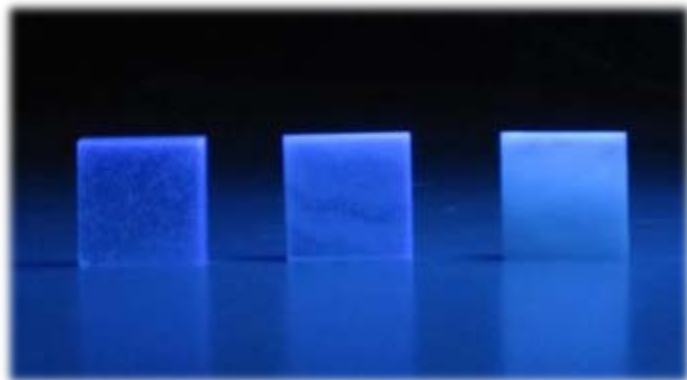


# Альтернатива He-3: детекторы нейтронов на основе новых стеклокомпозитных сцинтилляторов

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



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

# Применения нейтронных детекторов

## Известные применения

### Исследования



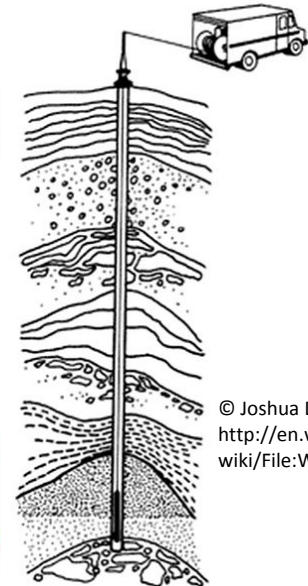
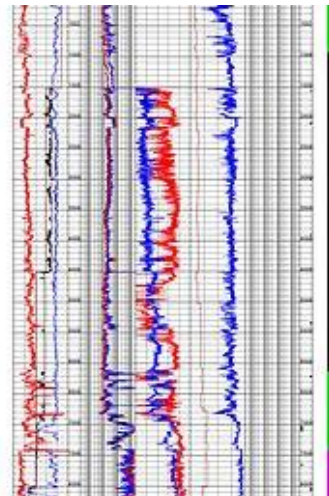
## Обнаружение делящихся веществ



## Перспективные применения

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

## Георазведка



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

# Как детектировать нейтрон?

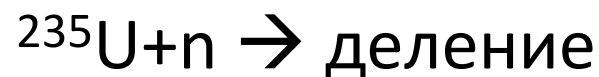


Не взаимодействует  
с электронными  
оболочками

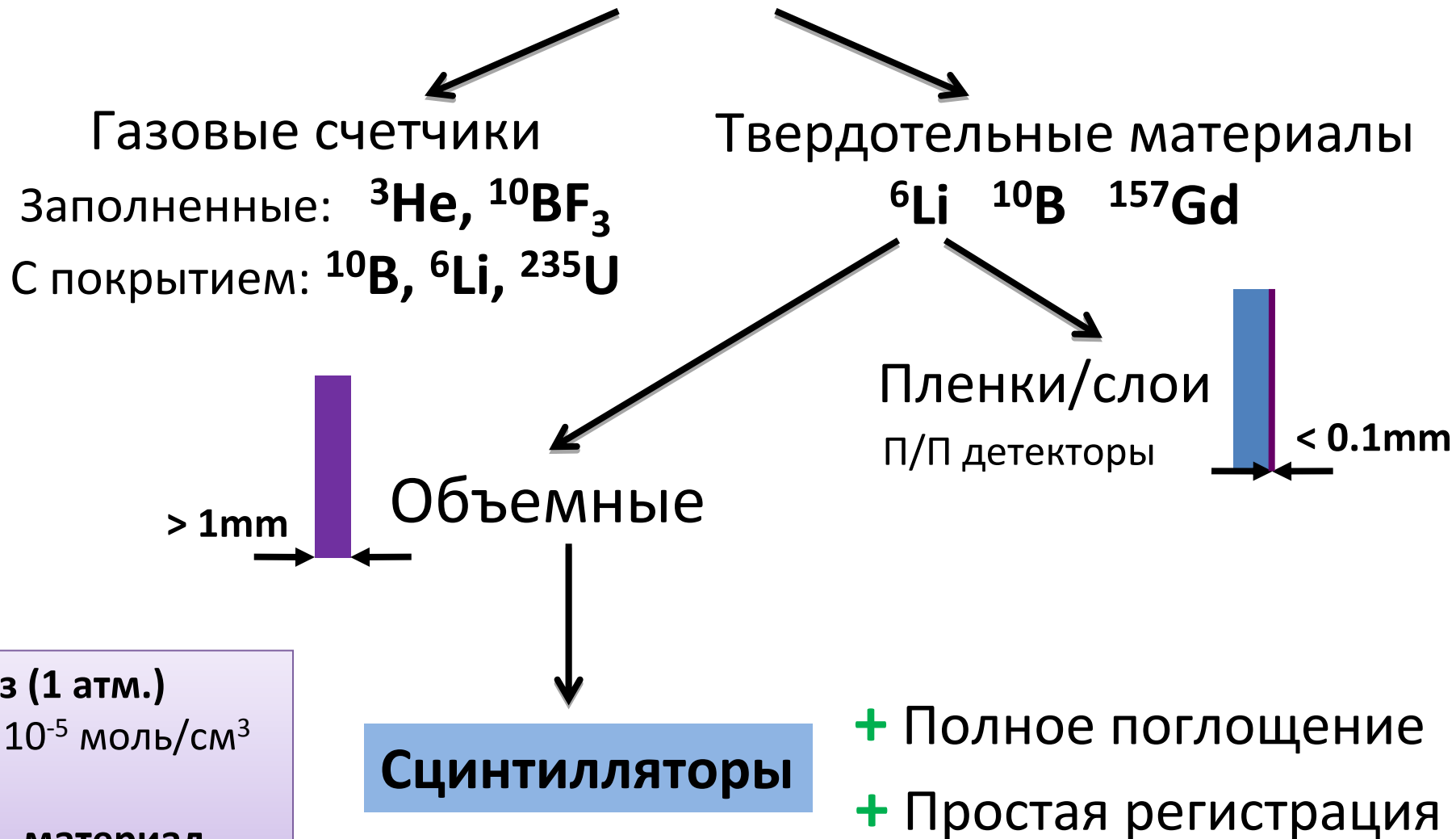
НО

взаимодействует с  
ядрами

Для регистрации необходимо «превратить»  
нейтрон в заряженную частицу:



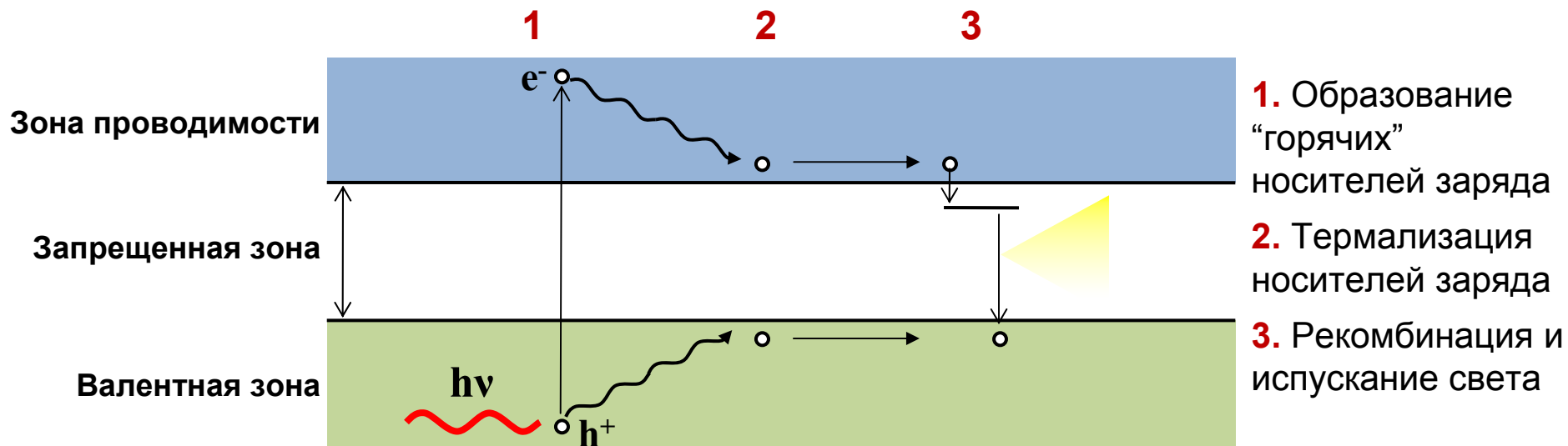
# Выбор детектора тепловых нейтронов



Газ (1 атм.)  
 $5 \cdot 10^{-5}$  моль/см<sup>3</sup>

Тв. материал  
 $1-3 \cdot 10^{-2}$  моль/см<sup>3</sup>

# Механизм сцинтилляции



## Преимущества сцинтилляционных детекторов

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

# Требования к сцинтилляторам для регистрации нейтронов

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

# Выбор состава сцинтиллятора

Классические монокристаллы:

NaI:Tl

LaBr<sub>3</sub>:Ce

PbWO<sub>4</sub>

Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>

Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce

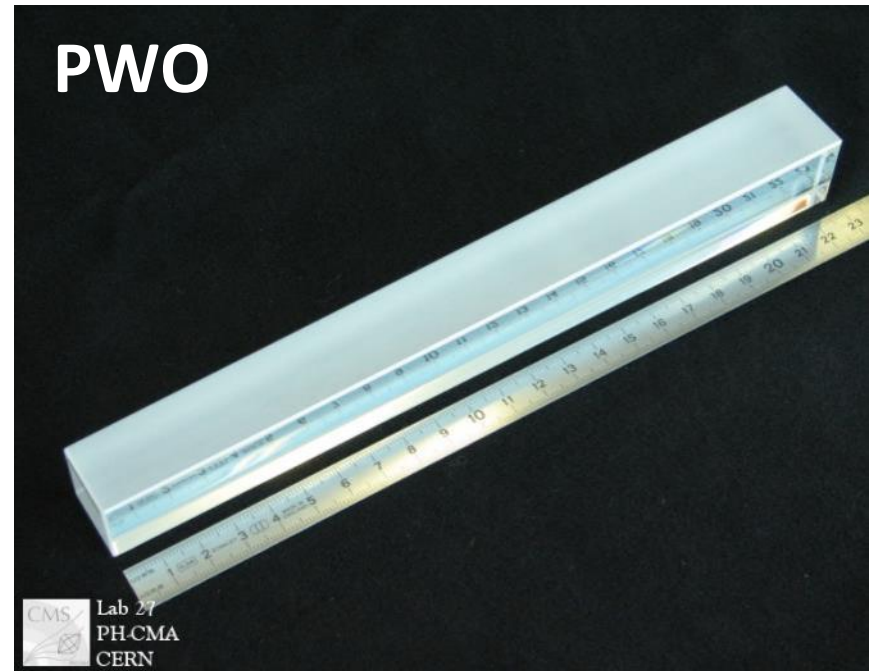
Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Ce

- нет Li / В

- тяжелые

- форма

- состав



Для эффективного разделения  $n/\gamma$  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](http://www.ikts.fraunhofer.de/en/research_fields/materials/percusorkeramik/leuchtstoffe.html)



Laurence Livermore National Lab

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

+ Может включать  $^{157}\text{Gd}$

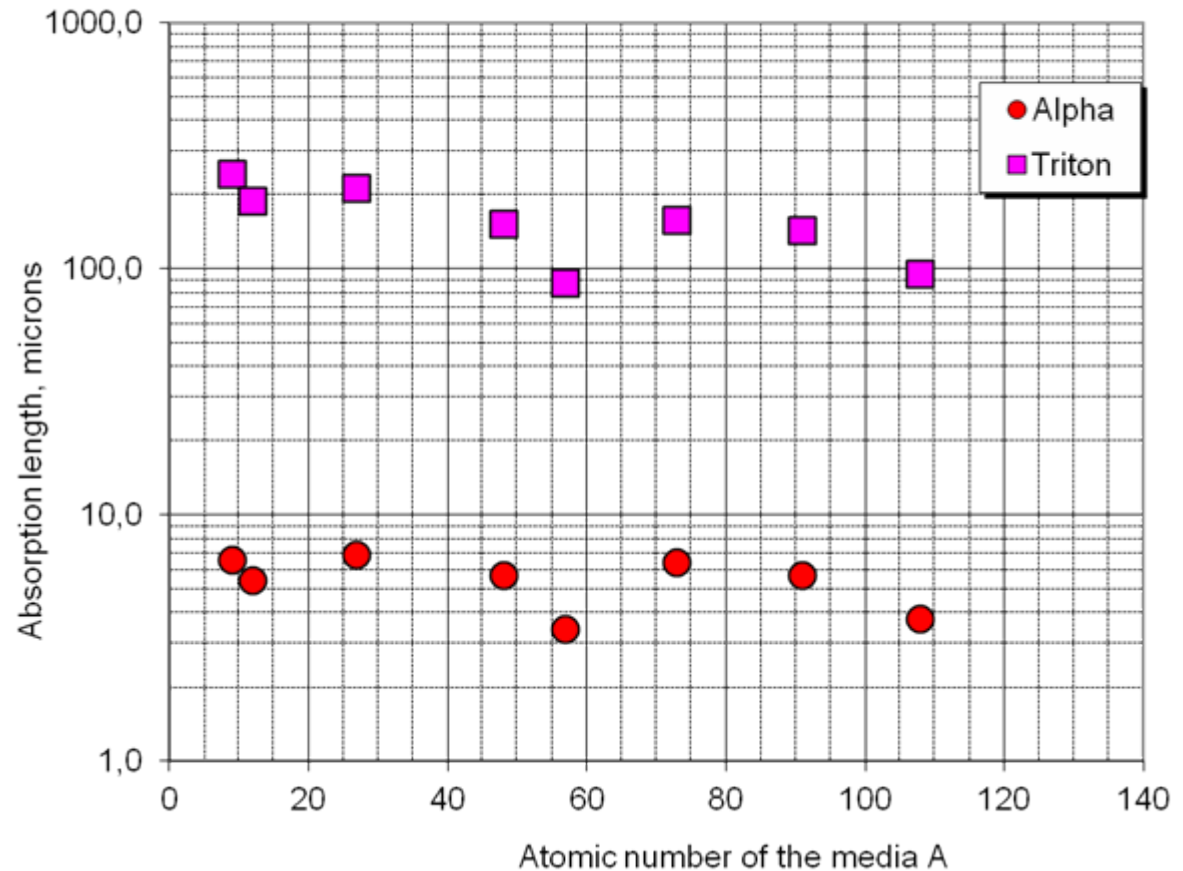
- тяжелая



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



	Q (MeV)	$\sigma_{nA}$ (barn)
${}^3\text{He}$	0,764	5330
${}^6\text{Li}$	4,780	940
${}^{10}\text{B}$	2,792	3840
${}^{157}\text{Gd}$	$\gamma$	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

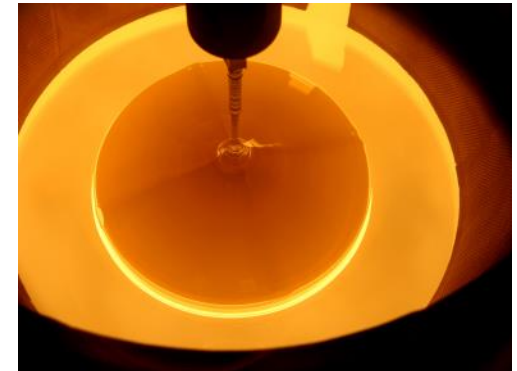
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}^{3+}$  – цена, ограниченный размер,  
гигроскопичный

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

## Композиты:

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

Пластики с наполнителем - непрозрачный,  $n/\gamma$   
( $^6\text{Li}$  или  $^{10}\text{B}$ )



[http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Chohralsky\\_Silicon\\_Crystal\\_Growth.jpg](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](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cut_Ruby.jpg)

- Дорогие в  
производстве  
- Ограниченный выбор

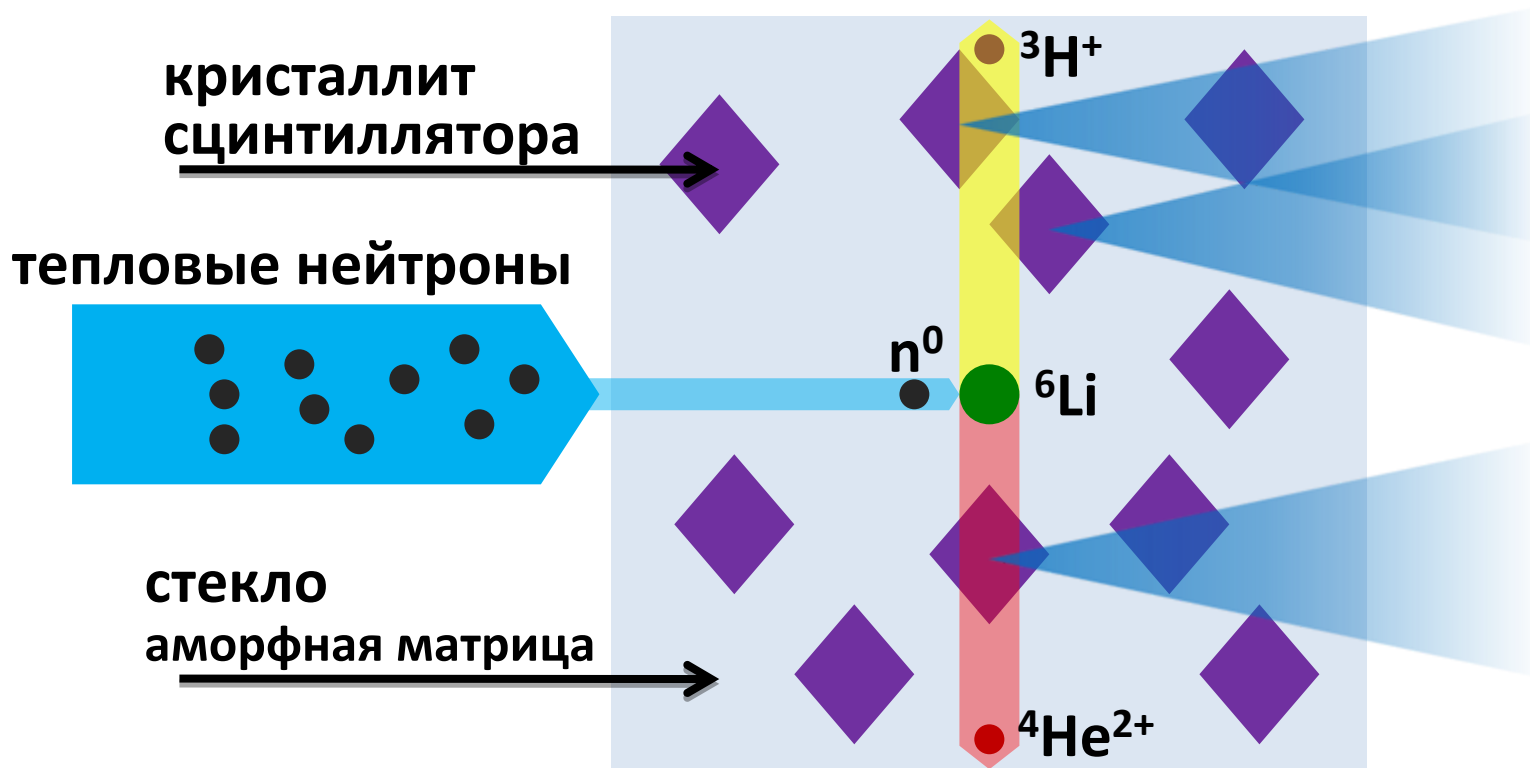
## Стекл



Photo source:  
stockphoto43.com

- Ограниченный выход  
сцинтилляций  
(следствие затрудненного  
перемещения экситонов)

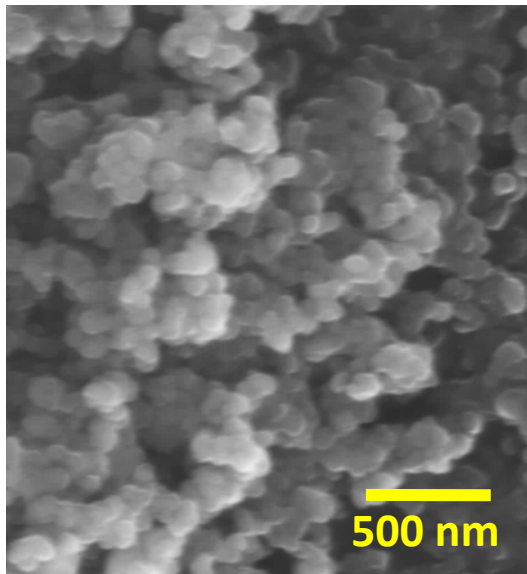
# Стеклокомпозитный сцинтиллятор – совмещение преимуществ стекла и кристалла



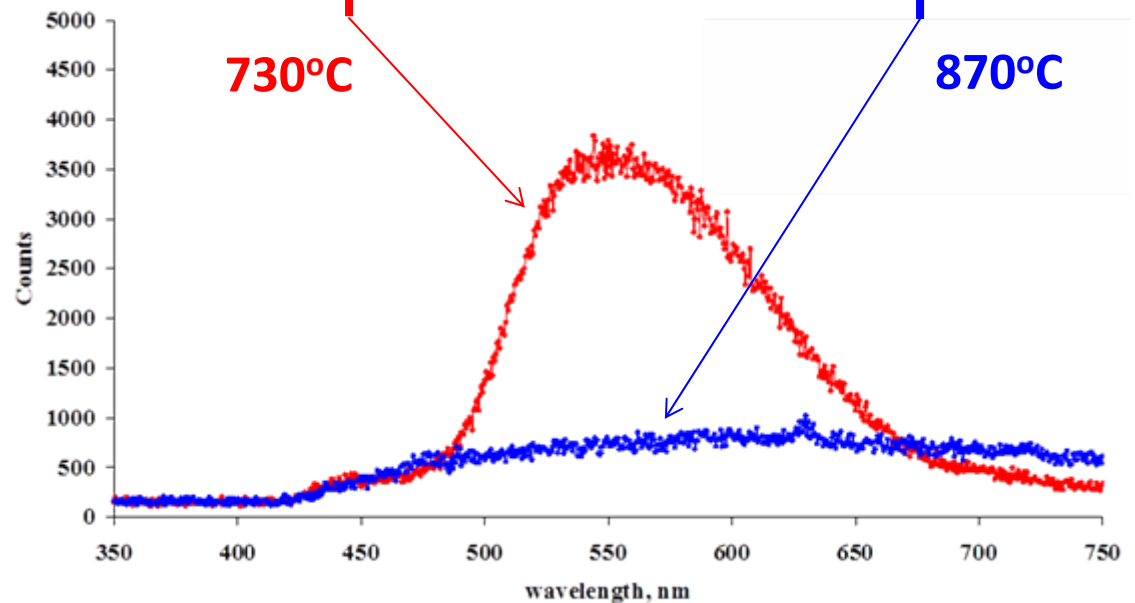
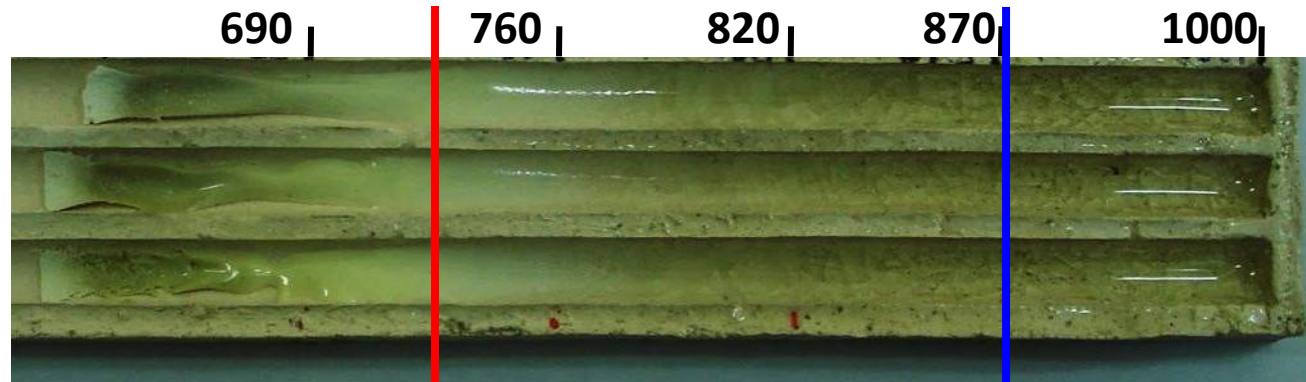
# Прямолинейный подход

## 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

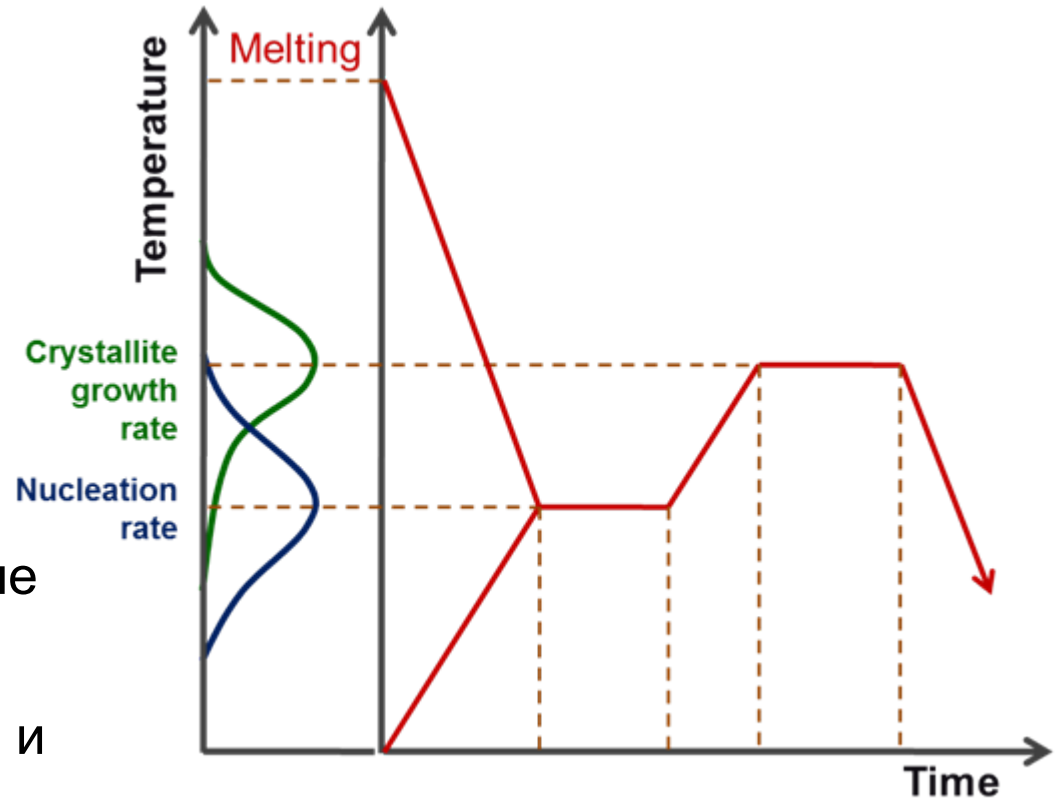
# Получение композита кристаллизацией стекла

## 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

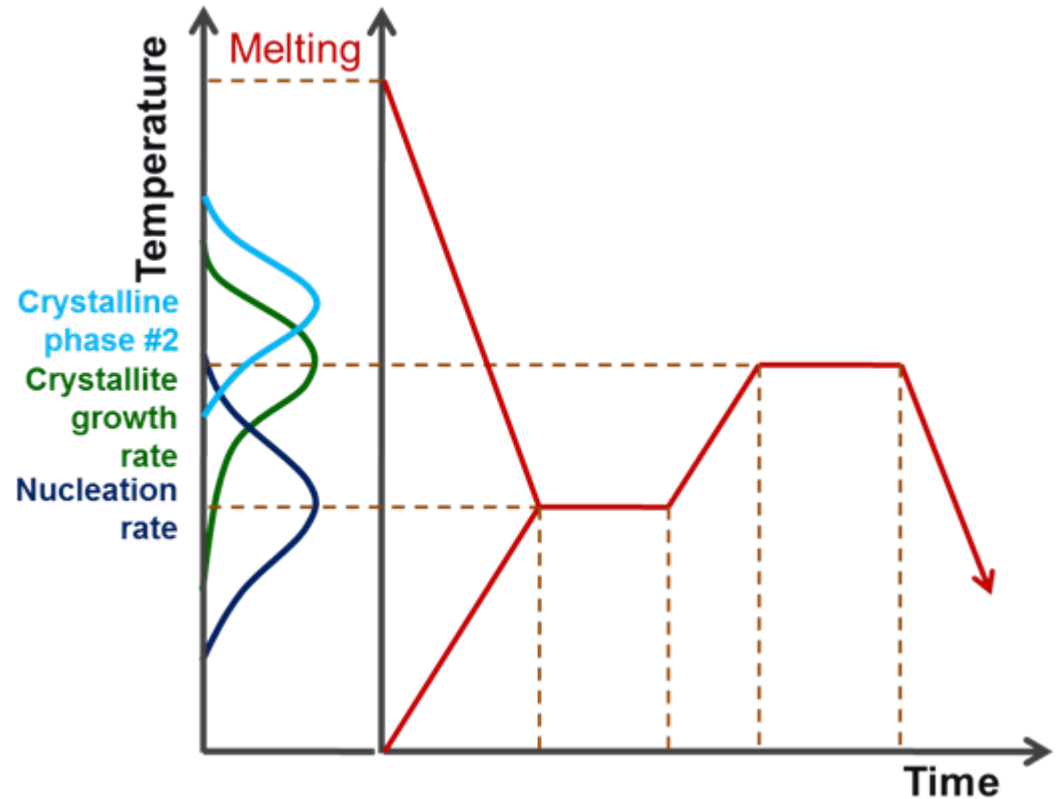


# Получение композита кристаллизацией стекла

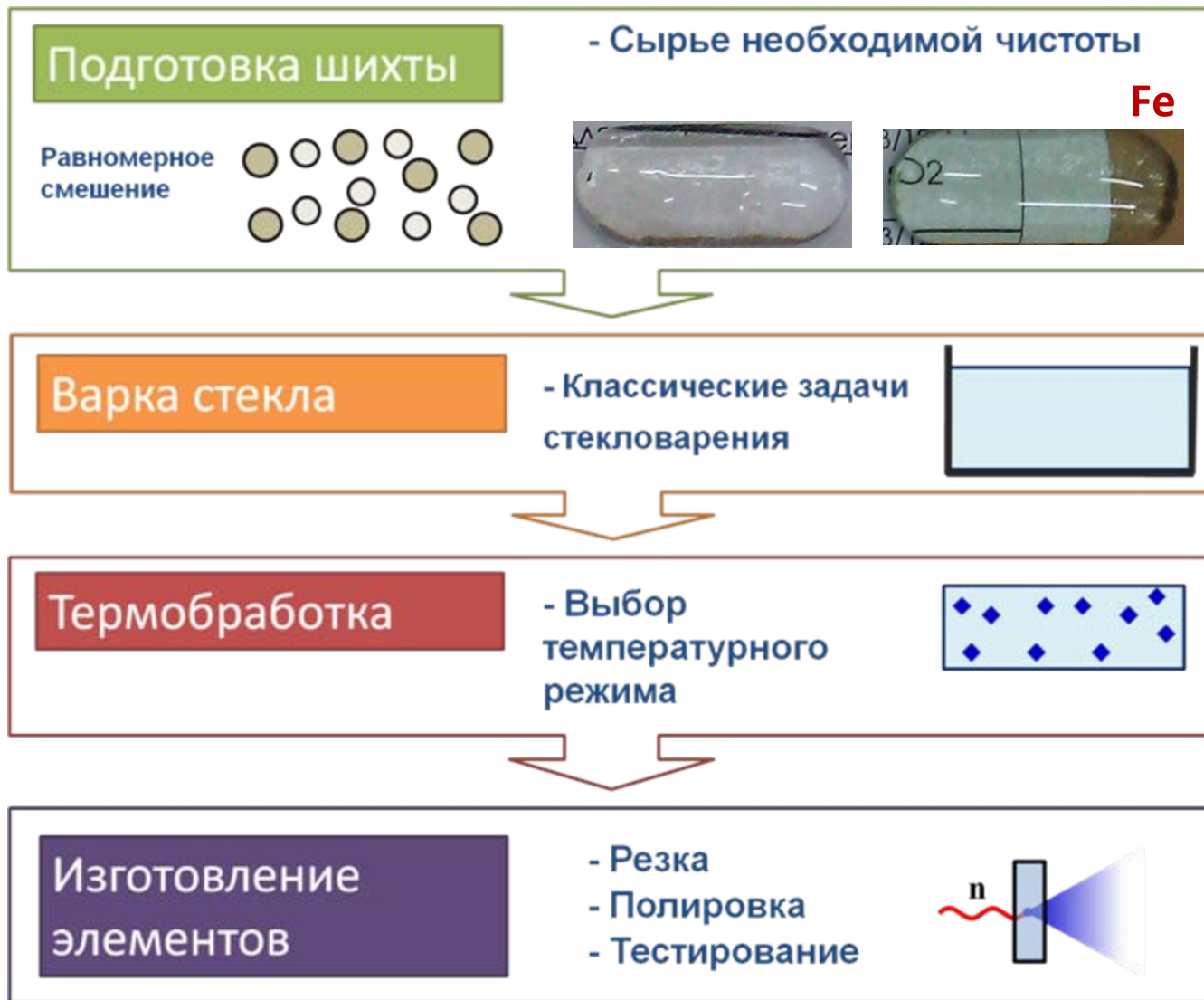
## Классическая технология ситаллов

### Нежелательные явления:

- Крупные частицы
- Посторонние фазы

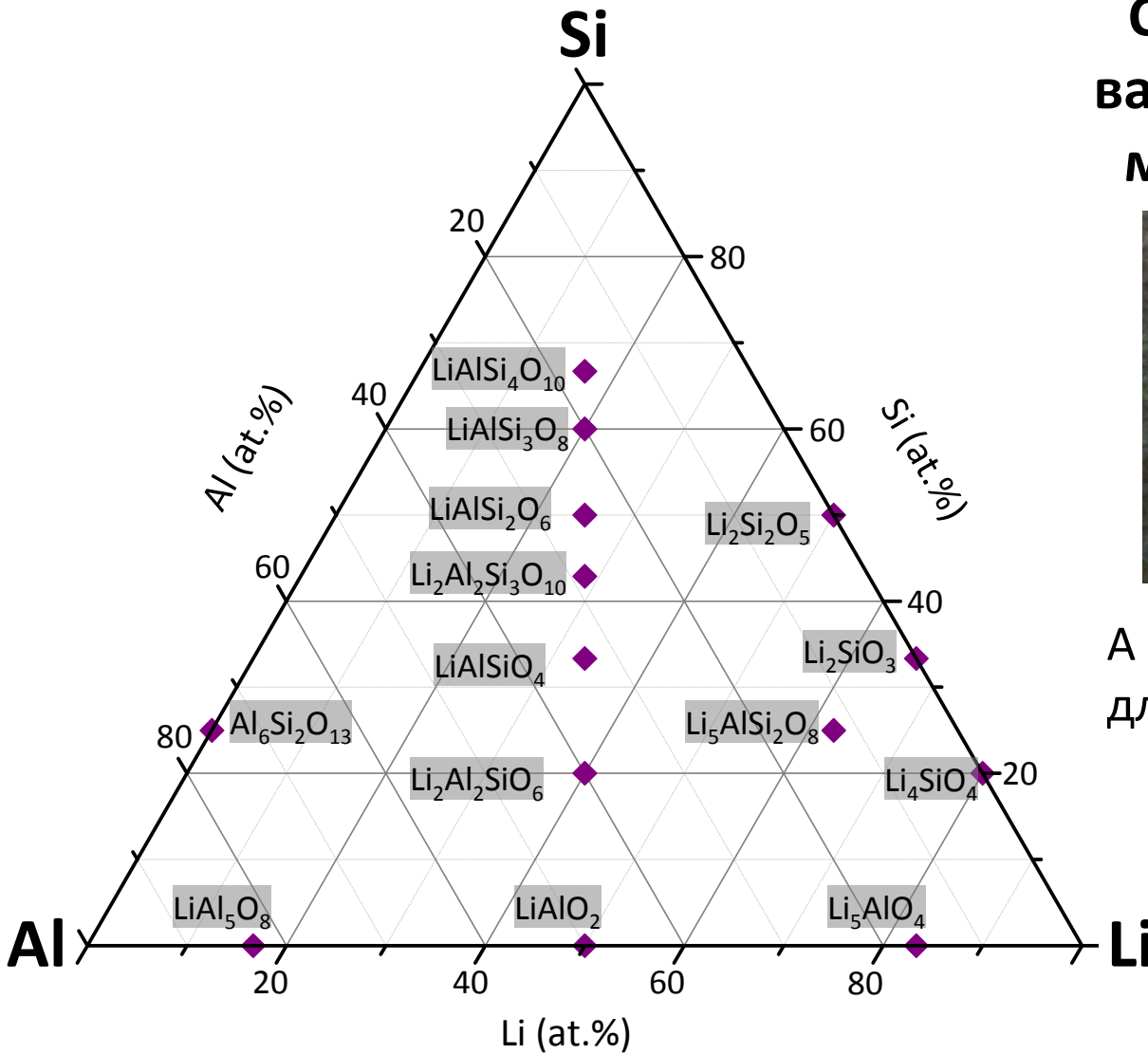


# Основные стадии технологического процесса





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



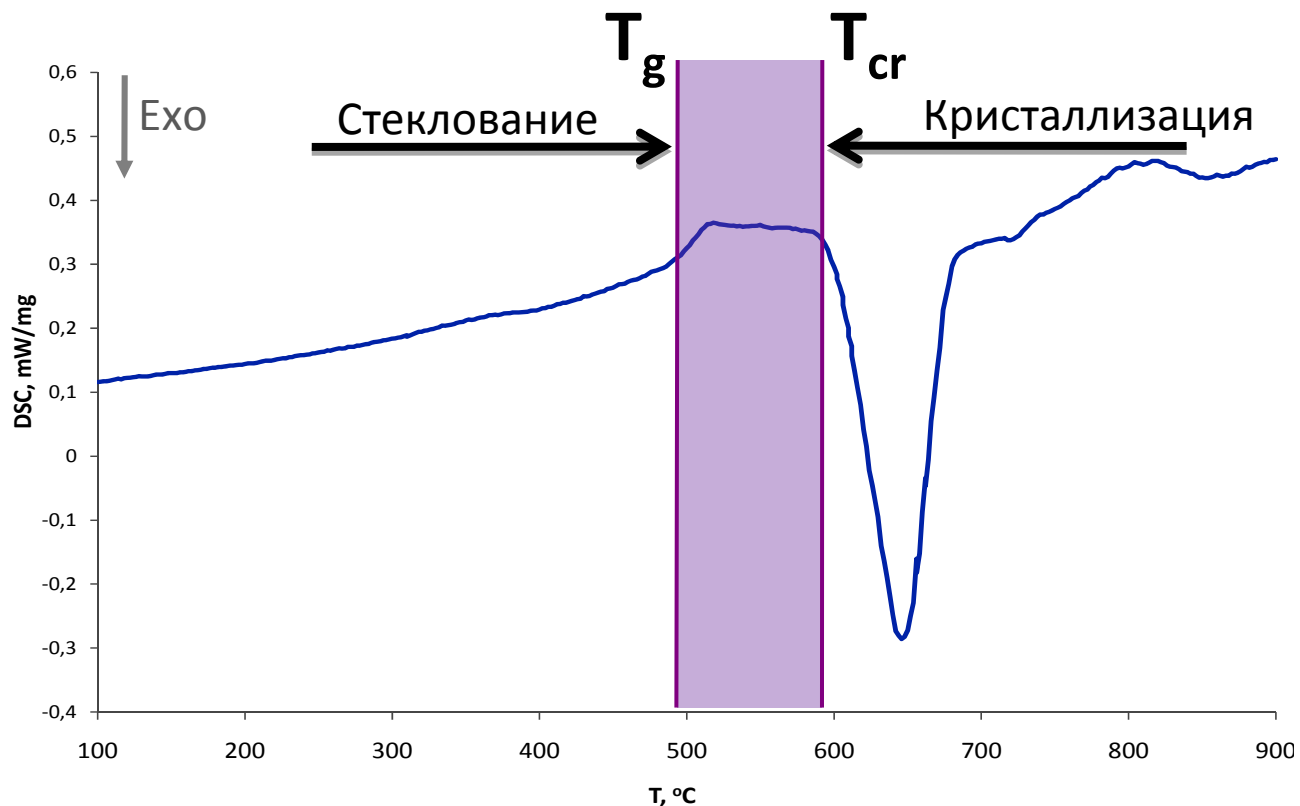
Стеклокерамика LAS –  
варочные панели, самое  
массовое применение



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**

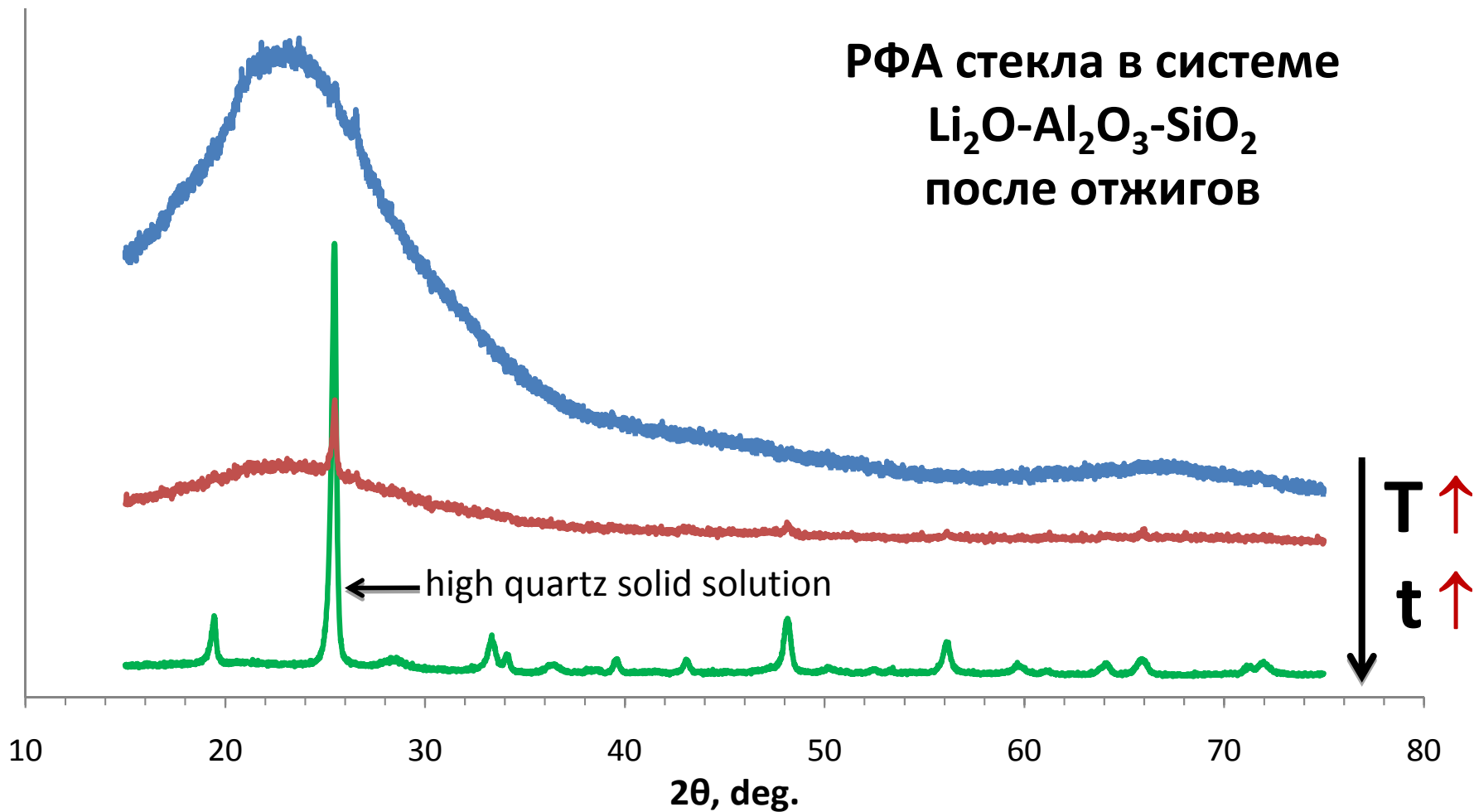


**Перегрев ведет к опалесценции  
или кристаллизации**

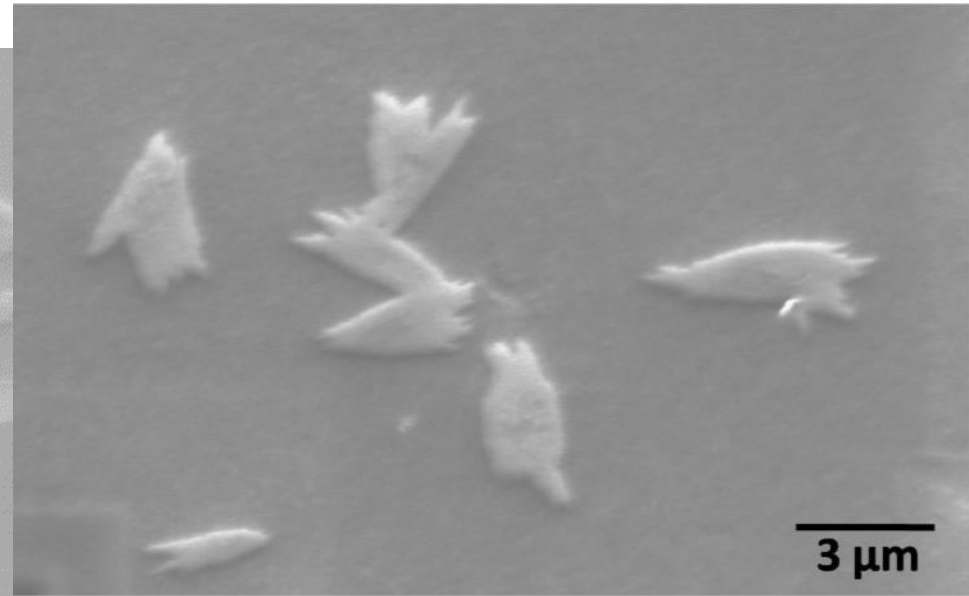
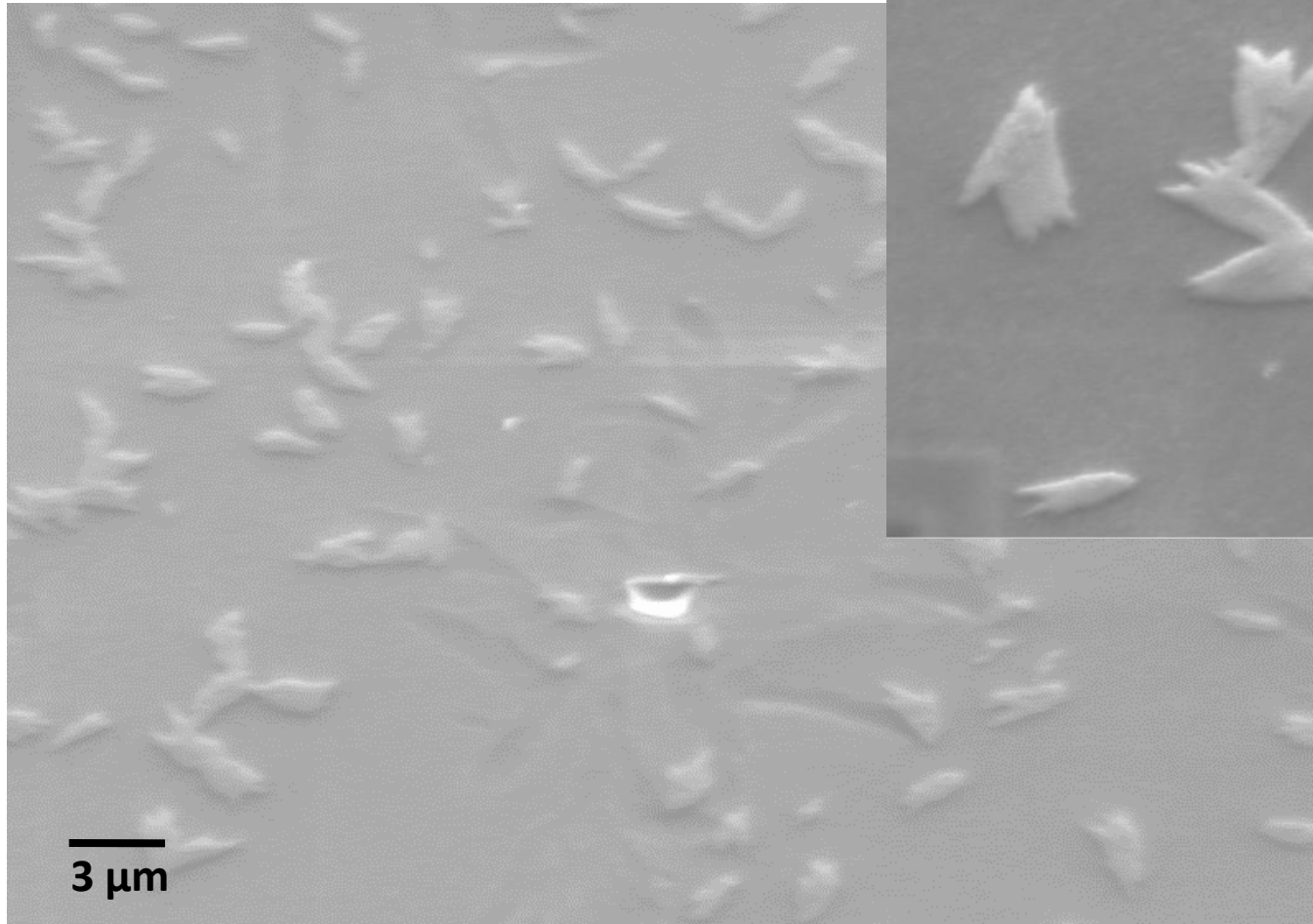


# Кристаллизация стекла

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



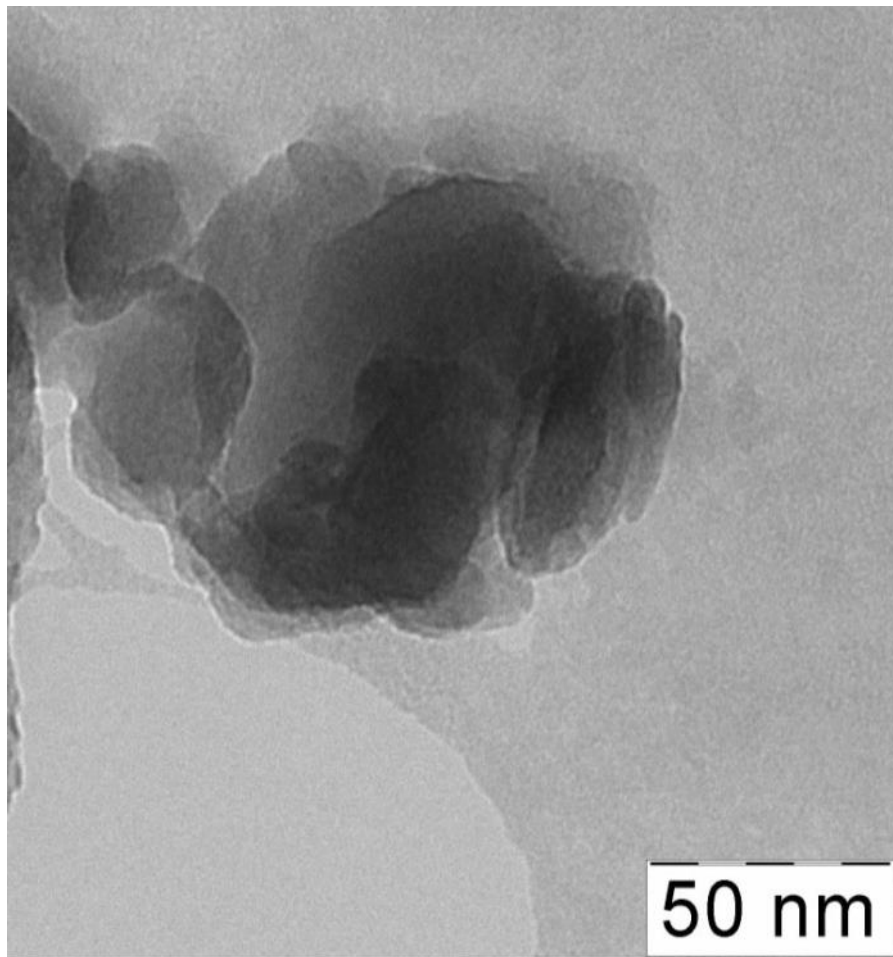
# Микрокристаллические включения



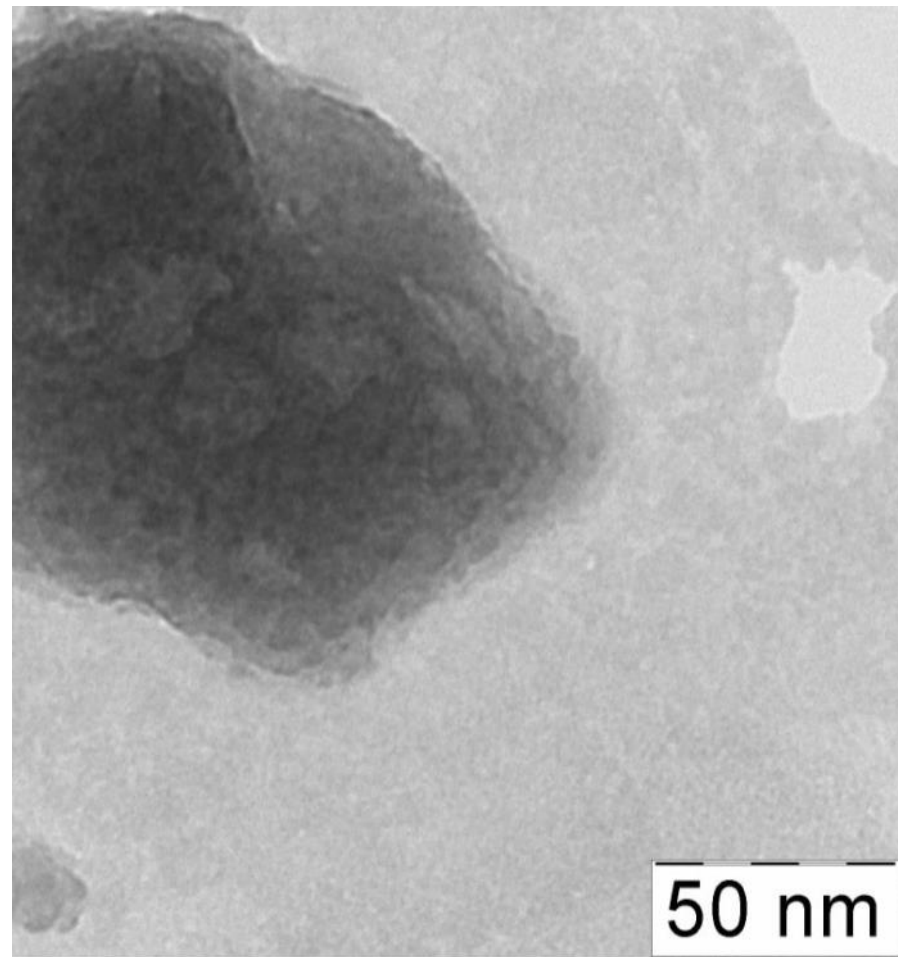
Перегрев ведет к образованию включений  $>1$  мкм и опалесценции

# Нанокристаллические включения в аморфной матрице

Аморфный образец

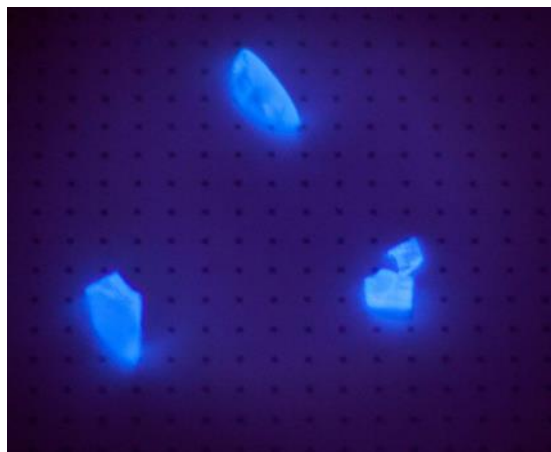


Нанокристаллиты

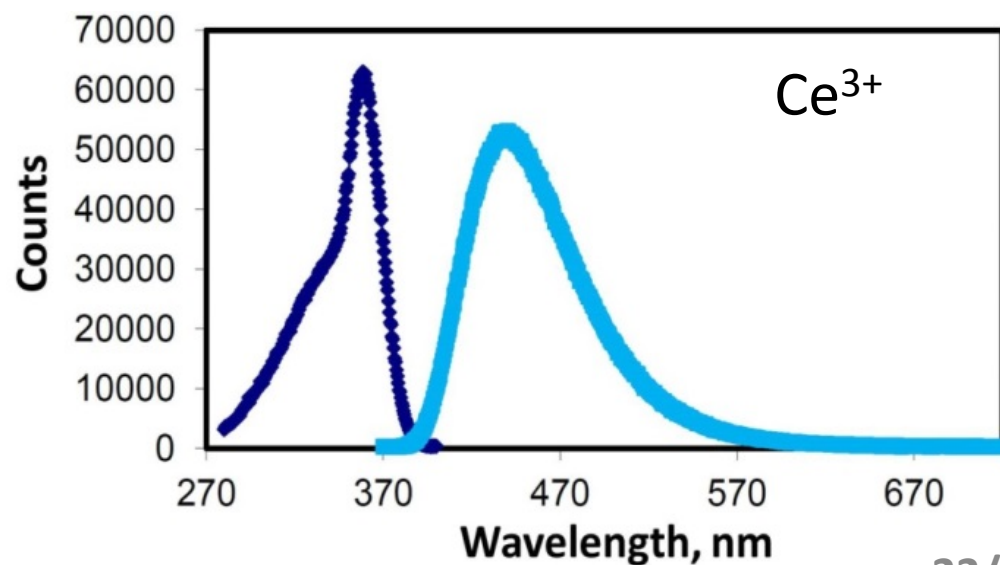
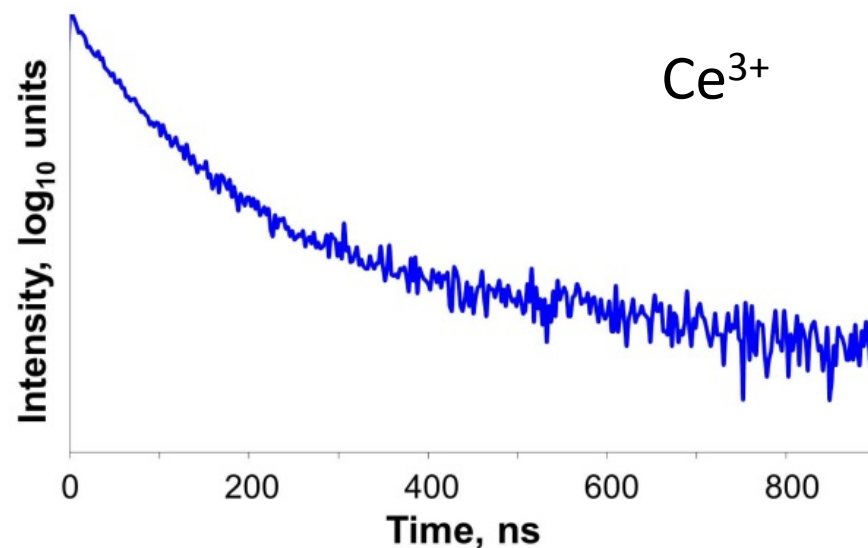


# Сцинтилляционные характеристики

Константа затухания –  
~70 нс  
( $\gamma$ -сцинтилляция)

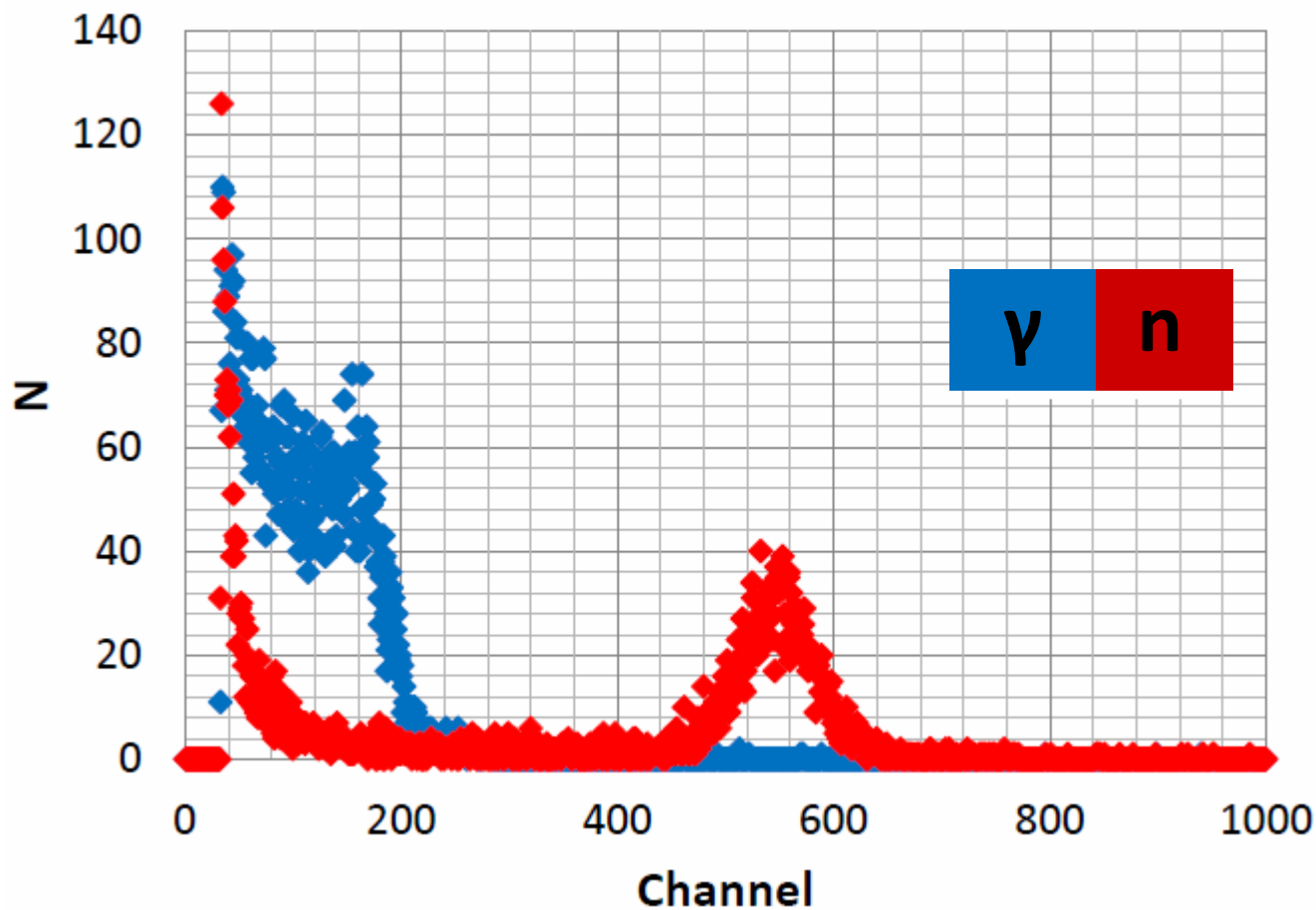


Максимум испускания –  
~430 нм  
(Фотолюминесценция)



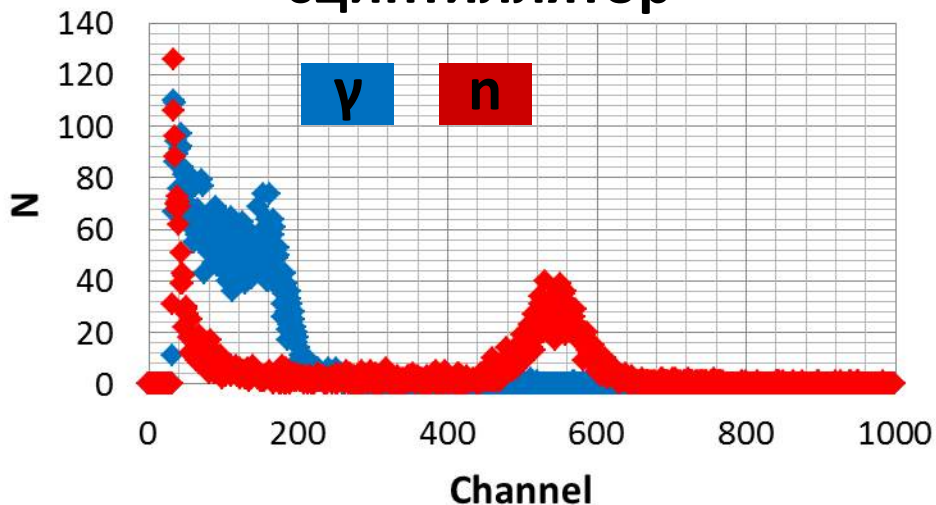
# Сцинтилляционные характеристики

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

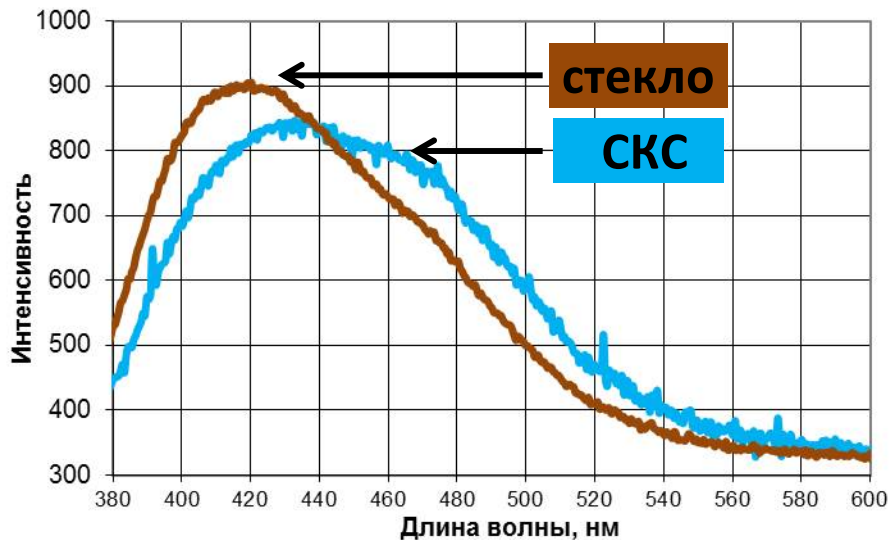
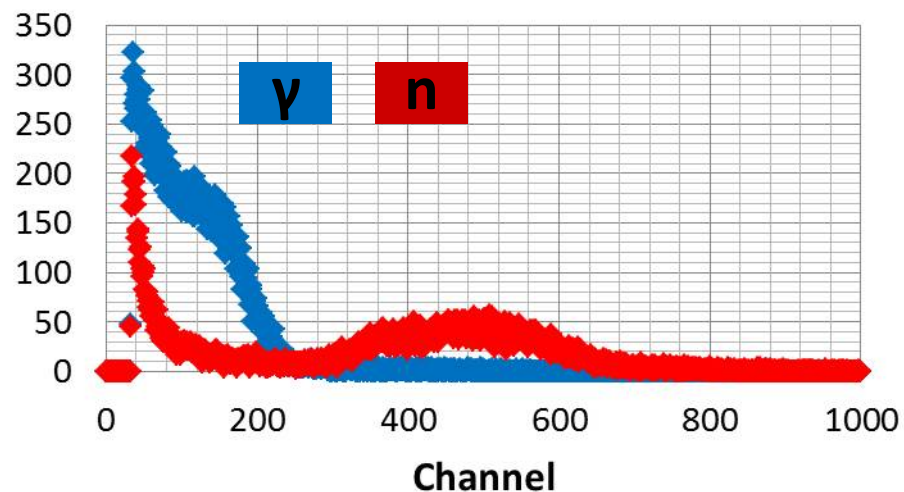


# Сравнение со сцинтилляционным стеклом

## Стеклокомпозитный сцинтиллятор



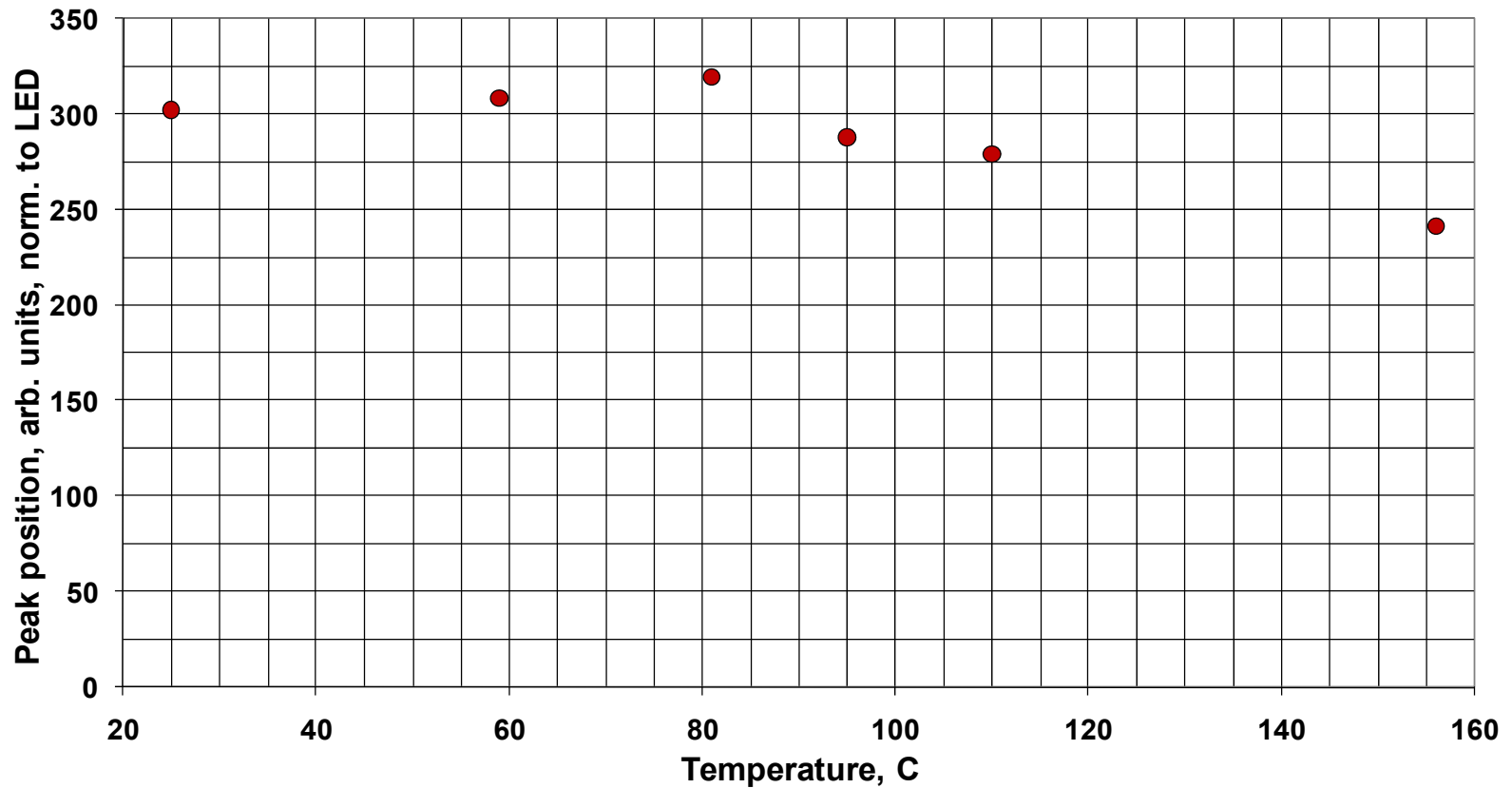
## Сцинтиллирующее стекло





# Температурная стабильность

$\alpha$  излучение от источника Pu-238  
считывание ФЭУ



# Эффективность поглощения нейтронов

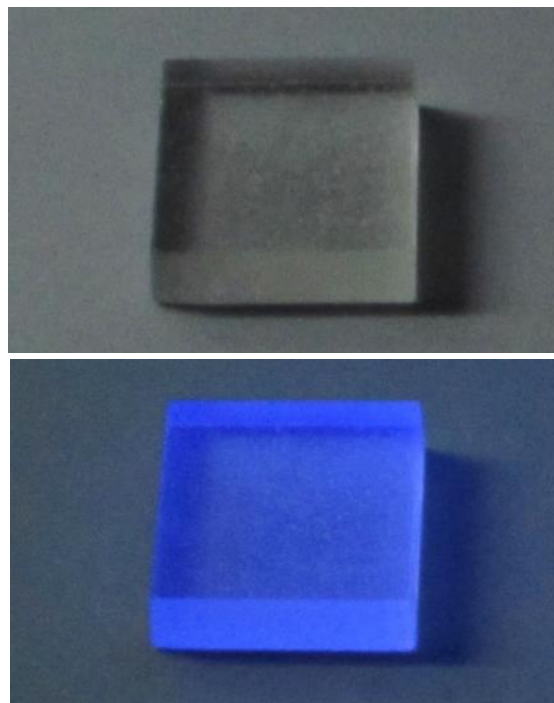
## Распределение поглощения нейтронов по толщине (моделирование на GEANT4)



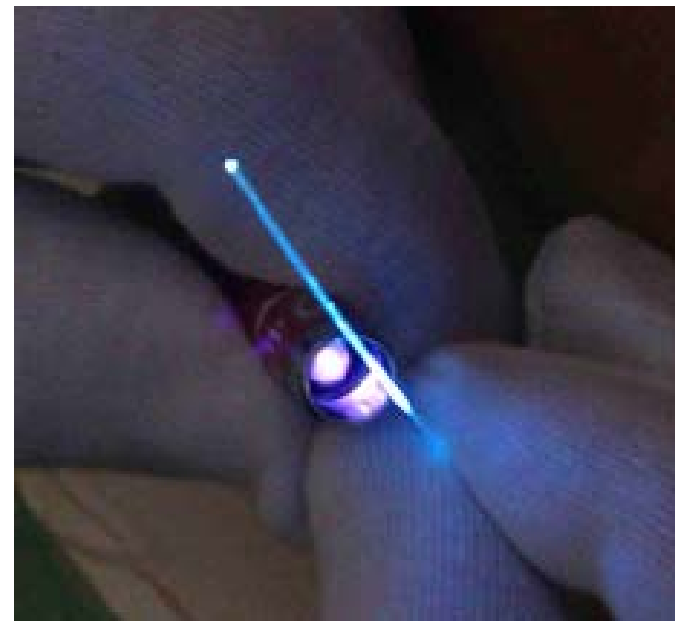
# Размер и форма сцинтилляционных элементов

## Пластины

Опробовано:



## Оптоволокно

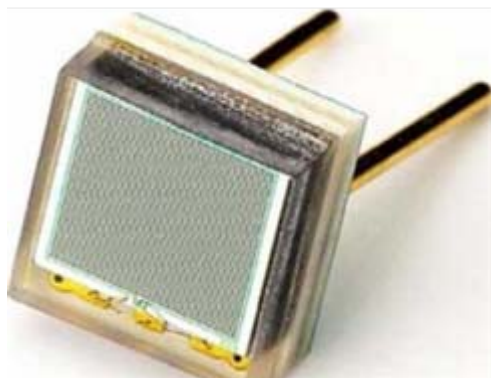


Были изготовлены образцы площадью 1-10 см<sup>2</sup>

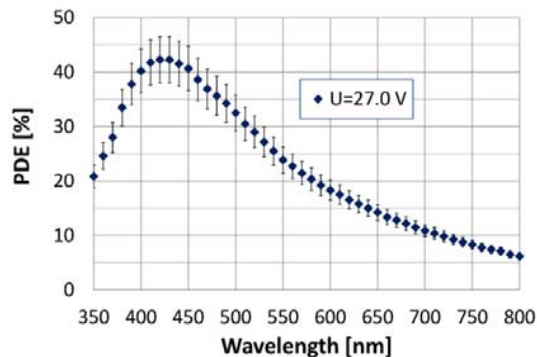
При необходимости можно увеличить площадь образцов

# Детекторы на основе Si-ФЭУ

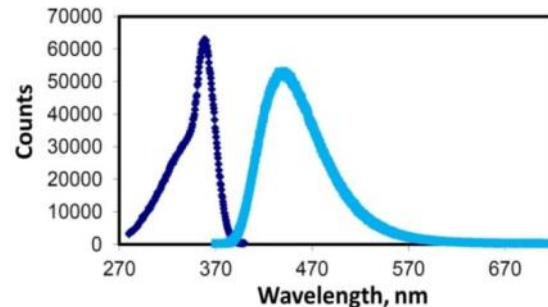
SiPM\_PM3350\_Trench, КЕТЕК



Кривая спектральной чувствительности Si-ФЭУ



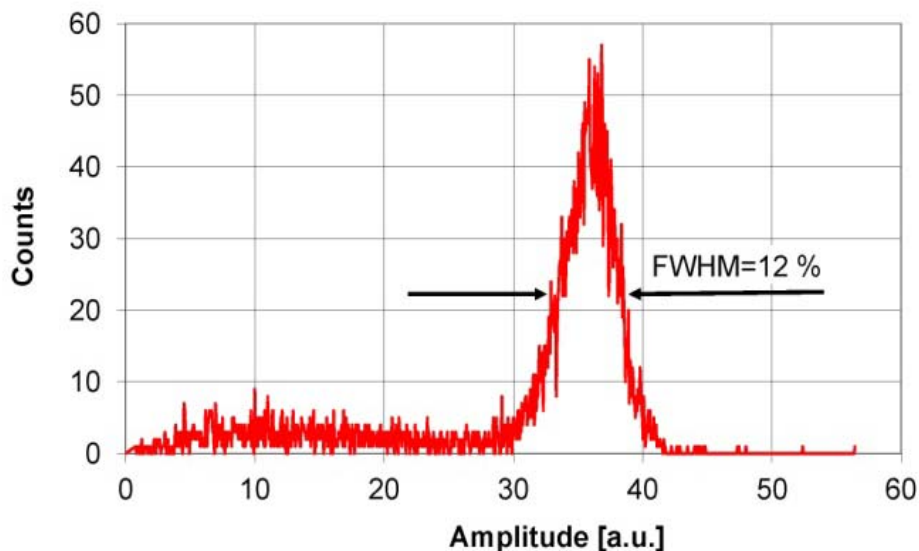
Спектр люминесценции СКС



Размер единичного Si-ФЭУ - от  $3 \times 3\text{ мм}^2$

Амплитудный спектр,  
детектор СКС + Si-ФЭУ

источник  $^{241}\text{Am-Be}$



# Подведение итогов

- Твердые сцинтилляторы могут быть заменой  $^3\text{He}$  для регистрации тепловых нейтронов
- Материалы на основе  $^6\text{Li}$  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

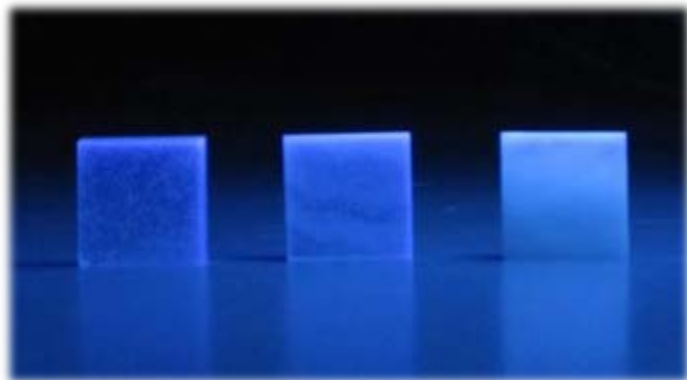
Производительность технологии

Детекторные системы

# Спасибо за внимание!

Продолжить общение  
можно у постера

Секция 3, Четверг 13 марта

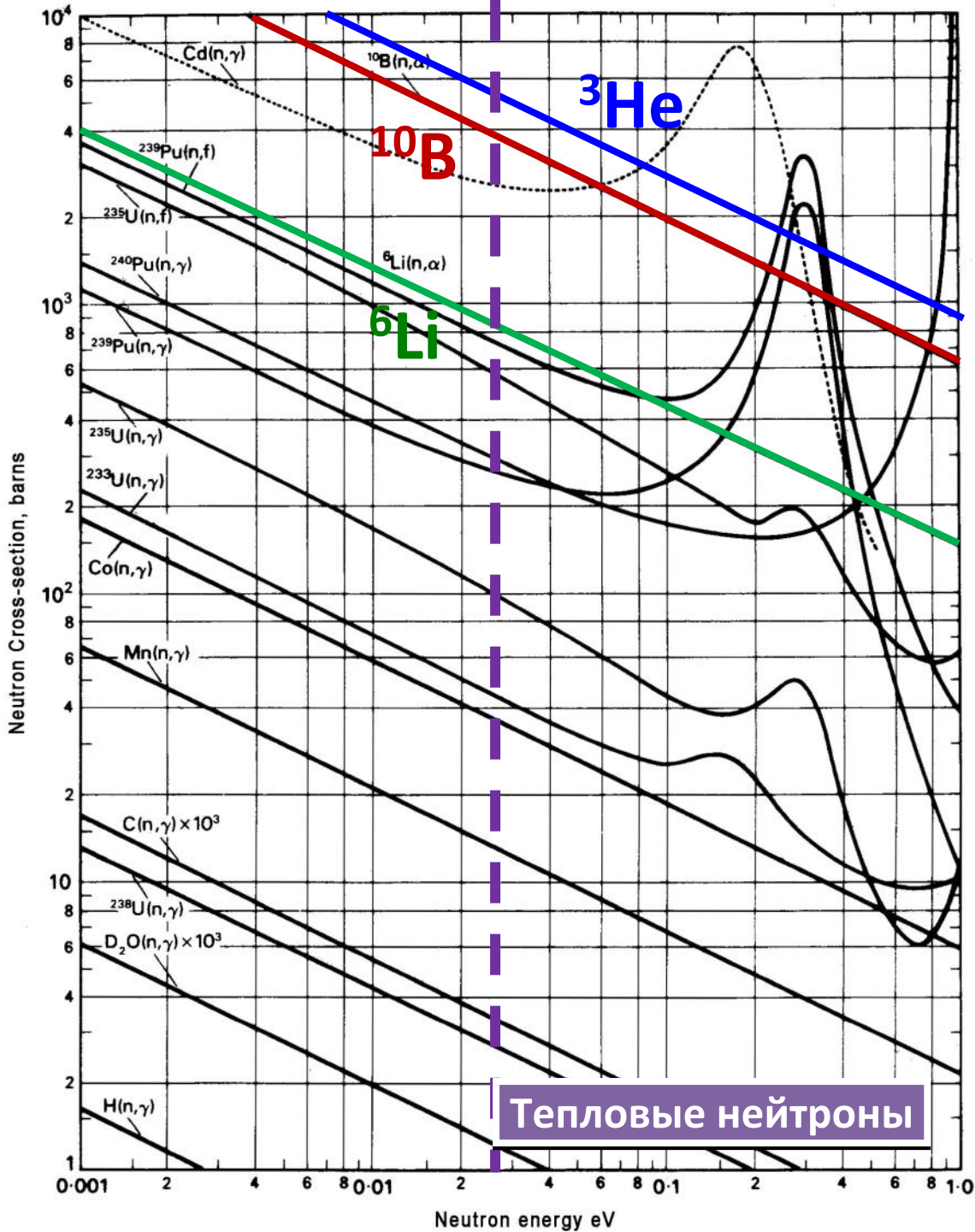


  
**NEOSCINT**

[neoscint@gmail.com](mailto:neoscint@gmail.com)

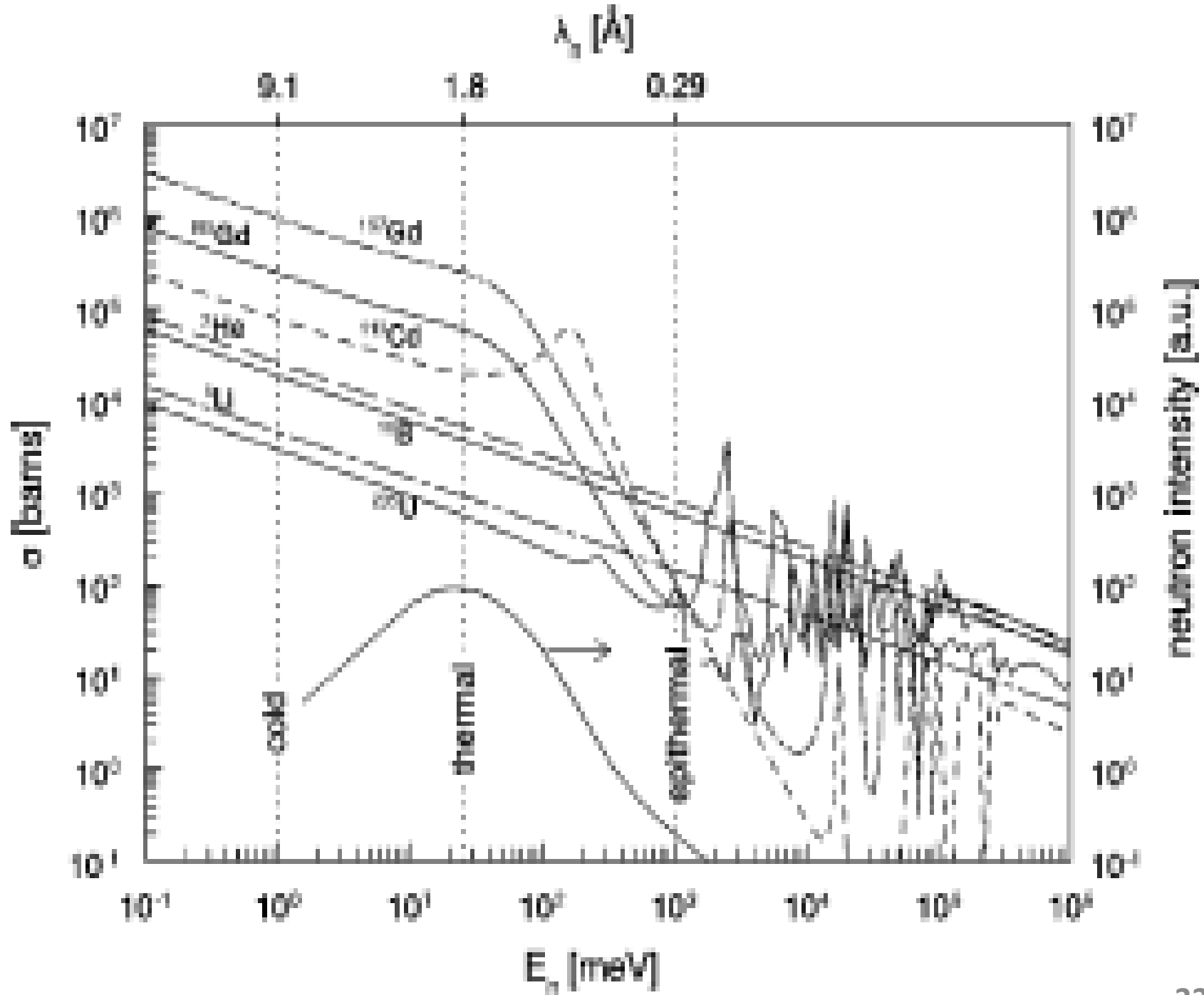
+7-916-117-32-20





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





# Classic scintillators

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