



Радиационное повреждение кристаллов $Y_2SiO_5:Ce$ при облучении γ -излучением и протонами с энергией 24 ГэВ.

Э.Ауффрей¹, А.Борисевич², А. Гектин³,
М. Коржик², Д. Козлов², О. Сидлецкий³

1 - CERN, Женева, Швейцария

2 - Институт ядерных проблем, Минск, Беларусь

3 - Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина



CRYSTALS FOR HADRON CALORIMETRY

(From Adam Para, Fermilab, SCINT 09, 2009)

- “...A Collection of ‘Fun to Solve’ Challenges”:
- ...**Demonstrate separate detection of Cherenkov and scintillation light:**
- ...The requirements:
 - Scintillation properties (decay time, spectrum) must allow separation of the scintillations and Cherenkov component. **Very modest light yield: >200/GeV scintillation, >10/GeV Cherenkov detected.** Combined requirement on crystals, photodetectors, geometry, system aspects.
 - **Good transmission of the Cherenkov light**
 - **Inexpensive!! 50-100 m³ required → cost (in large scale production) must not exceed ~2\$/cc**
 - Short interaction length 20-22 cm.
 - Mechanically stable
- ... NOT a requirement:
 - Speed of the response, absence of long components (1-10 μ s fine, 1 ms too long)
 - Radiation resistance
 - Available immediately. 3-4 years will be fine, in time for the detector design



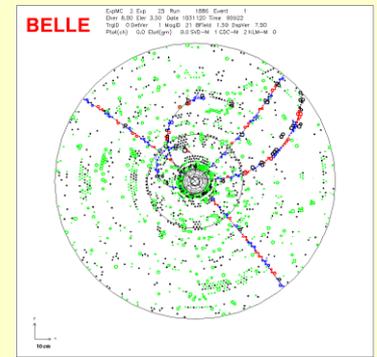
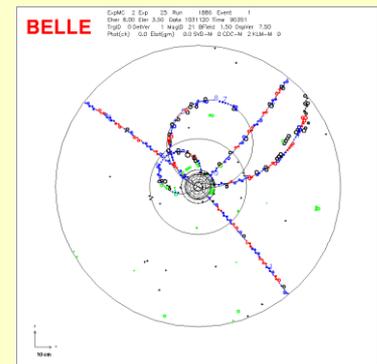
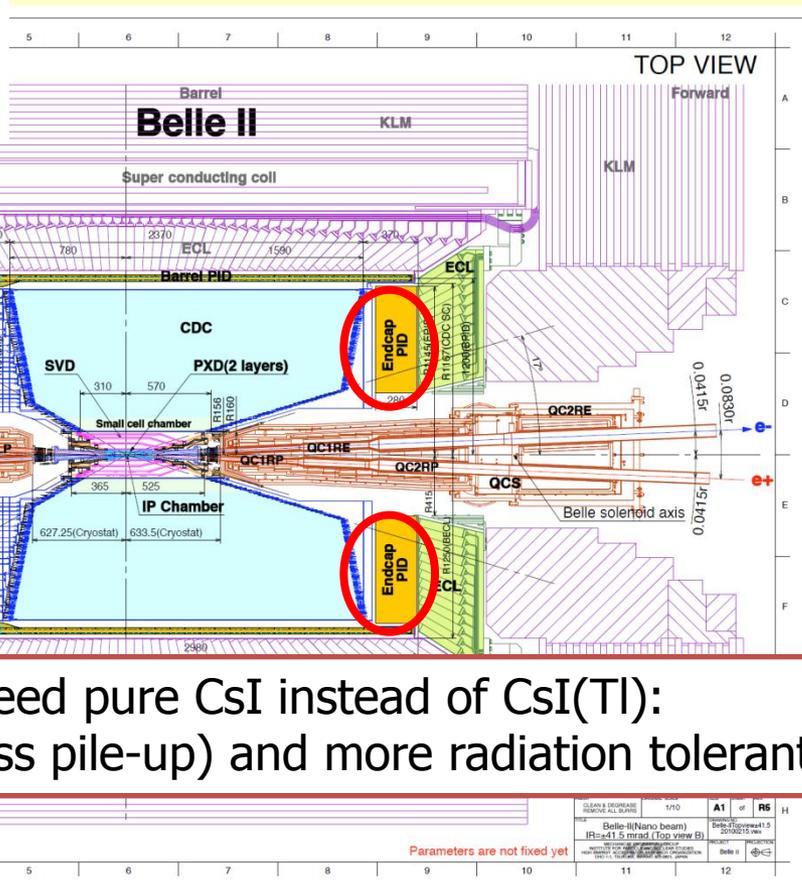
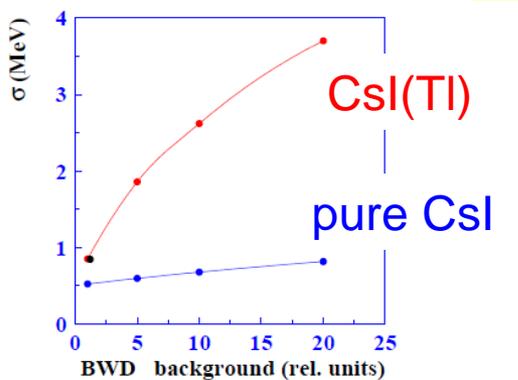
From a B factory (Belle) to a super B factory (Belle II): need to build a new detector to handle higher backgrounds



Particularly critical in Belle II: calorimetry in the endcaps

Belle-II: Higher background (x20) and event rate (x10)

Pile-up noise as a function of background level, normalized to Belle.



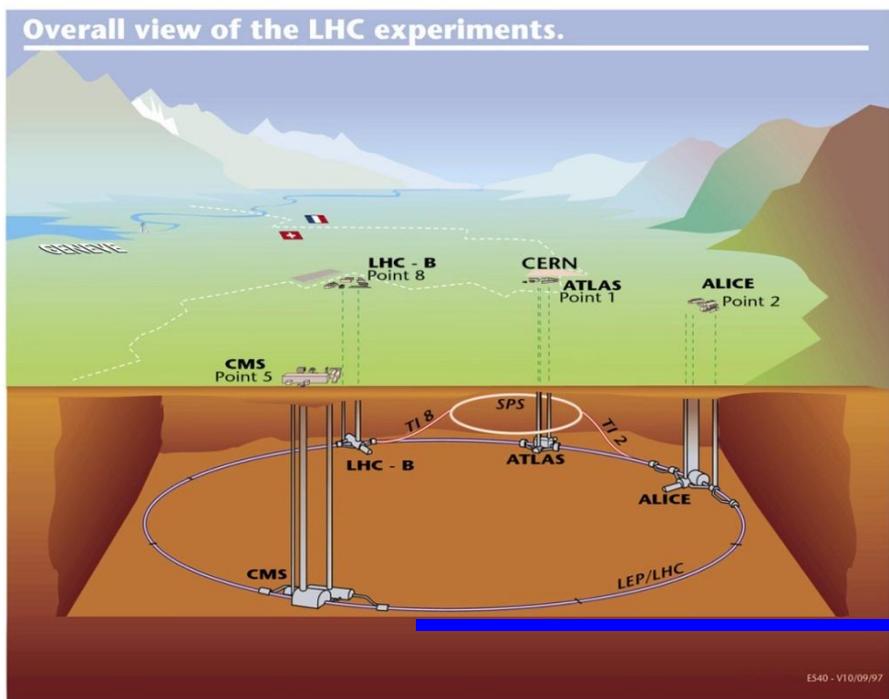
Endcaps: need pure CsI instead of CsI(Tl):
faster (→less pile-up) and more radiation tolerant

CLASS & NUMBER	1710	A1	of	R5
Belle-II(Nano beam)				
IP=41.5 mm (Top view)				
Belle II				

Parameters are not fixed yet



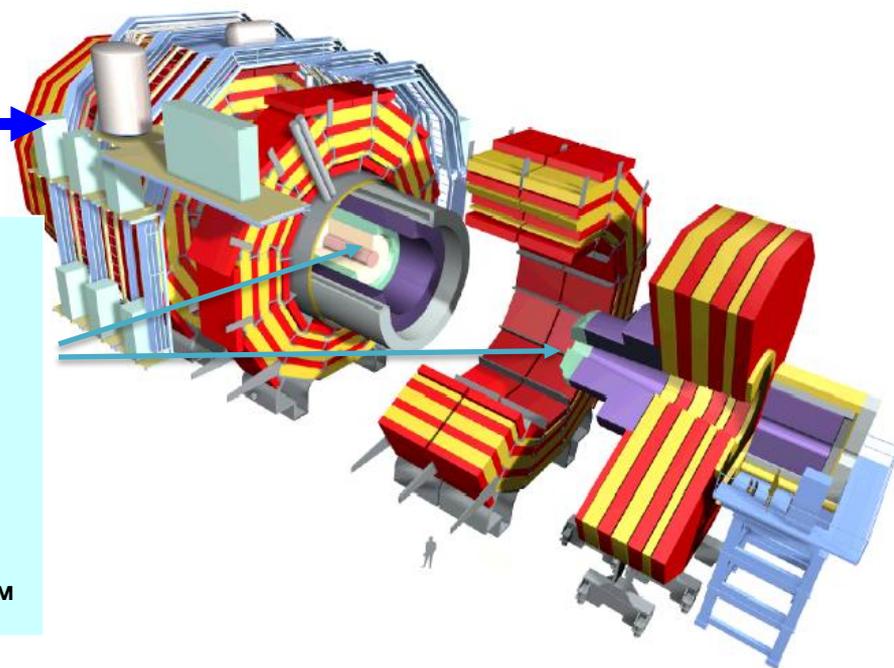
ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ LHC в ЦЕРНе.



ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

pp-коллайдер
 E_p (ц.м.) = 14 TeV
 Светимость = $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 10 лет
 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТОЧКИ

РАДИАЦИОННАЯ НАГРУЗКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТОЧКАХ
 10^9 pp неупругих взаимодействий/с LHCb
 $D_1 = 4 \text{ kGy}$ 90°- R(2m)
 $D_1 = 200 \text{ kGy}$ 10°- R(3m)
 $D_n = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
 CMS
 ATLAS
 ALICE



ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА КОЛЛАБОРАЦИИ CMS

МОДЫ

$H \rightarrow \gamma\gamma$ ($m_H \leq 150 \text{ GeV}$)
 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow (e^+ e^-)$ 140-700 GeV
 $H \rightarrow WW \rightarrow (e^+ e^-)$ 140-700 GeV
 ГРАНУЛЯРНОСТЬ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ
 постоянный член в разрешении 0.55%

ПОГЛОЩАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

$25X_0$ (23.5 см)

$\Delta\phi * \Delta\eta = 0.0175 * 0.0175$; 23*23 мм



Полученные CMS и ATLAS к концу лета 2012 года результаты обобщены в работах

**A new boson with a mass of 125 GeV observed with the CMS Experiment at the
Large Hadron Collider**
September 2012
The CMS Collaboration

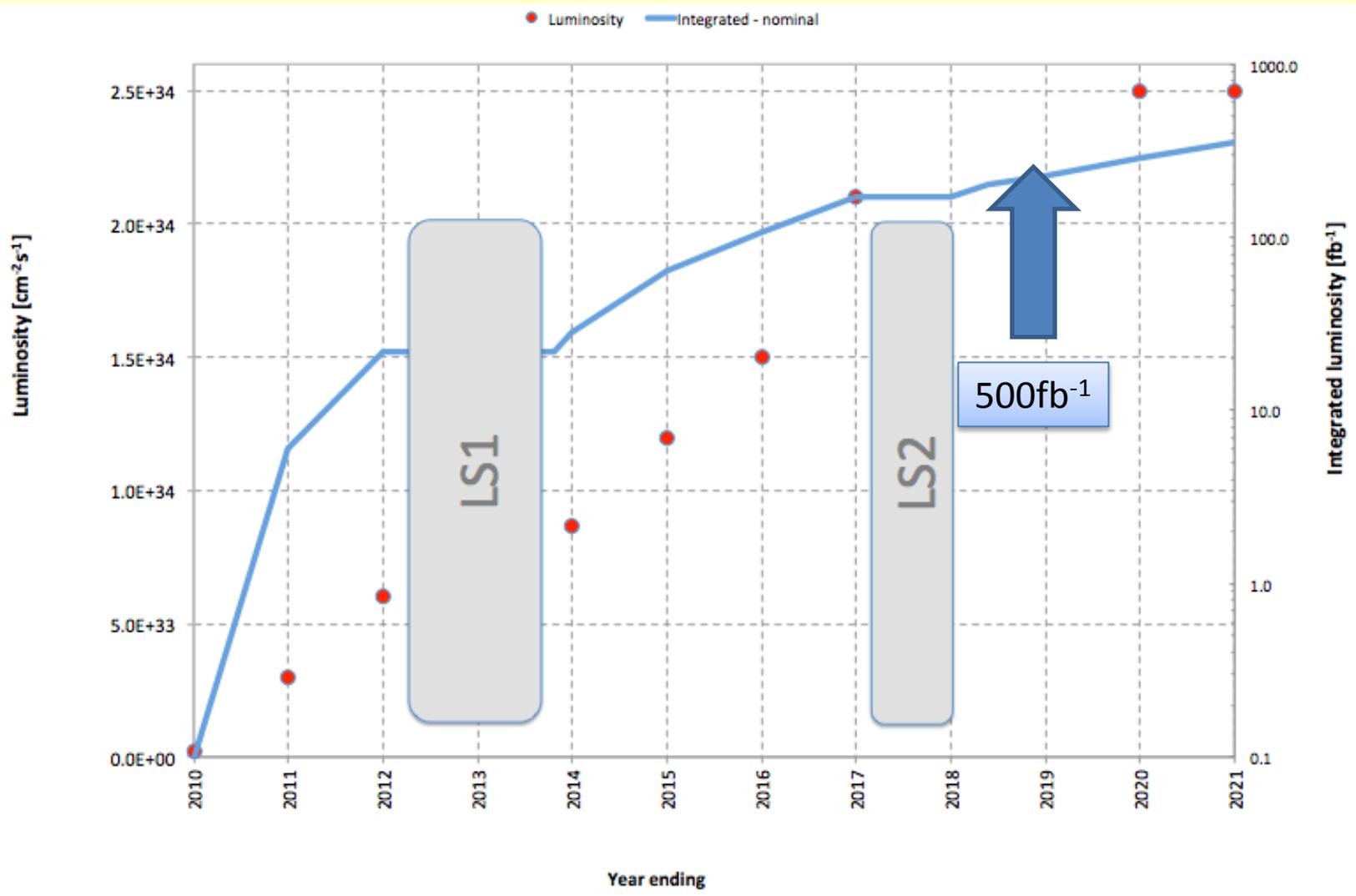
**Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the
ATLAS detector at the LHC**
September 2012
The ATLAS Collaboration

**Проведение дальнейших исследований потребует существенной
модернизации практически всех экспериментальных установок,
спроектированных более 15 лет назад !**



Переход от LHC к HL-LHC

Одним из наиболее вероятных сценариев развития ситуации на LHC является модернизация ускорителя с целью увеличения светимости.



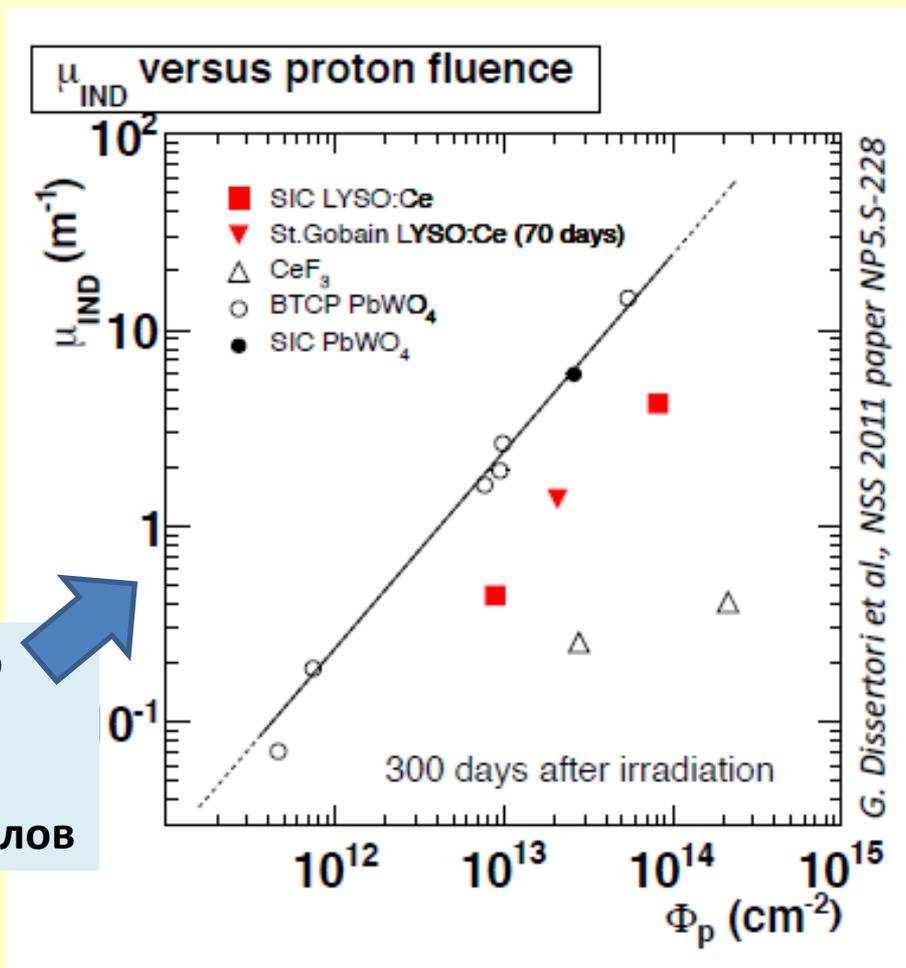


Последствия увеличения светимости для экспериментальных установок на LHC на примере CMS ECAL.

1. Значительное увеличение дозовой нагрузки на части детекторов, расположенных в области $\eta \geq 2.5$

2. Заряженные адроны становятся доминирующим фактором радиационного повреждения конструкционных материалов установок, в том числе и сцинтилляционных материалов.

Изменение коэффициента наведенного поглощения в зависимости от интегрального потока протонов с энергией 24 ГэВ для различных материалов



(Предоставлено Ф. Несси-Тедальди, ETH, Zurich, из выступления на IEEE, Анахайм, США, 1.11.2012,)



Почему сохранение прозрачности кристаллов столь важно?

1. **Прогрессирующая деградация свойств кристаллов в радиационных полях** ожидается вследствие видоизменения имеющихся в кристалле дефектов и создания новых радиационных дефектов.

Можно ожидать частичного восстановления свойств в результате старения (recovery).

2. **Ухудшение статистических показателей детектора в результате радиационно-наведенного поглощения.**

Это происходит вследствие непрерывно изменяющихся условий светособирания при не постоянном коэффициенте поглощения.

3. **“Нелинейность” энергетической шкалы**

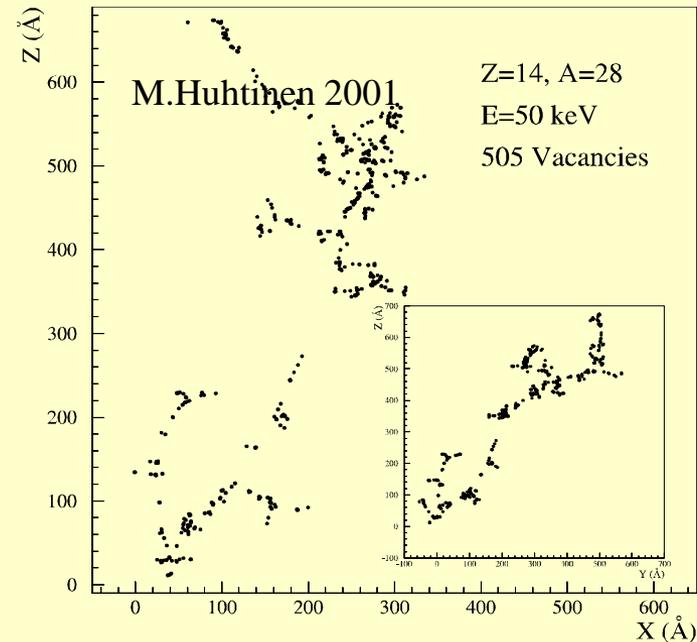
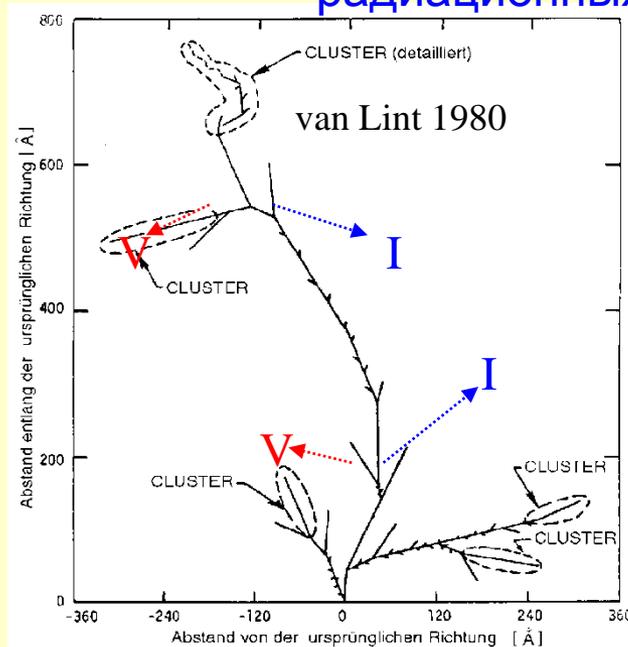
Это - результат того, что распределение поглощенной в кристалле энергии (electromagnetic shower) зависит от исходной энергии частицы. Чем выше значение оптического поглощения, тем больше отклонение от линейности для высокоэнергетических фотонов.



Основной механизм повреждения легкой кристаллической решетки кремния адронами за счет неионизационных потерь был установлен при проведении НИР по трекерам

(M.Moll and Co, <http://www.cern.ch/rd50>)

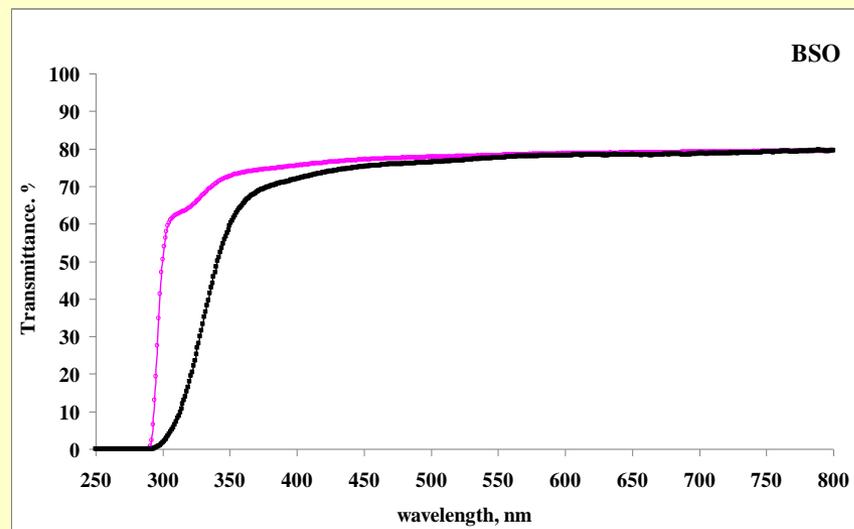
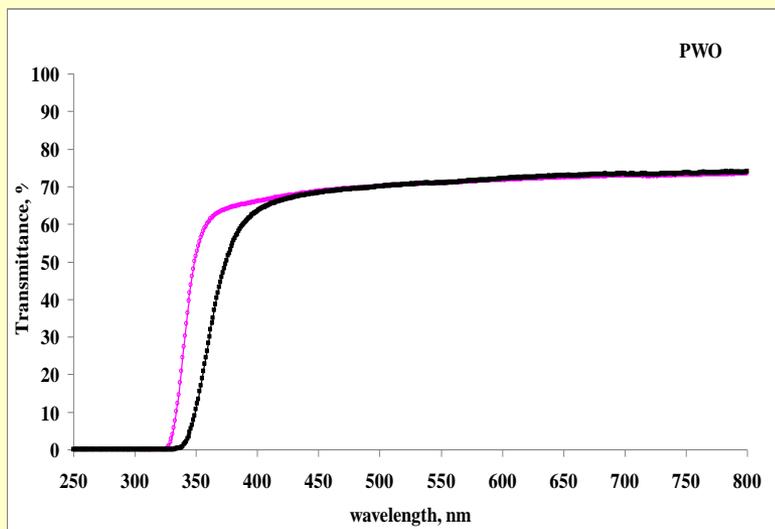
- ◆ Пространственное распределение вакансий и кластеров радиационных дефектов. (50 keV Si-recoil in silicon).



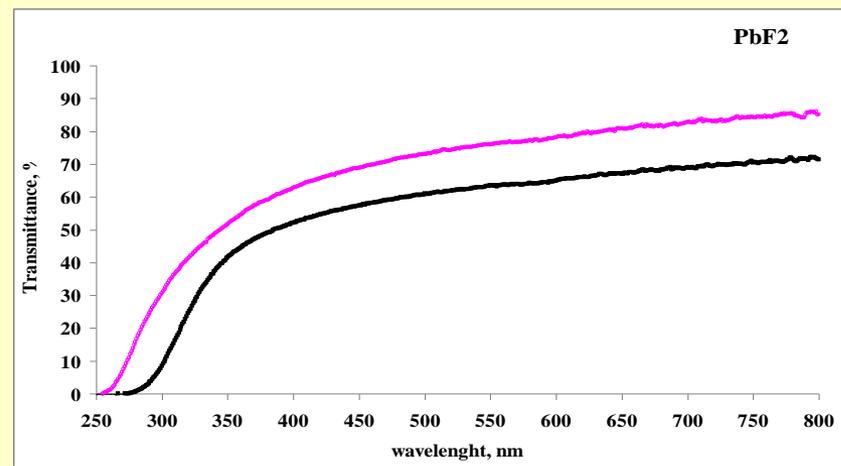
Работы по исследованию влияния повреждения адронами на свойства сцинтилляционных материалов начались , по существу, недавно, с 2004г.



Почему не подходят для работы в сильных полях ионизирующего излучения с адронной компонентой самоактивированные тяжелые сцинтилляторы и широкозонные радиаторы?



За счет образования вакансий под действием протонов образуются центры окраски, перекрывающие полосы свечения либо черенковское излучение

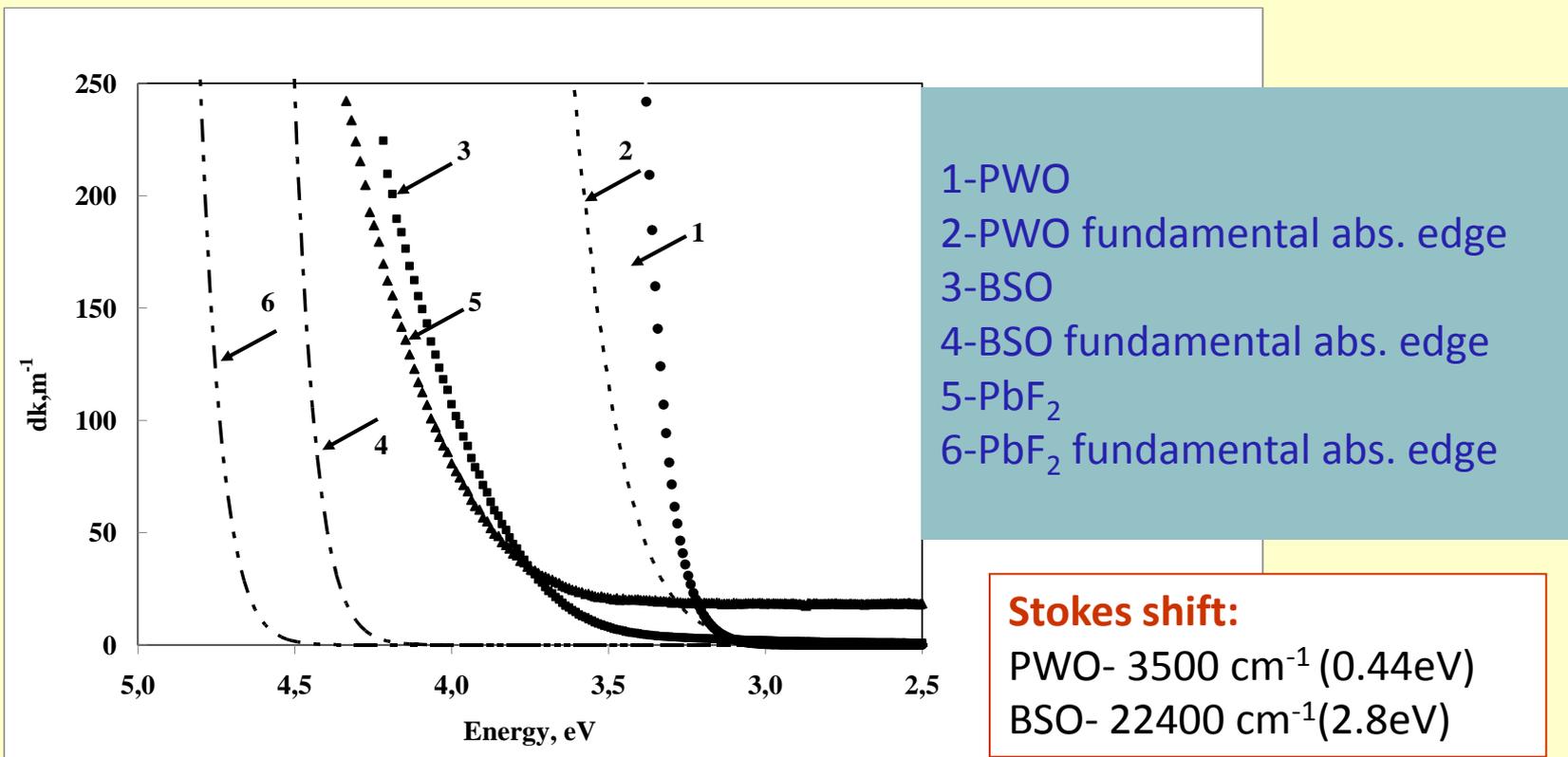


[Radiation damage of heavy crystalline detector materials by 24 GeV protons](#)

A. Barysevich et.al. NIM A *In Press, Accepted Manuscript*, Available online 27 October 2012



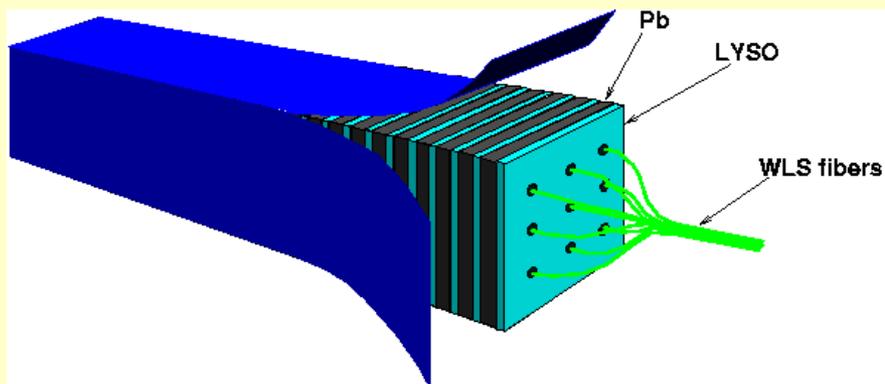
Сужение спектральной области пропускания в облученных протонами тяжелых кристаллах



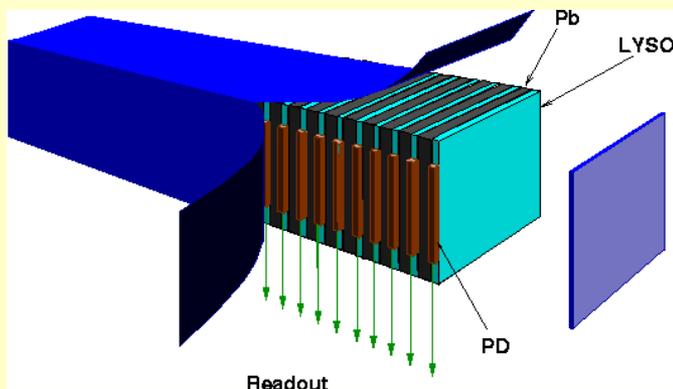


Влияние фактора повреждения протонами сцинтилляционных материалов на конструкционные особенности детекторных модулей, которые будут работать в области $\eta \geq 2.5$ приводит к:

- Требованию использовать легкие неорганические сцинтилляционные материалы,
- Переходу к конструкциям, сочетающим короткие сцинтилляционные элементы, чередующиеся с поглотителем энергии ливня (Pb,W)



Концепция детекторного модуля типа «шашлык» для работы при высоких радиационных нагрузках



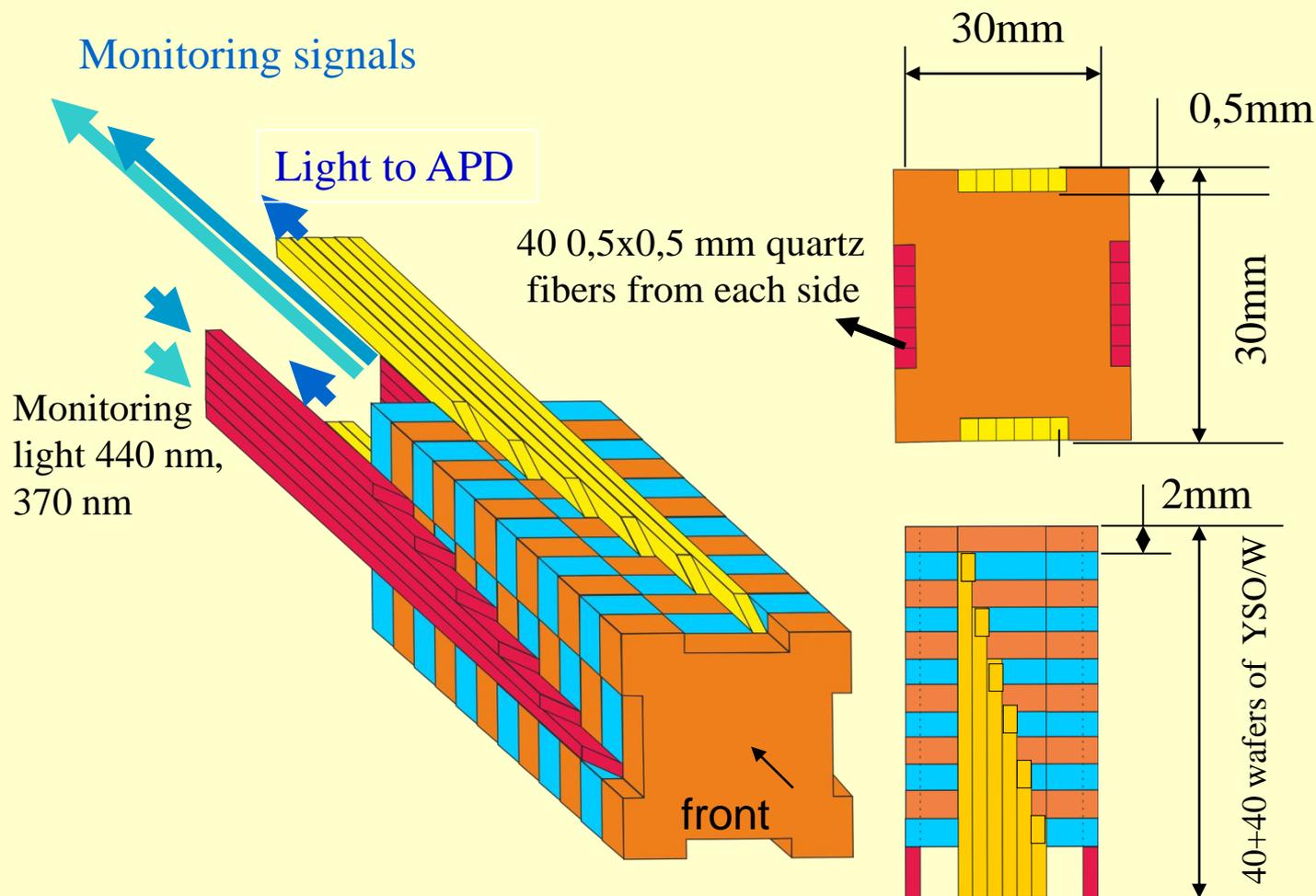
Проблемы:

- Калибровка сцинтилляционных пластин
- Стойкость световодов- шифтеров
- Стойкость фотодетекторов в передних слоях

(Предоставлено Пен Ян Зу CalTech, из выступления на CMS Forward Calorimetry Taskforce Meeting, 30.08.2012, CERN)



Другая концепция детекторного модуля для работы при высоких радиационных нагрузках



- Scintillation light will be measured from each wafer from two opposite sides
- Small APD 1x40 cells or two 1x20 with sensitive area $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ would be enough
- Transmission and LY of each wafer will be monitored simultaneously

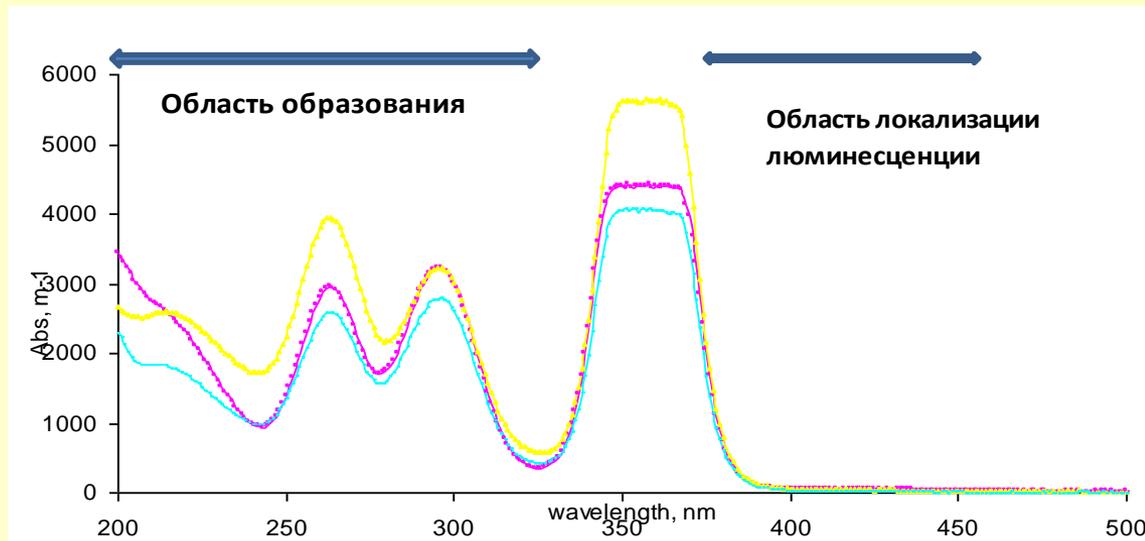


ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ

Стоксов сдвиг в некоторых
сцинтилляционных
материалах, активированных
ионами Ce^{3+} или Pr^{3+}

Material	$5d \rightarrow 4f$ (Ce^{3+})	$5df \rightarrow 4f^2$ (Pr^{3+})
Y_2SiO_5	0,43 eV (3400 cm^{-1})	0,27eV (2200 cm^{-1})
Lu_2SiO_5	0,45 eV (3600 cm^{-1})	0,37eV (3000 cm^{-1})
$Lu_3Al_5O_{12}$	0,45 eV (3500 cm^{-1})	0,3 eV (2400 cm^{-1})
$Y_3Al_5O_{12}$	0,44 eV (3500 cm^{-1})	0,4 eV (3200 cm^{-1})
$YAlO_3$	0,37 eV (3000 cm^{-1})	0,46 eV (3680 cm^{-1})

Спектры поглощения кристаллов LSO:Ce(голубой)
LYSO:Ce(желтый) и YSO:Ce (сиреневый), $n=0.4mm$.



Критерий выбора при использовании
 Ce^{3+} - допированных материалов :

- минимальное собственное поглощение
- цена производства и сырья

Выбор за YSO:Ce!

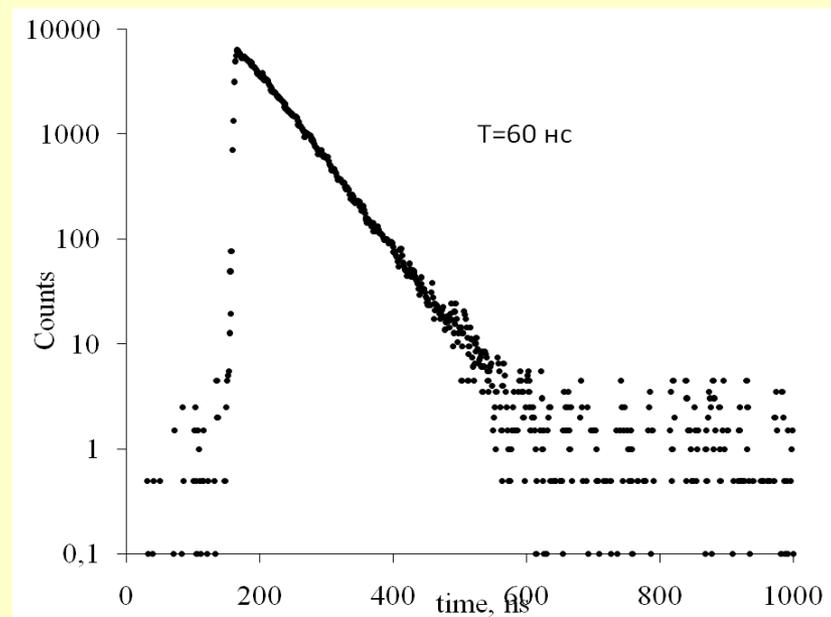
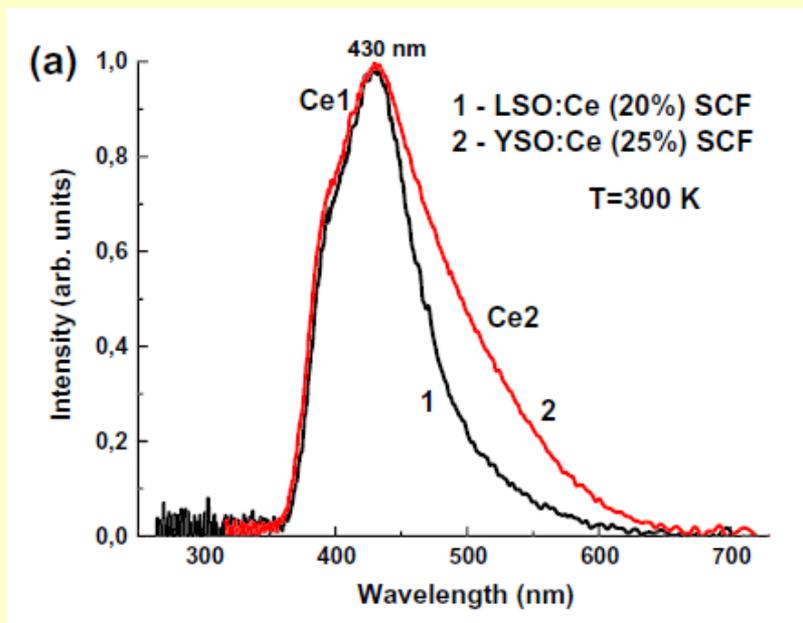


Сцинтилляционные характеристики YSO:Ce

СВЕТОВОЙ ВЫХОД

$$LY_{\text{LSO}} = LY_{\text{YSO}}$$

Кинетика сцинтилляционного импульса





Радиоизотопы, измеренные в YSO:Ce через 30 дней после облучения образца протонами 24ГeV

Nuclide	Halflife	Conf.	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /unit)	
Rb-83	8.62E+001 D	0.999	14.10 @	8.20		
			520.39*	45.00	8.2E+002	27.1%
			529.59*	29.30	7.8E+002	31.9%
			552.59*	16.00	6.2E+002	52.1%
Rb-84	3.28E+001 D	0.996	881.60*	69.00	3.6E+002	28.2%
Sr-85	6.48E+001 D	0.997	13.35 @	50.10		
			15.00	8.70		
Y-88	1.07E+002 D	0.972	514.01*	96.00	8.5E+002	19.2%
			14.12 @	51.15		
			15.80 @	9.05		
Zr-88	8.34E+001 D	0.998	898.04*	93.70	3.4E+003	9.0%
			1836.06*	99.20	3.3E+003	10.1%
			392.90*	97.24	1.3E+002	42.6%

КАК И В ТЯЖЕЛЫХ МАТЕРИАЛАХ

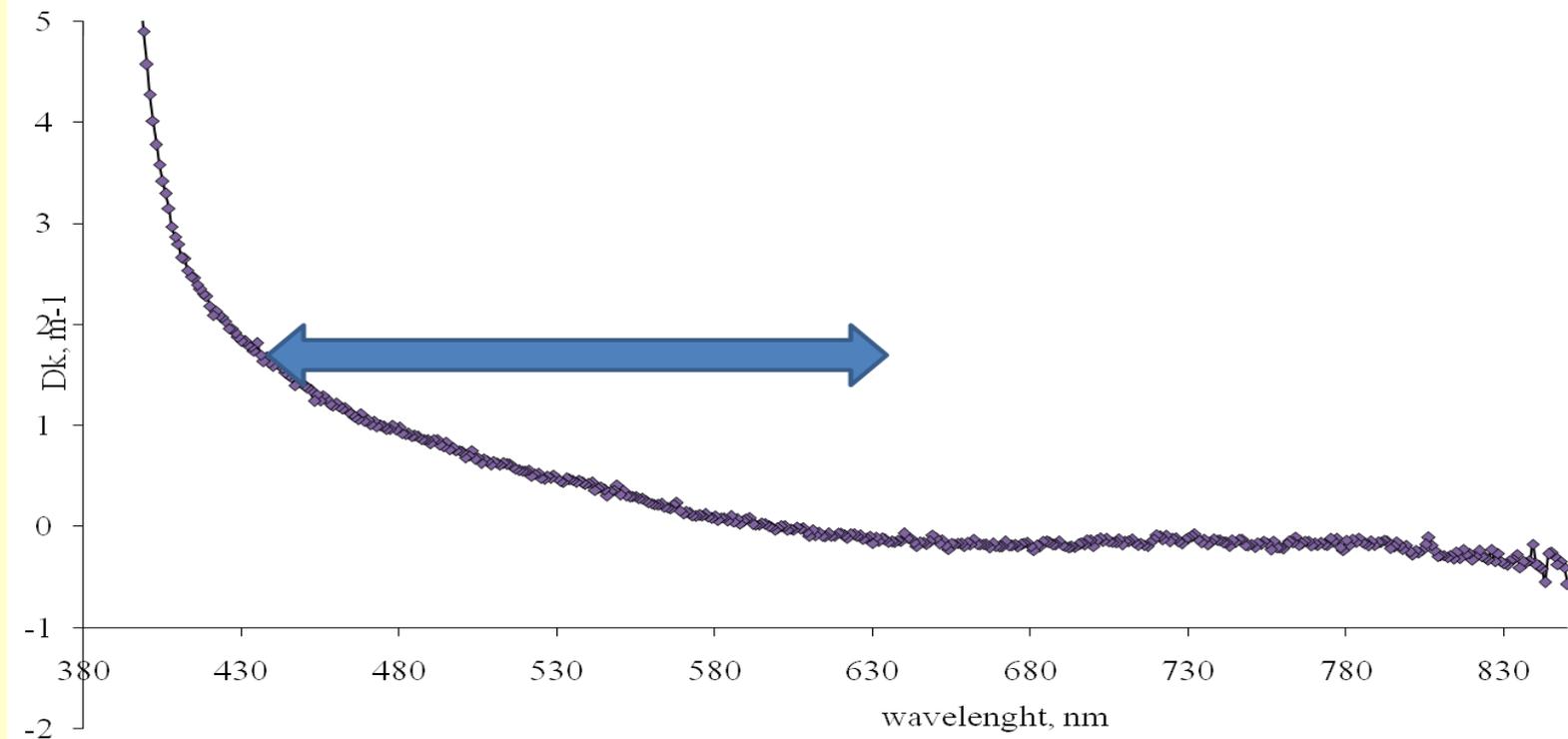
* ОСНОВНОЙ МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ - ВЫБИВАНИЕ ЛЕГКИХ ФРАГМЕНТОВ ИЗ ЯДЕР!

** ОСНОВНОЙ МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛА - ВЫБИВАНИЕ АТОМОВ ИЗ ПОЗИЦИЙ В РЕШЕТКЕ ЛЕГКИМИ ФРАГМЕНТАМИ С ОБРАЗОВАНИЕМ ВАКАНСИЙ.



Наведенное поглощение в кристаллах YSO:Ce при облучении ^{60}Co , поглощенная доза 100 крад

Нет выраженных наведенных полос поглощения в спектральной области люминесценции !

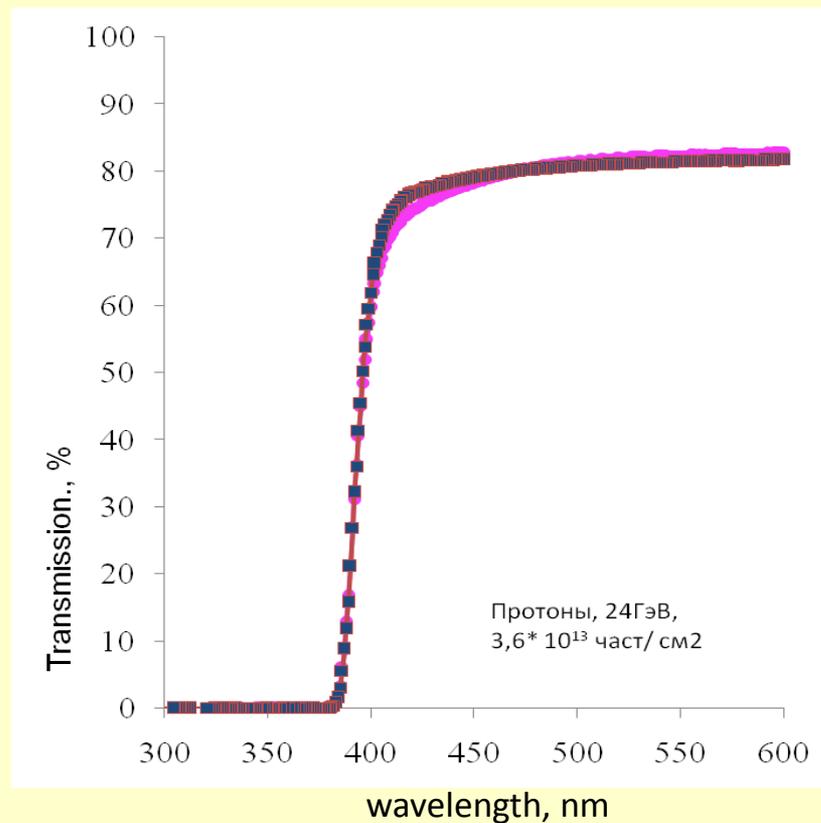
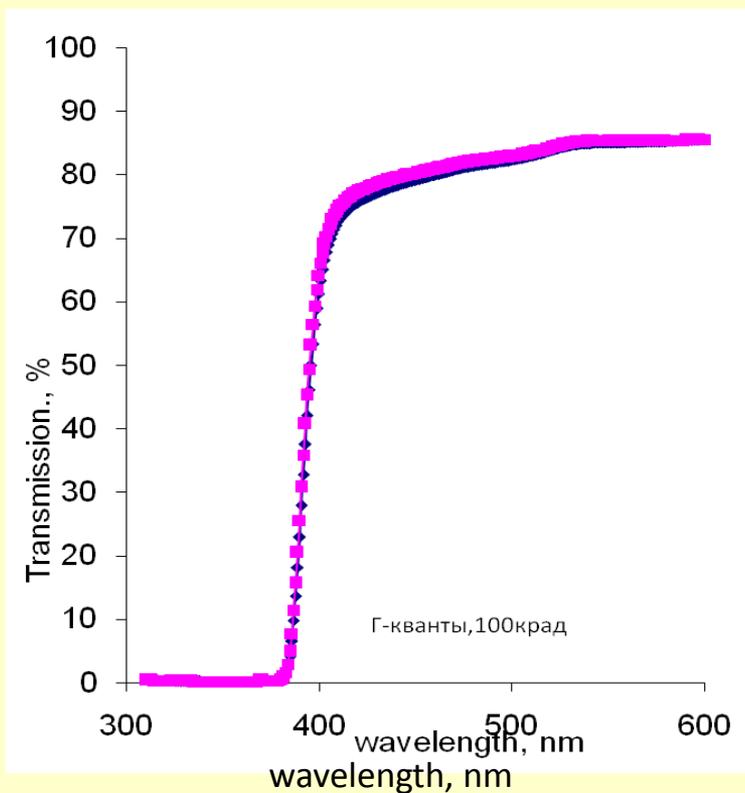


Кристалл **YSO:Ce** имеет высокое структурное совершенство после выращивания, поглощение в максимуме люминесценции менее 2 м^{-1} .



Сравнение спектров пропускания кристалла YSO:Ce (1x1x1см³) после облучения гамма-квантами и протонами (в точке до развития каскада вторичных частиц)

Начальное пропускание – сиреневый цвет





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что сцинтилляционный материал YSO:Ce является стойким как к облучению гамма -излучением , так и протонами высоких энергий.

2. Сцинтилляционные параметры кристалла могут быть подстроены для удовлетворения требованиям экспериментов на HL-LHC:

- кинетика сцинтилляций может быть укорочена за счет введения в кристалл тушащих примесей;

- размеры кристаллов могут быть доведены до длины , при которой будут из одного кристалла вырезаться пластинки для одного детекторного блока.

Ближайшие планы:

Консолидировать усилия и провести тесты и облучения кристаллов большего размера.

! - Результаты могут быть интересны для модернизации экспериментальных установок коллабораций ALICE, LhCB и CMS при переходе ускорителя в режим высокой светимости.

!! - Работа требует поддержки и может быть выполнена в широкой коллаборации, включающей ОИЯИ, ЦЕРН, НИИ ЯП (Минск, Беларусь), ИСМА (Харьков, Украина) и др.



Спектры пропускания кристалла YSO:Ce (2x1x1 см³) до и после облучения протонами (в точке с развитым каскадом вторичных частиц)

