

Комбинированный LXe/CsI калориметр детектора КМД-3

В.Е. Шебалин
ИЯФ СО РАН

по материалам кандидатской диссертации

6 июня 2016 г.
ИЯИ РАН г. Троицк

- ВЭПП-2000
- Детектор КМД-3
- Цилиндрический калориметр
- LXe калориметр
- CsI калориметр
- Предварительная калибровка CsI калориметра
- Совместная калибровка LXe и CsI калориметров
- Bhabha калибровка
- Восстановление энергии фотонов
- Заключение

Магнитный момент мюона

$$\vec{\mu} = g \frac{e\hbar}{2mc} \vec{S}$$

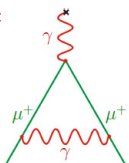
$$a_{\mu} = (g - 2)_{\mu} / 2$$

$$a_{\mu}^{\text{Exp}} - a_{\mu}^{\text{SM}} = 3.6\sigma$$

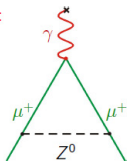
$\pi+\pi-$	505.65 ± 3.09
$\pi+\pi-2\pi^0$	18.62 ± 1.15
$\pi+\pi-\pi^0$	47.38 ± 0.99
$2\pi+2\pi-$	13.64 ± 0.36
$K+K-$	22.95 ± 0.26
from Isospin relations	5.98 ± 0.42
	(or 12.46 ± 0.76 for $J_S < 2$)
Rqcd[2-11.09GeV]	41.19 ± 0.82

- Прецизионное измерение величины $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ с систематической погрешностью $< 1\%$
- Изучение адронных каналов $e^+e^- \rightarrow 2h, 3h, 4h, \dots$, $h = K, \pi, \eta$
- Изучение возбужденных состояний векторных мезонов $\rho', \rho'', \omega', \phi', \dots$
- Изучение процессов рождения нуклон-антинуклонной пары вблизи порога рождения
- и другие задачи

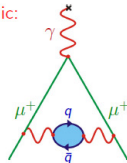
QED:

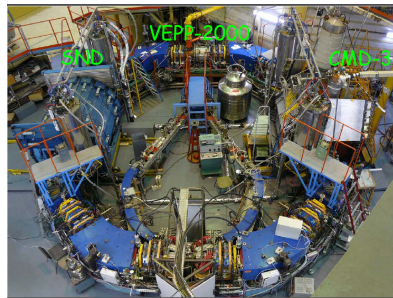
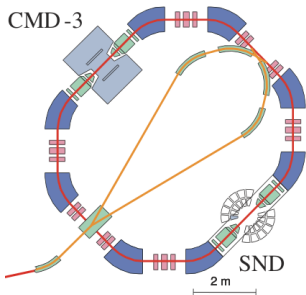


weak:



hadronic:





Технические характеристики

	500 МэВ	1 ГэВ
Периметр	24.39 м	
σ_x, σ_y , мм	0.058	0.12
σ_z , см	1.2	3.5
I, мА	50	200
N/пучок	2.5×10^{10}	1×10^{11}
$L, \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	1.8×10^{31}	1×10^{32}

D.E. Berkaev et al, Nucl. Phys. Proc. Suppl. B 225-227 (2012) 303

"Круглые" пучки

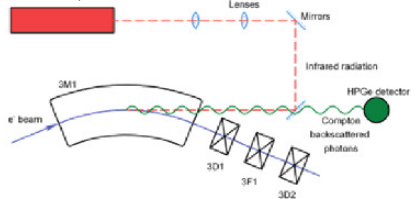
$$L = \frac{\pi \gamma^2 \xi_x \xi_y \epsilon_x \epsilon_y f}{r_e^2 \beta_y^*} \left(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 \quad \Rightarrow \quad L = \frac{4 \pi \gamma^2 \xi^2 \epsilon f}{r_e^2 \beta^*}$$

(геометрический фактор: x4)

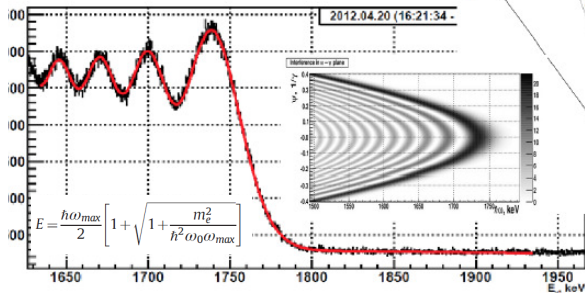
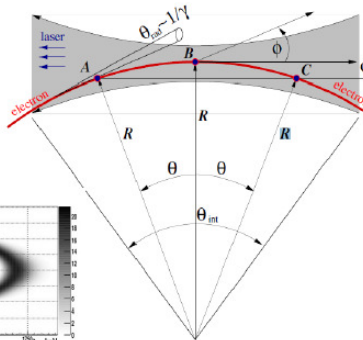
- $E_{c.m.s.} = 0.32 \div 2 \text{ ГэВ}$
- 2010-2013: $L_{\text{int}}(\text{CMD3}) \approx 60 \text{ pb}^{-1}$
- Измерение энергии $\frac{\sigma_E}{E} = 6 \times 10^{-5}$

Измерение энергии пучков

CO2 laser, $\lambda \approx 5.43$ мкм



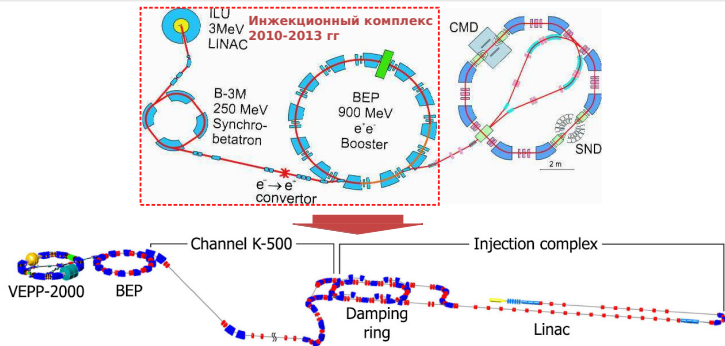
Излучение из точек A и C под углом $\phi = 0$ интерферирует



$$E = 993.662 \pm 0.011$$

V. Abakumova et al., Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 14, 140402,
 V. Abakumova et al., Nucl. Instrum. Meth. A744 (2014) 35-40

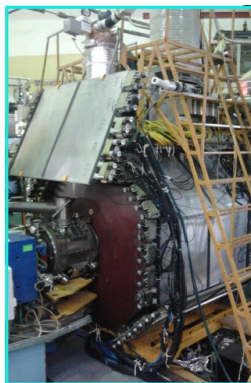
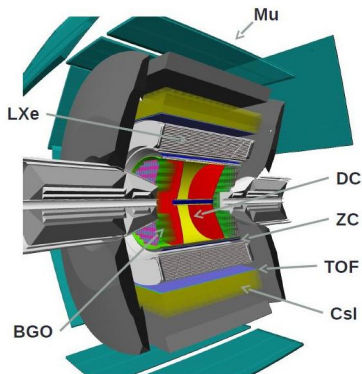
Модернизация ускорительного комплекса



	старый комплекс	новый комплекс
e ⁺ /c	2 × 10 ⁷	3 × 10 ⁸
e ⁻ /c	10 ⁹	10 ¹¹
БЕР E _{max} , МэВ	825	1000
Частота импульсов, Гц	0.7	12.5

A. Romanov, D. Berkaev et al, Status of the electronpositron collider VEPP-2000, Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA

Детектор КМД-3

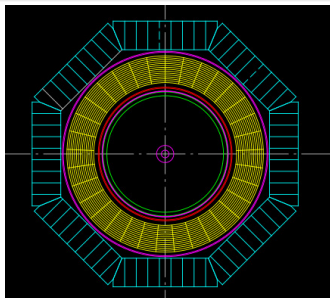


- Универсальный криогенный магнитный детектор, $B = 13$ кГс
- Трековая система: Дрейфовая камера(DC) + Z-камера(ZC), $\sigma_P/P = 1.3 \div 4.5\%$
- Тонкий сверхпроводящий соленоид размещен в одном вакуумном объеме с LXe калориметром. Толщина пассивного вещества перед цилиндрическим калориметром составляет $0.35X_0$ (6.27 г/см²)
- 3 калориметрические подсистемы: цилиндрические LXe и CsI калориметры и торцевой калориметр на основе кристаллов BGO

Составной цилиндрический калориметр

Задачи

- Измерение координат фотонов широком диапазоне энергий от 10MeV до 1GeV
- Измерение координат фотонов
- Формирование сигнала нейтрального триггера детектора



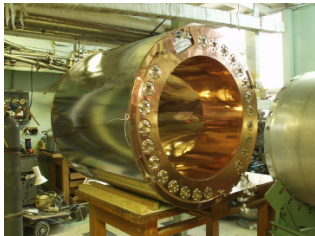
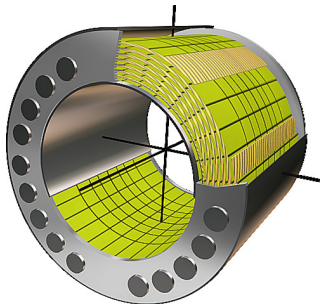
Преимущества

- Компактность
- Высокое пространственное разрешение, позволяет измерять удельные энергопотери и профиль электромагнитного ливня
- Полная толщина $13.5X_0$ обеспечивает энергетическое разрешение около 8% для 200MeV и 4% для 1GeV энергии фотонов

Недостатки

- Толщина пассивного вещества между LXe и CsI составляет $0.25X_0$

Жидкоксеноновый калориметр



Параметры жидкого Хе

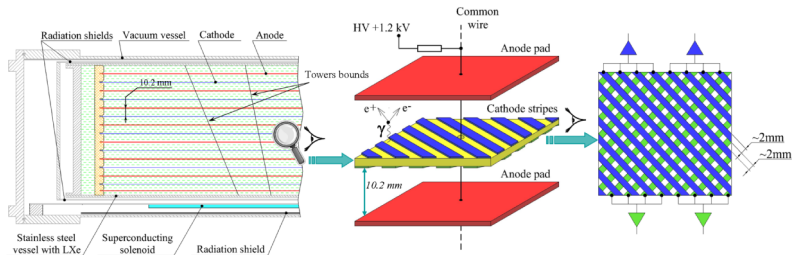
Z	54
A	131.29
ρ , г/см ³	2.95
X_0 , см	2.87
R_M , см	5.22
$(dE/dx)_{min}$, МэВ/см	3.71
W, эВ/пара	15.6

Структура калориметра

- Объем калориметра 400 л
- Рабочая температура 175 К
- Телесный угол $0.8 \cdot 4\pi$
- Толщина 15 см ($5.4 X_0$)
- Напряженность электрического поля в зазоре 1.2 кВ
- Максимальное время дрейфа электронов ионизации 4.5 мкс

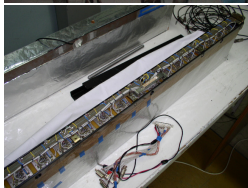
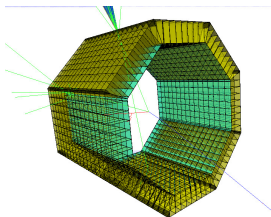
A. V. Anisyonkov et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 598(2009)

Структура электродов LXe калориметра



Структура калориметра

- 14 цилиндрических ионизационных камер, образованных 15-ю электродами с зазором 10.2 мм между ними
- 8 анодных и 7 катодных цилиндров
- Аноды разделены на прямоугольные площадки, образуя 264 башни для измерения энергвыделения:
8 башен вдоль оси Z
33 вдоль угла ϕ
- Катоды разделены на 2112 полосок для измерения координат
- Полоски на противоположных сторонах цилиндра ориентированы взаимно перпендикулярно



Характеристики CsI

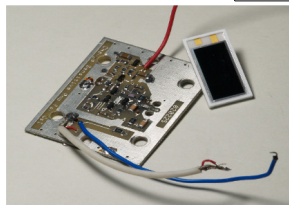
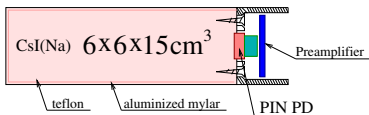
	CsI(Tl)	CsI(Na)
ρ , г/см ³	4.51	
X_0 , см	1.86	
R_M , см	3.57	
dE/dx , МэВ/см	5.6	
λ_{max} , нм	560	420
τ , нс	1000	600
LO, n.ph./МэВ	45000	30000

Конструкция калориметра

- 8 октантов \times 9 модулей \times 16 счетчиков
- Кристаллы CsI(Tl)(60%) и CsI(Na) (40%)
- Толщина калориметра $8.1 X_0$

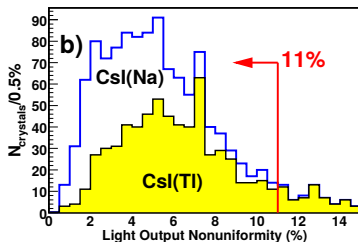
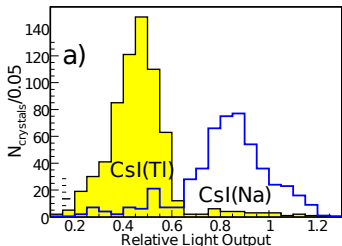
V. M. Aulchenko et al., CsI calorimeter of the CMD-3 detector, 2015 JINST 10 P10006

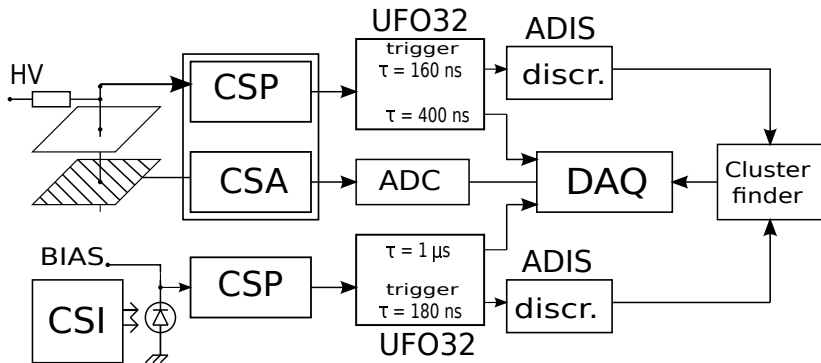
CsI калориметр

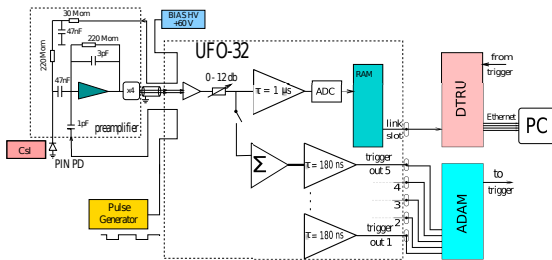


Calorimeter structure

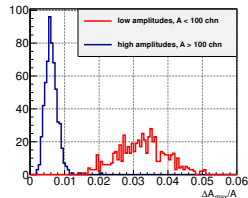
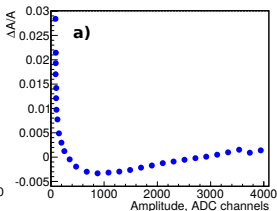
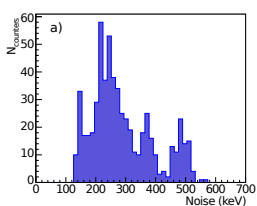
- 1152 счетчика
- Регистрация сцинтиляционного света – PIN PD Hamamatsu
- Чувствительная область фотодиода 10 × 20 мм²

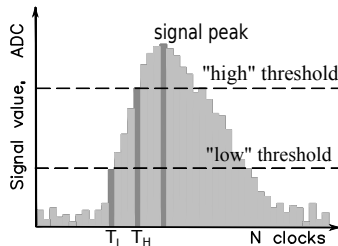
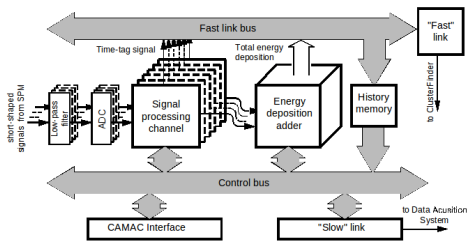






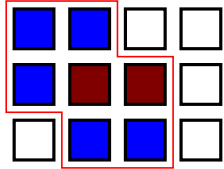
- Ослабление сигнала на входе 0-12 дБ
- $(CR)-(RC)^4$ фильтр, $\tau = 4$ мкс
- 12-битовый АЦП с пиковым детектором
- Триггерный тракт: суммирование 4-8 каналов, $(CR)-(RC)$, $\tau_{CR}=180$ нс





- Оцифровка с частотой 100 МГц
- АЦП 10 бит, цена деления $\approx 1\text{МэВ}/\text{канал}$
- Вычисление полного энергосодержания и передача данных о величине энергосодержания и позиционной информации энергосодержания в блок поиска кластеров
- Время пересечения порога и амплитуда сигнала передается в ССД
- Блок поиска кластеров принимает решение нейтрального триггера

cluster border



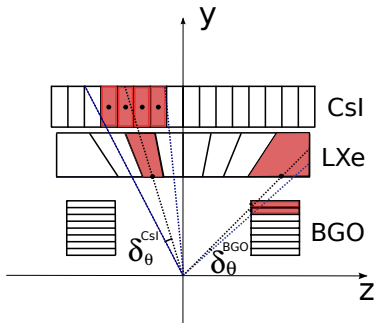
$2 \text{ MeV} < E < 5 \text{ MeV}$



$E > 5 \text{ MeV}$

Алгоритм

- Для элементов калориметра с $E > 5 \text{ МэВ}$, соседние элементы с $E > 2 \text{ МэВ}$ присоединяются к кластеру
- Элементы считаются соседними, если они имеют общие стороны



LXe-CsI connection

- Элементы CsI калориметра присоединяются к кластеру LXe если их центр лежит внутри телесного угла кластера
- $E = \sum_{i=1}^N E_i$

Задача калибровки

$$E_i = k_i(A_i - p_i)$$

k_i необходимо определить

Этапы энергетической калибровки

- Предварительная калибровка CsI калориметра с помощью космических частиц в специальных заходах без пучков
- Совместная калибровка LXe и CsI калориметров по энерговыделению космических частиц с помощью треков, реконструированных в LXe
- Точная калибровка каналов калориметра с помощью процесса e^+e^- рассеяния

V. E. Shebalin et al, JINST 9 C10013 (2014)

Предварительная калибровка CsI calorimetра

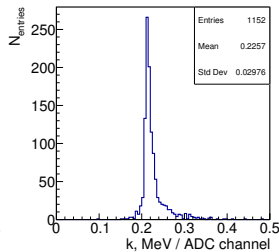
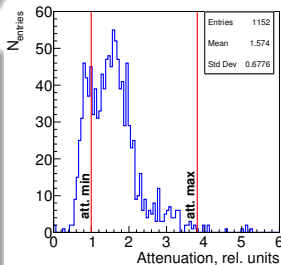
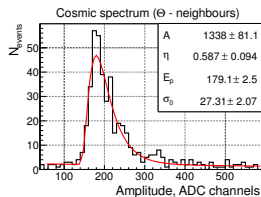
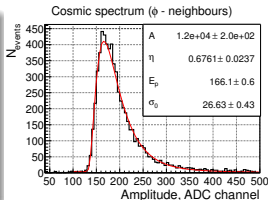
Моделирование космики

$$\frac{\partial N}{\partial p \partial \Omega} \propto \cos^k(\theta) \cdot \exp \left[-\frac{\ln^2(p/p_0)}{2\sigma^2} \right],$$

$$k = 2.26, \sigma = (2.86 - \cos(\theta))/1.54, \\ p_0 = 500 \text{ МэВ}/c$$

Калибровка

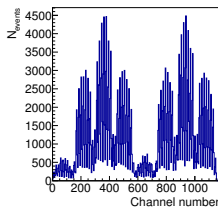
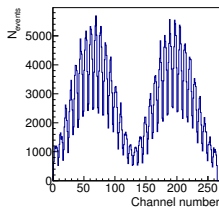
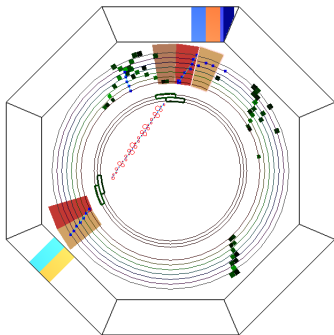
- Срабатывание ‘соседей’ по θ или по ϕ
- Спектры аппроксимируются логарифмическим Гауссом
- Определение коэффициентов аттенуации
- $k_i = E_{MC}/E_P$
- Калибровка в специальных заходах (~10 часов)



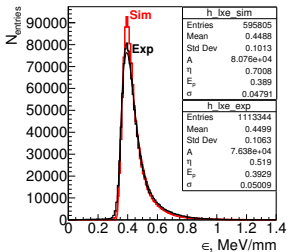
Отбор событий

- $N_{\text{trk_DC}} < 2$
 - $N_{\text{trk_LXE}} > 0$
 - $E_{\text{LXe}} < 200$ МэВ
 - $E_{\text{CsI}} < 300$ МэВ
-
- 3×3 элемента с центром в пересеченном треком элементе
 - Определяется длина трека (продолжения в CsI) L
 - $E_{\text{seed}} > 20$ МэВ
 - $E_{3 \times 3} - E_{\text{seed}} < 10$ МэВ

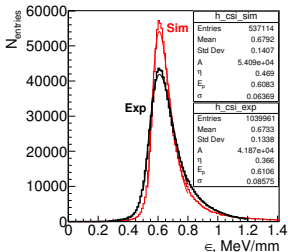
$$\epsilon = E_{3 \times 3} / L$$



Распределение ϵ в LXe



Распределение ϵ в CsI

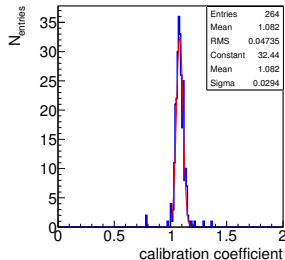


$$f(\epsilon) = A e^{-\frac{\ln^2(1-\eta(\epsilon-E_p)/\sigma)}{2\sigma_0}}$$

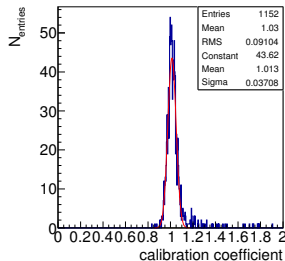
$$k_i = E_p^{MC} / E_p^{exp}$$

- Космика в экспериментальных заходах $\nu \approx 70$ Гц
- Около 2 недель для LXe
- Около месяца для CsI

Распределение k_i в LXe

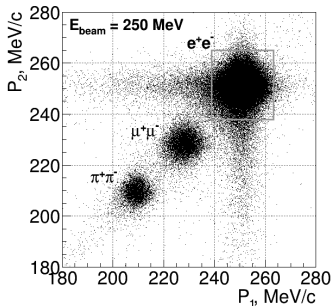
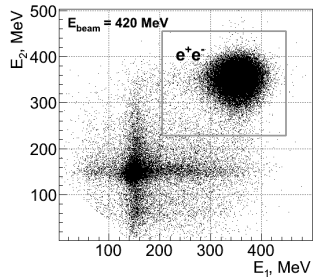
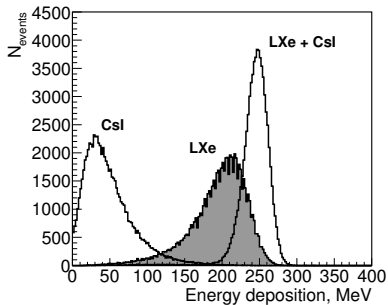


Распределение k_i в CsI



Критерии отбора

- 2 tracks in DC
- $|\theta_1 + \theta_2 - \pi| < 0.05$
- $|\phi_1 - \phi_2| < 0.05$
- $|p - E_{\text{beam}}| < 3 \cdot \sigma_p$
- $E_{\text{beam}}/2 < E_{1,2} < 1.05 \cdot E_{\text{beam}}$



LXe coefficients

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N \frac{(E_{\text{mc}}^j(\theta, \phi) - \sum E_i^n k_i - E_{\text{CS1}}^n)^2}{\sigma^2(\theta)}$$

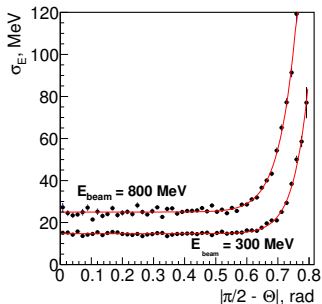
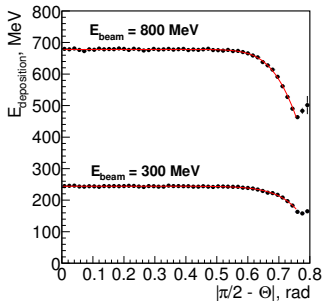
$$\chi^2 \rightarrow \min$$

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial k_i} = 0 \Rightarrow \sum_j k_j Q_{ij} = R_i,$$

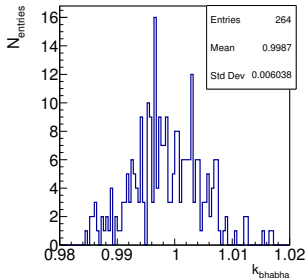
$$Q_{ij} = \sum_{n=1}^N \frac{E_i^n E_j^n}{\sigma^2}, R_i = \sum_{n=1}^N \frac{E_i^n E_{\text{mc}}^n}{\sigma^2}$$

$$k_i = \sum_j R_j (Q^{-1})_{ij}$$

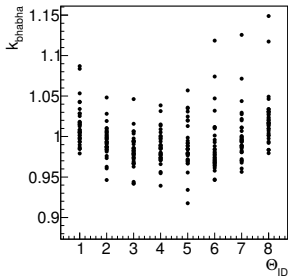
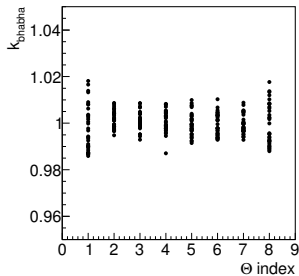
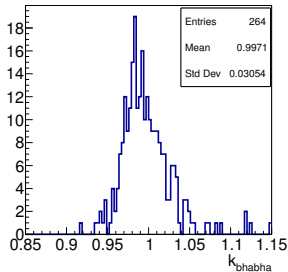
n - event number, i, j - LXe channel indexes



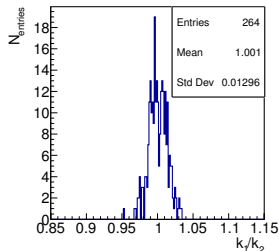
Моделирование



Эксперимент



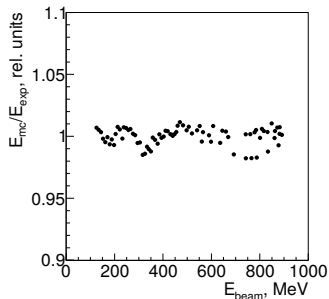
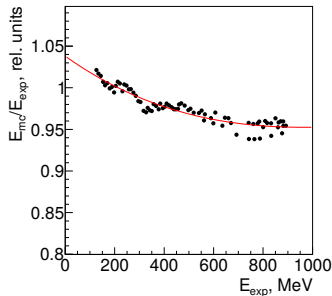
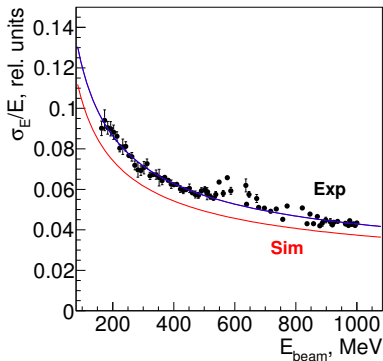
Отношение коэффициентов, полученных в двух различных точках по энергии



Была так же исследована применимость подхода к CsI. Систематический сдвиг коэффициентов в LXe и CsI. На доступной статистике точность хуже, чем в космической калибровке.

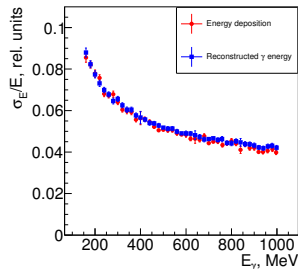
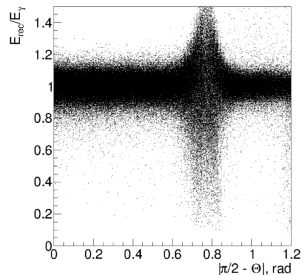
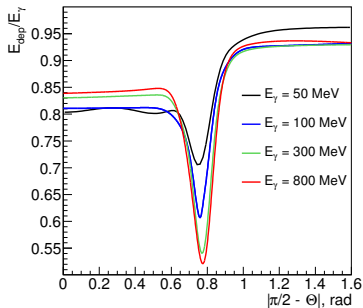
Экспериментальные поправки к энерговыведению

- Калибровка CsI по космике
- Отклик LXe в зависимости от времени выровнен по космике
- Калибровка LXe по Vhabha
- Экспериментальные поправки к энерговыведению



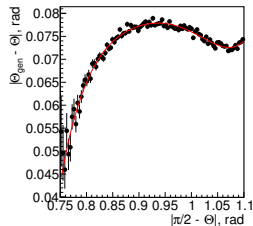
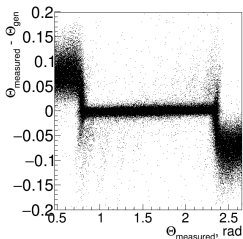
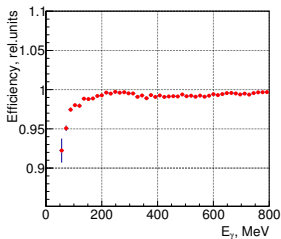
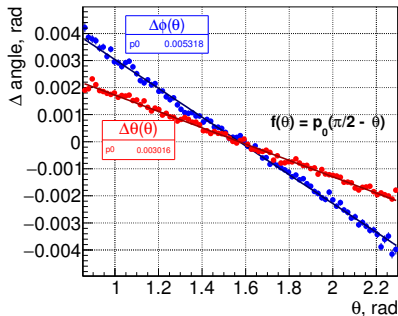
γ energy

- $\langle E_{\text{dep}} \rangle = f(E_\gamma, \theta, \phi)$
- $f(E_{\text{dep}}, \theta, \phi)$ из моделирования
- $E_\gamma = f^{-1}(E_{\text{dep}}, \theta, \phi)$ методом линейной интерполяции между табулированными значениями



γ angles

- В большинстве случаев точка конверсии фотонов определяется по полоскам LXe ($\approx 95\%$)
- Небольшое систематическое отклонение истинной координаты от измеренной, в зависимости от угла влета частицы определяется из моделирования
- Существенная сдвигка координат для фотонов, зарегистрированных в BGO калориметре



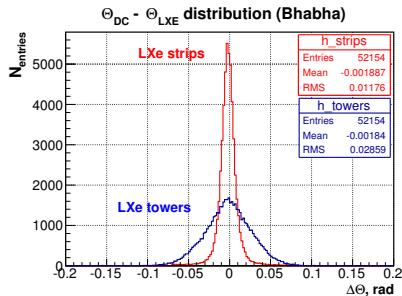
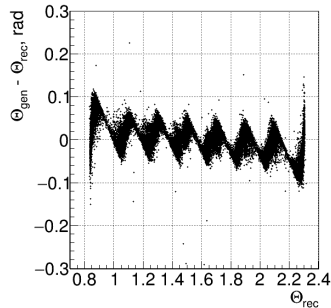
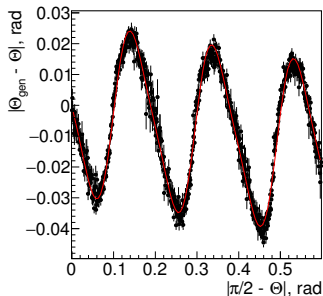
γ angles

- Если точка конверсии фотона не реконструирована по полоскам, координаты фотона измеряются как центр тяжести кластера:

$$x_i = \sum_{n=1}^N x_i^n E^n, \quad N - \text{количество каналов}$$

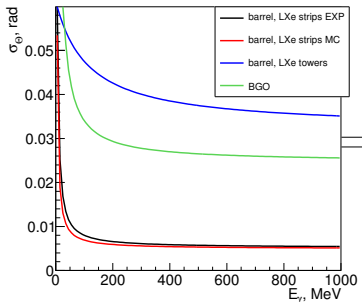
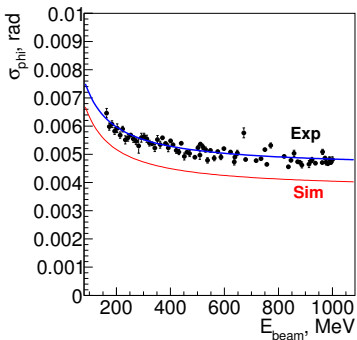
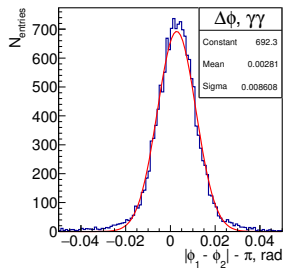
LXe и CsI в кластере

- Поправочная функция определяется из моделирования



Координатное разрешение LXe

- Экспериментальное разрешение измерено по процессу $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
- Распределение по углу раскоординатности



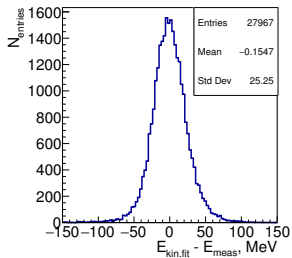
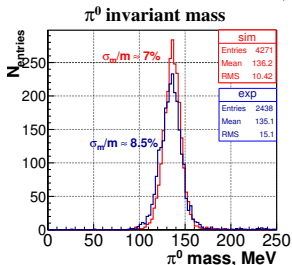
Координатное и энергетическое разрешения цилиндрического калориметра

	моделирование	эксперимент
σ_E/E	$\frac{0.036}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus 0.027$	$\frac{0.034}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus 0.020$
σ_ϕ , мрад	$3.2 + \frac{0.33}{0.025+E}$	$3.7 + \frac{0.33}{0.025+E}$
σ_ϕ , мрад башни	$32 + \frac{3.3}{0.1+E}$	$35 + \frac{3.4}{0.1+E}$

Экспериментальные разрешения и разрешения в моделировании внесены в систему обработки данных

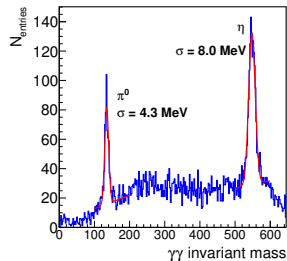
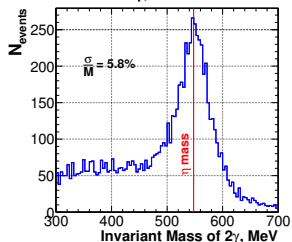
π^0 and η mass resolution

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0, \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$



$$e^+e^- \rightarrow \eta\gamma, \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

$e^+e^- \rightarrow 3\gamma, \sqrt{s} = 1019 \text{ MeV}$

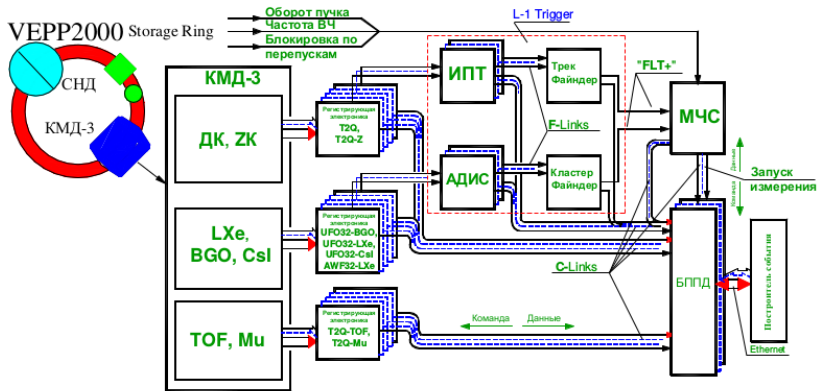


- 1 За три года набора экспериментальных данных с детектором КМД-3 с 2010 по 2013 год калориметр на основе кристаллов CsI продемонстрировал хорошие параметры. Были разработаны процедуры мониторинга работоспособности и стабильности каналов калориметра. Стабильность отклика электроники калориметра составила не хуже 1%.
- 2 Разработана процедура независимой от других подсистем детектора энергетической калибровки CsI калориметра с помощью космических частиц в специальных космических заходах, обеспечивающая точность определения калибровочных коэффициентов на уровне 3-5%.
- 3 Разработана процедура совместной калибровки жидкоксеронового и CsI калориметров с помощью космических частиц по данным, записанным в экспериментальных заходах, с использованием треков частиц, восстановленным в жидкоксероновом калориметре. Погрешность определения калибровочных коэффициентов составила не хуже 2% для жидкоксеронового калориметра и не хуже 3% для CsI калориметра.
- 4 Разработана процедура калибровки каналов цилиндрического калориметра по событиям упругого e^+e^- -рассеяния. Погрешность определения калибровочных коэффициентов составила около 1.5%.
- 5 Разработаны процедуры реконструкции фотонов и восстановления их кинематических параметров. Энергетическое разрешение для фотонов в эксперименте составило $\sigma_E/E = \frac{0.036}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus 0.027$, что близко к разрешению в моделировании, которое составило $\sigma_E/E = \frac{0.034}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus 0.020$.
- 6 Разрешение цилиндрического калориметра по инвариантной массе π^0 -мезона составило 9.5 МэВ в моделировании и 11.5 МэВ в эксперименте

Backup

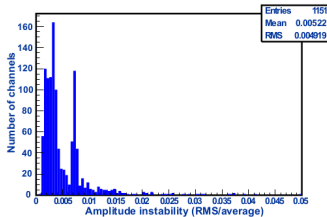
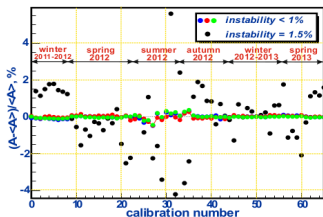
- 1 V.E. Shebalin et al., Combined Liquid Xenon and crystal CsI calorimeter of the CMD-3 detector, 2014 JINST 9 C10013 (труды конференции INSTR2014)
- 2 В.Е. Шебалин и др., Цилиндрический калориметр детектора КМД-3, Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, N 9-10 с. 839-846 (МСК СЯФ 2014)
- 3 V.E. Shebalin et al., CsI calorimeter of the CMD-3 detector, 2015 JINST 10 P10006
- 4 V.E. Shebalin et al., Calorimetry of the CMD-3 detector, доступна онлайн doi:10.1016/j.nima.2015.11.128 (PisaMeeting 2015)

Система сбора данных



Мониторирование CsI калориметра

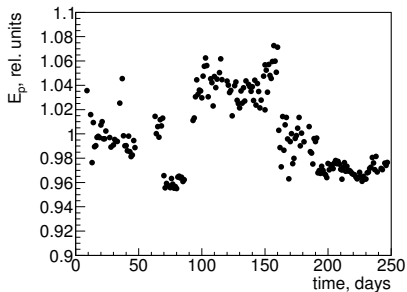
- Измерение температуры и влажности: 4 датчика температуры и 1 датчик влажности установлены на каждом октанте
- Калибровка с генератором импульсов: контроль работоспособности и стабильности электроники, измерение нелинейности и пьедесталлов АЦП
- Нестабильность электроники для большинства каналов менее 1%
- Четыре 10-канальных генератора импульсов переменной амплитуды
- К концу заходов 2010-2013 гг. 10 неисправных каналов.
- Во время остановки экспериментов была произведена разборка калориметра с заменой неисправных и шумящих предусилителей



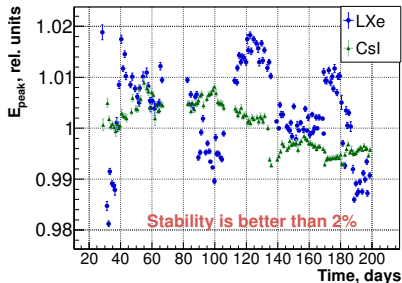
Стабильность отклика calorimetра по космике

- Была обнаружена существенная нестабильность отклика каналов LXe calorimetра
- Статистика в отдельных каналах LXe, набранная в течение дня, недостаточна для калибровки
- Была проведена ежедневная калибровка групп из 8 башен с одинаковым индексом по ϕ

группа из 8 башен

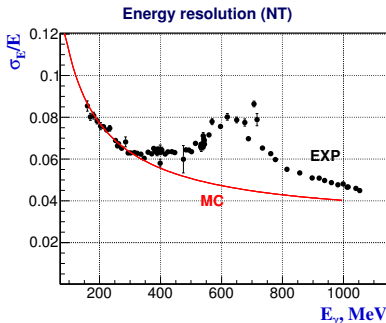
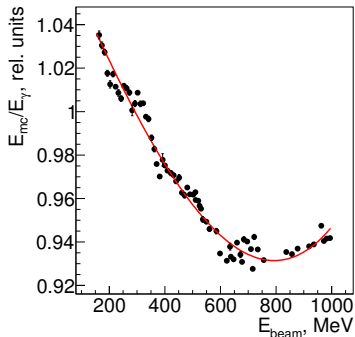
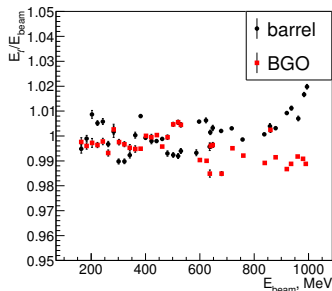


все каналы



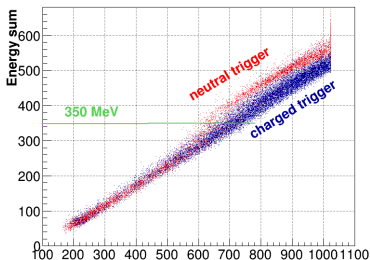
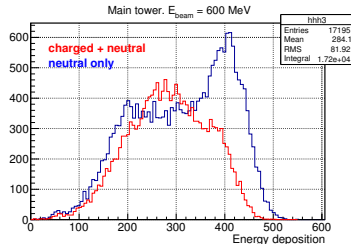
Экспериментальные поправки к энергии

- Процесс $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ (НТ)
- Отсутствуют треки в ДК
- 2 коллинейрных кластера
- $|\theta_1 + \theta_2 - \pi| < 0.1$
- $|\phi_1 - \phi_2| < 0.1$
- $E_{\text{beam}}/2 < E_{1,2} < 1.05 \cdot E_{\text{beam}}$



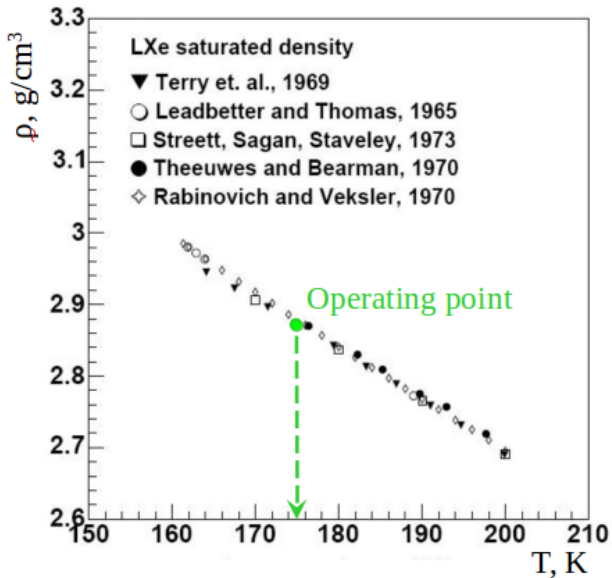
Проблемы разрешения при нейтральном триггере

- В экспериментах 2010-2013 гг.
- Особенность работы плат УФО-32(LXe) при нейтральном триггере
- Изучено влияние типа триггера на величину сигнала
- Дополнительная задержка открытия ворот пикового детектора

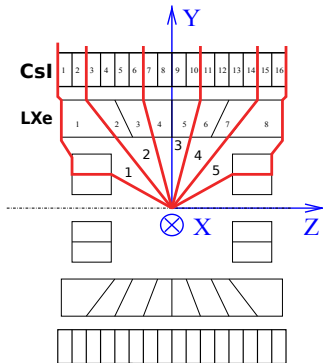
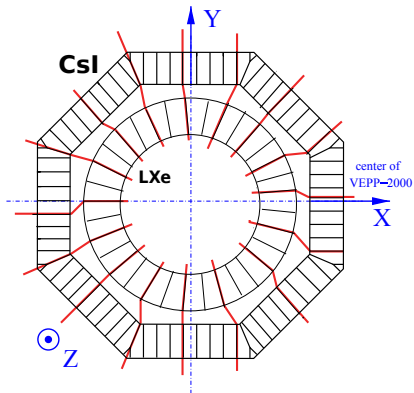


Во время остановки экспериментов 2013 г. была проведена модернизация плат УФО-32 (LXe) для устранения данного эффекта

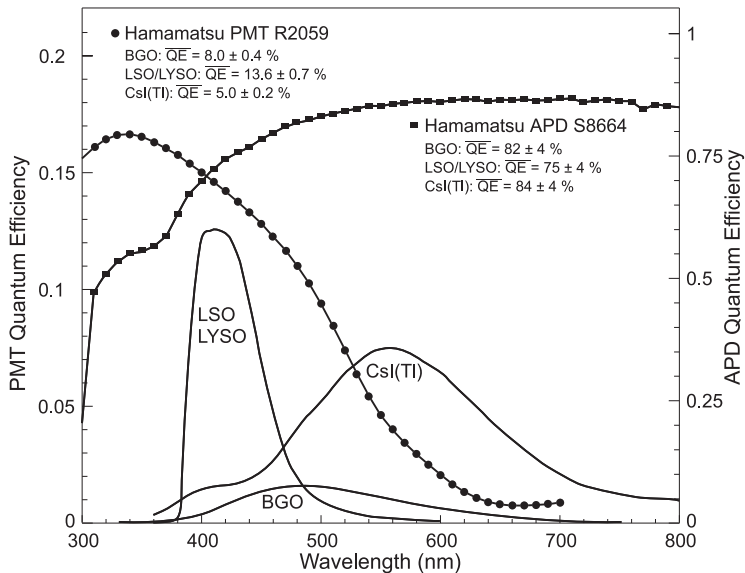
Зависимость плотности LXe от температуры

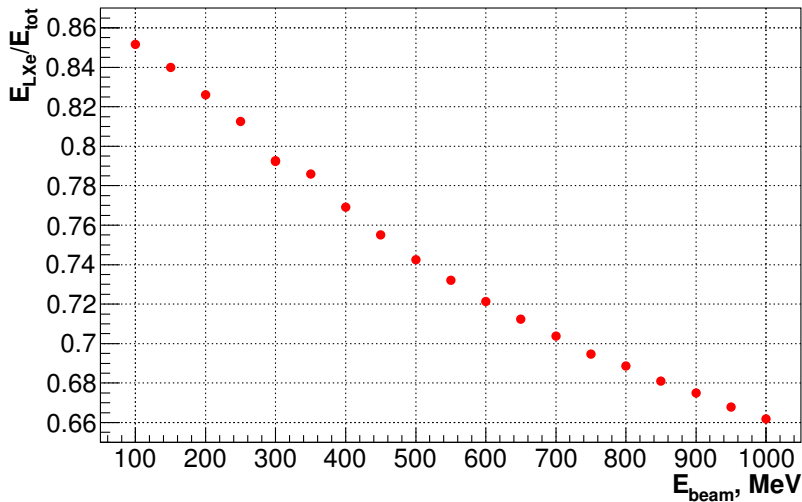


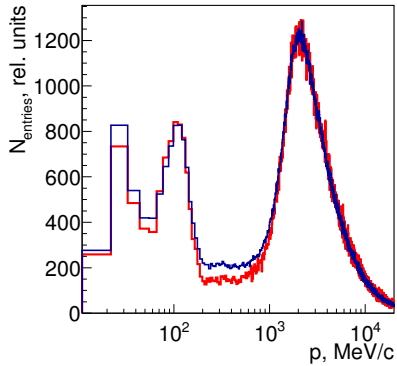
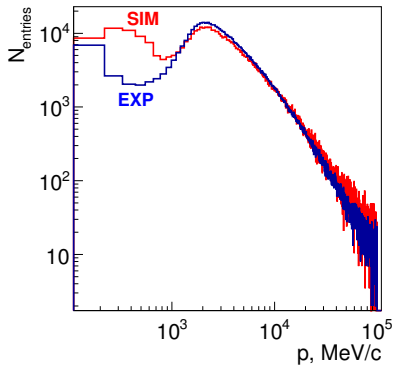
Триггерные супербашни

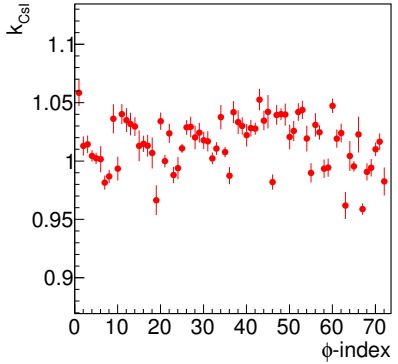
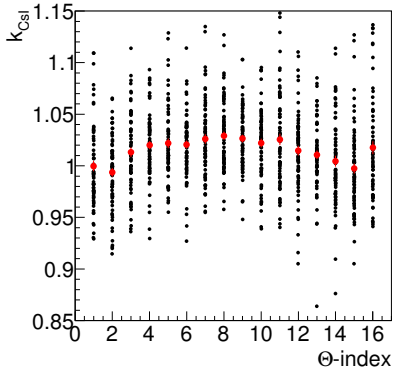


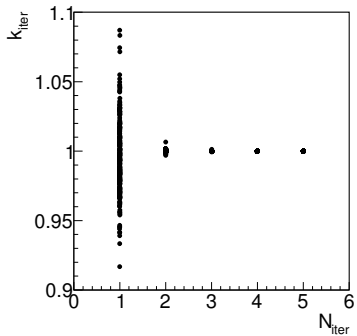
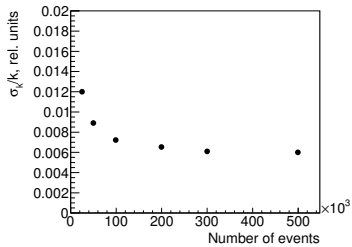
Квантовая эффективность PMT и PIN PD



E_{LXe}/E_{tot} vs E_{beam} (simulation)

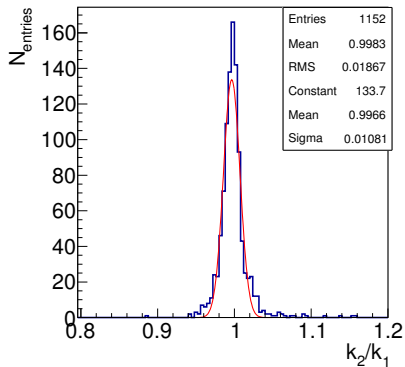






$k_{\text{mean}}^{\text{CsI}}$	1.0	0.95	0.9
$k_{\text{mean}}^{\text{LXe}}$	0.998	1.007	1.016

σ_k^{CsI}	0	0.05	0.1
σ_k^{LXe}	0.006	0.008	0.01



Сравнение калибровочных коэффициентов CsI, полученных с интервалом полгода