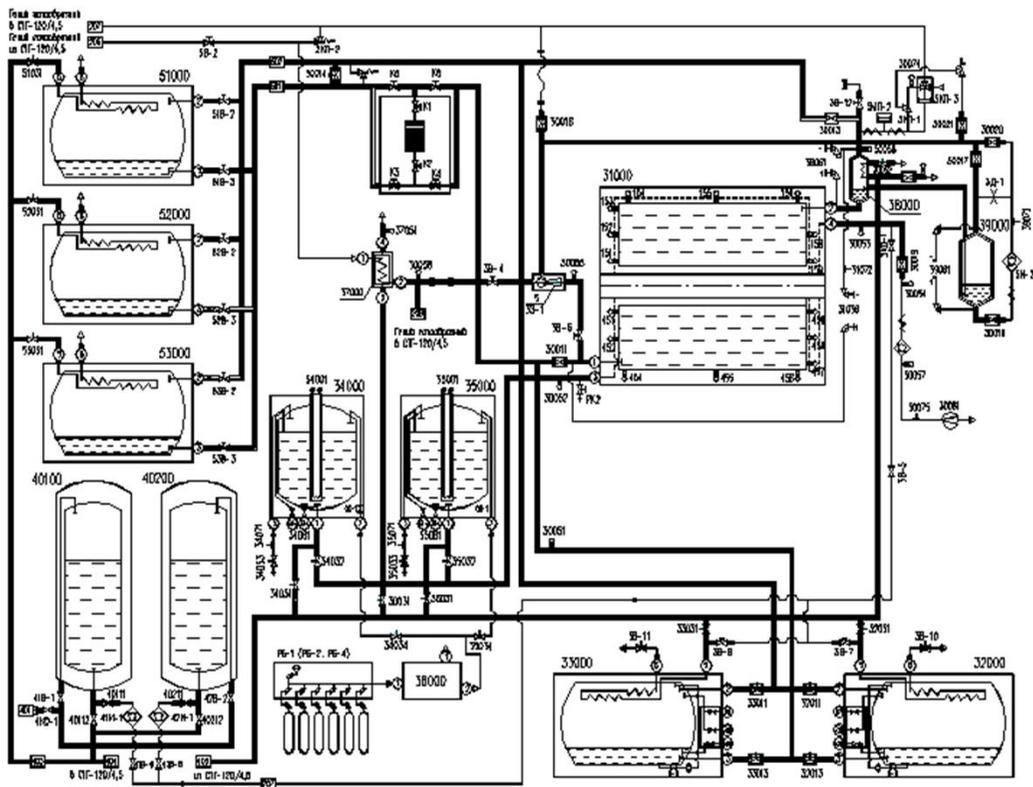


Электродная структура состоит из трех слоев «башен», ориентированных на место встречи, заземленные электроды 1-го слоя разбиты на полоски (4 слоя для измерения угла φ и 4 слоя для измерения угла Θ).

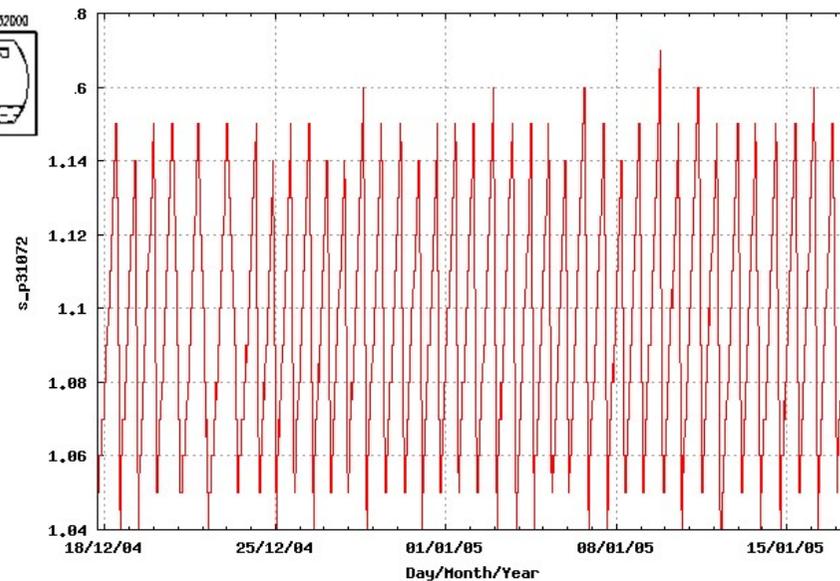
Сборка калориметра



Криогенная система калориметра



kelcryo (s_p31072)
17/01/2005 16:36:21 NOV7



Раз в день калориметр охлаждается жидким азотом. При этом, суточные колебания абсолютного давления криптона в криостате составляют 0.1 атм, что соответствует изменению температуры LKr на 1 К.

$$\frac{1}{T} \frac{dA_{mip}}{dT} = -1.3 \pm 0.2 \% / K; \quad \frac{1}{T} \frac{dA_{\gamma}}{dT} = -0.40 \pm 0.05 \% / K;$$

Электроника калориметра

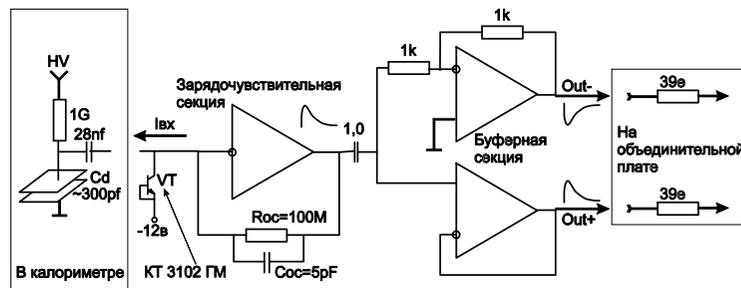


Канал регистрирующей электроники состоит из следующих элементов:

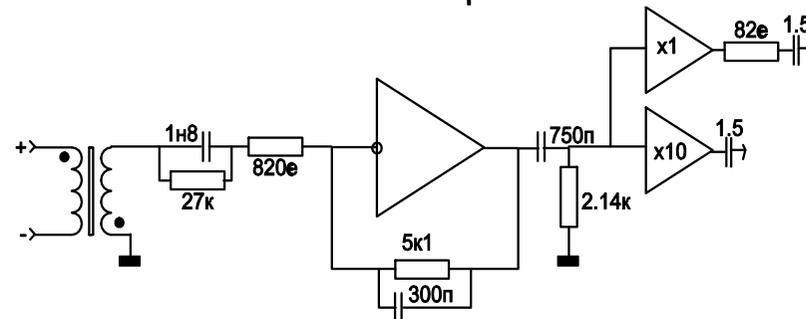
- Зарядочувствительный предусилитель на полевом транзисторе SNJ1800D
- RC-2CR формирователь ($\tau = 1.5 \mu\text{s}$ для «башен», $\tau = 4.2 \mu\text{s}$ для полосок)
- Пиковый АЦП (12-bit)

Кроме того, между предусилителями и формирователями имеются коммутирующие блоки, содержащие специальные генераторы (всего: 12 шт. для спектрометрических каналов и 28 шт. для координатных каналов), которые имитируют входной ток реальных частиц для относительной калибровки каналов электроники.

Preamplifier

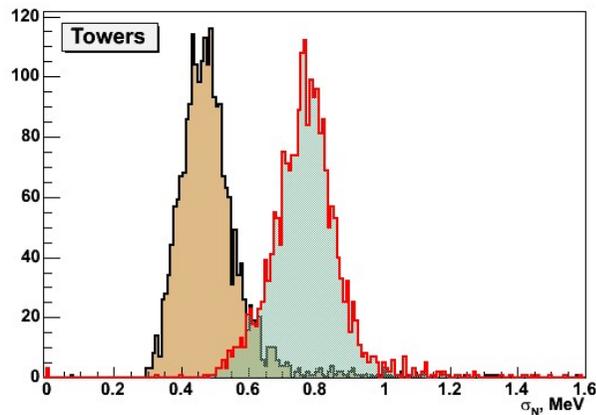


RC-2CR shaper

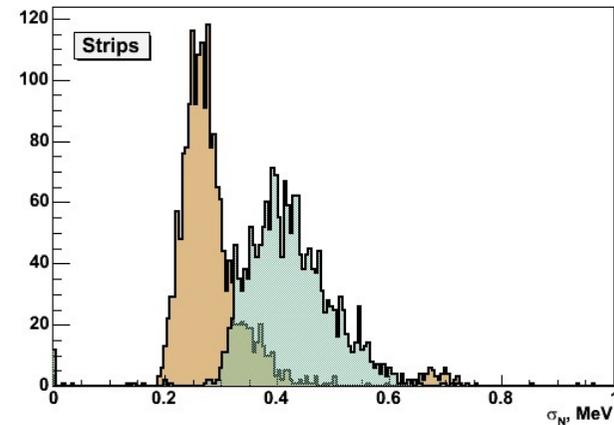


Шумы электроники и радиоактивности

Распределения по измеренным шумам в каналах электроники калориметра.
Полупрозрачные гистограммы – HV включено, сплошные - HV выключено.



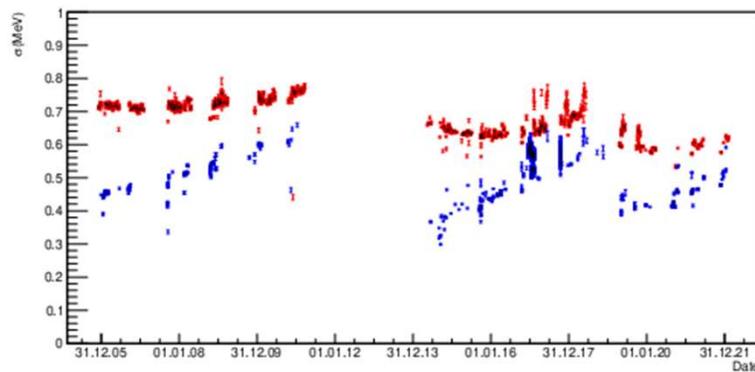
N = 0.5 MeV; N+R = 0.8 MeV; R = 0.6 MeV



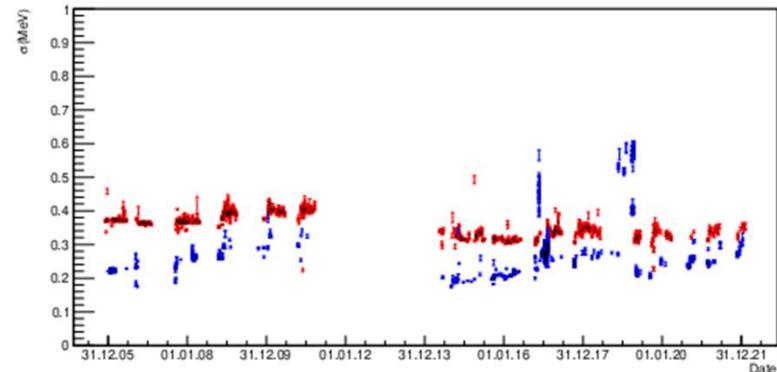
N = 0.3 MeV; N+R = 0.4 MeV; R = 0.3 MeV

Временная зависимость среднего шума в электронике калориметра.

Красные точки – суммарный шум. **Синие** – собственный шум электроники.



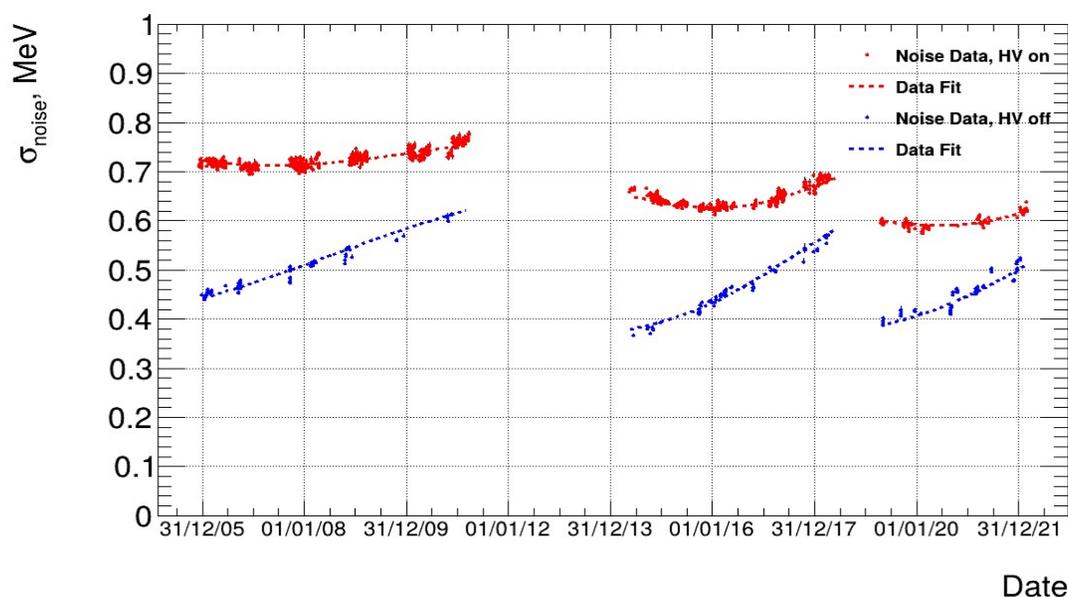
Башни



Полоски

Шумы электроники и радиоактивности

Башенные каналы



Средний шум спектрометрического канала электроники с включенным HV (**красные точки**) и без него (**синие точки**).

Совместный фит данных аналитическими функциями для расчета шумов электроники (**синяя кривая**) и радиоактивности. **Красная кривая** – квадратичная сумма шумов и радиоактивности.

Фиксированные параметры:

$T_{dr} = 9 \mu s$, $\tau_{rc-2cr} = 1.5 \mu s$, активность изотопа $^{85}Kr = 300 \text{ Гц/см}^3$.

Свободные параметры:

Ёмкость башни: C_d [pF]

Объём башни: V_{LKr} [литры]

Время жизни электронов: $\tau_i^j [\mu s] = T_{const} +$

$T_0^i \cdot \exp(-t/\tau_d^i)$,

i – индекс временного интервала.

Постоянная распада изотопа ^{85}Kr : τ_{85} [месяцы].

Результат подгонки:

$C_d = 341.0 \pm 0.3 \text{ pF}$; $V_{LKr} = 3.19 \pm 0.02 \text{ л}$;

$T_{const} = 1.17 \pm 0.01 \mu s$

$\tau_{85} = 240.1 \pm 0.4 \text{ months}$.

$T_0^1 = 3.70 \pm 0.01 \mu s$; $\tau_d^1 = 31.23 \pm 0.01 \text{ months}$

$T_0^2 = 13.78 \pm 0.01 \mu s$; $\tau_d^2 = 16.66 \pm 0.02 \text{ months}$

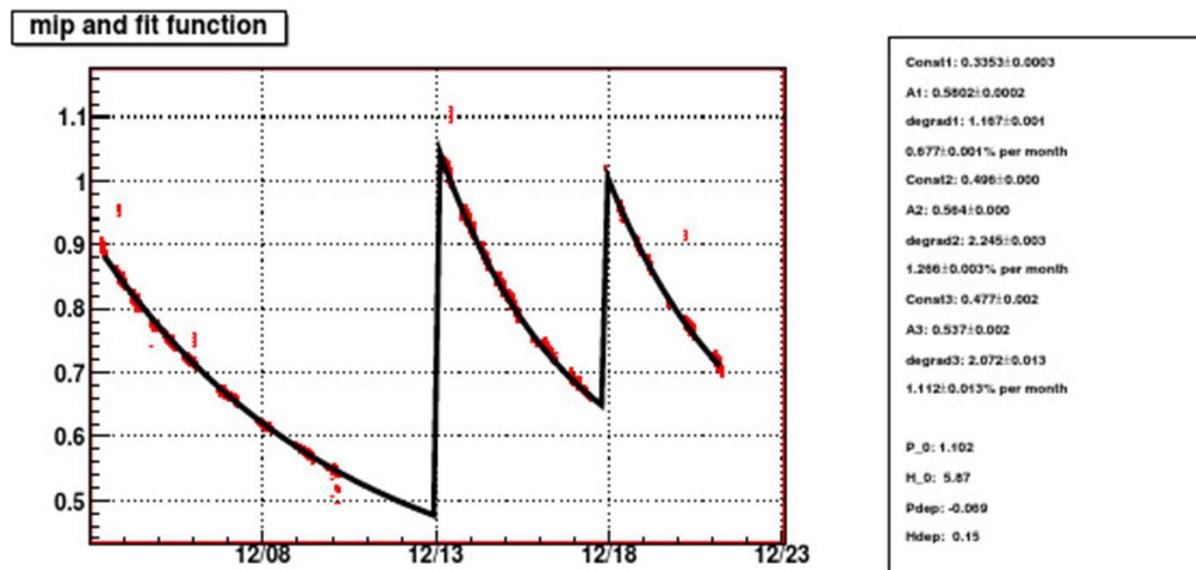
$T_0^3 = 10.76 \pm 0.07 \mu s$; $\tau_d^3 = 18.17 \pm 0.01 \text{ months}$

Период полураспада: $T_{1/2} = \tau_{85} \cdot \ln 2 = 166.4 \pm 0.3 \text{ месяцев} = \mathbf{13.86 \pm 0.03 \text{ лет}}$

Очистка криптона

LKr калориметр не имеет системы постоянной очистки криптона от электроотрицательных примесей. Поэтому амплитуда сигнала в калориметре со временем уменьшается. Когда амплитуда падает ниже определенного уровня, весь криптон очищается во время технической остановки.

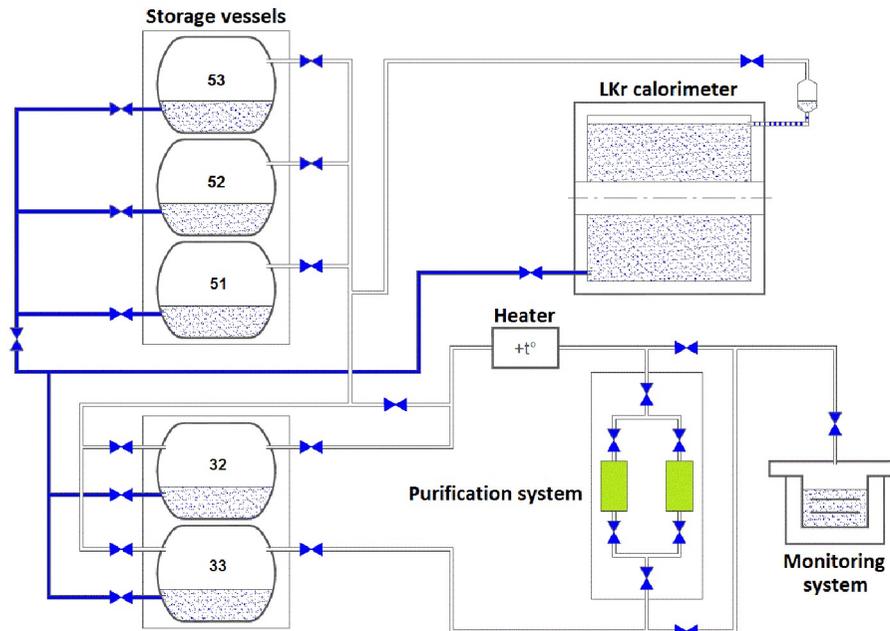
Временная зависимость амплитуды калориметра от M.I.P. (2003 - 2023)



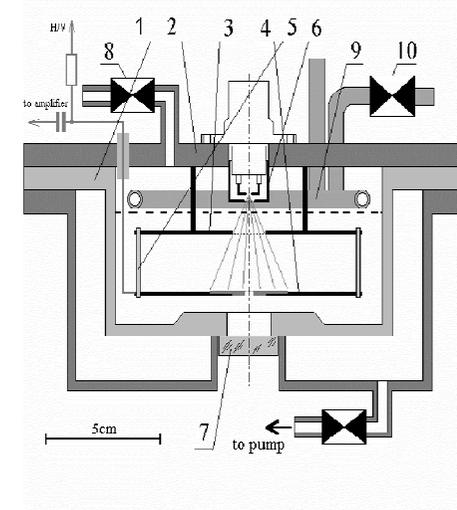
Реконструкция событий в LKr калориметре учитывает эту зависимость амплитуды от времени. Все реконструированные амплитуды кластеров нормируются на амплитуду от минимально ионизирующей частицы.

Очистка криптона

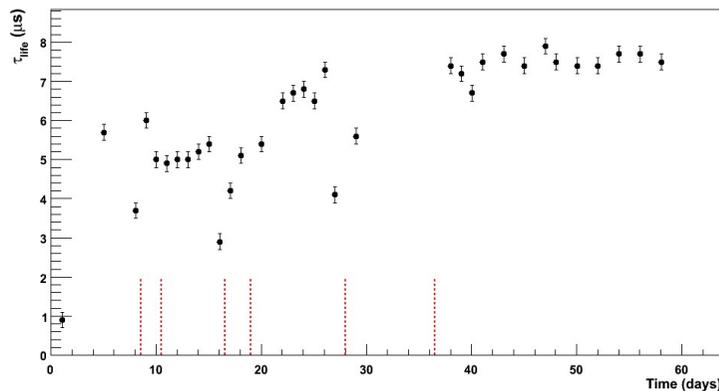
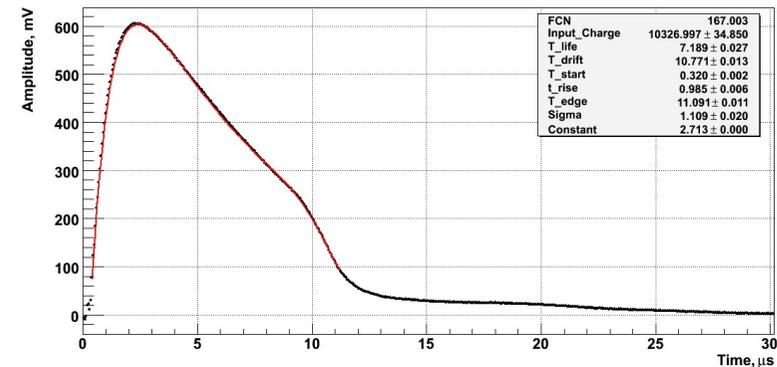
Промышленная система очистки УТОА-40/10А производства НПК «Наука» с двумя большими картриджами используется для очистки криптона. Система очистки может работать только с газообразным криптоном при комнатной температуре.



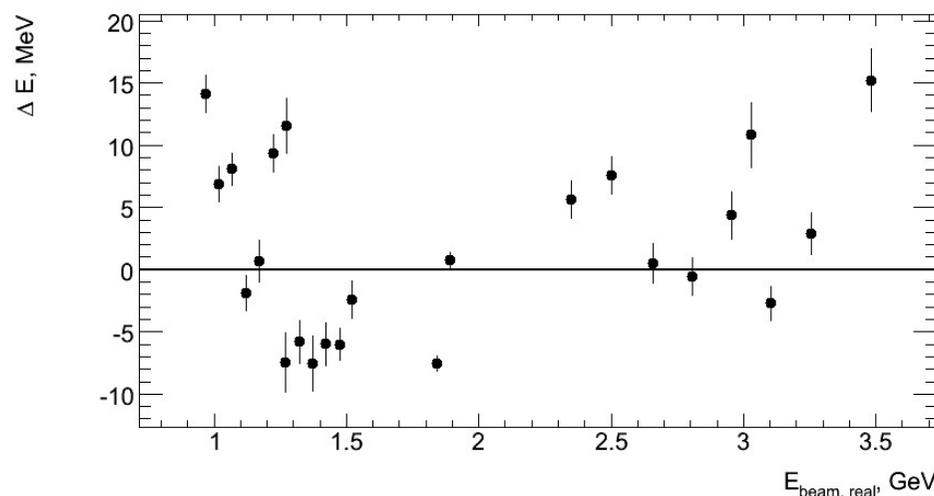
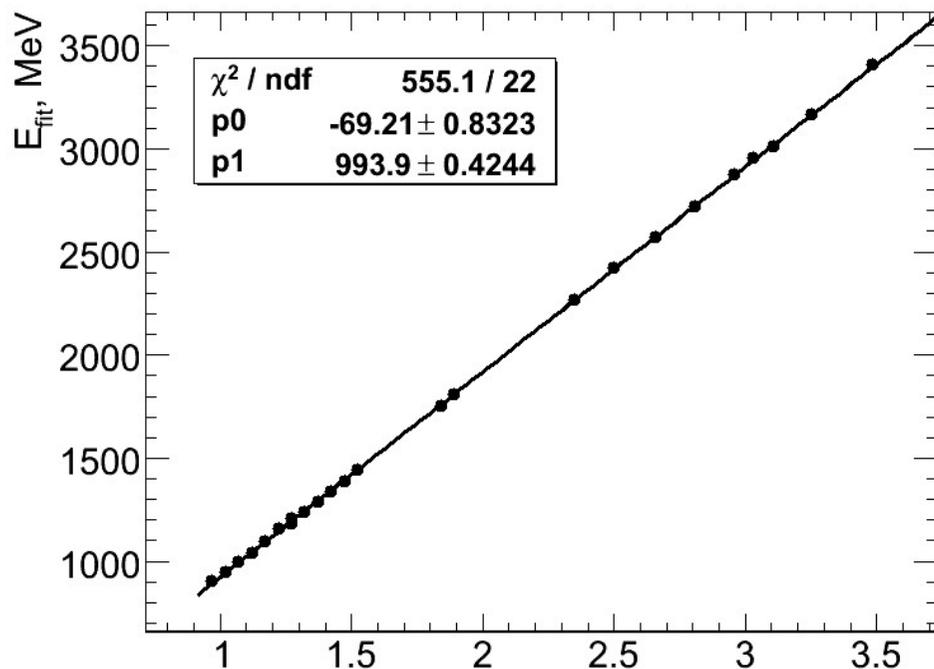
Монитор очистки



Форма сигнала монитора



Линейность и временная стабильность отклика



В 2015–2022 годах КЕДР провел серию экспериментов по измерению R (отношение сечения рождения адронов к сечению рождения пары мюон-антимюон) в широком диапазоне энергий от 1.84 ГэВ до 7.0 ГэВ. Эти эксперименты дают возможность изучить линейность и долгосрочную стабильность отклика калориметра в широком диапазоне энергий кластеров с использованием событий электрон-позитронного рассеяния.

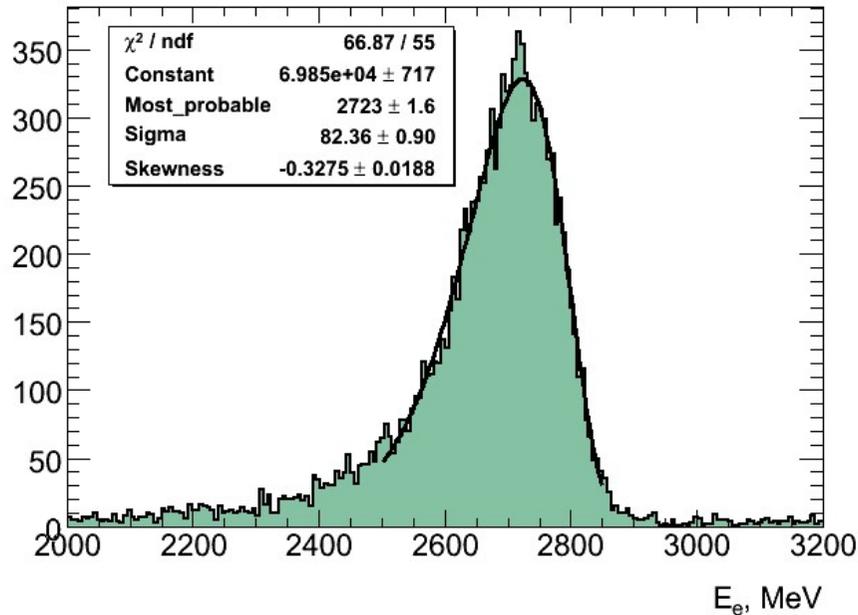
Показана зависимость энергии кластера в калориметре от энергии пучка в коллайдере, а также отклонение от линейной аппроксимации.

При реконструкции кластера в калориметре используется только относительная калибровка электроники и нормировка на амплитуду от M.I.P.

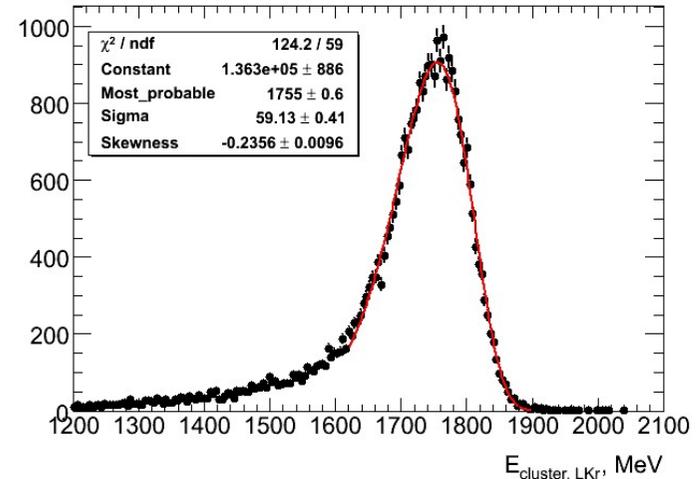
Энергетическое разрешение калориметра

Энергетическое разрешение для событий электрон-позитронного рассеяния было измерено на том же наборе данных. В качестве примеров приведены несколько спектров по энергии кластера в калориметре.

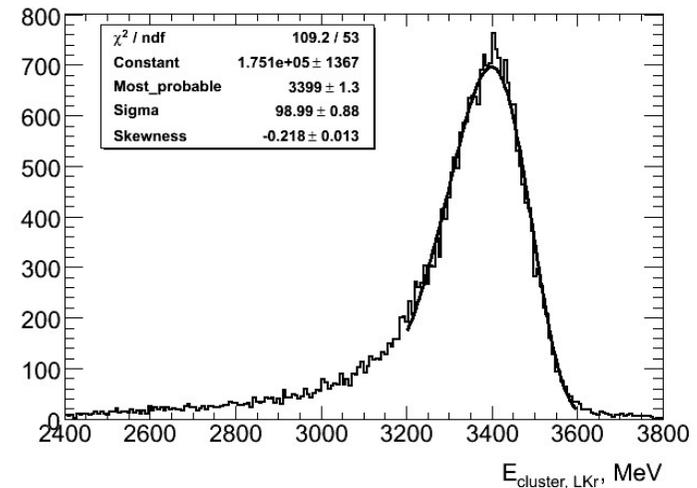
$E_{\text{beam}} = 2.7 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (3.02 \pm 0.03)\%$



$E_{\text{beam}} = 1.75 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (3.36 \pm 0.02)\%$



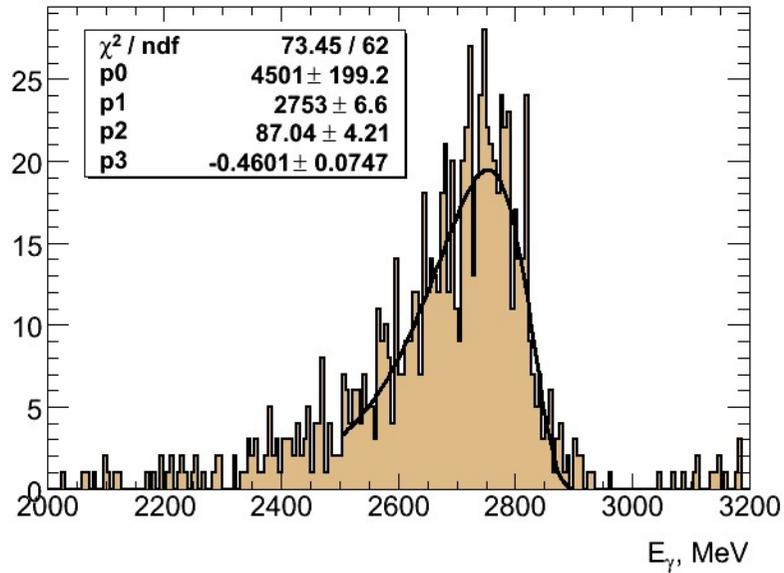
$E_{\text{beam}} = 3.4 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (2.91 \pm 0.03)\%$



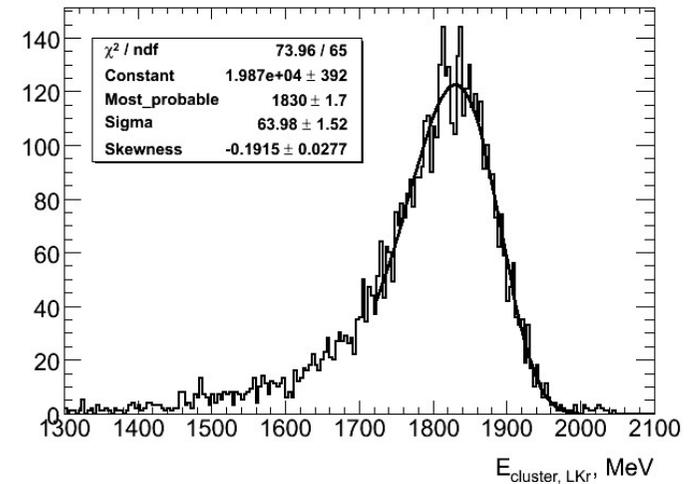
Энергетическое разрешение калориметра

То же самое для фотонов в событиях $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.

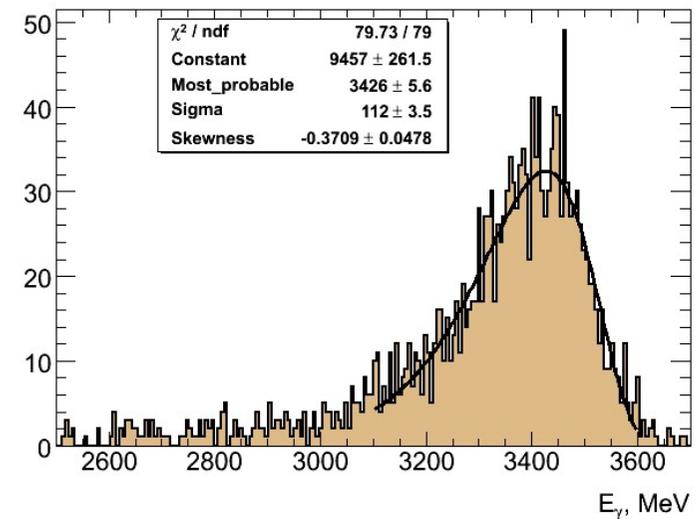
$E_{\text{beam}} = 2.7 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (3.16 \pm 0.15)\%$



$E_{\text{beam}} = 1.8 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (3.50 \pm 0.08)\%$



$E_{\text{beam}} = 3.4 \text{ GeV}$ $\sigma_E/E = (3.27 \pm 0.10)\%$

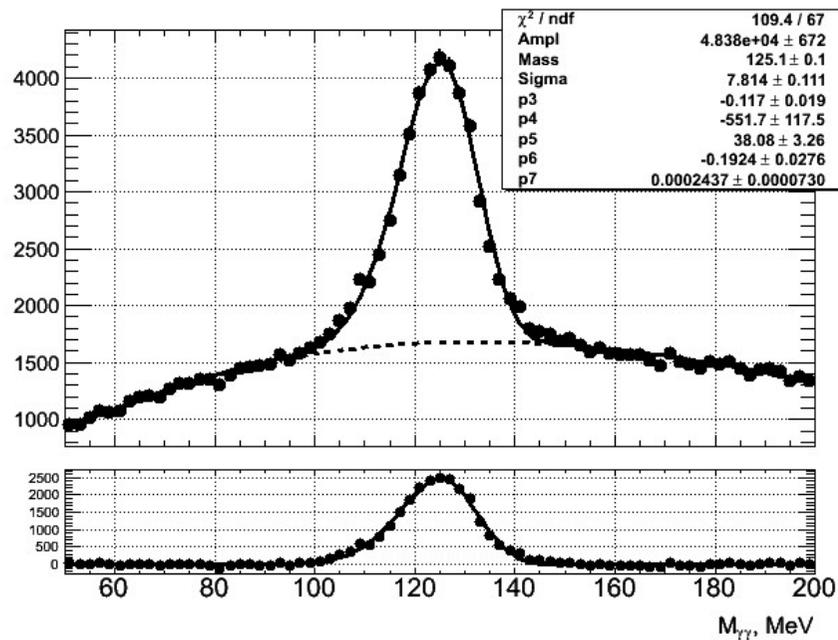


Инвариантная масс двух фотонов

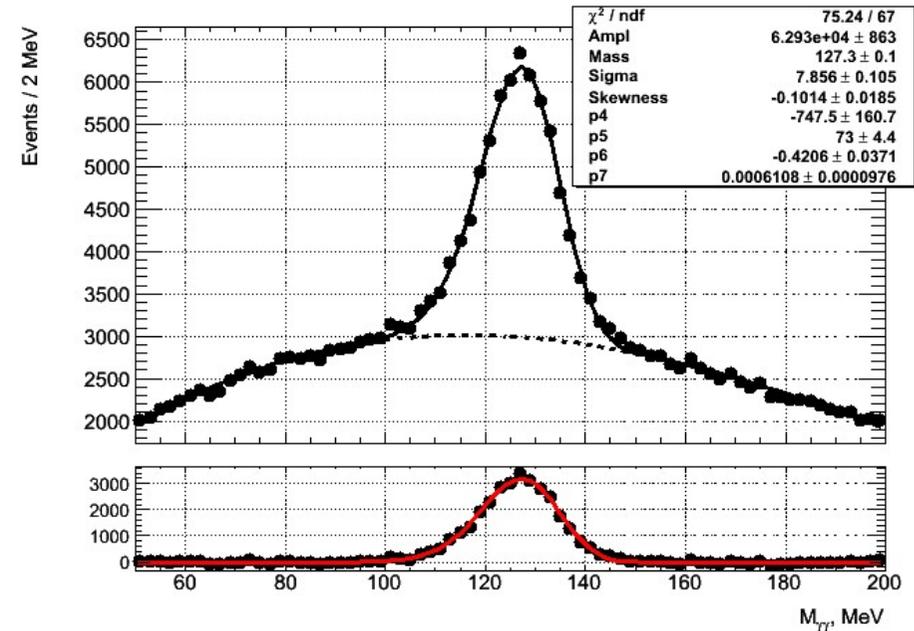
Пик от распада π^0 .

Экспериментальные данные в пике $\Psi(2s)$.

МС



$$\sigma_M/M = (6.24 \pm 0.09)\%$$

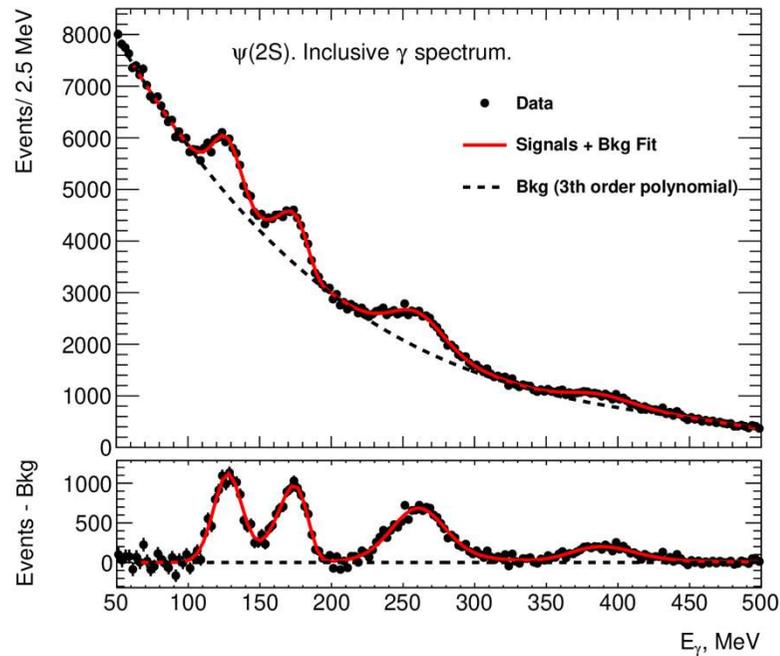


$$\sigma_M/M = (6.17 \pm 0.12)\%$$

Энергетическое разрешение при малых энергиях.

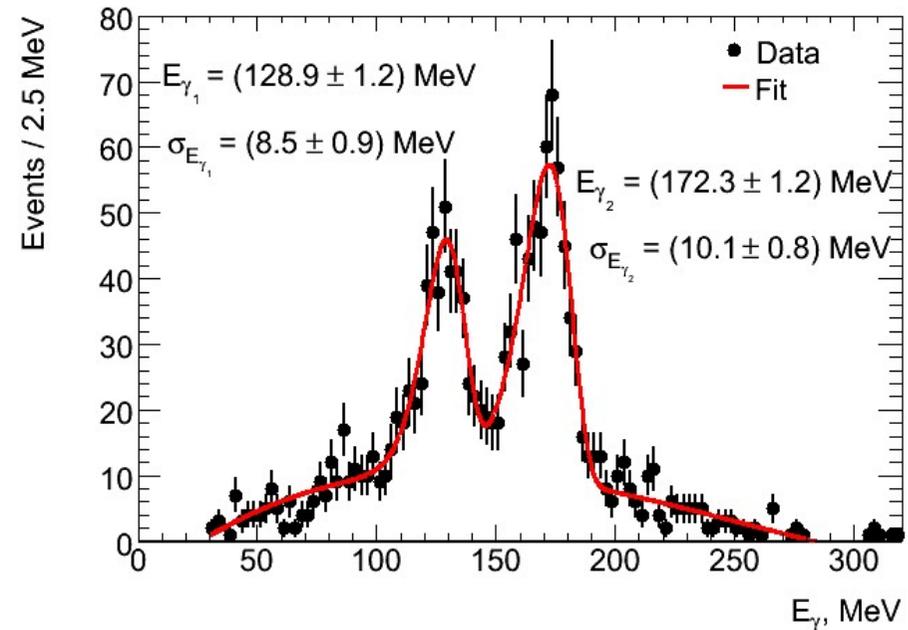
Радиационные переходы $\Psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0,1,2}$

Инклюзивный спектр фотонов. Фотоны из распадов π^0 исключены. Подгонка: полином 3 степени + 3 асимметричных гаусса + $BW \times \omega^3 \times$ асимметричный гаусс для $\Psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0}$.



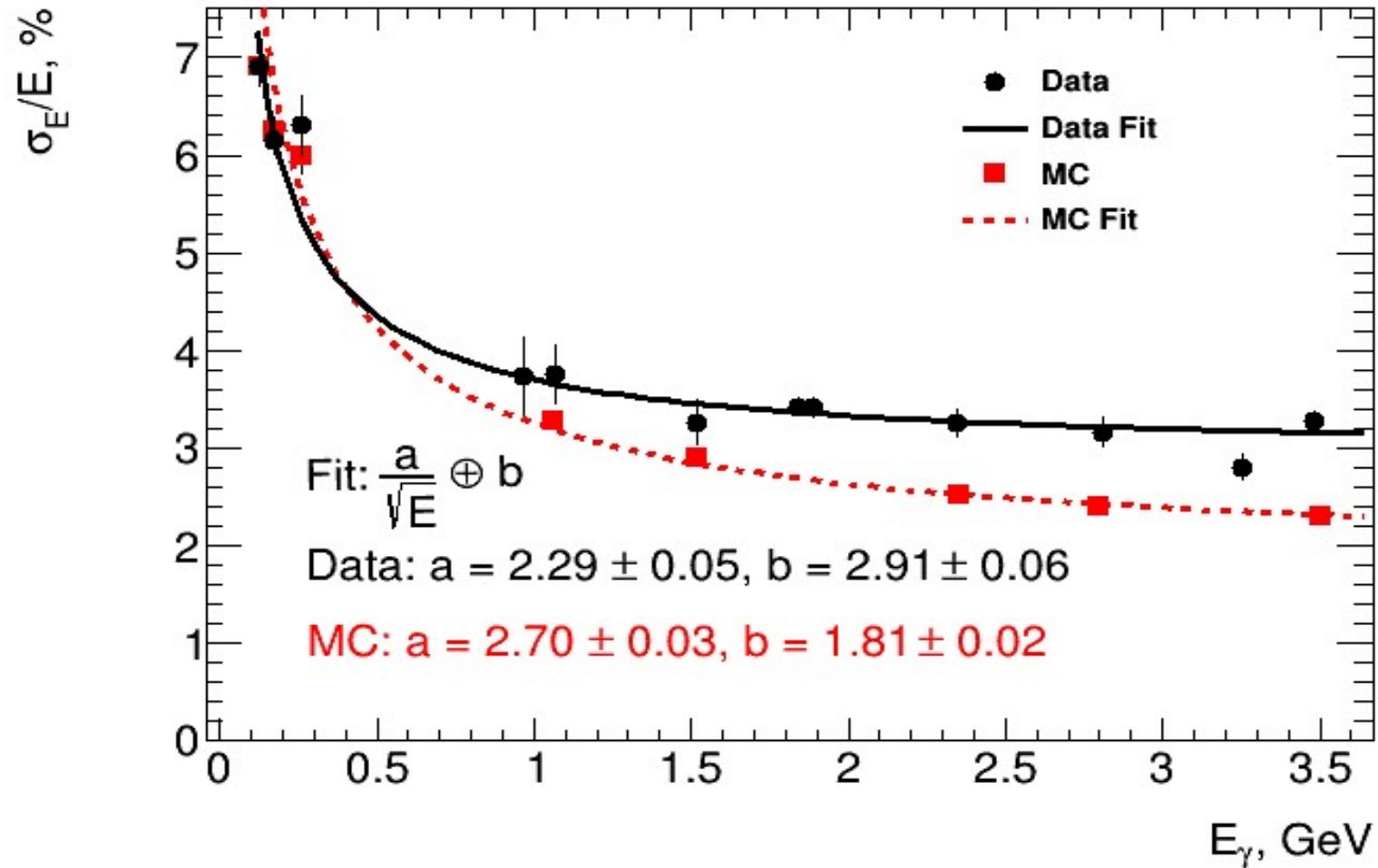
E_γ	128 MeV	171 MeV	261 MeV
σ_E/E	$(7.7 \pm 0.4)\%$	$(6.1 \pm 0.3)\%$	$(6.4 \pm 0.3)\%$

Каскадные радиационные переходы $\Psi' \rightarrow \gamma \chi_{c1,2} \rightarrow \gamma \gamma J/\psi \rightarrow \gamma \gamma l^+ l^-$

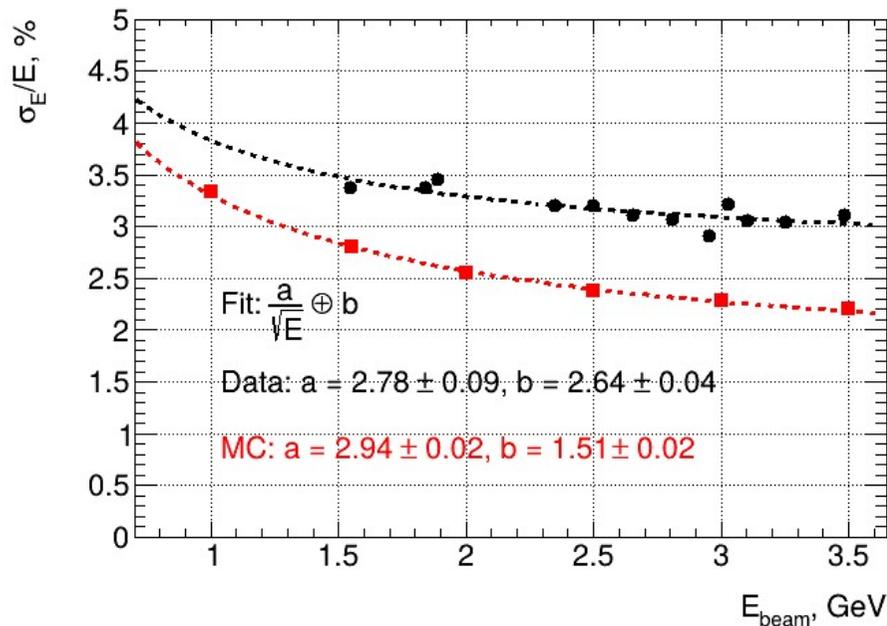


E_γ	128 MeV	171 MeV
σ_E/E	$(6.6 \pm 0.7)\%$	$(5.9 \pm 0.5)\%$

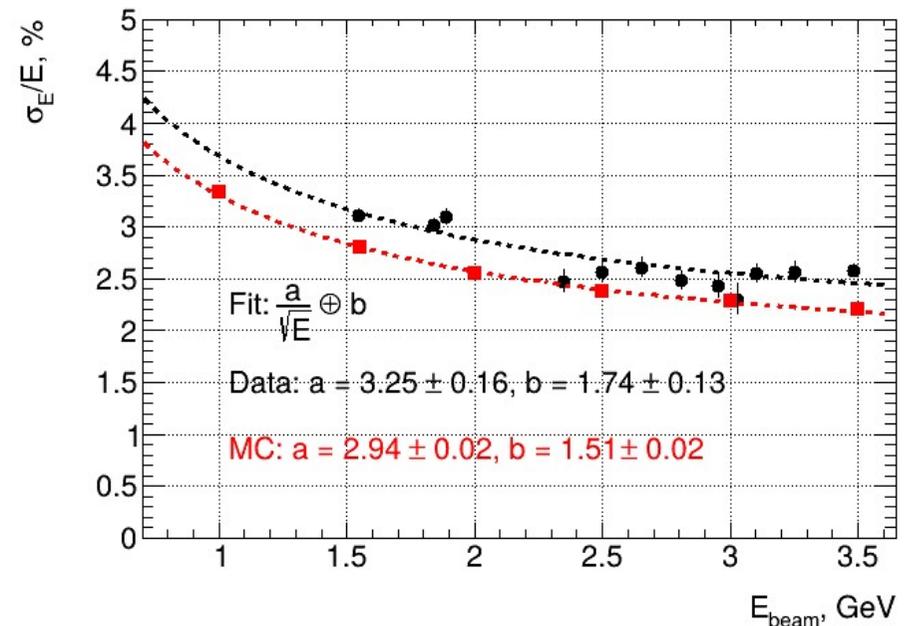
Энергетическое разрешение. ФОТОНЫ



Энергетическое разрешение. Электроны

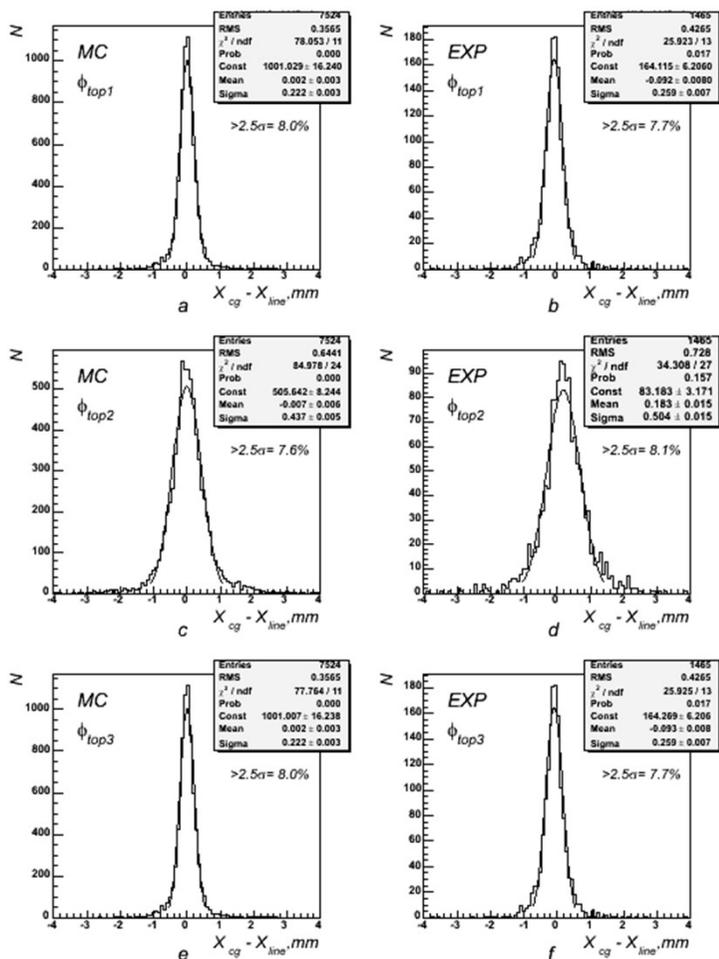


При реконструкции кластеров используется только генераторная относительная калибровка и нормировка на амплитуду от M.I.P.



Разрешение определяется по ограниченной области калориметра, каналы которой калибруются одним и тем же калибровочным генератором.

Пространственное разрешение для МIP



Пространственное разрешение для МIP измерялось с использованием данных, полученных на заходах с космическими частицами. Распределения разницы между координатами кластера в координатном слое и координаты реконструированного трека показаны для трех слоев ϕ -полосок.

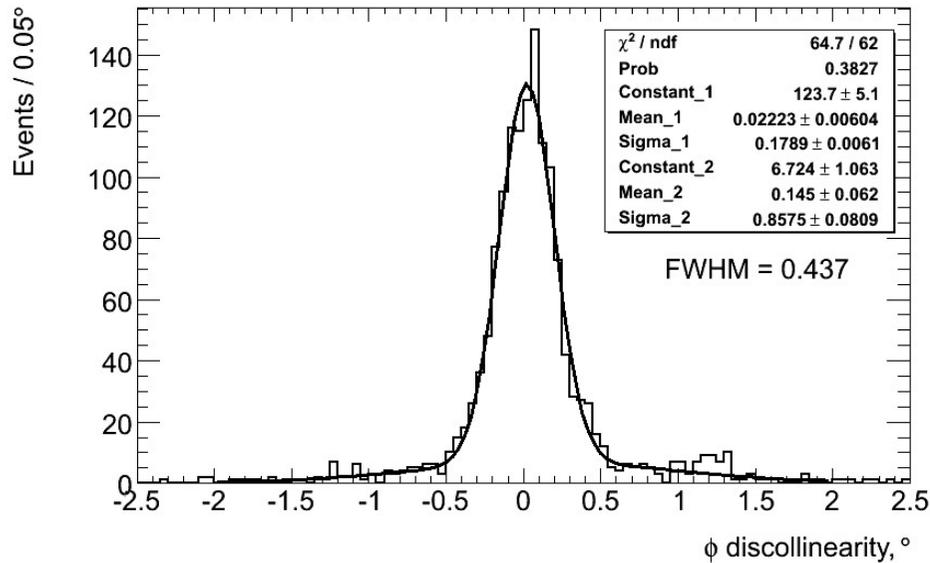
Разрешение для слоя ϕ_2 :

$$\sigma_{MC} = 0.437 \cdot \sqrt{3/2} = 0.535 \text{ мм} \pm 0.015$$

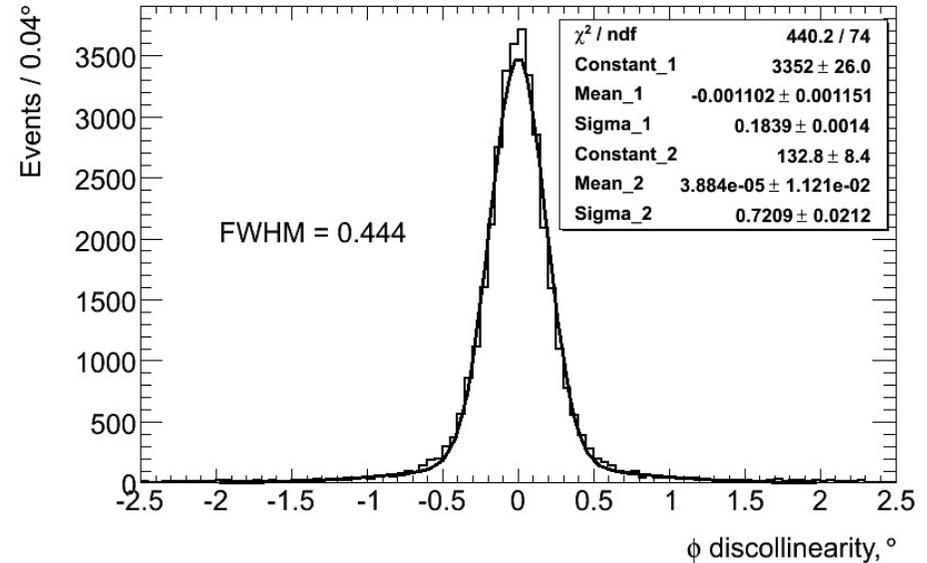
$$\sigma_{exp} = 0.504 \cdot \sqrt{3/2} = 0.618 \text{ мм} \pm 0.019$$

Пространственное разрешение для фотонов

Распределение по углу расколлинеарности кластеров фотонов в калориметре LKr для событий $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. $E_{\text{beam}} = 3.5$ ГэВ



Experiment



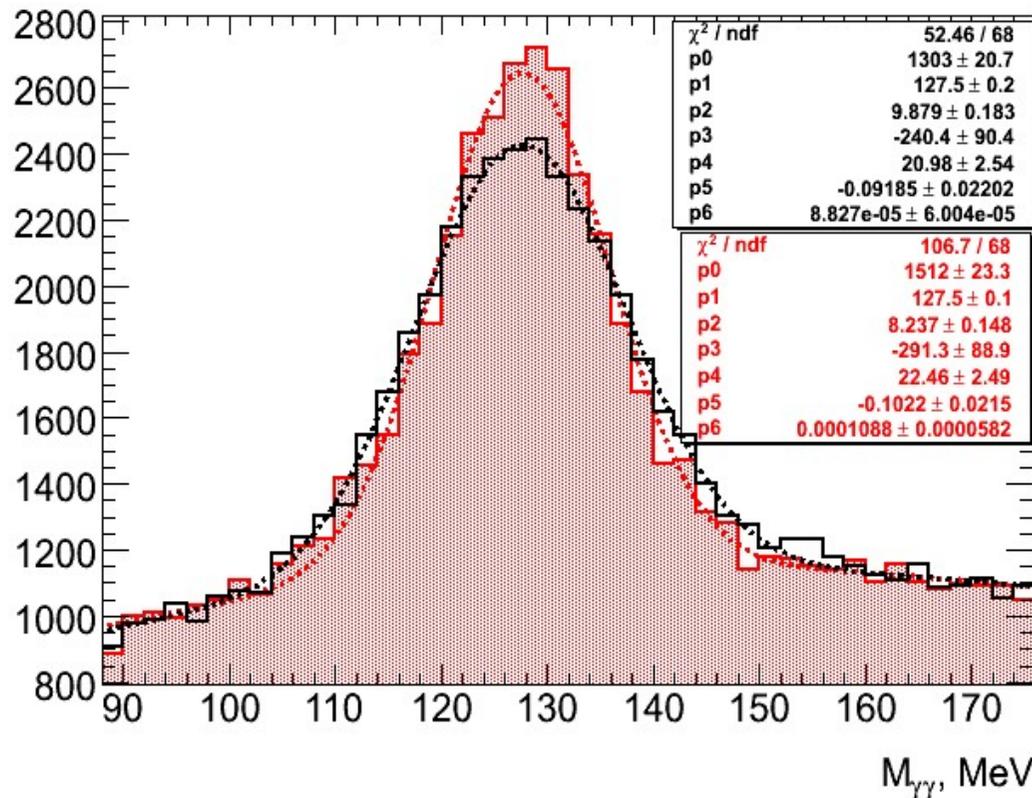
MC

$$\sigma_{\phi} \approx 0.13^{\circ} \Rightarrow \sigma \approx 1.8 \text{ мм}$$

Пространственное разрешение для фотонов

Разрешение по массе π^0 .

Экспериментальные данные набранные в пике J/ψ . Прозрачная (черная) гистограмма – инвариантная масса определяется с использованием координаты фотонного кластера, полученной только по башням. Красная – координата кластера определяется по полоскам.



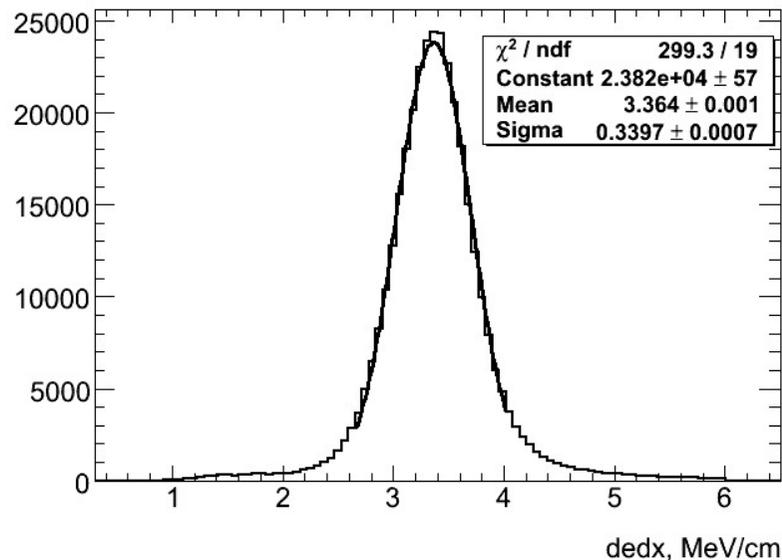
$$\sigma_M/M = (7.75 \pm 0.12)\% \quad \text{Башни}$$

$$\sigma_M/M = (6.46 \pm 0.12)\% \quad \text{Полоски}$$

Измерение dE/dx

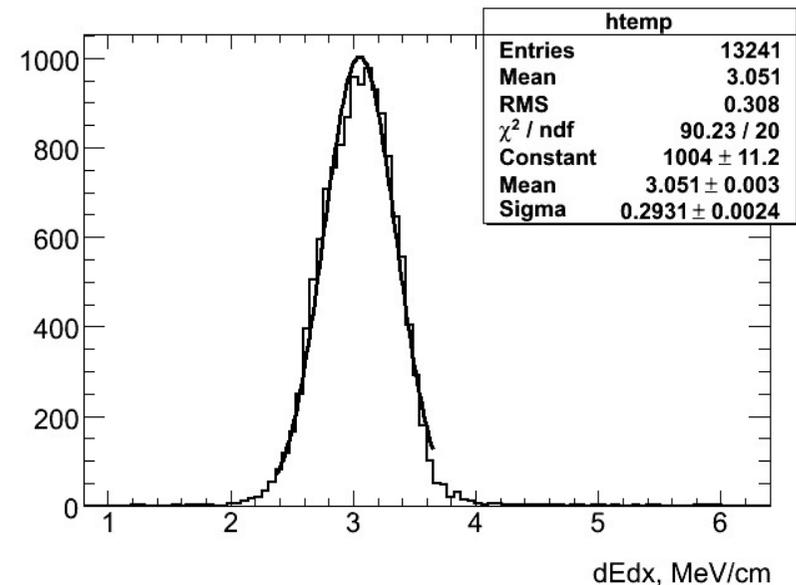
Наличие 8 слоев с полосками в электродной системе калориметра позволяет измерять ионизационные потери для MIP.

Распределение по усеченному среднему ионизационных потерь космических мюонов в полосках.



$$\sigma_{dEdx}/dEdx = 10.1\%$$

MC



$$\sigma_{dEdx}/dEdx = 9.6\%$$

Заключение

Электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона в составе детектора КЕДР работает на эксперимент уже более 20 лет. За это время он зарекомендовал себя как надежный, стабильный, неприхотливый прибор с хорошими параметрами.

List of selected publications

- 1) "Investigation of an an electromagnetic calorimeter based on liquid krypton"
NIM A289 (1990) 468-474
- 2) "Liquid krypton calorimeter for KEDR detector"
NIM A316 (1992) 8-13
- 3) "Liquid krypton electromagnetic calorimeter"
NIM A327 (1993) 193-198
- 4) "Precision timing with liquid ionization calorimeters"
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A332(1993)78-84
- 5) "Performance of an accordion electromagnetic calorimeter with liquid krypton and argon"
NIM A344 (1994) 363-377
- 6) "Liquid ionization calorimetry with time sampled signals"
NIMA 349(1994) 367-383

8) "Liquid krypton calorimeter for KEDR detector and last prototype results"
NIM A379 (1996) 475-477

9) "The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam"
NIM A394 (1997) 35-45

10) "First observation of photon splitting in a strong coulomb field. Current status of the experiment."
PHOTON'97, the XIth International Workshop on Gamma-Gamma Collisions,
Egmond aan Zee, Netherlands, 246-250

11) "High-accuracy measurement of photon position in a liquid krypton calorimeter"
NIM A419 (1998) 602-608

12) "Delbruck scattering at energies of 140-450 MeV"
Phys. Rev. C58 (1998) 2844-2850

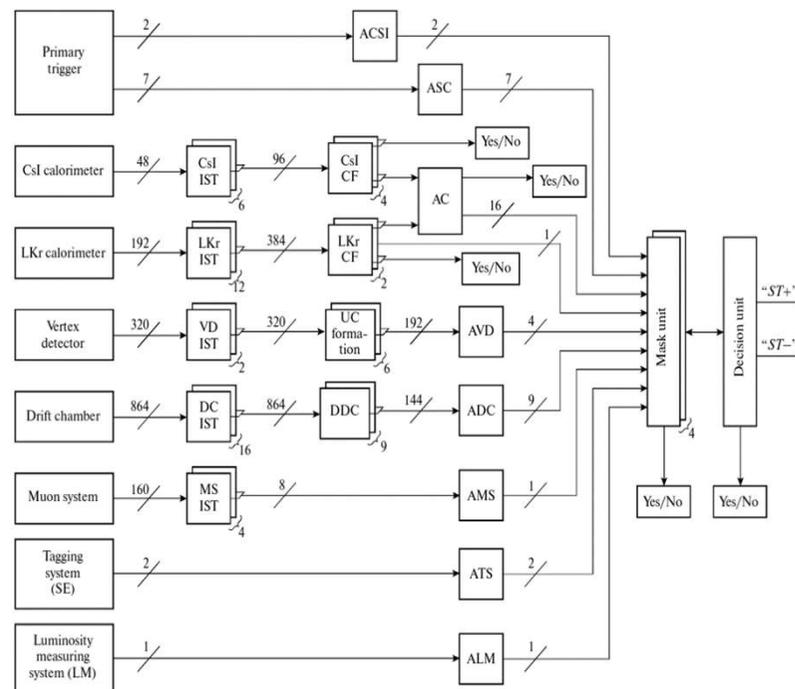
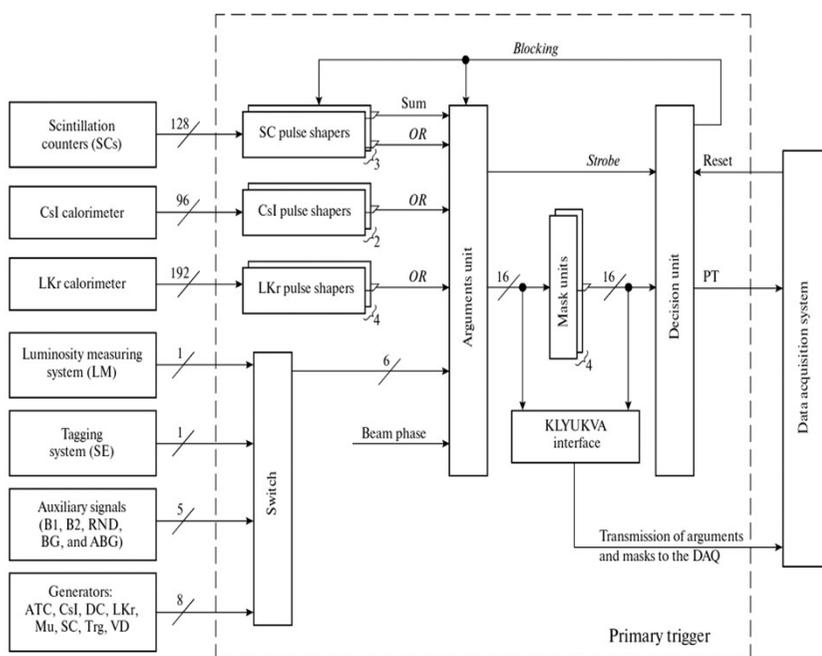
13) "Experimental investigation of high-energy photon splitting in atomic fields"
PRL, v.89 (2002) 061802

14) "A purity monitor for the KEDR liquid krypton calorimeter"
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/P06004>, 2016 JINST 11 P06004

Триггер

Триггер детектора КЕДР имеет два аппаратных уровня

Башни первых двух слоев LKr калориметра объединены в супербашни для использования в триггере. В калориметре 192 таких супербашен, каждая из которых состоит из восьми башен LKr – $2 \times 2 \times 2$ (r, ϕ , z). Сигналы от супербашен поступают на дискриминаторы с регулируемыми порогами, и их логическая сумма идет в первичный триггер.



Во вторичный триггер поступают 192 аналоговых сигнала от супербашен калориметра, которые подаются на дискриминаторы с двумя управляемыми компьютером порогами — thr1 и thr2 ($thr1 < thr2$). Выходные сигналы дискриминаторов подаются в формирователь кластеров (ФК). ФК отдельно подсчитывает количество кластеров с порогами thr1 и thr2 и формирует соответствующие аргументы, которые передаются в блок принятия решений вторичного триггера.

Пространственное разрешение для фотонов

Непосредственно пространственное разрешение для фотонов измерялось в эксперименте с прототипом калориметра на пучке меченных фотонов.

Зависимость пространственного разрешения от энергии фотонов показана для двух слоев полосок. Первый слой — это слой, в котором произошла конверсия фотона. Второй слой — это следующий за ним слой.

Ширина полосок составляет 1 см.

