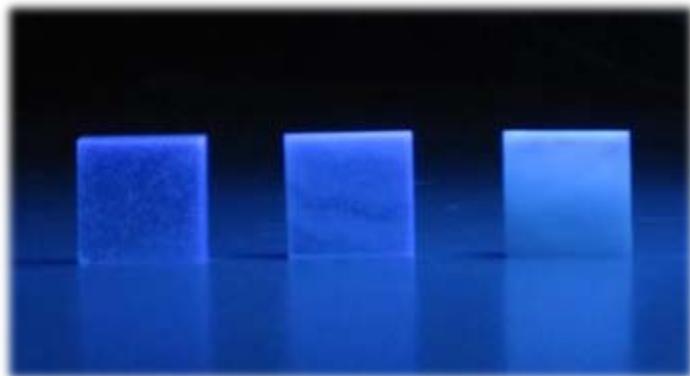


Альтернатива He-3: детекторы нейтронов на основе новых стеклокомпозитных сцинтилляторов

Г. А. Досовицкий, М. В. Коржик, А. Е. Досовицкий



NEOSCINT
neoscint@gmail.com
+7-916-117-32-20

Применения нейтронных детекторов

Известные применения

Исследования



Обнаружение делящихся веществ

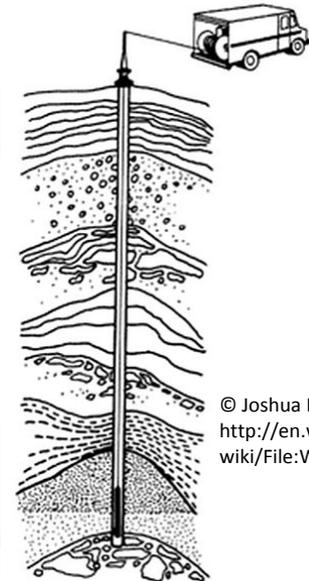
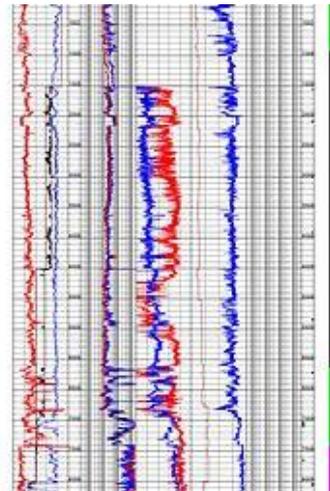


<http://energy.cr.usgs.gov/OF00-200/WELLS/LISBURN1/LAS/L11LOG.JPG>

Перспективные применения

- Контроль работы ядерного реактора
- Экологический мониторинг
- Инженерная диагностика
- Ядерная (нейтронная) медицина

Георазведка



© Joshua Doubek, from http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wireline_Truck.JPG

Как детектировать нейтрон?



Не взаимодействует
с электронными
оболочками

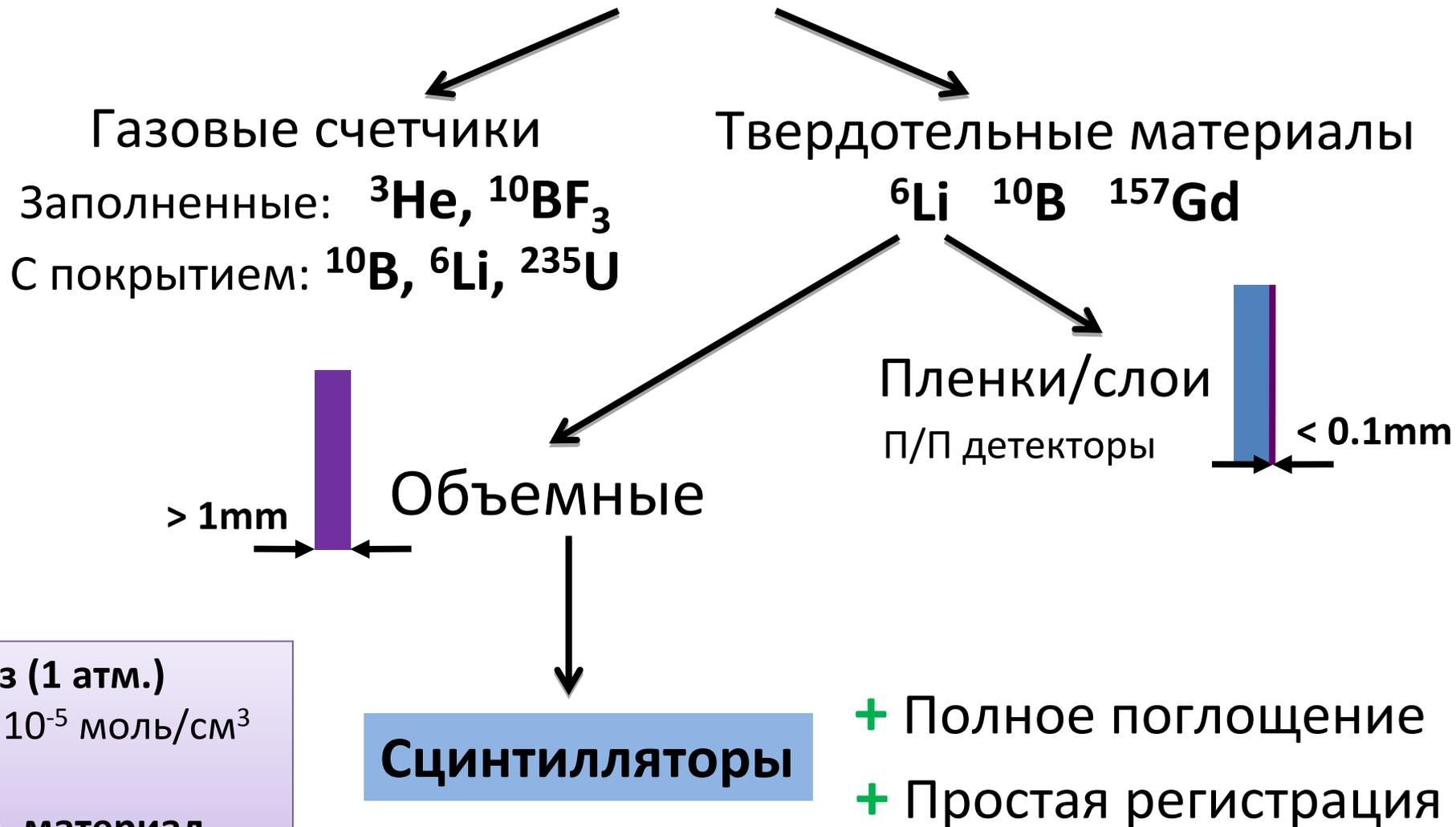
НО

взаимодействует с
ядрами

Для регистрации необходимо «превратить»
нейтрон в заряженную частицу:



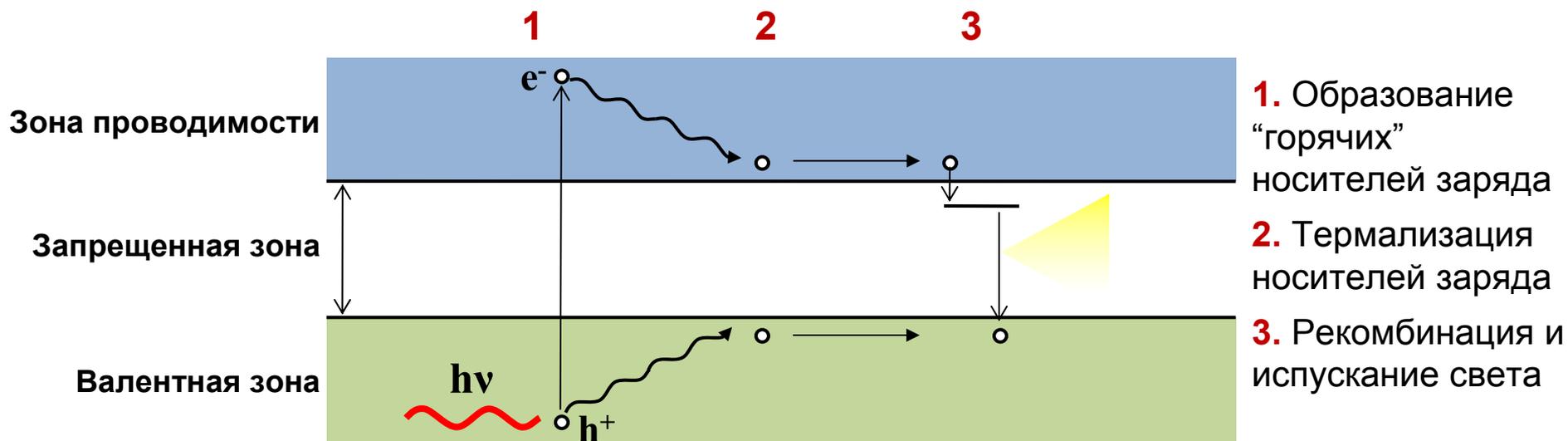
Выбор детектора тепловых нейтронов



Газ (1 атм.)
 $5 \cdot 10^{-5}$ моль/см³

Тв. материал
 $1-3 \cdot 10^{-2}$ моль/см³

Механизм сцинтилляции



Преимущества сцинтилляционных детекторов

Альтернативные детекторы	Недостатки
Полупроводниковый детектор	<ul style="list-style-type: none">- Высокая стоимость больших объемов- Низкая тормозная способность- Хрупкий материал
Газовый счетчик	<ul style="list-style-type: none">- Низкая тормозная способность

Требования к сцинтилляторам для регистрации нейтронов

Поглощающая способность	Низкая для γ -квантов, высокая для нейтронов с $E < 1$ эВ поглощение ~ 100 % на 3-5 мм толщины
Световыход	$> 5'000$ фотонов/нейтрон
Оптическая прозрачность	Обязательна
Максимум испускания	Согласующийся с чувствительностью фотодиодов и фотоэлектронных умножителей (400-600 нм)
Послесвечение	Менее 100 ppm через 1 мс после прекращения облучения
Кинетика сцинтилляции	< 100 нс
Радиационная стойкость	Средняя или высокая
Прочие требования	- Низкое самопоглощение (возможность изготовления детекторов с большим чувствительным объемом) - Температурная стабильность световыхода

Выбор состава сцинтиллятора

Классические монокристаллы:

NaI:Tl

LaBr₃:Ce

PbWO₄

Bi₄Ge₃O₁₂

Y₃Al₅O₁₂:Ce

Lu₂SiO₅:Ce

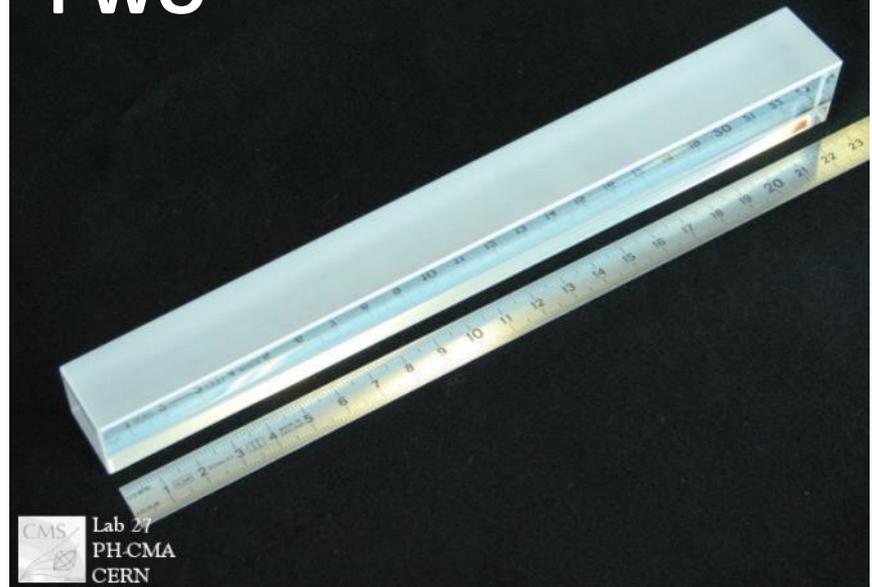
- нет Li / В

- тяжелые

- форма

- состав

PWO



Для эффективного разделения n/γ нужна легкая матрица

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	ГРУППЫ									
		А I В	А II В	А III В	А IV В	А V В	А VI В	А VII В	А VIII В	В	
1	1	1 H 1,0079 г/моль Водород						1 H 1,0079 г/моль Водород	2 He 4,00260 г/моль Гелий		
2	2	3 Li 6,941 г/моль Литий	4 Be 9,01218 г/моль Бериллий	5 B 10,81 г/моль Бор	6 C 12,011 г/моль Углерод	7 N 14,0067 г/моль Азот	8 O 15,9994 г/моль Кислород	9 F 18,9984 г/моль Фтор	10 Ne 20,179 г/моль Неон		
3	3	11 Na 22,9898 г/моль Натрий	12 Mg 24,305 г/моль Магний	13 Al 26,9815 г/моль Алюминий	14 Si 28,0855 г/моль Кремний	15 P 30,9738 г/моль Фосфор	16 S 32,06 г/моль Сера	17 Cl 35,453 г/моль Хлор	18 Ar 39,948 г/моль Аргон		

Керамика как материал для детектора нейтронов

Твердый неметаллический материал, полученный спеканием порошков



YAG:Ce



GYGAG:Ce



Fraunhofer IKTS

http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research_fields/materials/percusorkeramik/leuchtstoffe.html



Laurence Livermore National Lab

<http://spie.org/x42241.xml>

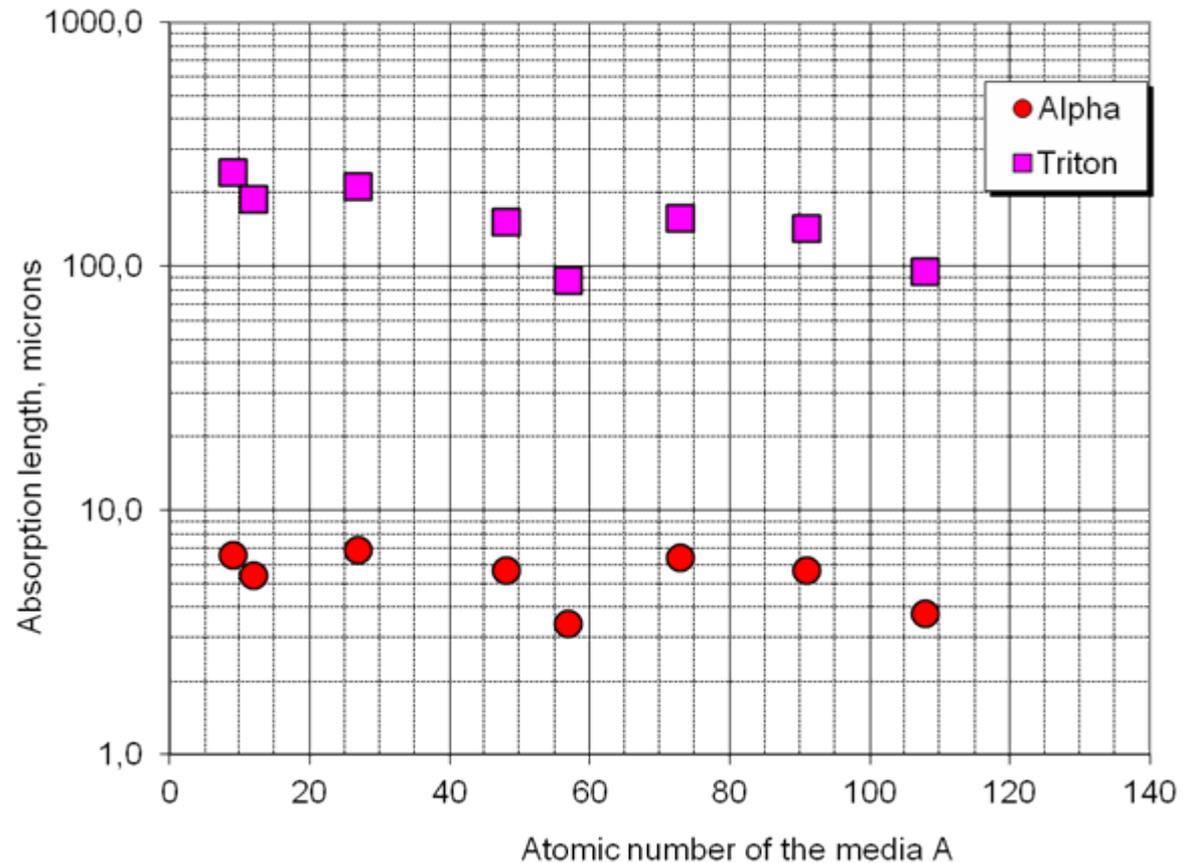
+ Может включать ^{157}Gd

- тяжелая

В чем преимущество материалов на ${}^6\text{Li}$?



	Q (MeV)	σ_{nA} (barn)
${}^3\text{He}$	0,764	5330
${}^6\text{Li}$	4,780	940
${}^{10}\text{B}$	2,792	3840
${}^{157}\text{Gd}$	γ	255000
${}^{235}\text{U}$	210	582



+ легкий

+ большая энергия

За счет большой длины свободного пробега тритона в материале повышается выход сцинтилляций на нейтрон

Выбор состава сцинтиллятора

Монокристаллы:

$\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ – цена, ограниченный размер

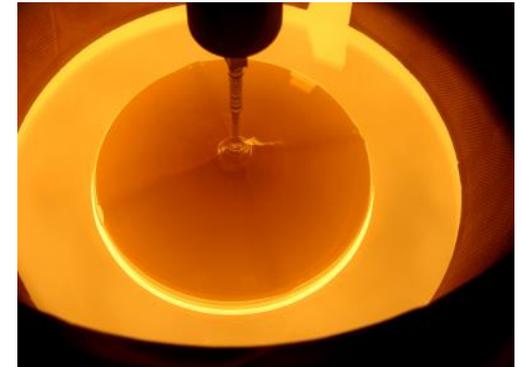
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}^{3+}$ – цена, ограниченный размер,
гигроскопичный

$\text{LiI}:\text{Eu}^{2+}$ – ограниченный размер, гигроскопичный,
 n/γ ($\rho = 4,1$)

Композиты:

$\text{ZnS}:\text{Ag}/^6\text{LiF}$ - непрозрачный, n/γ

Пластики с наполнителем - непрозрачный, n/γ
(^6Li или ^{10}B)



http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Chohralsky_Silicon_Crystal_Growth.jpg
Автор: Qwazzy

Single crystal Vs glass scintillators

+ Высокий выход
сцинтилляций



+ Дешевое производство
(относительно кристаллов)
+ Гибкость составов
+ Гибкость формы

Кристалл



Louise Oriole
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cut_Ruby.jpg

- Дорогие в
производстве
- Ограниченный выбор

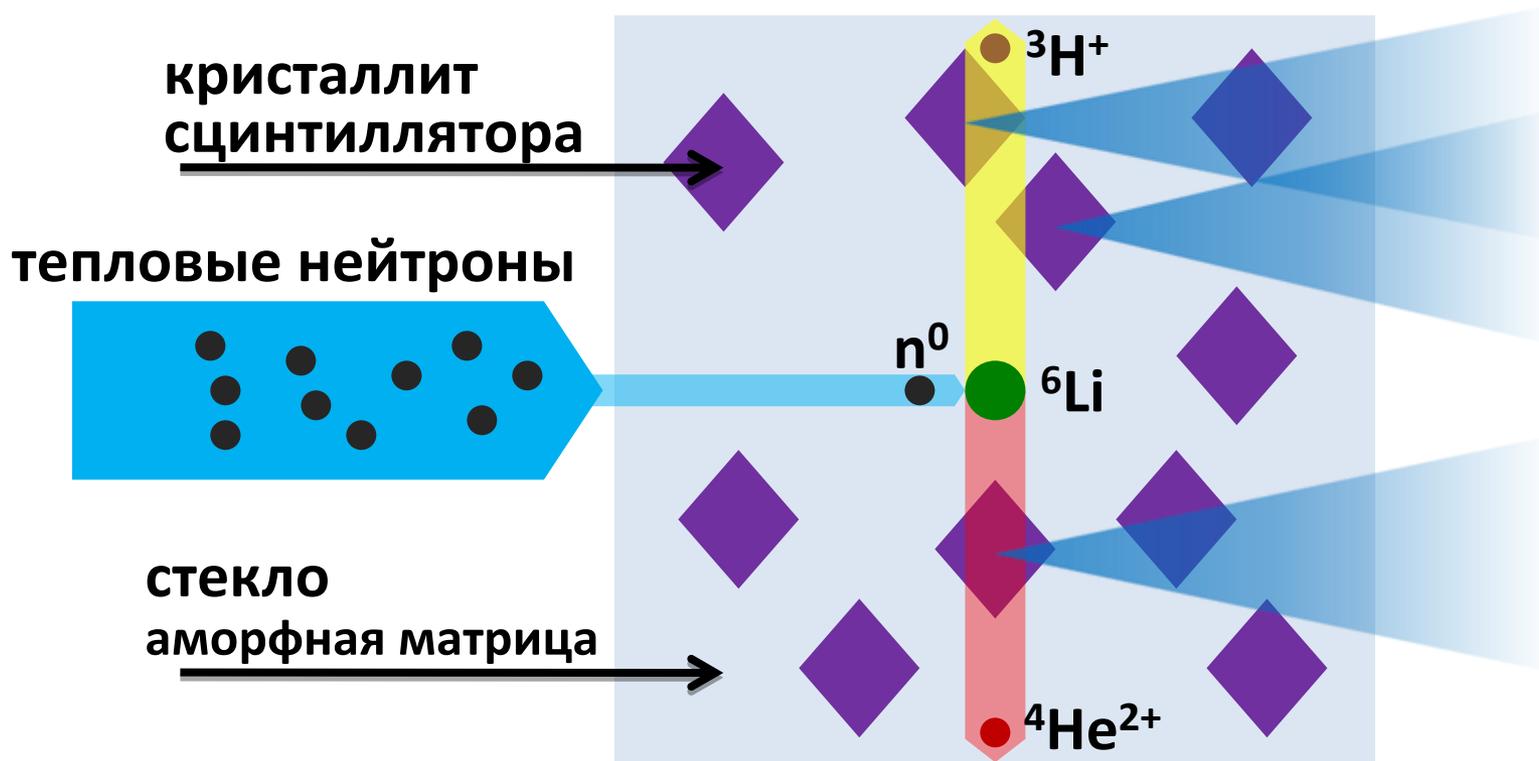
Стекл



Photo source:
stockphoto43.com

- Ограниченный выход
сцинтилляций
(следствие затрудненного
перемещения экситонов)

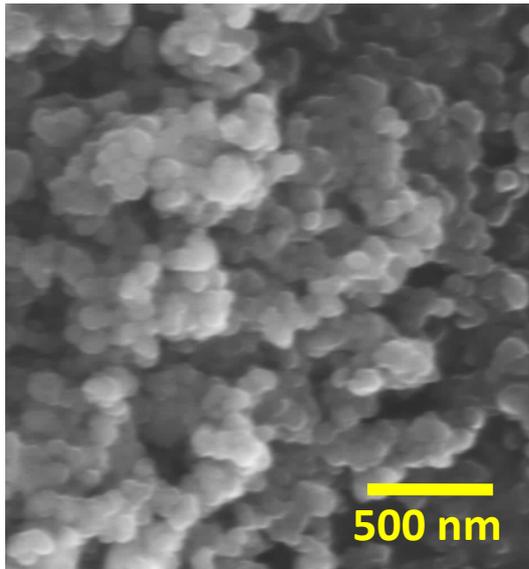
Стеклокомпозитный сцинтиллятор – совмещение преимуществ стекла и кристалла



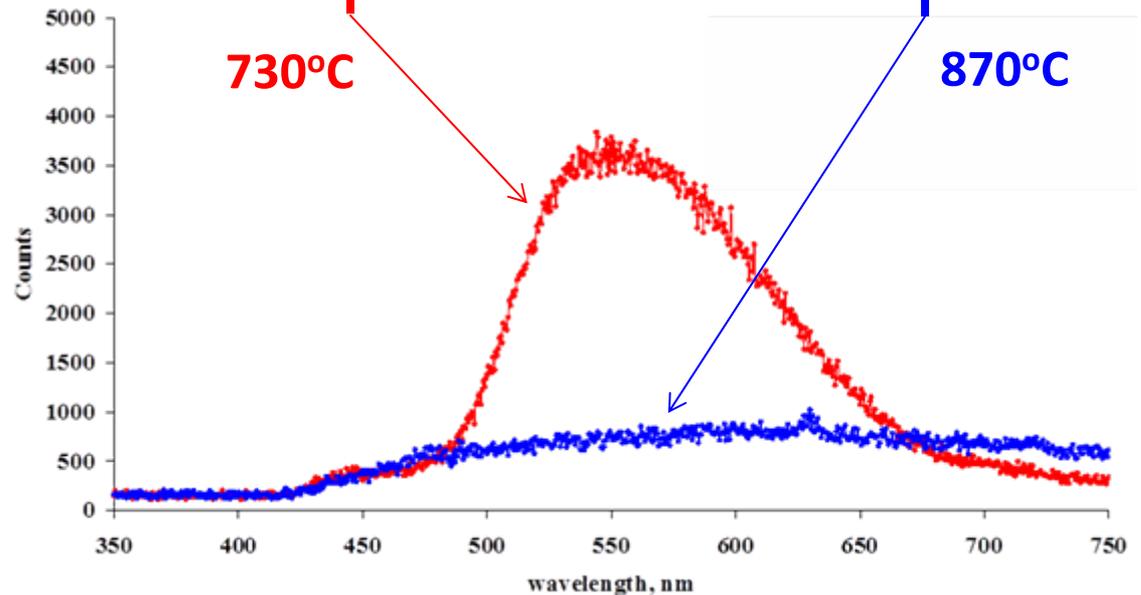
Прямолинейный подход

Смешение нанопорошка YAG:Ce с Li/V – содержащим стеклом

Порошок YAG:Ce



Градиентная плавка



M.V. Korjik, G.A. Dosovitskiy
NSS/MIC 2010, Knoxville

Photoluminescence, Excitation 350 nm

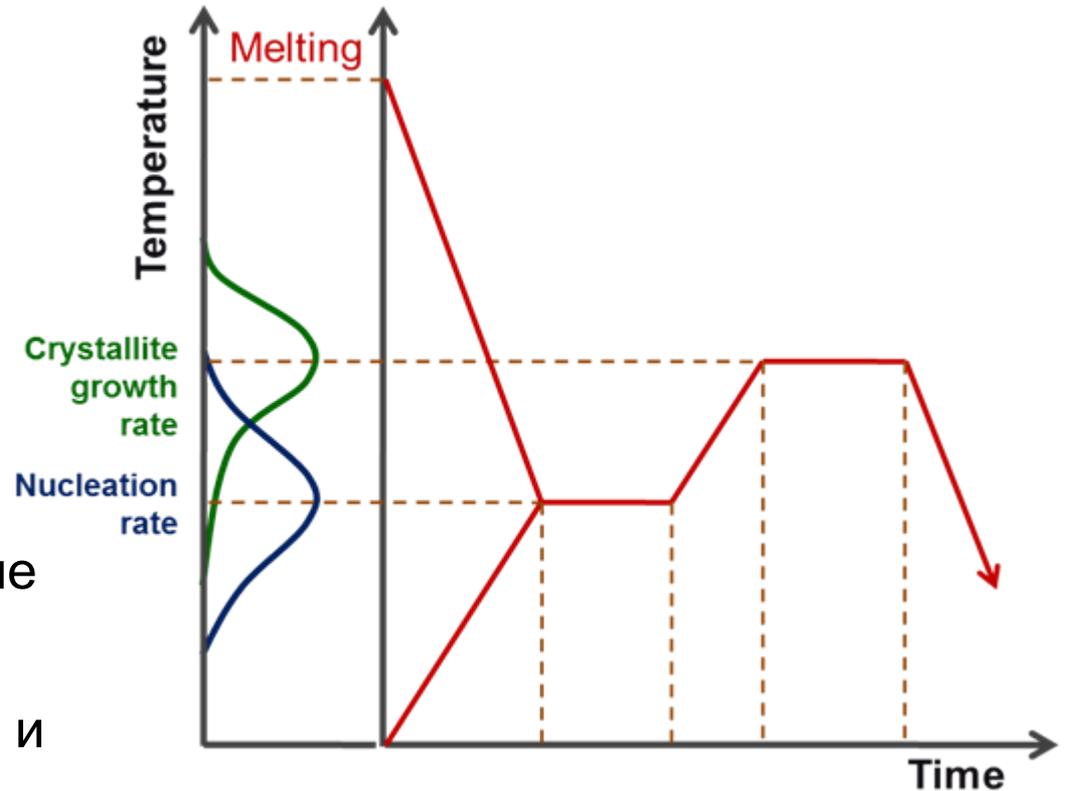
Получение композита кристаллизацией стекла

Классическая технология ситаллов

1. Плавка стекла
(состав)

2. Кристаллизация
(температурный режим)

- + Равномерное распределение кристаллитов
- + Можно управлять размером и количеством кристаллитов
- + Технология производства близка к стекольной

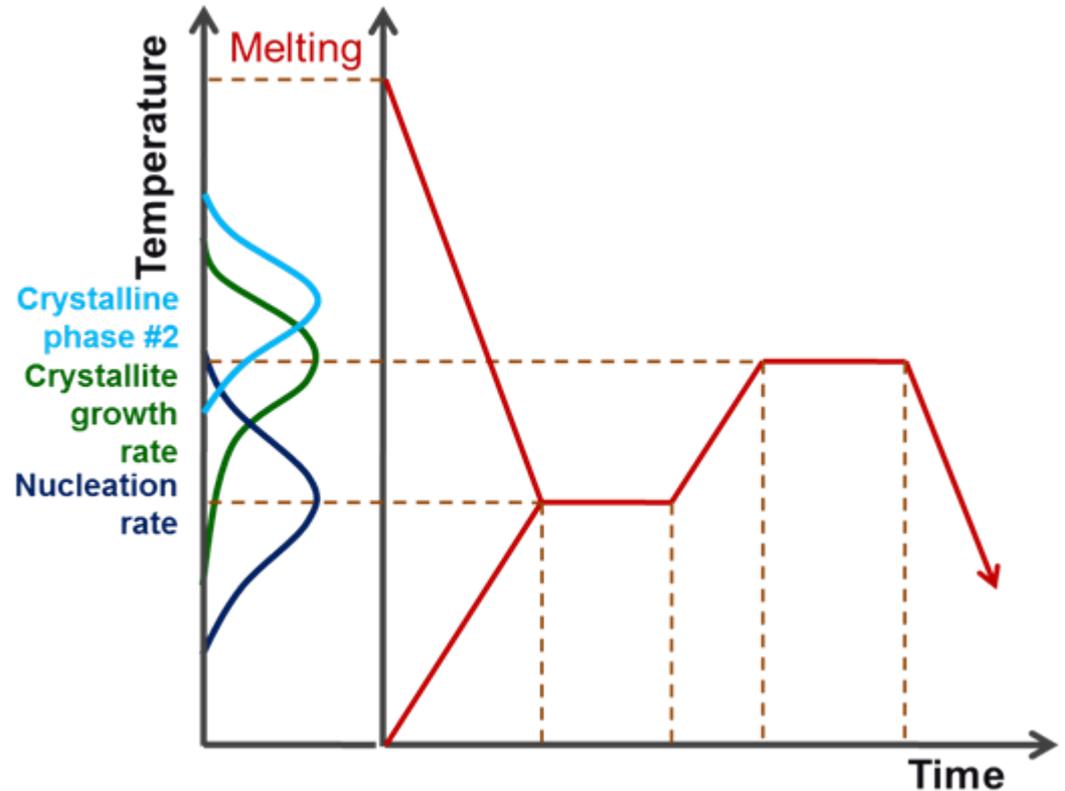


Получение композита кристаллизацией стекла

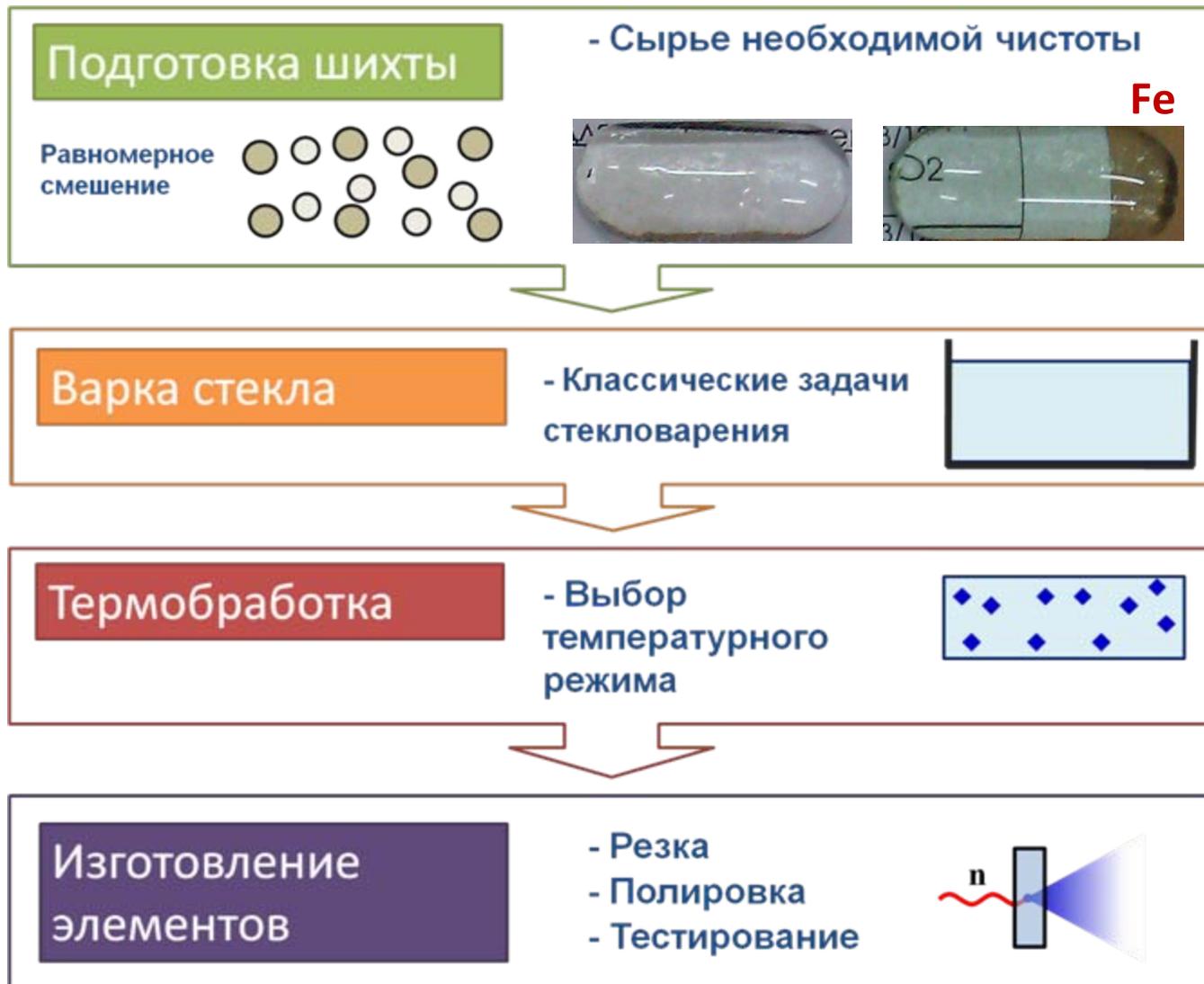
Классическая технология ситаллов

Нежелательные явления:

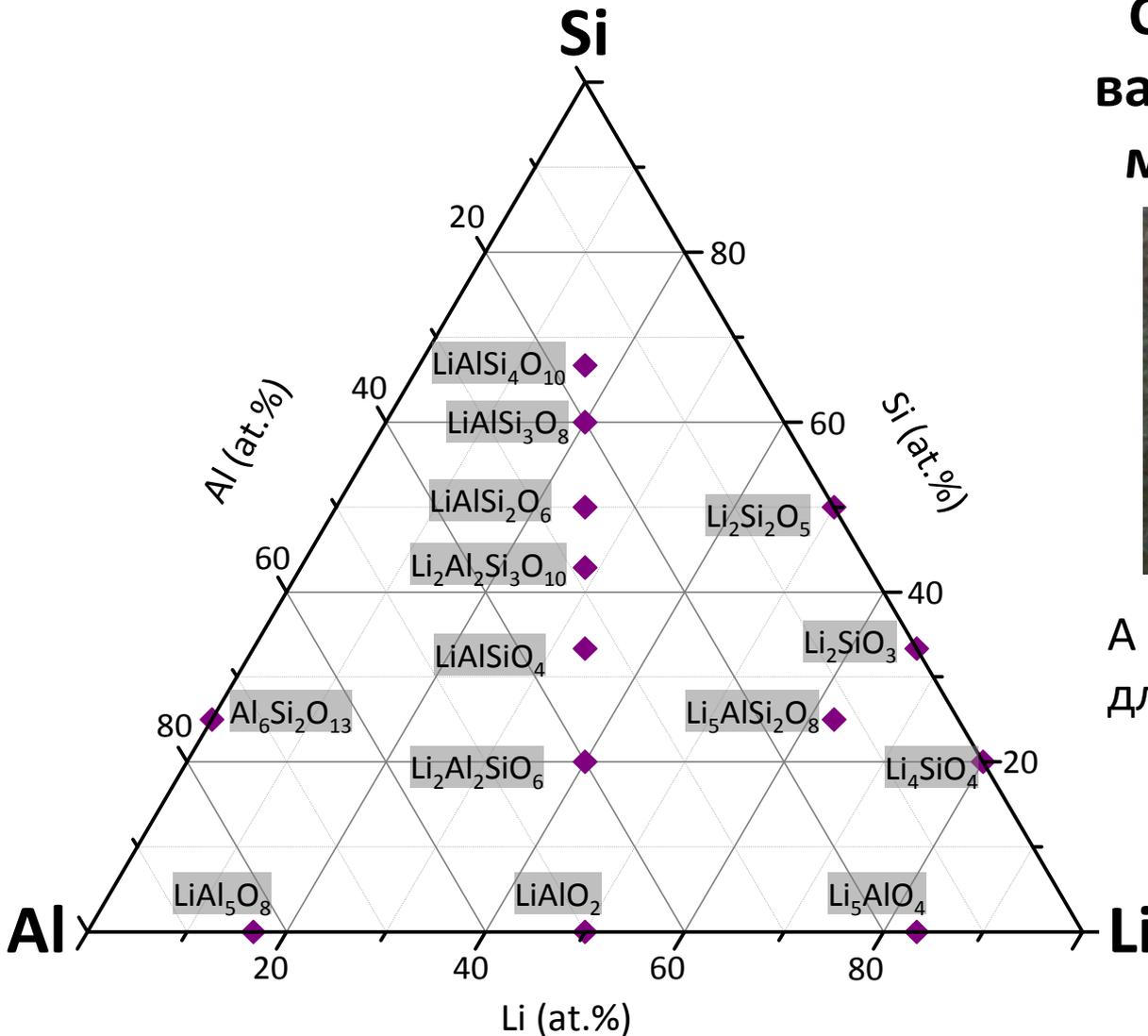
- Крупные частицы
- Посторонние фазы



Основные стадии технологического процесса



Стеклообразующая система $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (LAS)



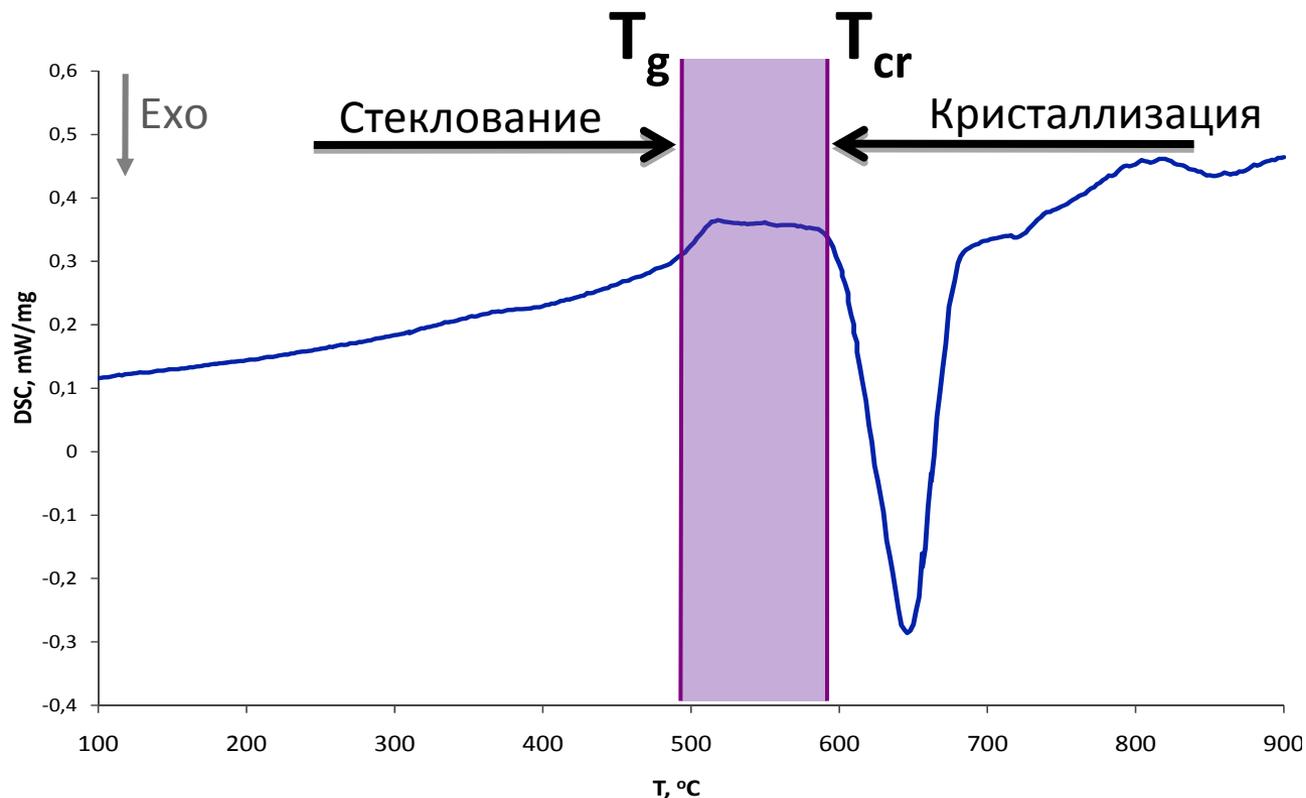
Стеклокерамика LAS –
варочные панели, самое
массовое применение



А кроме того – электролиты
для Li-ионных аккумуляторов

GS20 – коммерческое п-
чувствительное стекло в
системе LAS (AST, SG)

Выбор температурного режима



**ДТА
исходного
стекла**



**Правильные условия получения –
прозрачный материал**

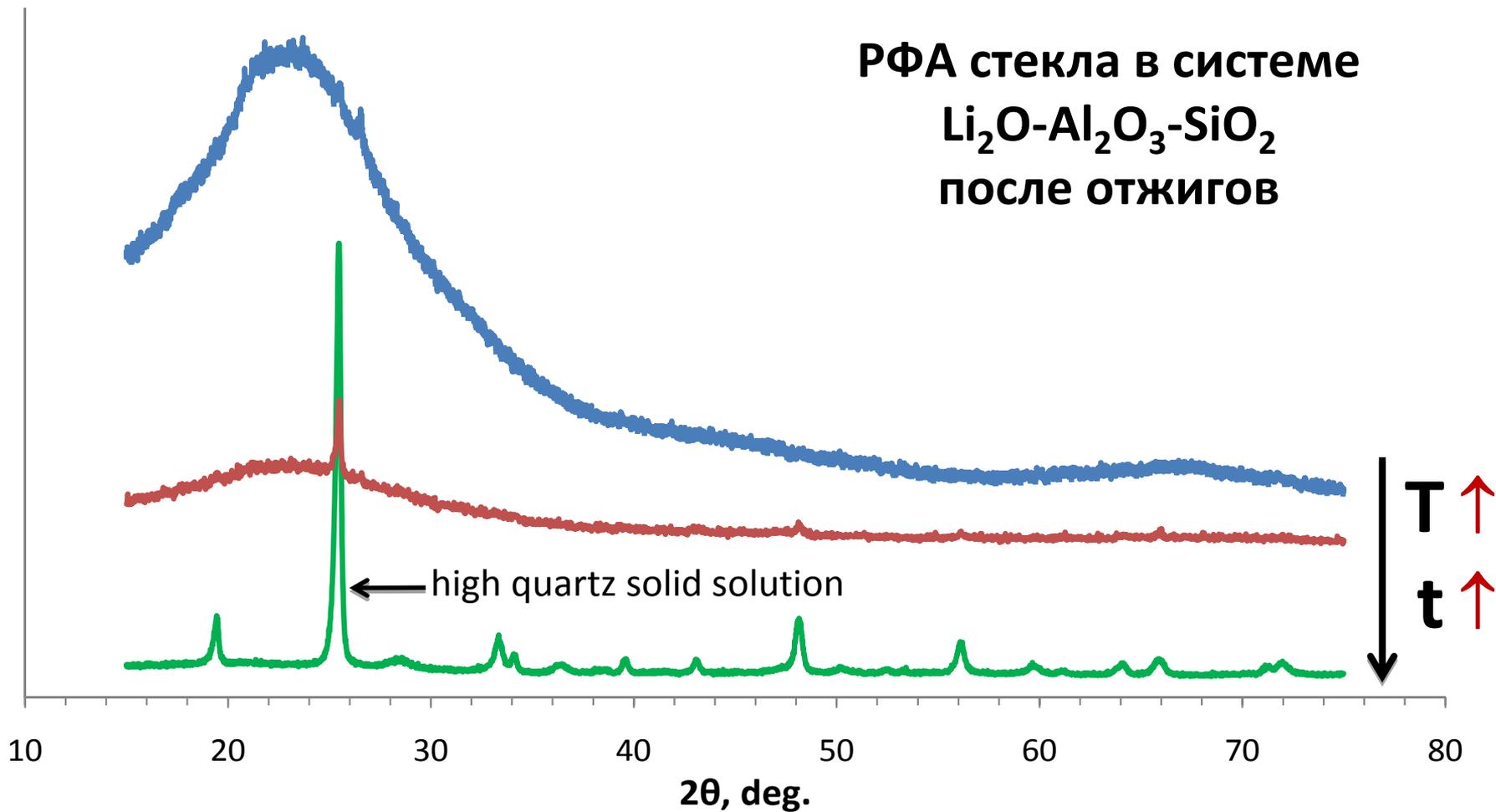


**Перегрев ведет к опалесценции
или кристаллизации**

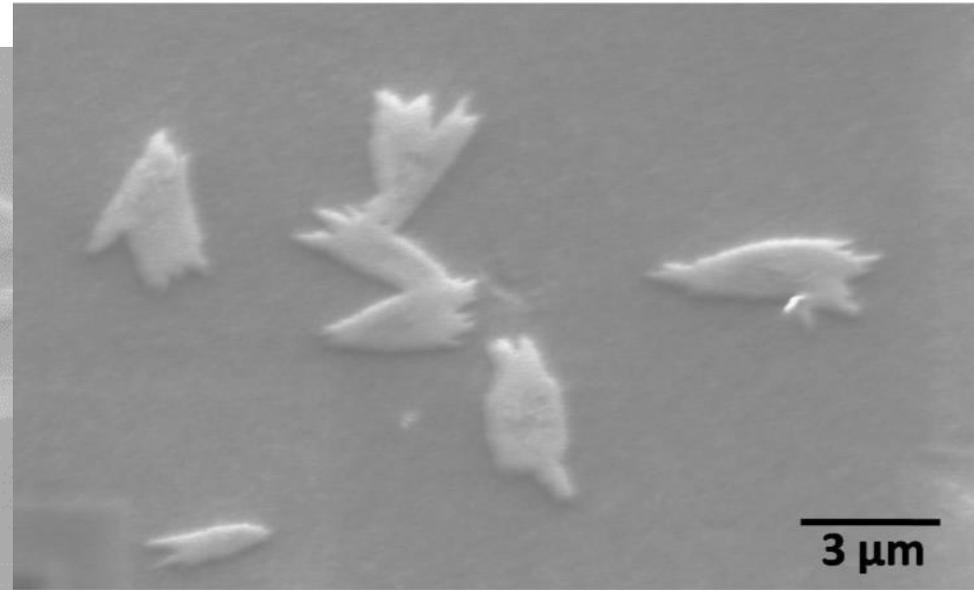
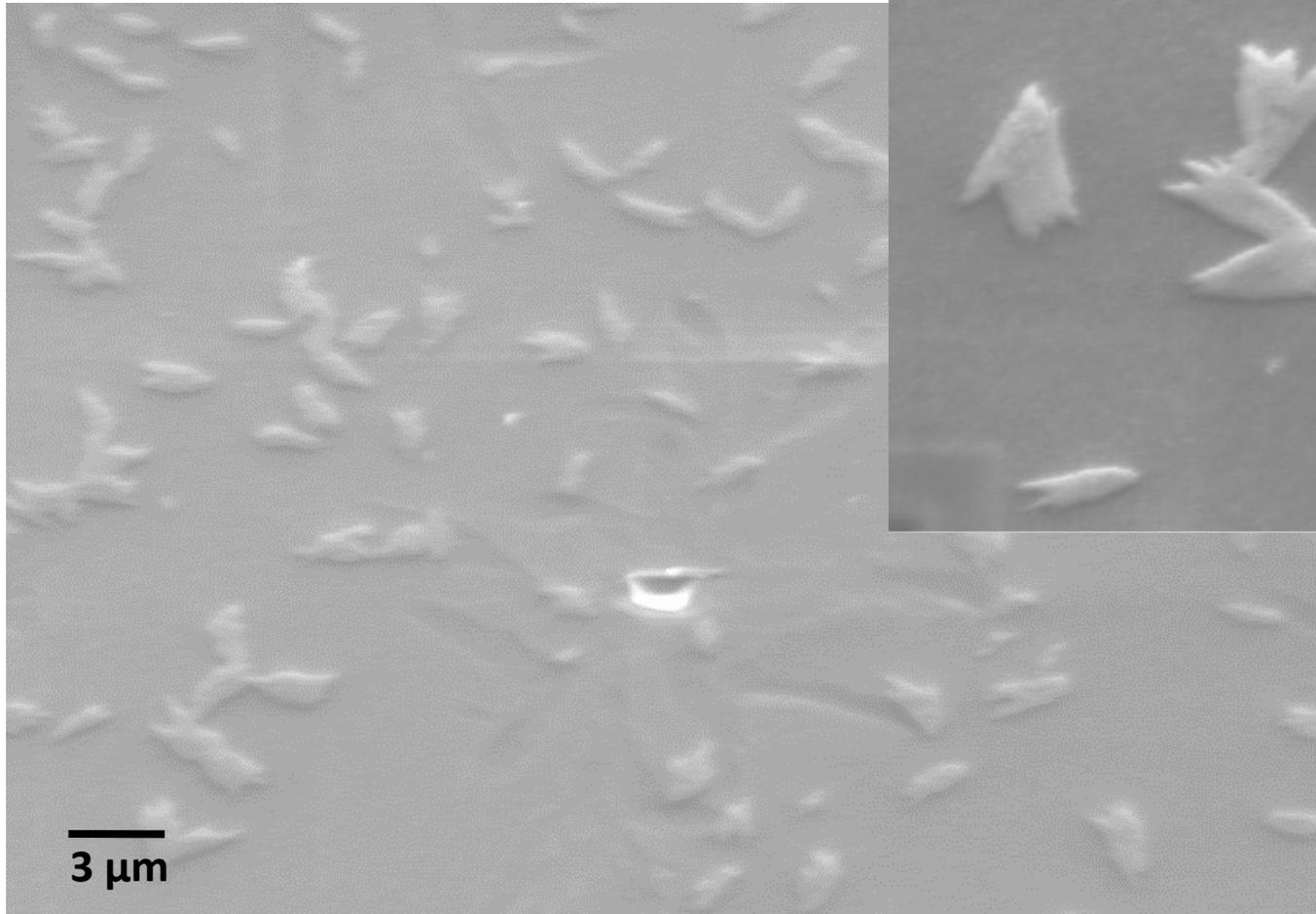


Кристаллизация стекла

РФА стекла в системе
 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$
после отжига



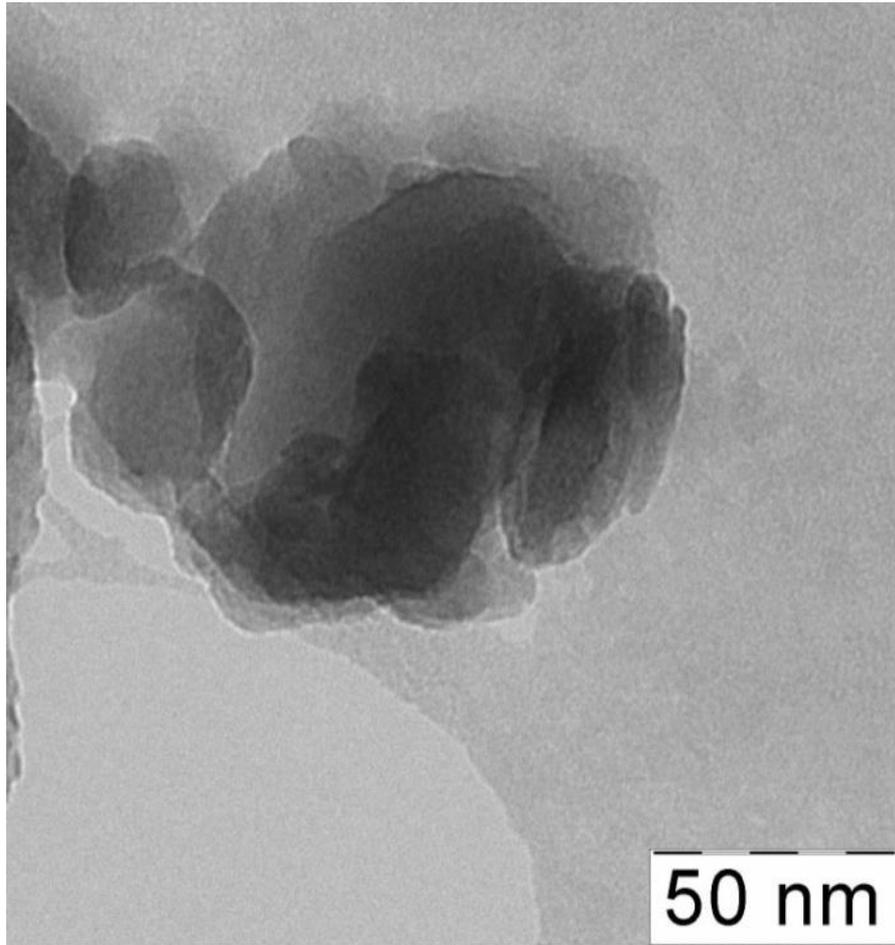
Микрокристаллические включения



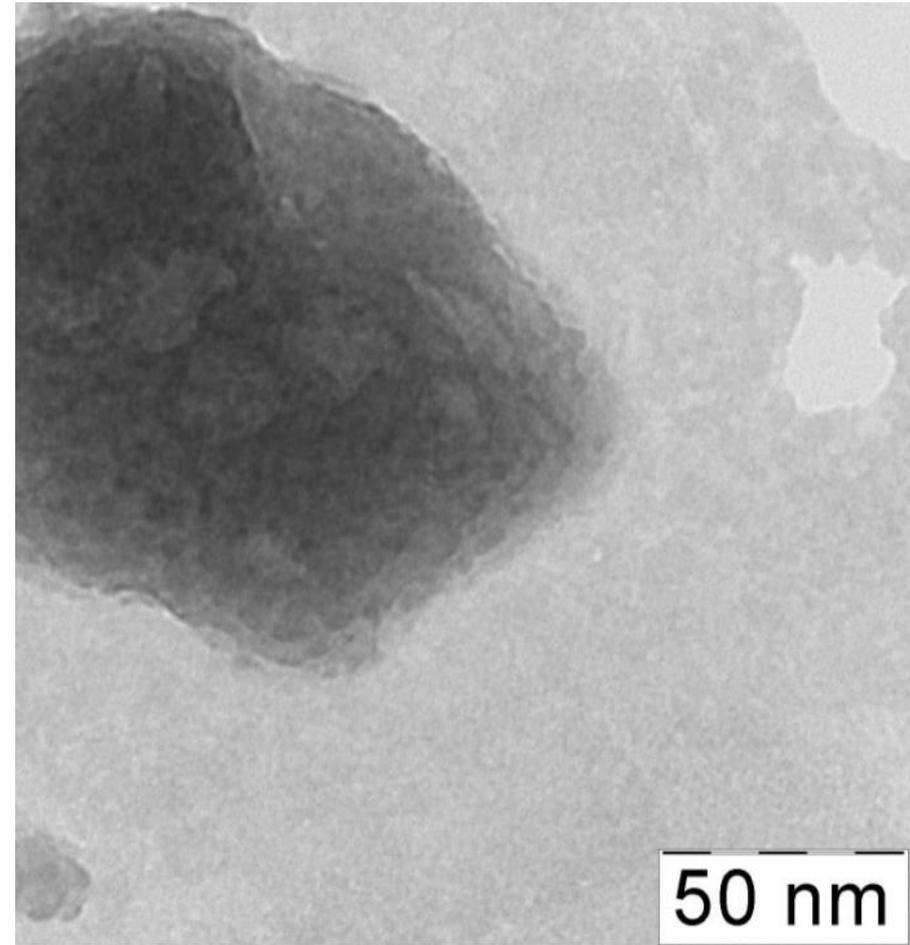
Перегрев ведет к образованию включений >1 мкм и опалесценции

Нанокристаллические включения в аморфной матрице

Аморфный образец



Нанокристаллиты

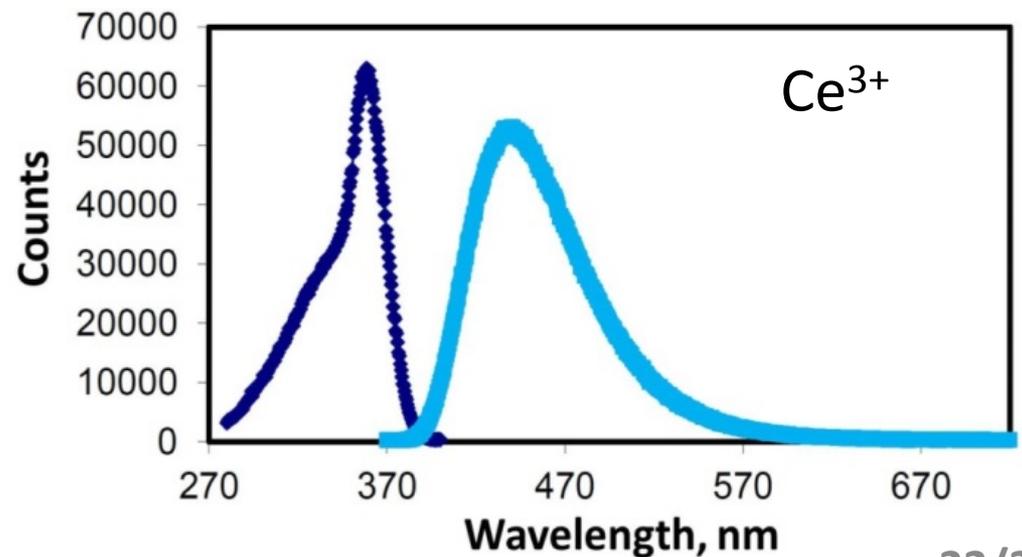
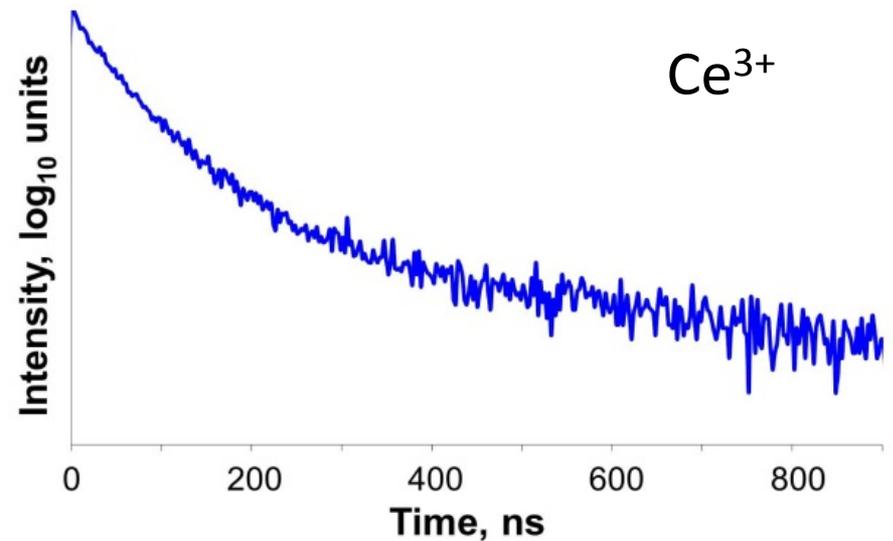


Сцинтилляционные характеристики

Константа затухания –
~70 нс
(γ -сцинтилляция)

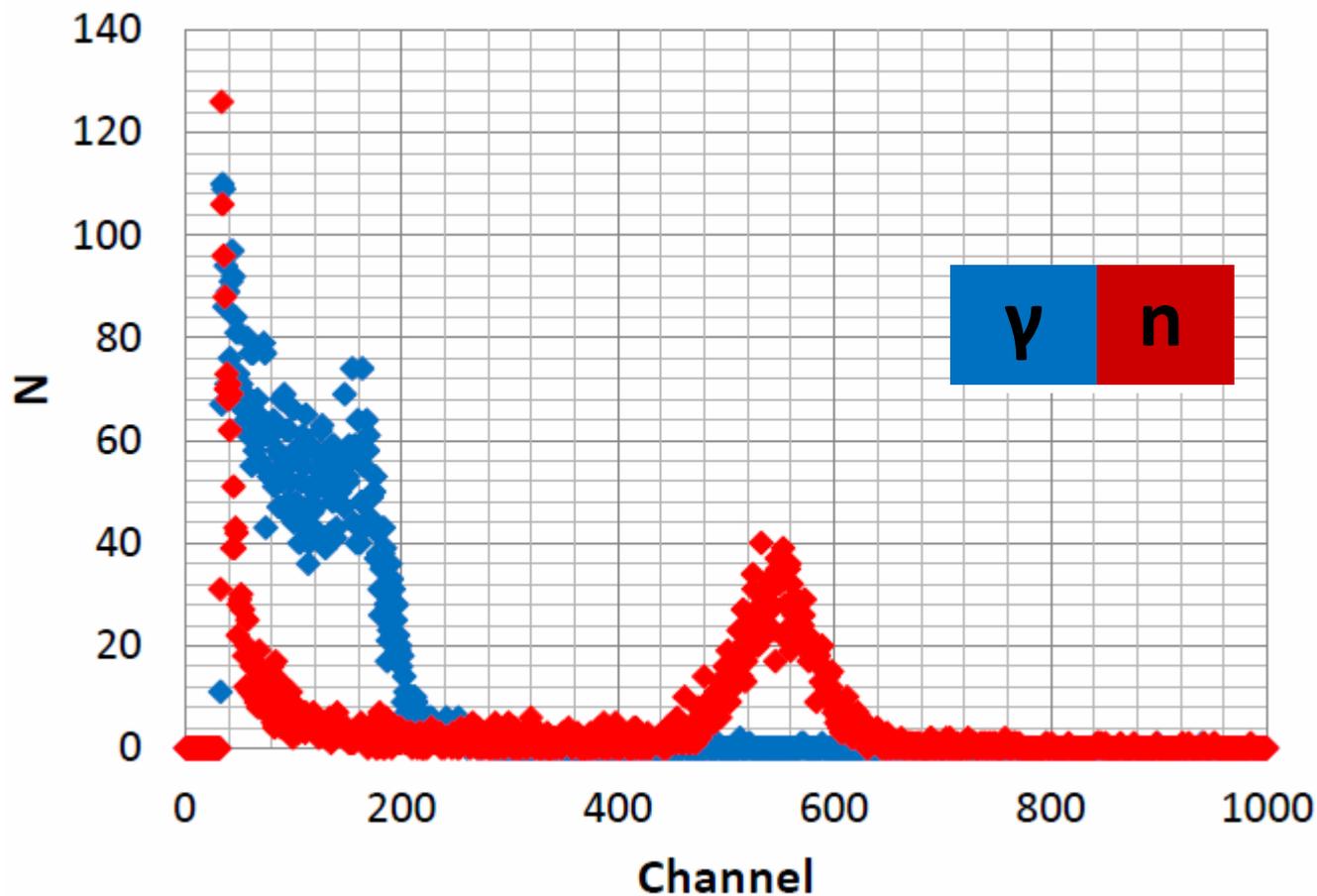


Максимум испускания –
~430 нм
(Фотолюминесценция)



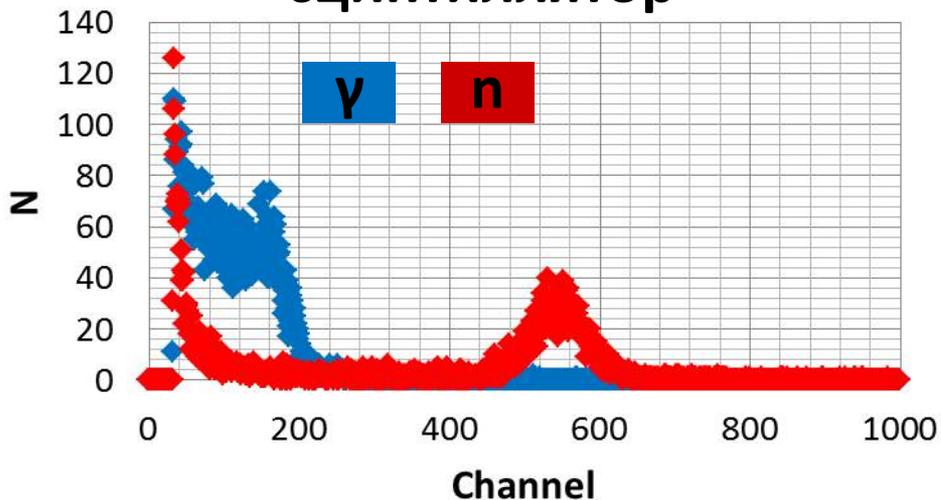
Сцинтилляционные характеристики

Амплитудный спектр, источники:
 ^{137}Cs (γ -излучение) и $^{241}\text{Am-Be}$ (тепловые нейтроны)

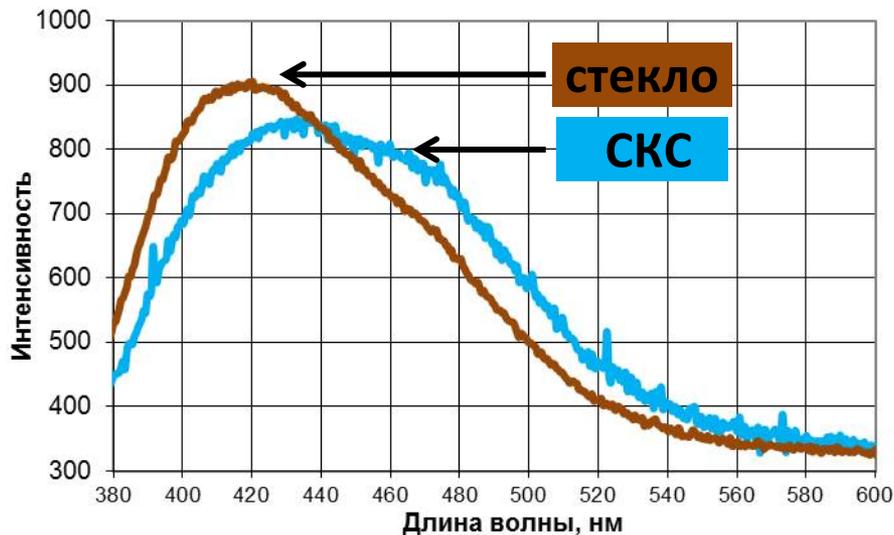
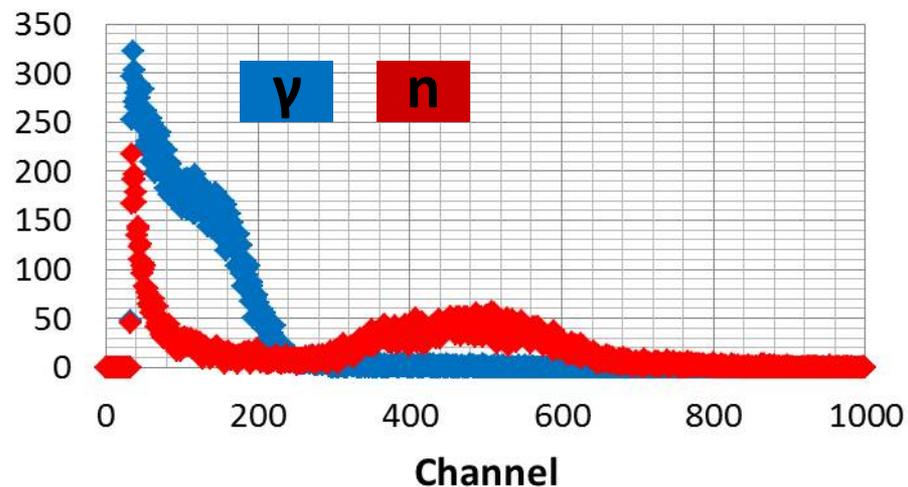


Сравнение со сцинтилляционным стеклом

Стеклокомпозитный сцинтиллятор

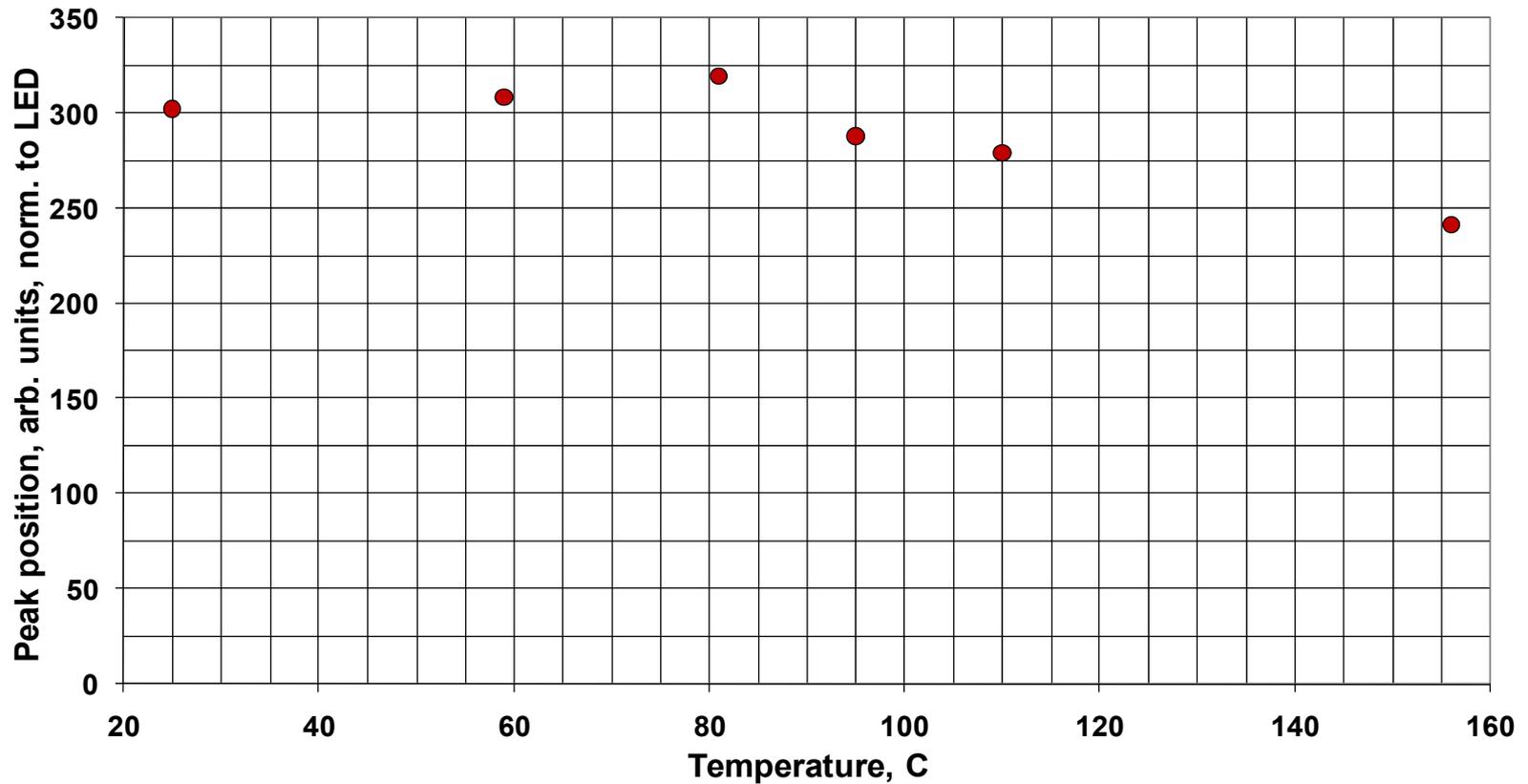


Сцинтиллирующее стекло



Температурная стабильность

α излучение от источника Pu-238
считывание ФЭУ



Эффективность поглощения нейтронов

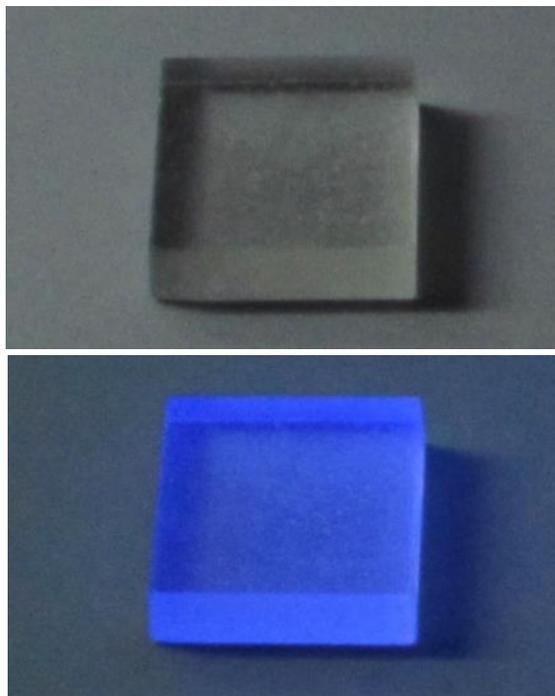
Распределение поглощения нейтронов по толщине (моделирование на GEANT4)



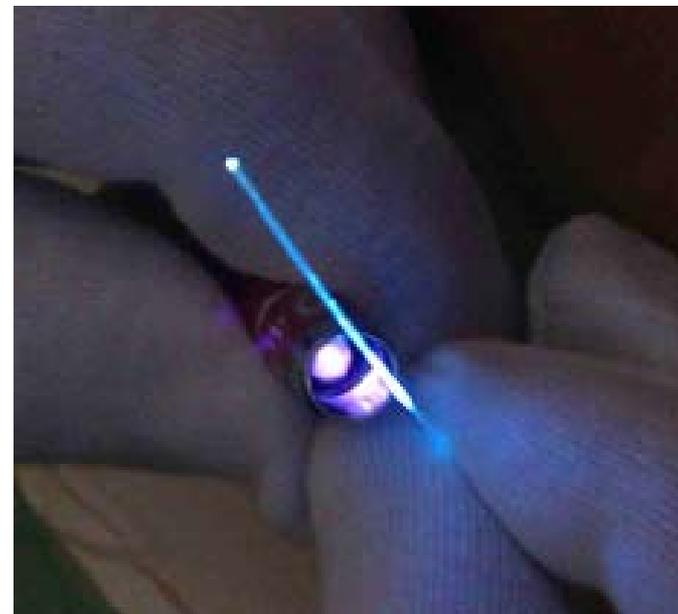
Размер и форма сцинтилляционных элементов

Пластины

Опробовано:



Оптоволокно

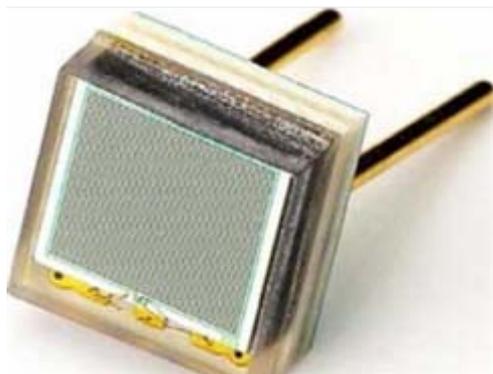


Были изготовлены образцы площадью 1-10 см²

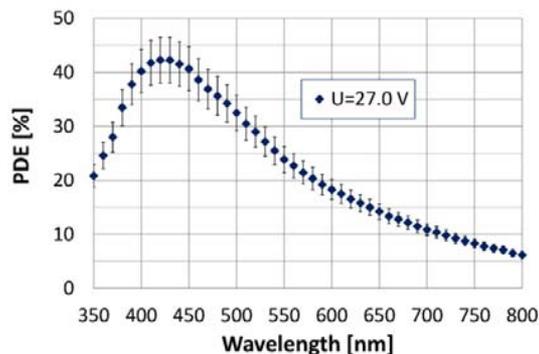
При необходимости можно увеличить площадь образцов

Детекторы на основе Si-ФЭУ

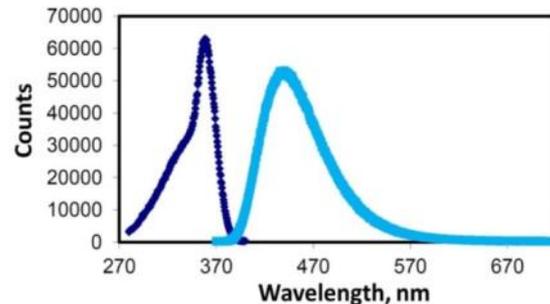
SiPM_PM3350_Trench, КЕТЕК



Кривая спектральной чувствительности Si-ФЭУ



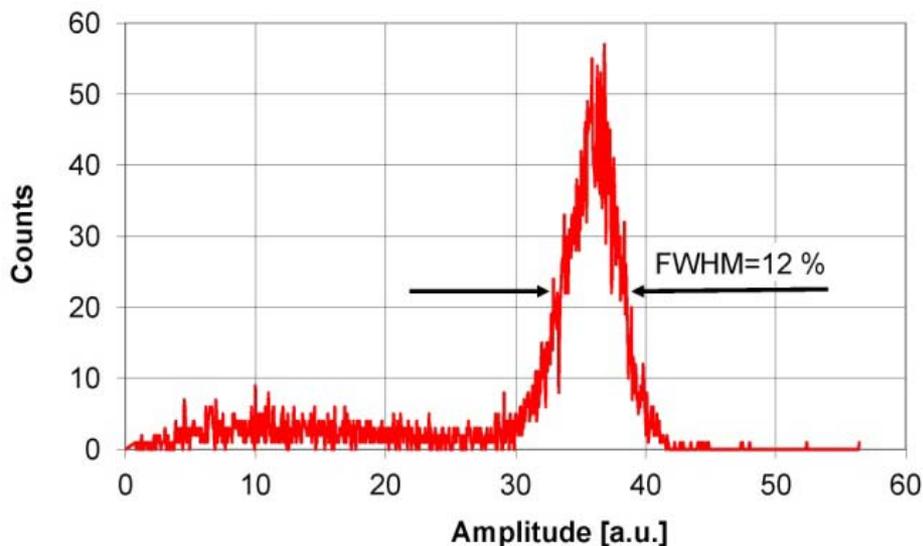
Спектр люминесценции СКС



Размер единичного Si-ФЭУ - от 3x3 мм²

Амплитудный спектр,
детектор СКС + Si-ФЭУ

источник ²⁴¹Am-Be



Подведение итогов

- Твердые сцинтилляторы могут быть заменой ^3He для регистрации тепловых нейтронов
- Материалы на основе ^6Li имеют важные преимущества перед более тяжелыми изотопами
- Стеклокомпозитные сцинтилляторы могут быть успешным совмещением преимуществ стекол и монокристаллов
- Есть разработки материалов этого класса с многообещающими характеристиками

Направления для возможного дальнейшего улучшения

Световыход

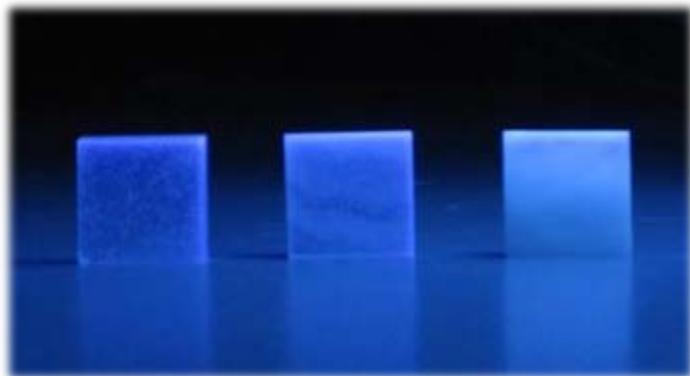
Производительность технологии

Детекторные системы

Спасибо за внимание!

Продолжить общение
можно у постера

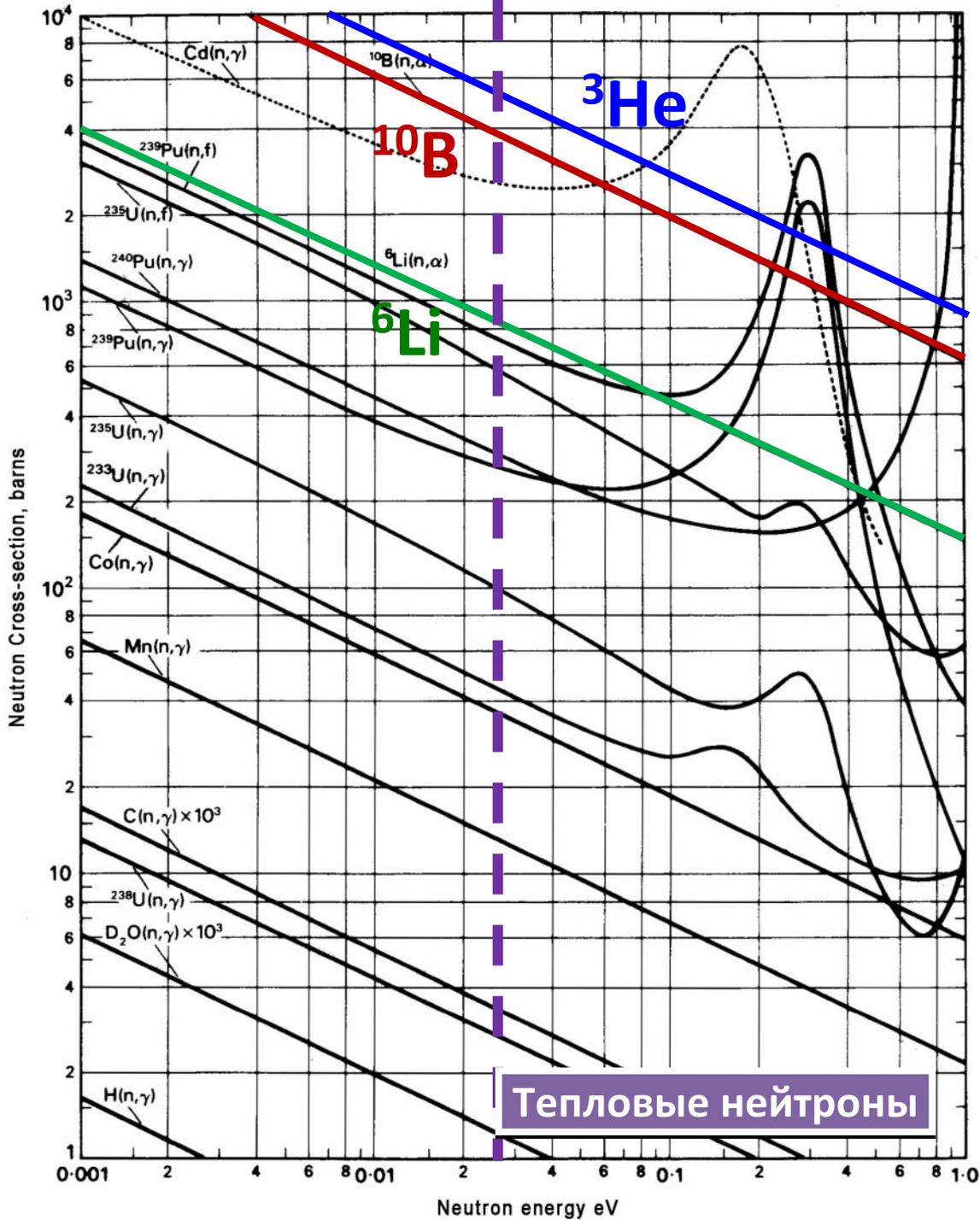
Секция 3, Четверг 13 марта



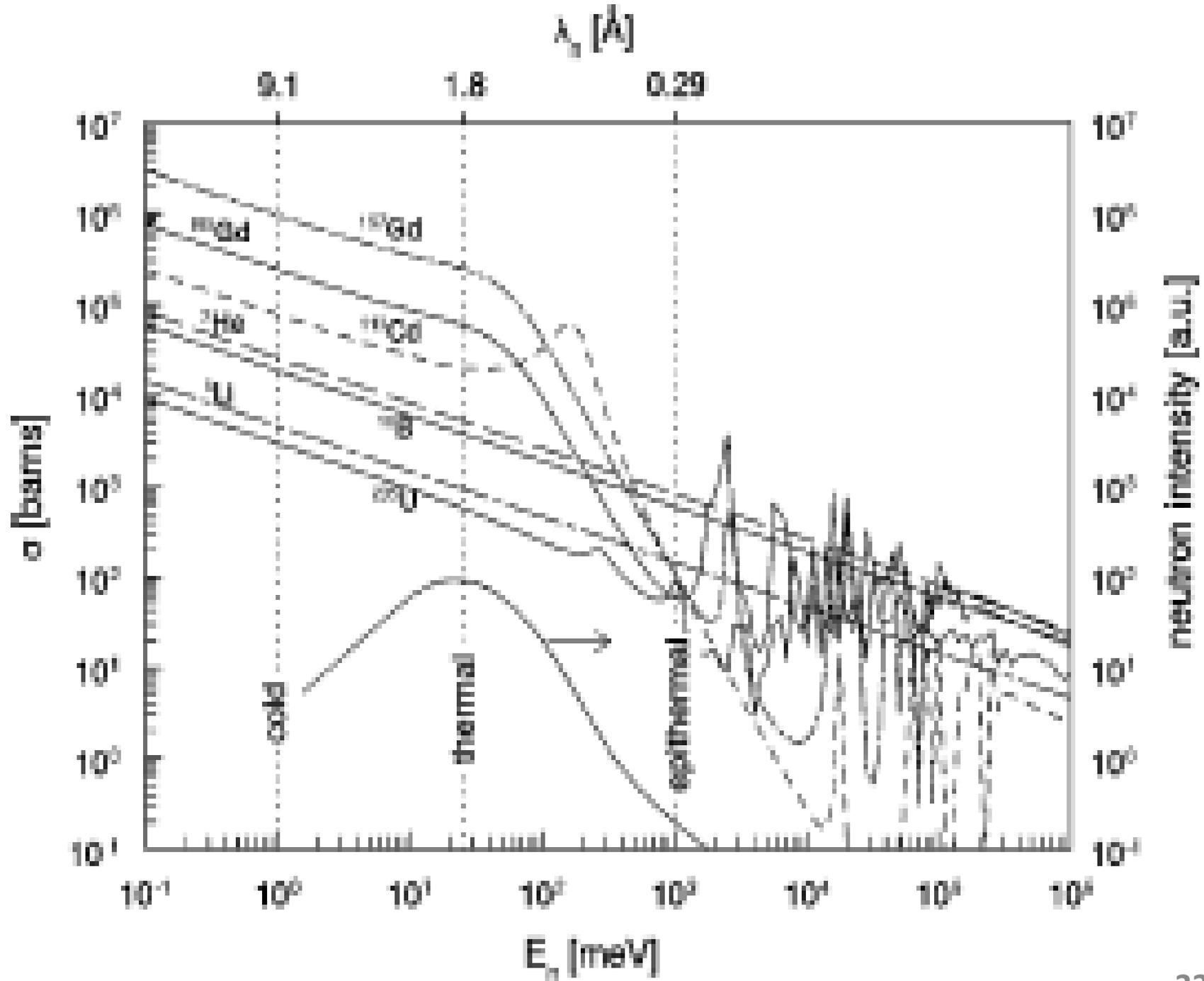

NEOSCINT

neoscint@gmail.com

+7-916-117-32-20



	Q (MeV)	σ_{nA} (barn)
^3He	0,764	5330
^6Li	4,780	940
^{10}B	2,792	3840
^{157}Gd	γ	255000
^{235}U	210	582



Classic scintillators

	PWO	BGO	BSO	YAG:Ce	LuAG:Ce	YAP:Ce	YAP:Pr	Lu ₂ Si ₂ O ₇ :Ce	Lu ₂ SiO ₅ :Ce
LY , ph/MeV	100	8200	1200	11 000	14 000	16 200	7050	30 000	27 000
τ_{sc} , ns	6	300	100	70	100	30	13.3	30	40
λ_{max} , nm	420	505	480	550	520	347	260, 295	380	420
ρ , g/cm ³	8.28	7.13	7.12	4.55	6.7	5.35	5.35	6.23	7.4
Z_{eff}	75.6	75.2	74.4	32.6	62.9	32	32	64.4	66