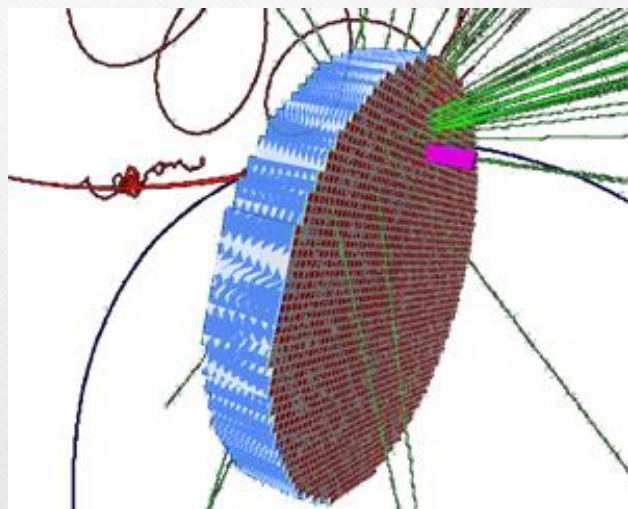


# Изучение оптических свойств кристаллов LYSO в рамках программы RND калориметра эксперимента COMET



Елена Величева

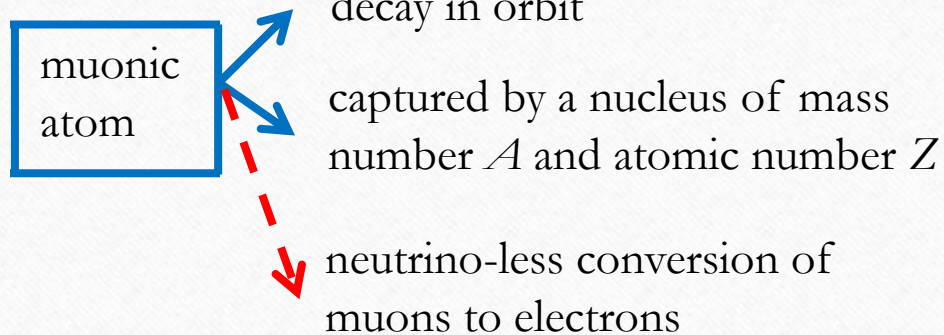
1

Сектор редких процессов

В связи с перевыборами на должность старшего научного сотрудника

# Эксперимент COMET

**COMET** (COherent Muon to Electron Transition) is new experiment to search for coherent neutrino-less conversion of muons to electrons



$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$$

$$\mu^- + N(A, Z) \rightarrow \nu_\mu + N(A, Z-1)$$

$$\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$$

$SM \sim 10^{-54}$

The SINDRUM-II collaboration sets the current upper limit on

$$B(\mu^- + Au \rightarrow e^- + Au) < 7 \times 10^{-13}$$

## Single event sensitivity

$$R_{\mu e} = \frac{\Gamma(\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z))}{\Gamma(\mu^- + N(A, Z) \rightarrow \nu_\mu + N(A, Z-1))}$$

## Goal of the COMET experiment

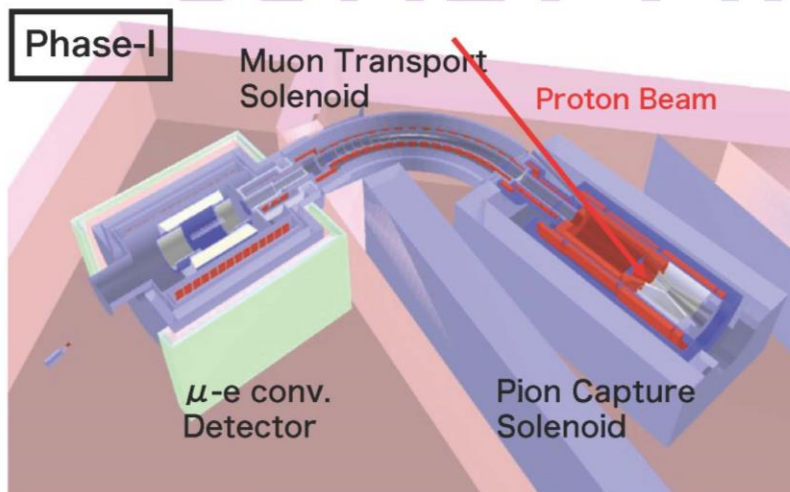
### COMET at J-PARC

- Search for the  $\mu$ -e conversion in muonic aluminium
- Proton beam at 8 GeV
- Extremely purely pulsed beam ( $R_{\text{ext}} < O(10^{-11})$ )
- Two-staged approach
- $< 10^{-14}$  in Phase I, 3.2 kW beam
- $< 10^{-16}$  in Phase II, 56 kW beam



# Программа Phase-I и Phase-II эксперимента COMET

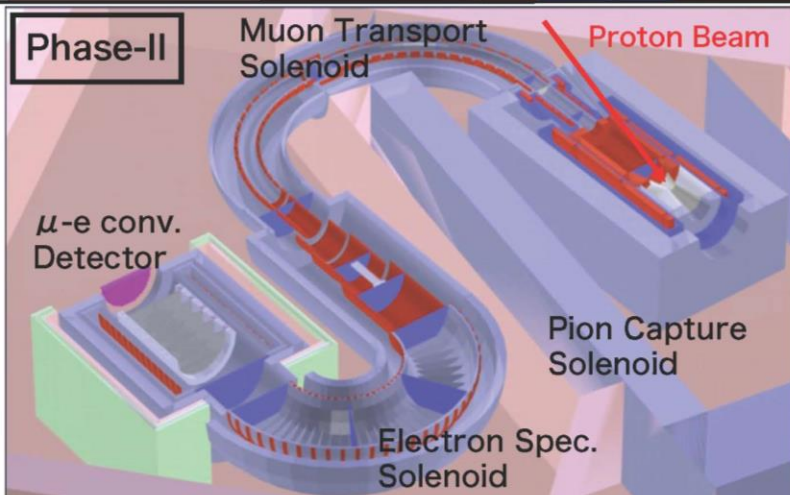
## COMET Phase I & II



Target Sensitivity  $<10^{-14}$  with 3.2kW beam

- **Proton beam line** construction in progress to be completed in **FY2021**
- **Graphite** as a pion production target
- Pion Capture Solenoid construction is in the 2<sup>nd</sup> year of multi-year construction contract (FY2020-2022)
- Physics Detector
  - CDC and trigger hodoscope in a solenoid
  - Muon stopping target (Al) at the center of the solenoid

Beam engineering run in FY2022 and physics in FY2023.



Target Sensitivity  $<10^{-16}$  with 56 kW beam

- **Extension of muon transport solenoid to cope with higher proton beam power**
  - More efficient beam background suppression
  - Much less pion contamination in longer transport
- **Tungsten alloy** as a pion production target
- **Electron spectrometer solenoid** to suppress the detector counting rate
- Physics detector
  - Straw-tube tracker and LYSO calorimeter
  - Muon stopping target (Al + others) in a gradient magnetic field for the purpose of signal electron collection with a magnetic mirroring

# Требования к калориметру

## Comet ECAL

1. The energy measured  $105 \pm 0.5$  MeV
2. The energy resolution  $\leq 5\%$
3. Spatial resolution 1 cm
4. Total rate 9670 kHz

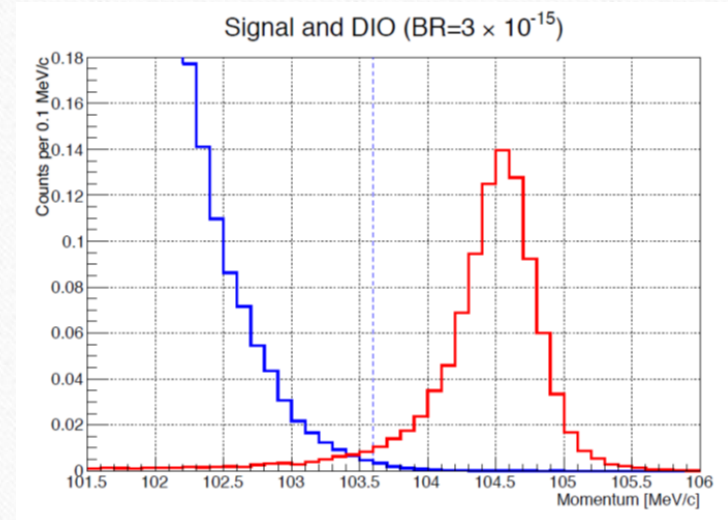
**LYSO: Ce** 20 x 20 x 120 mm<sup>3</sup>

Light Output = 32000 photon/MeV,

Energy resolution  $\sim 7 - 9\%$ ,

Decay time  $\sim 41$  ns, Density = 7.1 g/cm<sup>3</sup>,

$X_{0-LYSO} = 1.14$  cm;  $R_{M-LYSO} = 2.03$  cm



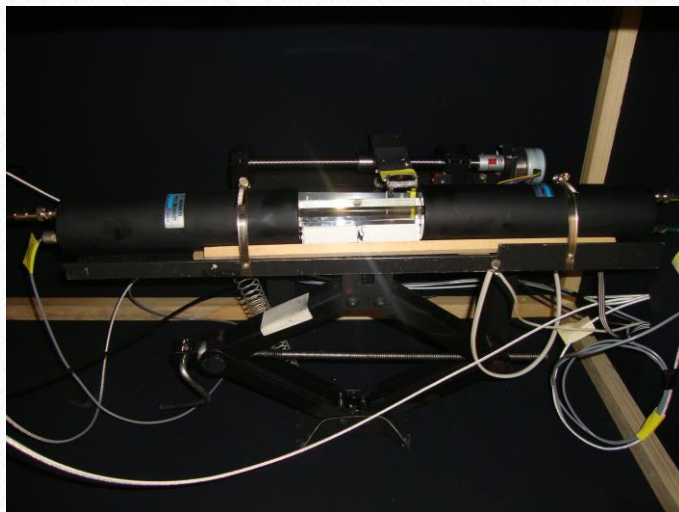
Моделирование распределения импульса электрона (красный) и импульса распада на орбите (синий) В соответствии с уровнем чувствительности  $10^{-15}$  в эксперименте COMET Phase-I. Вертикальный масштаб нормирован так, что интеграл сигнала равен одному событию

# Задачи, выполненные в рамках работы в эксперименте COMET

1. Исследование влияния разброса световыхода кристаллов на параметры калориметра.
2. Исследование влияния неоднородности световыхода по длине на оптические свойства кристаллов.
3. Улучшение равномерности светосбора за счет применения оптимальных светоотражающих материалов.
4. Измерение оптических параметров прототипа электромагнитного калориметра на кристаллах LYSO с помощью космических мюонов для ненулевого угла падения частиц.

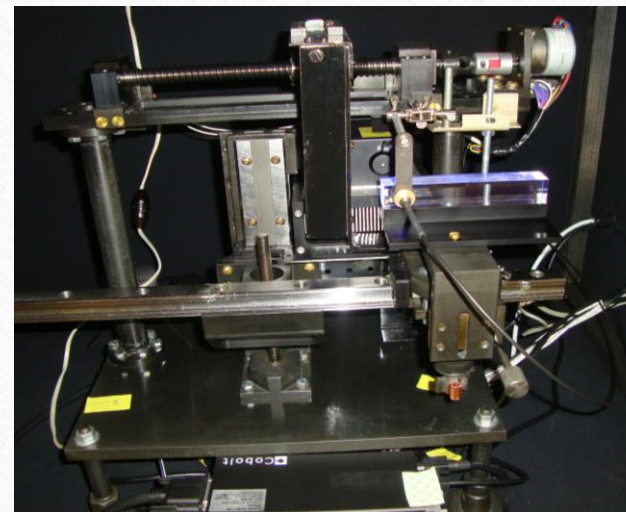


## Измерения методом гамма спектроскопии



- 1) быстродействующий ФЭУ НАМАМАТСУ Н1949-50 с делителем Н1949-50;
- 2) прецизионная механическая система перемещения источника излучения с точностью до 1 мкм на основе прецизионного шагового двигателя;
- 3) 5-ти гигагерцовый 32-х канальный диджитайзера VME VX1742;
- 4) триггерная система отбора, выполненная на модулях NIM;
- 5) калиброванные источники радиоактивного излучения  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$
- 6) коллиматор толщиной 4 мм и диаметром отверстия  $\varnothing = 0.5$  мм

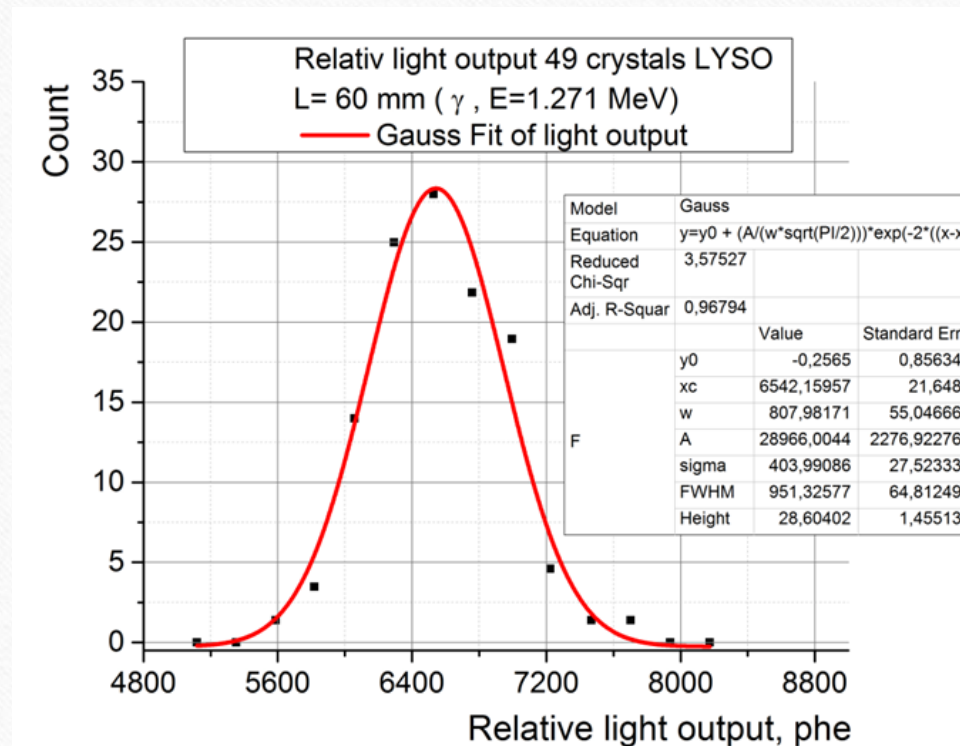
## Измерения методом оптической спектроскопии



- 1) прецизионная механической системы перемещения УФ-источника по длине кристалла,
- 2) спектрометр S100-2048H (Solar, Белоруссия), с детектором S11639 (Hamamatsu, Япония), имеющим оптическую решетку 1200 штрихов/мм и точностью измерения длины волны  $\pm 0,3$  нм ;
- 3) одночастотный непрерывный лазер с диодной накачкой (05-01, Cobolt, Швеция) и длиной волны 355 нм, долговременная стабильность (8 ч,  $\pm 3^\circ\text{C}$ )  $< 2\%$ , сверхмалый шум (шум в диапазоне от 20 Гц до 20 МГц (среднеквадратичное значение)  $< 0,2\%$ ) и диаметр пучка на апертуре  $700 \pm 50$  мкм;
- 4) конденсор PS-2 (Solar) для оптимального сбора сцинтилляционных фотонов с кристалла и передачи их по оптическому кабелю на спектрометр

# Результаты и обсуждения

# Влияние разброса световых выхода кристаллов на энергетическое разрешение калориметра





# Влияние разброса световыхода кристаллов на энергетическое разрешение калориметра

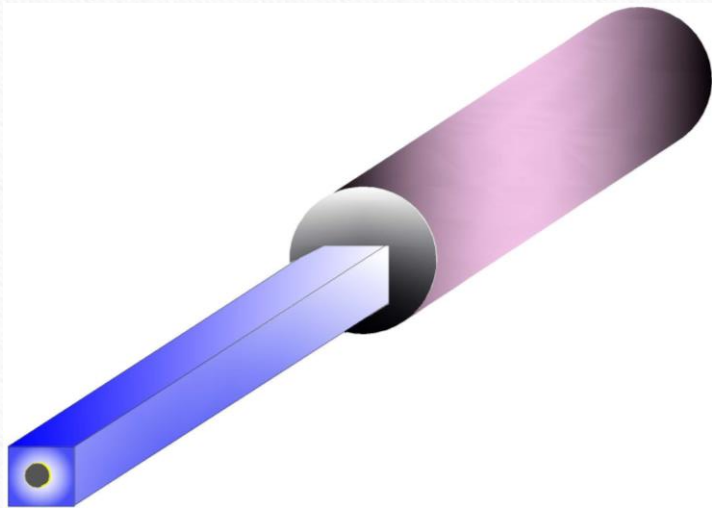
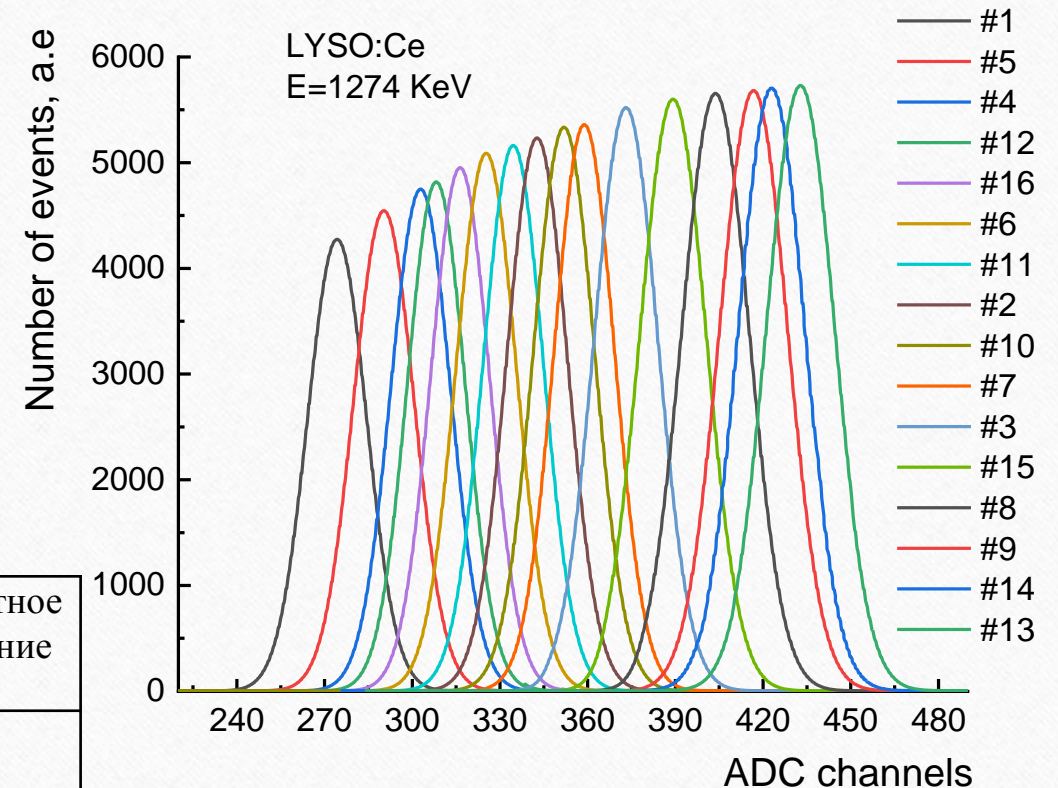
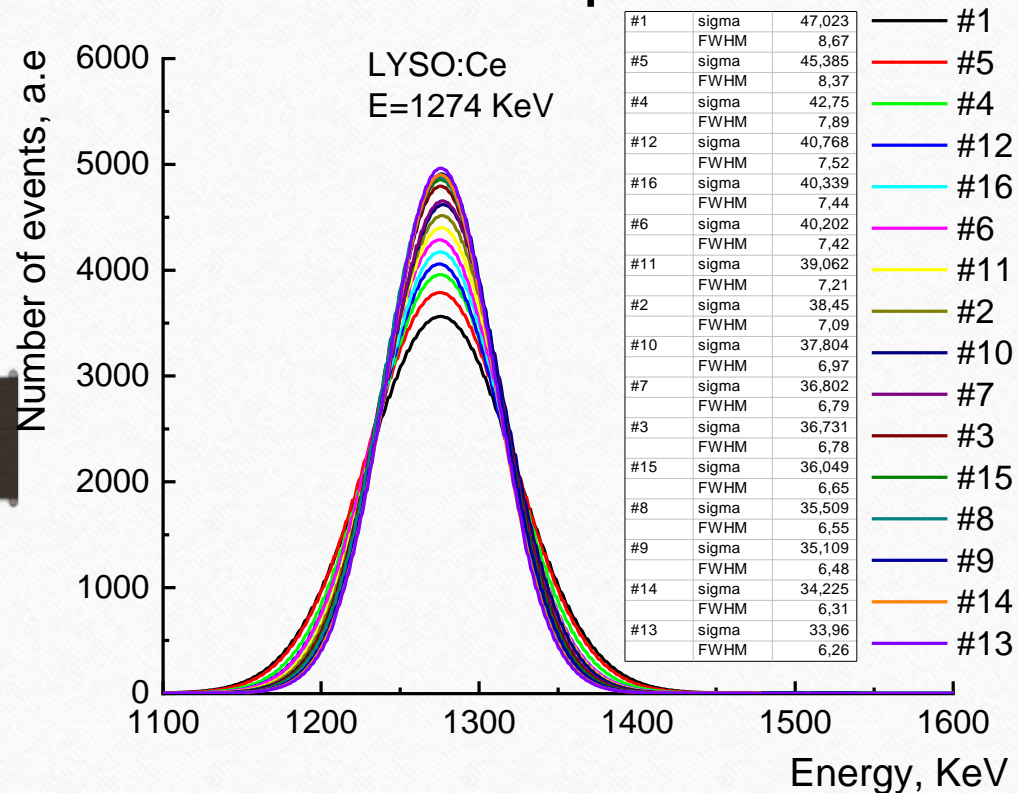


Схема измерений

	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Положение пика энергетического спектра в каналах ADC	274	433	353	48



# Влияние разброса световых кристаллов на энергетическое разрешение калориметра



Матрица 4 × 4 кристаллов LYSO:Ce:

274.3	290.3	302.9	308.2
316.4	432.8	325.3	334.5
342.7	351.9	358.8	373.1
389.1	403.7	416.8	422.9

По измерениям

Координаты центра	
X_g	6.7 mm
Y_g	39.6 mm

Моделирование G4

М. F. O. Yahya and F. Kocak,  
Advances in High Energy Physics  
V. 2021, Article ID 9931708, 5 p.

$$x_{gravity} = \frac{\sum_i E_i x_i}{\sum_i E_i}, y_{gravity} = \frac{\sum_i E_i y_i}{\sum_i E_i}$$

	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Разрешение, %	6.26	8.67	7.15	0.7

Координаты центра	
Y_g	7.81 mm
X_g	7.86 mm

# Исследование влияния неоднородности коэффициентов усиления фотодетектора на энергетическое разрешение кристалла

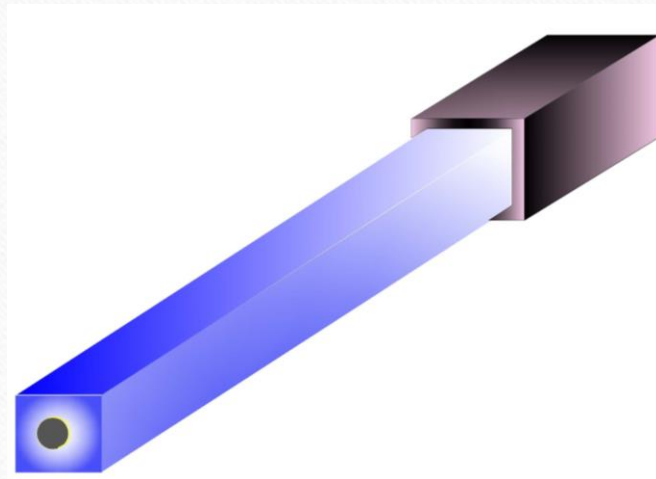
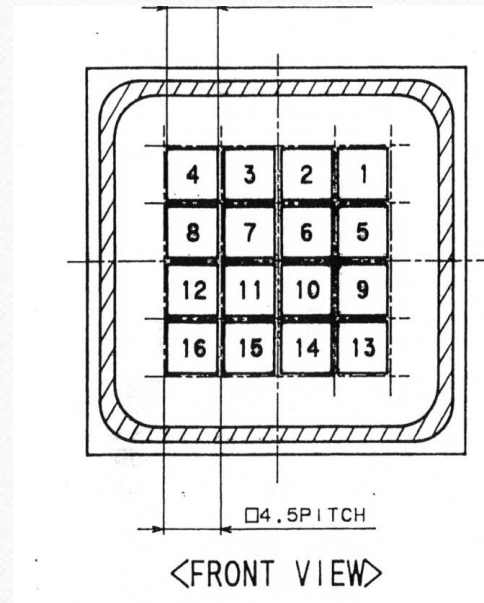


Схема измерений

Multianode photomultiplier tube assembly  
(16-ти канальный)



H6568 Anode Uniformity

Light Source : W-LAMP+5-58(400nm)

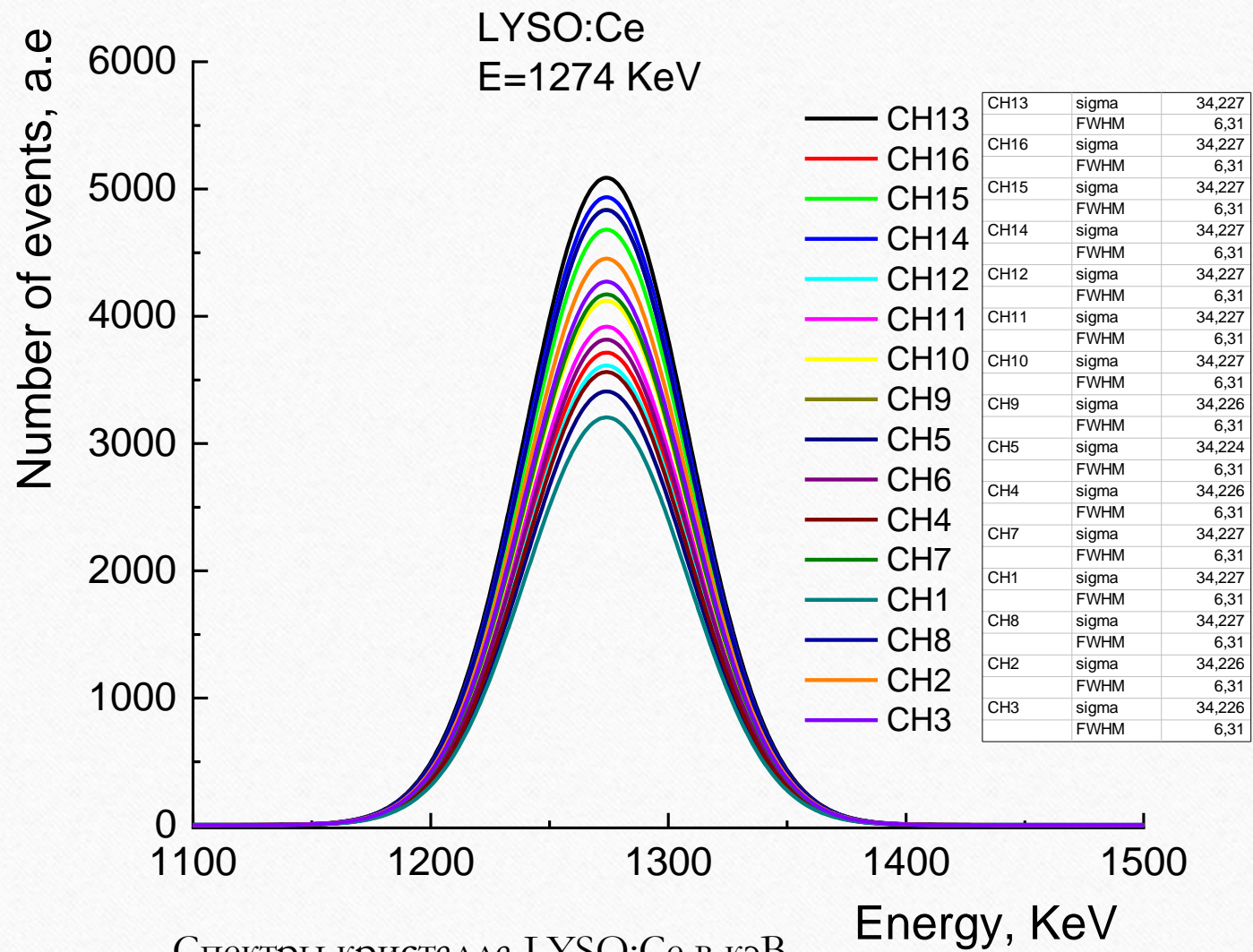
Bleeder Ratio : 1:1:1...1:1:1

Ebb : 800(V)

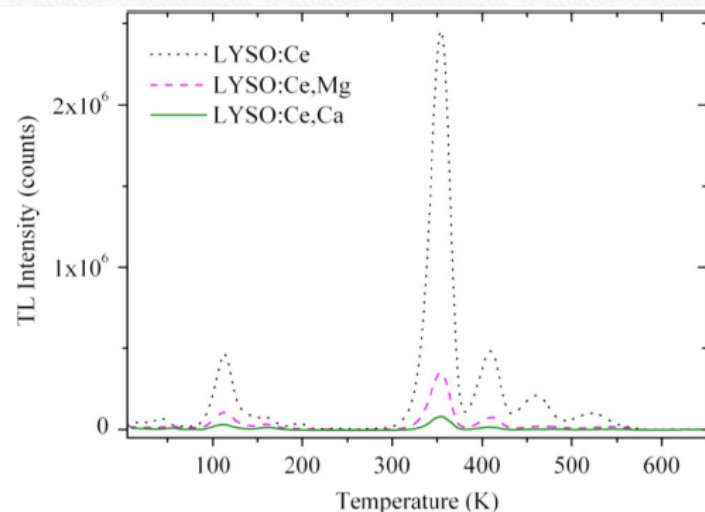
Serial No. : 6L21C7

77	81	85	91
62	65	70	81
63	66	71	82
72	84	93	100





# Влияние неоднородности распределения световыхода по длине на оптические свойства кристаллов: LYSO:Ce и LYSO:Ce,Ca



BLAHUTA ETAL.: EVIDENCE AND CONSEQUENCES OF  
CEIN LYSO:CE,Ca AND LYSO:CE,Mg SINGLE CRYSTALS

Кристаллы	Энергетическое разрешение, %		Разброс световыхода, %	Среднее значение неоднородности отклика сцинтилляторов, %
	511 КэВ	1274 КэВ		
LYSO:Ce	9	8,5	17	4,6
LYSO:Ce,Ca	6,4	6	10	1,1

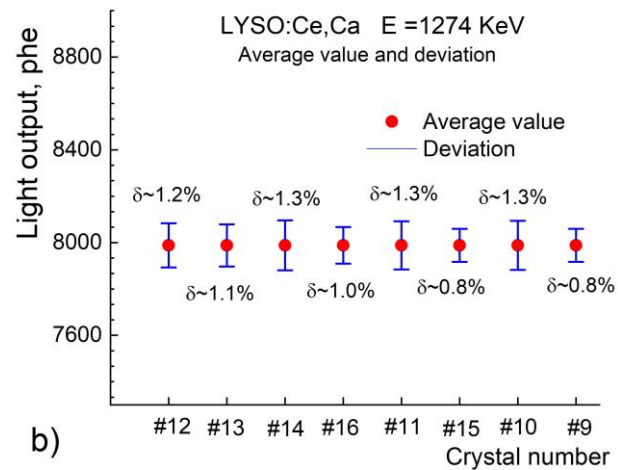
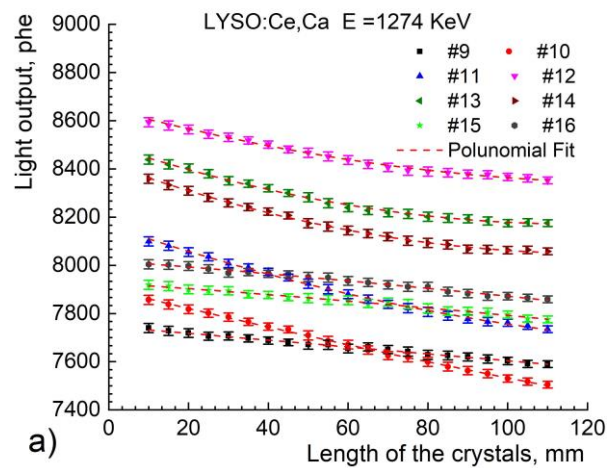
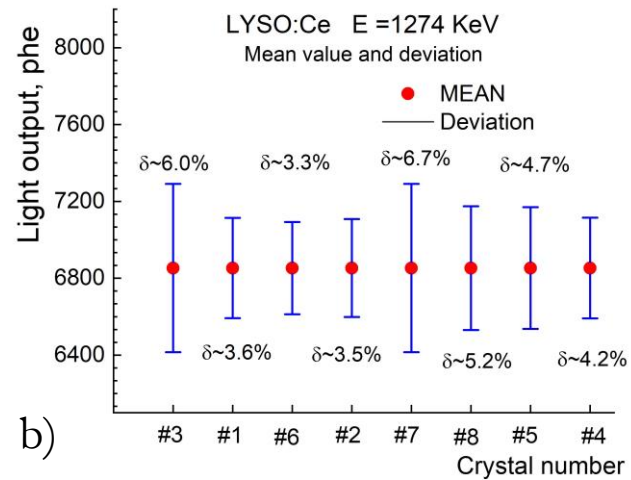
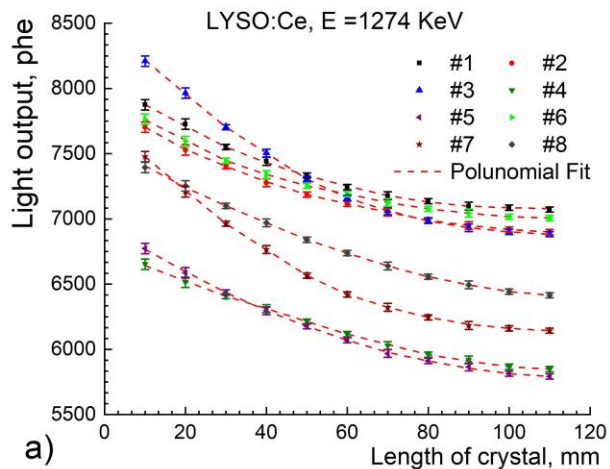


Схема измерений:

Источник излучения  $^{22}\text{Na}$  в коллиматоре устанавливался на расстоянии 12 мм над поверхностью кристалла.

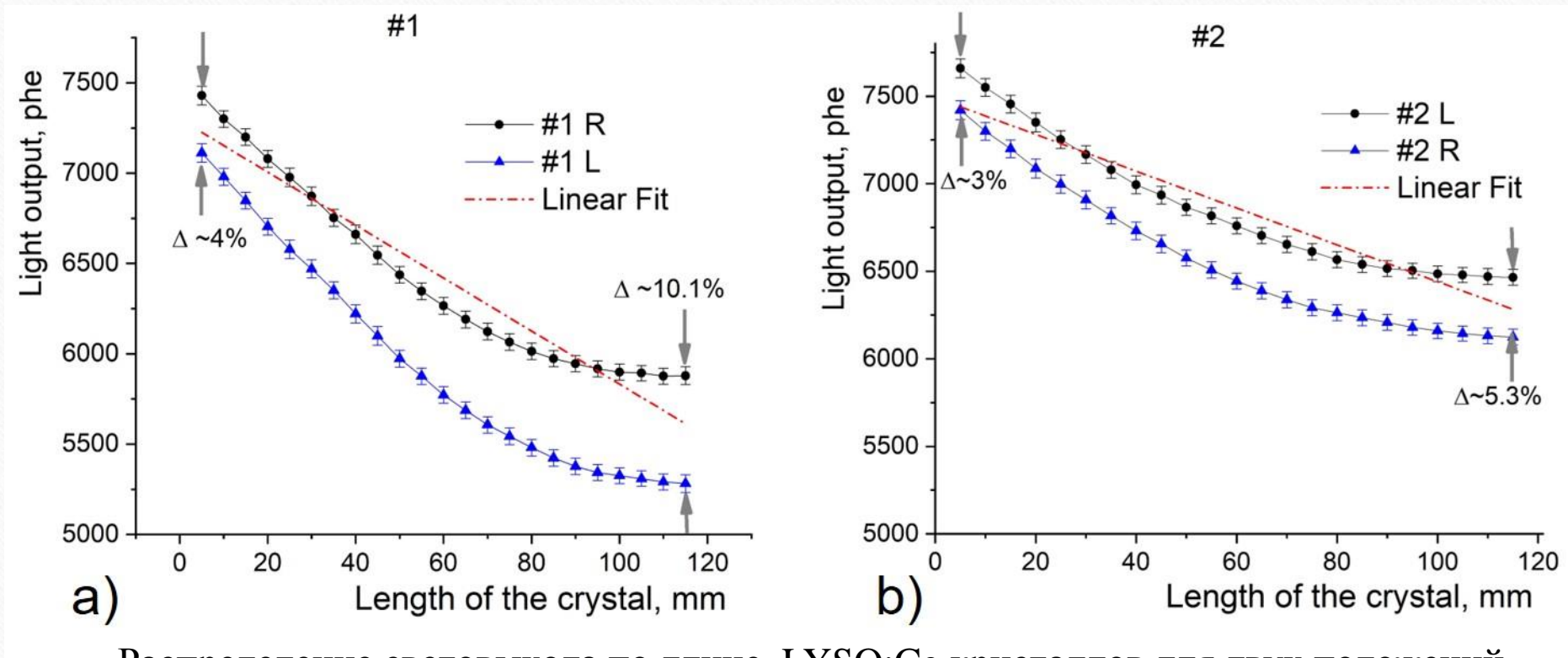
Измерения по длине кристалла проводились с шагом 5 мм

- а) Неоднородность световыхода по длине LYSO:Ce кристаллов (отклики сцинтилляторов);
- б) неоднородности откликов сцинтилляторов

- а) Неоднородность световыхода по длине LYSO:Ce,Ca кристаллов (отклики сцинтилляторов); б) неоднородности откликов сцинтилляторов



# Изучение оптических параметров кристалла LYSO:Ce фирмы JT Crystal Technology Co., Ltd



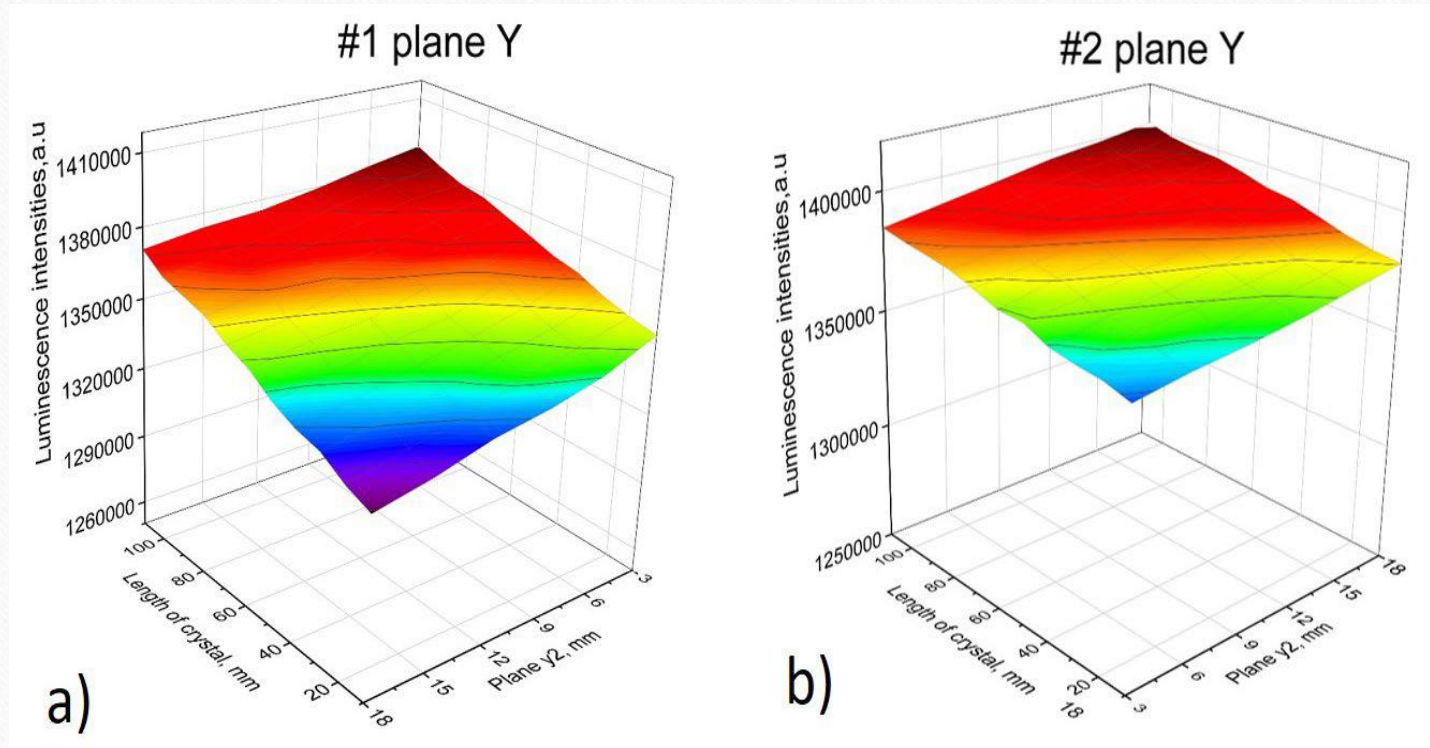
Распределение световыхода по длине LYSO:Ce кристаллов для двух положений фотодетектора (слева и справа) относительно длины кристалла:

a) кристалл фирмы JT Technology; b) Saint-Gobain

# Сравнение оптических параметров кристаллов LYSO:Ce фирмы JT Technology и Saint-Gobain

Кристалл			Разница световыхода, на расстоянии 10 мм от PMT, %	Световыход	Наклон линейного фита распределения световыхода
фирма	образец				
JT Technology	#1	#1R	4		15,7
		#1L			13,0
Saint-Gobain	#2	#2R	3	Больше на 9,7%	9,2
		#2L			10,1

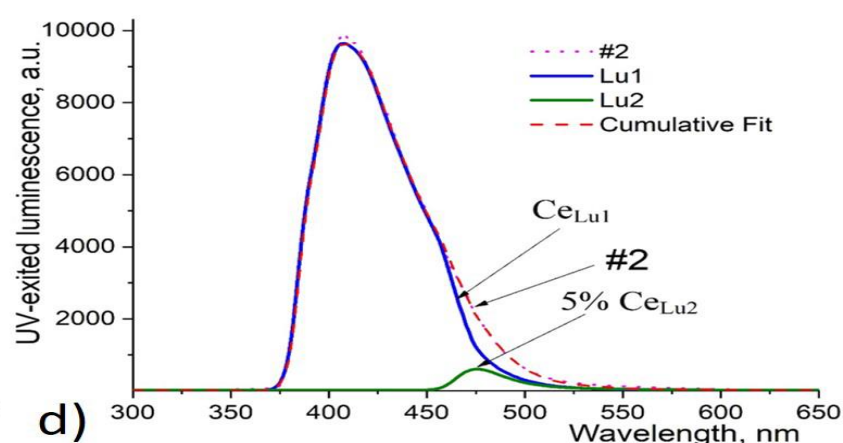
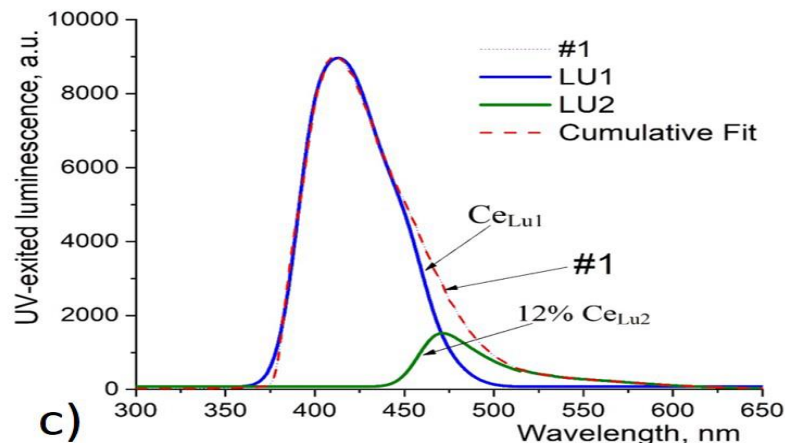
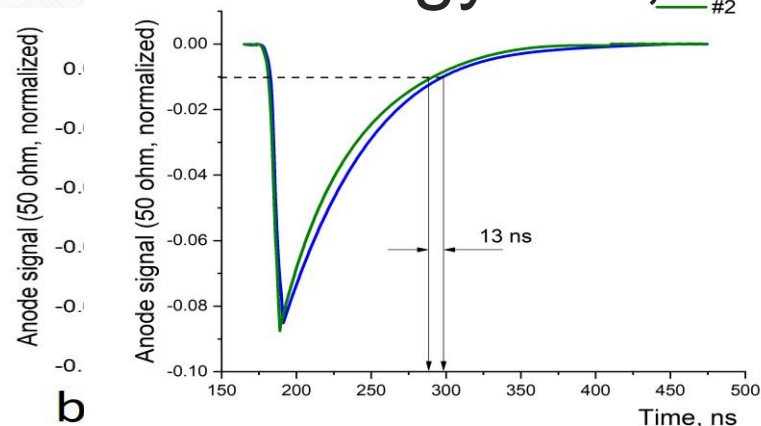
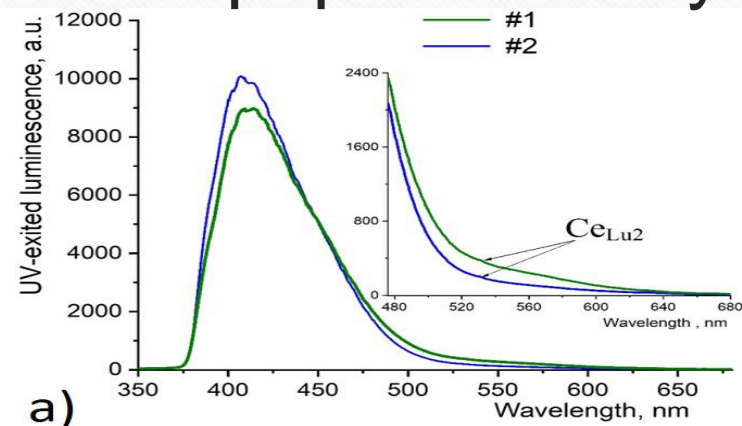
# Изучение оптических параметров LYSO:Ce кристалла фирмы JT Crystal Technology Co., Ltd



3D-распределения интенсивности люминесценции: а) #1 (JT Technology) и б) #2 (Saint-Gobain)

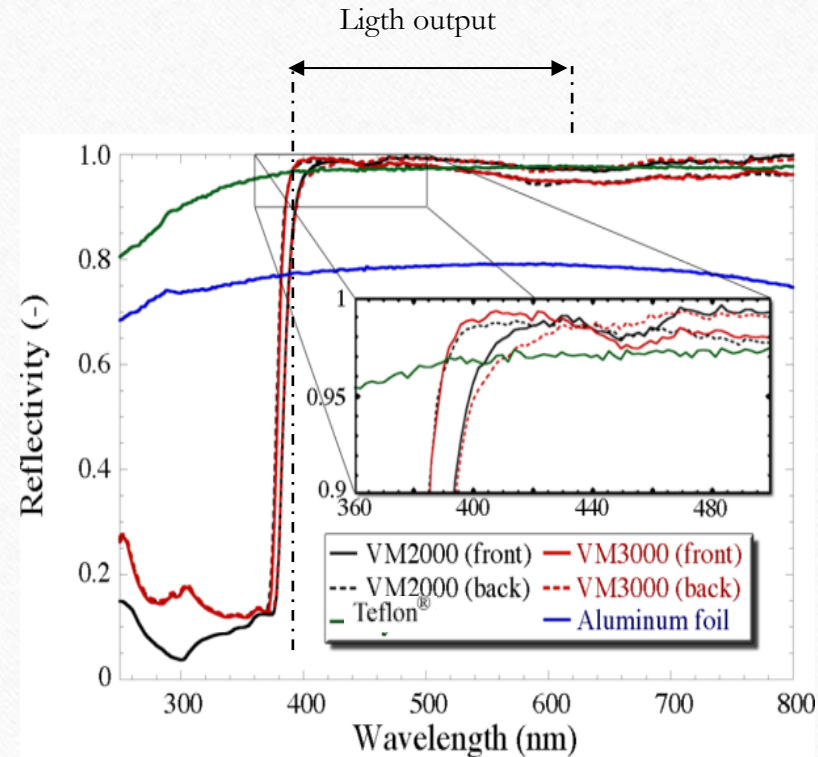
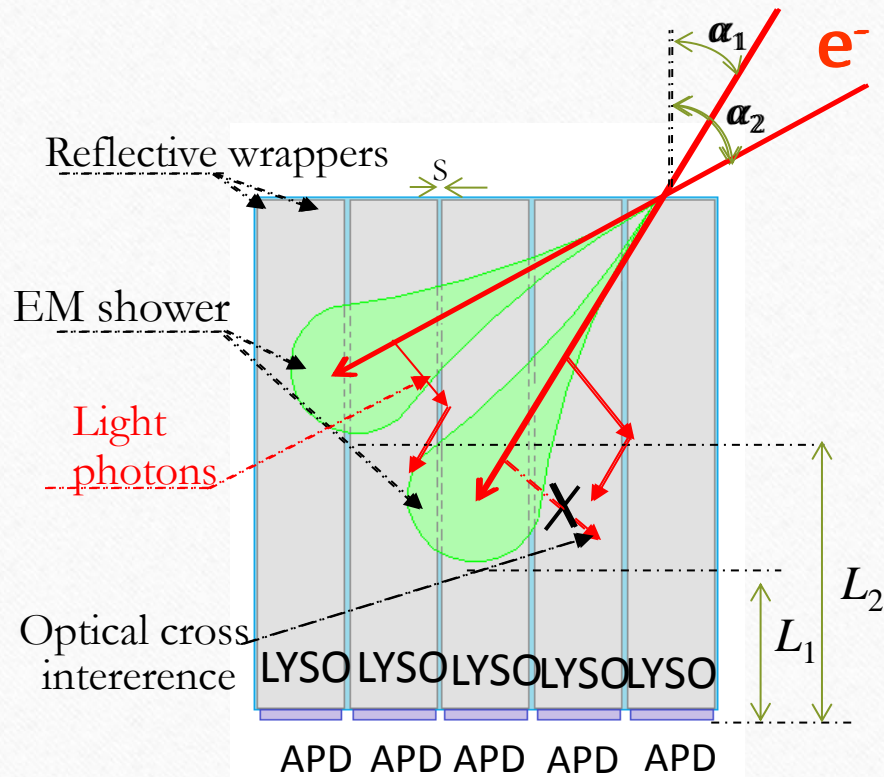


# Изучение оптических параметров LYSO:Ce кристалла фирмы JT Crystal Technology Co., Ltd



(a) UV-excited luminescence spectra of samples #1 and #2. (b) Time spectra of samples #1 and #2  
(c) and (d) Decomposition of the UV-excited luminescence spectra for (c) sample #1 and (d) sample #2

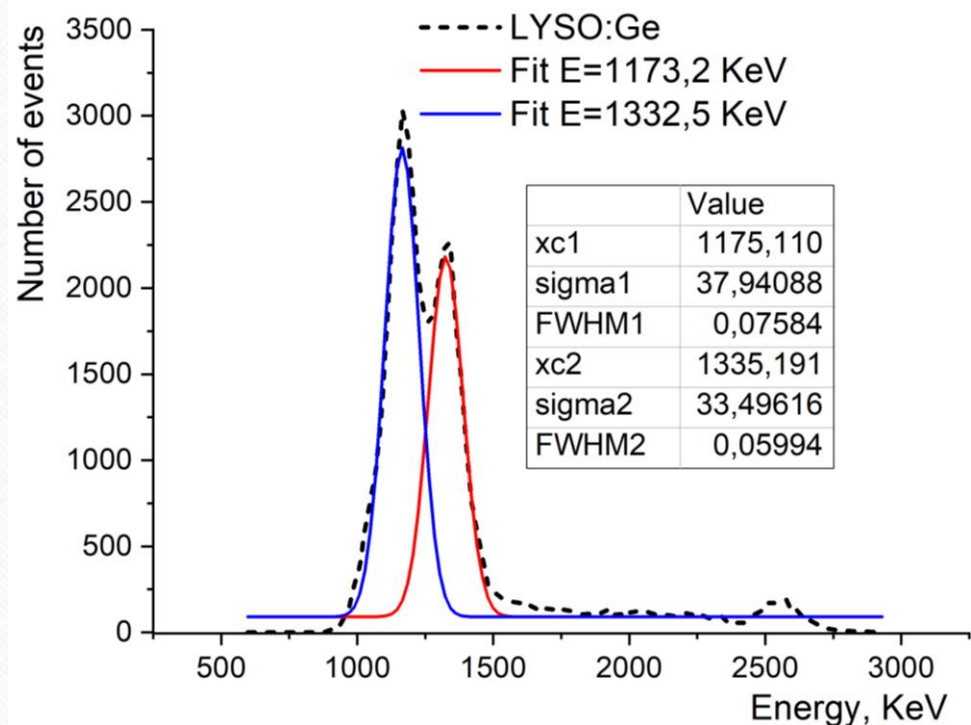
# Улучшение равномерности светосбора за счет применения светоотражающих материалов



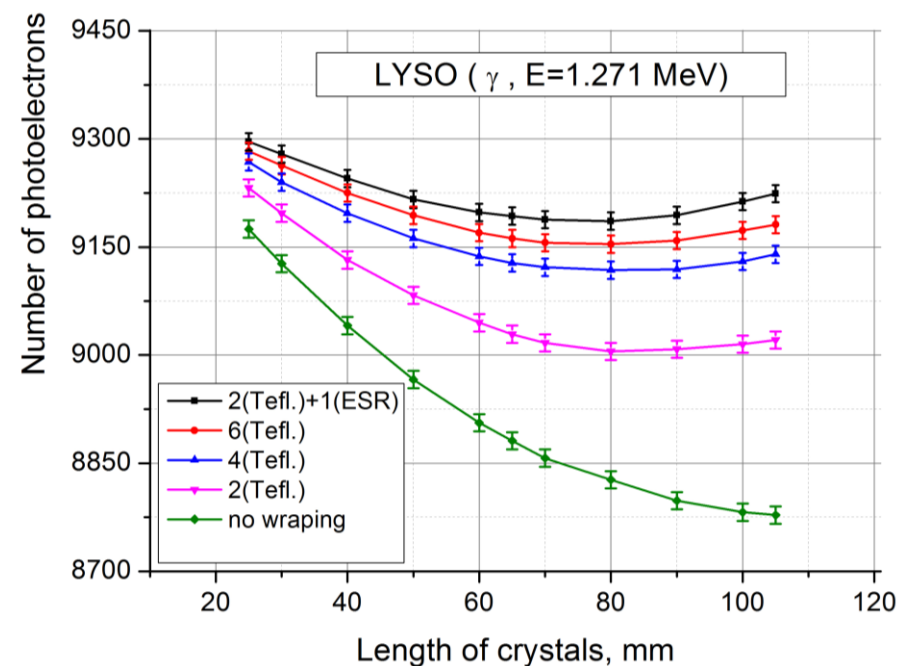
Тефлон AF1601,  
толщиной  $65 \mu k$ , с  
коэффициентом  
поглощения  $41 \text{ \%}/\text{см}$ ,  
ESR пленки VM2000,  
с коэффициентом  
отражения  $0,99/0,1$  и  
толщиной  $65 \mu k$

*M. Janecek, IEEE, V.59, P. 490-497, 2012.*

# Улучшение равномерности светосбора за счет применения светоотражающих материалов



Энергетический спектр кристалла с оптимальной оберткой



Неоднородность световыхода по длины кристалла для различных типов светоотражающих материалов



# Измерение оптических параметров прототипа калориметра эксперимента COMET с помощью космических мюонов



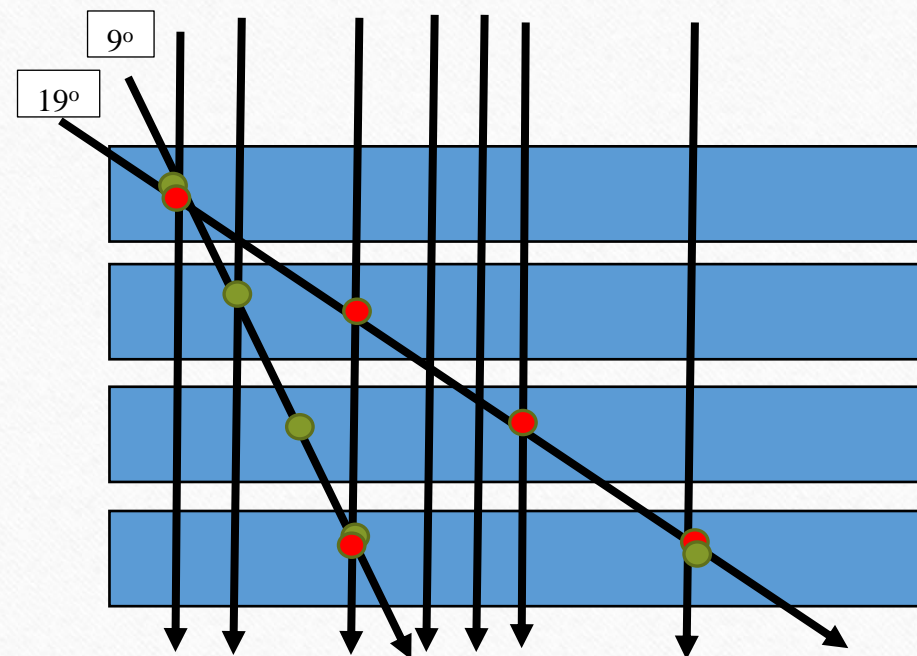
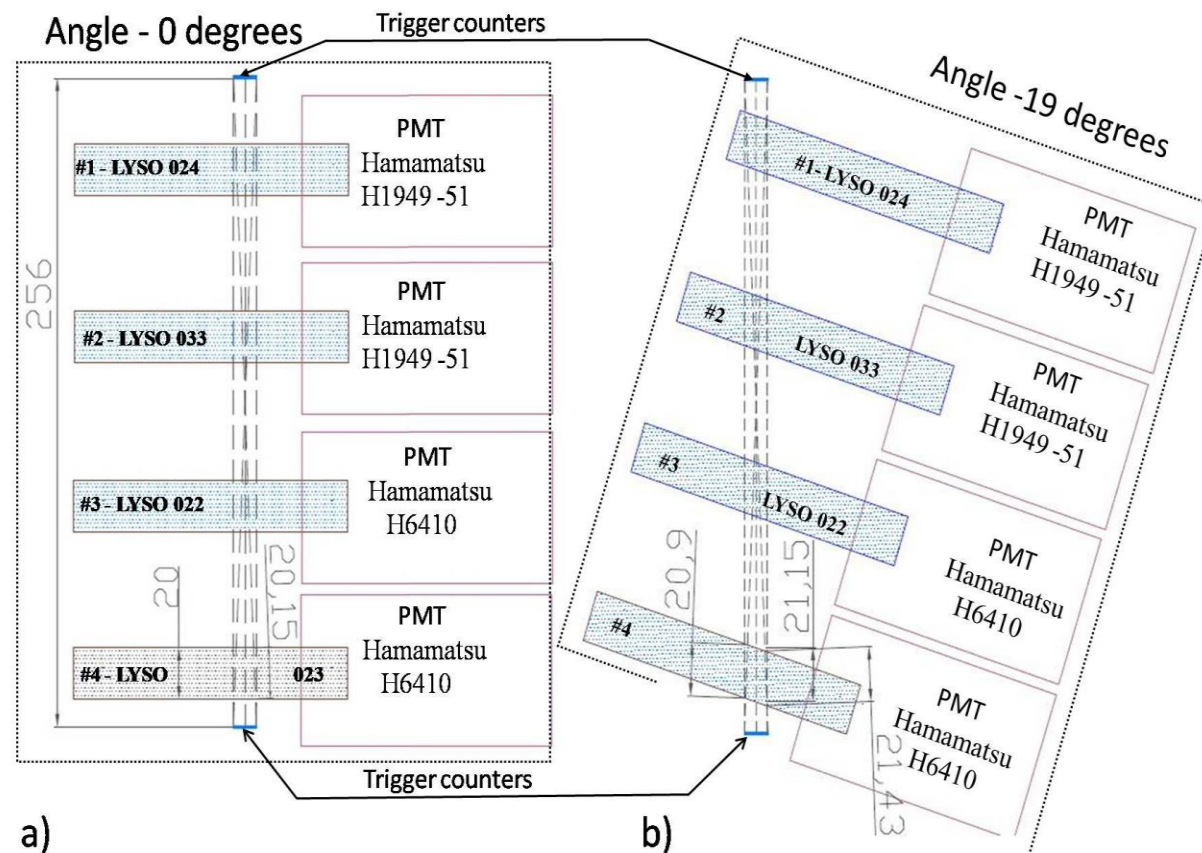
Прототип COMET калориметра

**Образцы:** кристаллы LYSO:Ce (Saint-Gobain Франция) : #1 (35LYSO 024), #2 (35LYSO 033), #3 (35LYSO 022), #4 (35LYSO 023). Каждый кристалл был обернут двумя слоями Тефлона AF1601, толщиной  $65 \mu\text{m}$ , с коэффициентом поглощения  $41 \text{ \%}/\text{см}$ , одним слоем ESR пленки VM2000, с коэффициентом отражения  $0,99/0,1$  и толщиной  $65 \mu\text{m}$ , и одним слоем черной бумаги толщиной  $200 \mu\text{m}$ .

Для светосбора с кристаллов использовались фотоумножители (PMT) Hamamatsu H1949-51. PMT монтировались с торцевой стороны кристалла с помощью оптической смазки (OKEN6262A, Oken, Japan)

Триггерный счетчик выполнен на пластике с размерами  $10 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ , а для светосбора применялись PMT Hamamatsu E2183-500. Счетчики были расположены на расстоянии  $256 \text{ мм}$  друг над другом, а эффективная площадь перекрытия составляла  $S_{\text{eff}} = 10 \times 5 \text{ mm}^2$ . Для измерения сигналов с PMT использовался 32-х канальный 5 ГГц диджитайзер диджитайзер VX1742В.

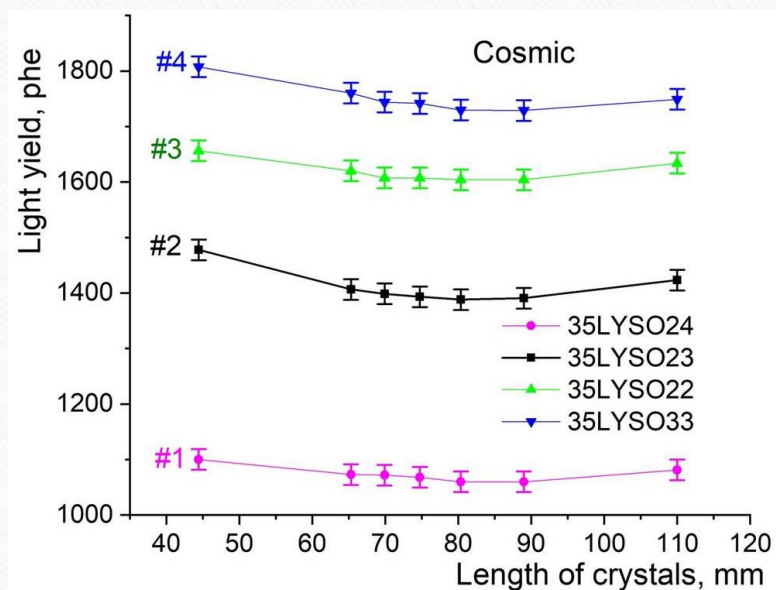
# Измерение оптических параметров прототипа калориметра эксперимента COMET с помощью космических мюонов



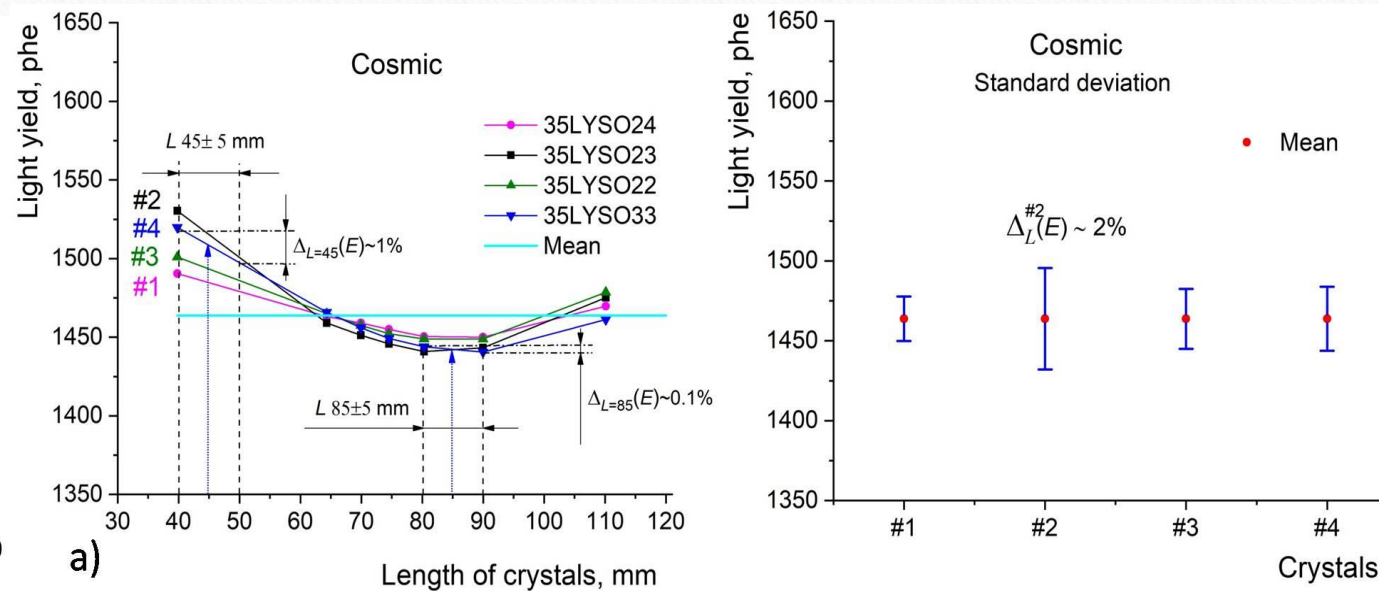
a) Измерение неоднородность отклика по длине кристаллов; б) Измерение неоднородности отклика на углах падения космических мюонов относительно торцевой плоскости кристаллов 19 и 9°



# Измерение оптических параметров прототипа калориметра эксперимента COMET с помощью космических мюонов



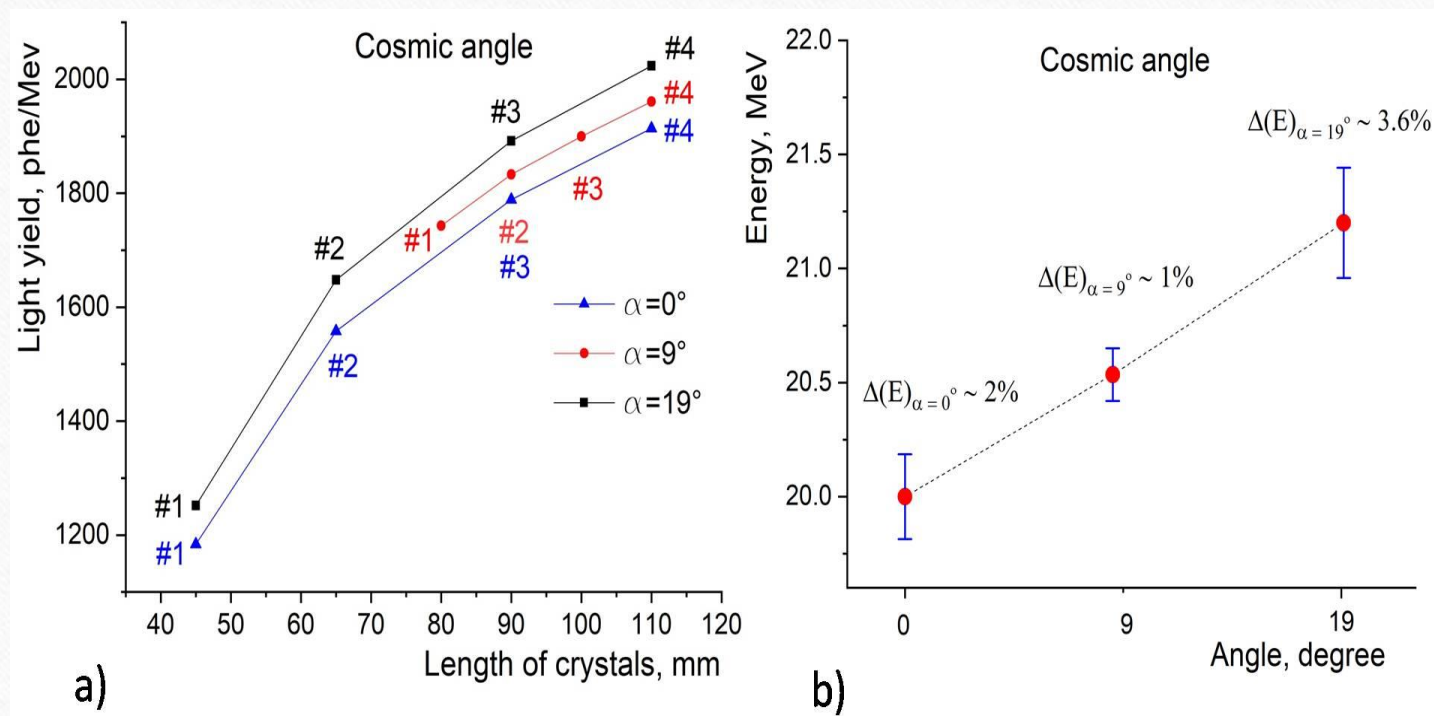
Распределение световыхода по длине кристалла (отклики сцинтилляторов), измеренное на космических мюонах



а) Отклики сцинтилляторов по длине, нормированные на их среднее значение, полученные на космических мюонах; б) Среднее значение отклика и неоднородность отклика по каждому сцинтиллятору



# Измерение оптических параметров прототипа калориметра эксперимента COMET с помощью космических мюонов



а) Отклики сцинтилляторов прототипа калориметра для углов 0, 9 и 19 градусов ; б) неоднородности отклика детектора для углов 0, 9 и 19 градусов

# Измерение оптических параметров прототипа калориметра эксперимента COMET с помощью космических мюонов

Отклик прототипа детектора для углов 9 и 19 градусов

Параметры Угол	$\bar{\Delta}_{\alpha_i}(E), [\text{МэВ}]$	$\delta(E)_{\alpha}, [\%]$	Оценка разрешения прототипа калориметра, [%]
0	20.0	2.0	~ 4
9	20.5	1.1	~ 2
19	21.2	3.6	~ 6

$\bar{\Delta}_{\alpha_i}(E)$  – среднее значение отклика прототипа детектора на  $i$  – том угле;

$\delta_{\alpha_i}(E)$  –неоднородности отклика детектора для углов 0, 9 и 19 градусов

## Заключение

1. Проведенный анализ показал, что разброс световыхода от кристалла к кристаллу будет приводить к ухудшению энергетического и пространственного разрешения калориметра.
2. Неоднородность коэффициентов усиления фотодетекторов будет слабо влиять на энергетическое разрешение кристалла.
3. Установлено, у кристаллов  $\text{LYSO:Ce,Ca}$  распределение сцинтилляционных свойств более однородно, например, среднее значение неоднородности откликов сцинтилляторов  $\text{LYSO:Ce,Ca}$  оставляет 1.1%, а  $\text{LYSO:Ce}$  – 4.6%.
4. Сравнение оптических свойств двух кристаллов позволяет сделать вывод, что у кристаллов фирмы Saint-Gobain распределение сцинтилляционных свойств более однородно, и что он имеет меньшее количество оптических ловушек и дефектов кристаллической структуры, чем кристалл фирмы JT Crystal Technology Co., Ltd.
4. Экспериментально установлено, что наилучшие результаты для решения проблемы улучшения равномерности светосбора могут быть получены при комбинированном типе покрытия: на боковые поверхности кристалла нанесено гетерогенное покрытие – два слоя диффузного отражателя TELON и внешний слой зеркальной пленки ESR.
5. Неоднородность отклика детектора зависит от угла падения космических мюонов относительно торцевой плоскости прототипа калориметра. Оценка разрешения прототипа калориметра дает для угла  $19^\circ$  значение 6 %, для  $9^\circ$  – 2%, а для  $0^\circ$  – 4%.



# Статъи

1. В. Калинин, Е. Величева, З. Цамалаидзе, А. Лобко, О. Мисевич, “ИСМА”, 2017. С.21-41 с.
2. E. Velicheva, V. Kalinnikov // Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol. 23, no. 4 (2020), pp. 374 – 385.
3. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Yusuke Uozumi, //Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 457–468.
4. V. Kalinnikov, E. Velicheva, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 225–234., 2022.

# Конференции и семинары

BelINP-2017, 1<sup>st</sup> International Symposium “Integration of Belarussian Scientists in the research programs of the world’s leading nuclear physics centers”.

Участие в СМ СОМЕТ.

Семинары ЛЯП.

**THANK YOU FOR ATTENTION!**



# Программа Phase-I и Phase-II эксперимента COMET

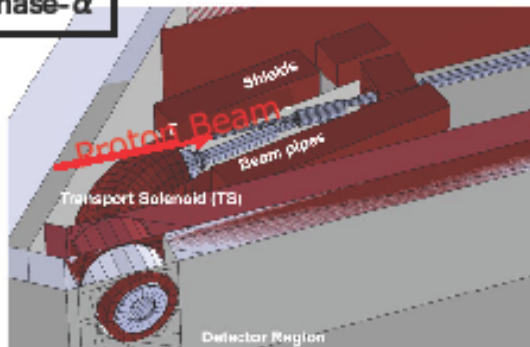
## Schedule of Phase- $\alpha$ and Phase-I

✓ 8GeV test and  $R_{\text{ext}}$  measurement in 2021

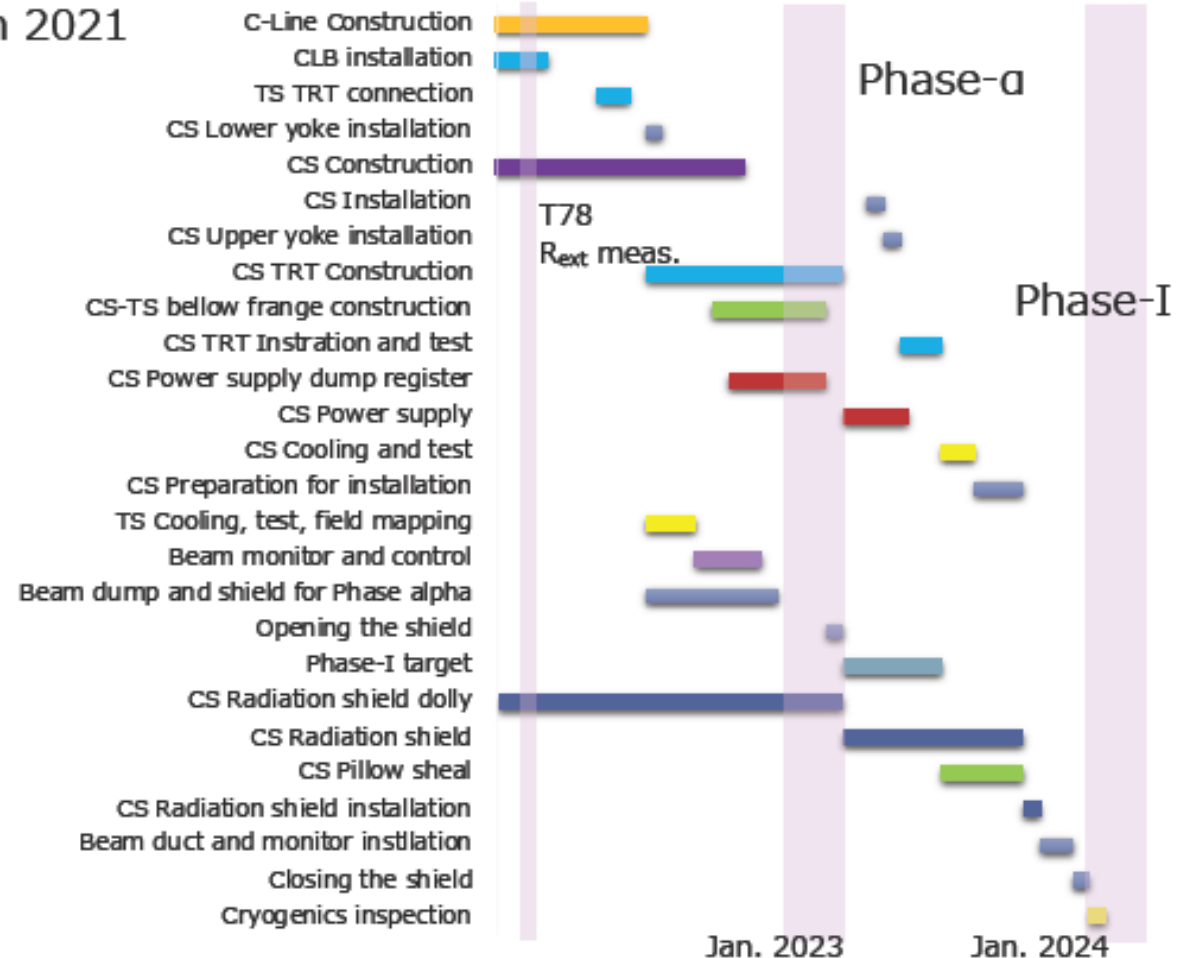
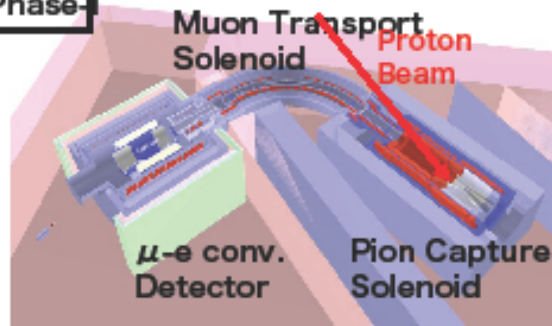
▣ Phase- $\alpha$  Eng. Run in JFY2022

▣ Phase-I Phys. Run in JFY2024

Phase- $\alpha$



Phase-I



# Изучение оптических параметров китайского кристалла LYSO:Ce фирмы JT Crystal Technology Co., Ltd

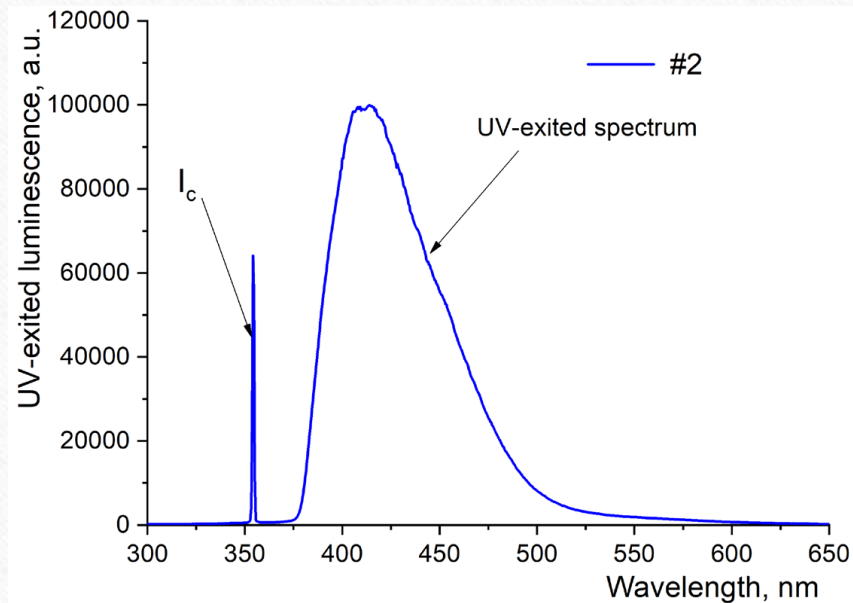
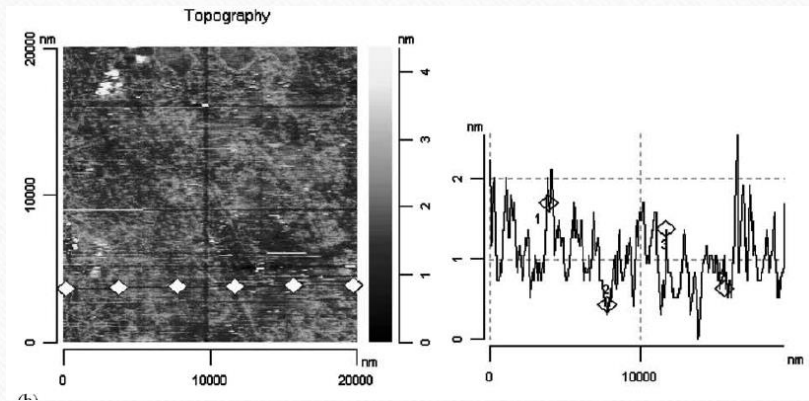


Fig. 1. UV-excited spectrum of LYSO:Ce crystal for an excitation wavelength of 355 nm with a peak from the UV radiation source  $I_c$  after passing through the crystal

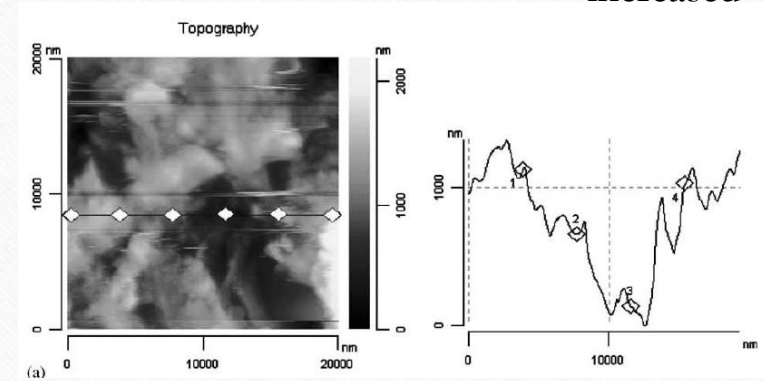
S

relative light output  
increased ~ 40%



chemical etching

relative light output  
increased ~ 26%



finely-abrasive diamond powder