Сцинтилляторы из монокристаллических гранул

Н.З. Галунов, Б.В. Гринёв

Институт сцинтилляционных материалов

Национальной академии наук Украины

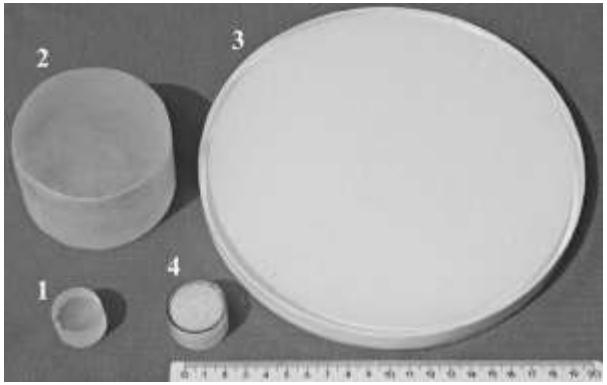
Слабые потоки наиболее опасных для человека излучений

Мотивация: Для детектирования слабых потоков ионизирующих излучений в задачах радиоэкологии (в частности в зоне работы персонала атомных станций), радиобиологии, радиомедицины, астрофизических задачах, при обнаружении не санкционированного провоза радиоактивных материалов необходимо увеличивать входное окно детектирующей системы для увеличения телесного угла детектирования.

1. Galunov N.Z. New generation of highly effective organic scintillators and their process technologies. ***In abstracts of International Technology Transfer Conference***, Iowa State University, June 23-24, 1998. – P.124.
2. Budakovsky S.V., Galunov N.Z., Seminozhenko V.P. Some new approaches to obtain the organic crystals with high quality. ***Book of Lecture Notes of First International School on Crystal Growth Technology***. – Beatenberg (Switzerland). – 1998. – P.777-778.

Композиционные сцинтилляторы

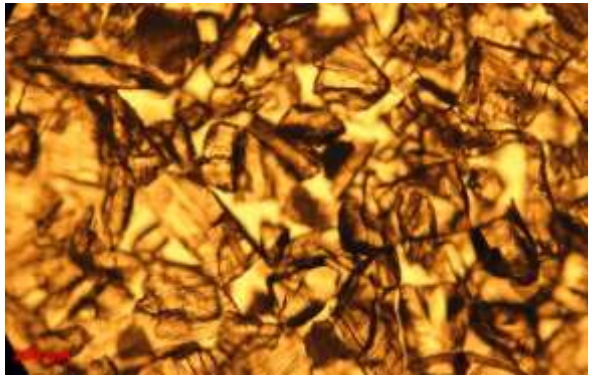
1. Дроблением объемного монокристалла получаем микромонокристаллы.
2. Набор калиброванных сит позволяет выделить фракции микромонокристаллов с характерными размерами $L_{av} = (d_i - d_j)/2$, которые должны быть сравнимы либо должны превышать пробег непосредственно ионизирующих частиц.
3. Вводим выбранную фракцию в прозрачный для сцинтилляционного света кремнийсодержащий диэлектрический гель (Sylgard 527) и получаем полупрозрачный сцинтилляционный материал.



1 Ø25 ×20 мм^3 монокристалл стильбена; **2** Ø80 ×50 мм^3 монокристалл *n*- терфенила; **3** Ø200×20 мм^3 композиционный сцинтиллятор, покрытый отражателем света; **4** Ø30×20мм^3 композиционный сцинтиллятор стильбена с L_{av} = 2мм..

Фотография монокристалла Ce:GPS и композиционного сцинтиллятора на основе его микромонокристаллов с L_{av}= 80мкм.

Монокристалл – это прозрачный материал. Прохождение света через композиционный сцинтиллятор носит диффузный характер.



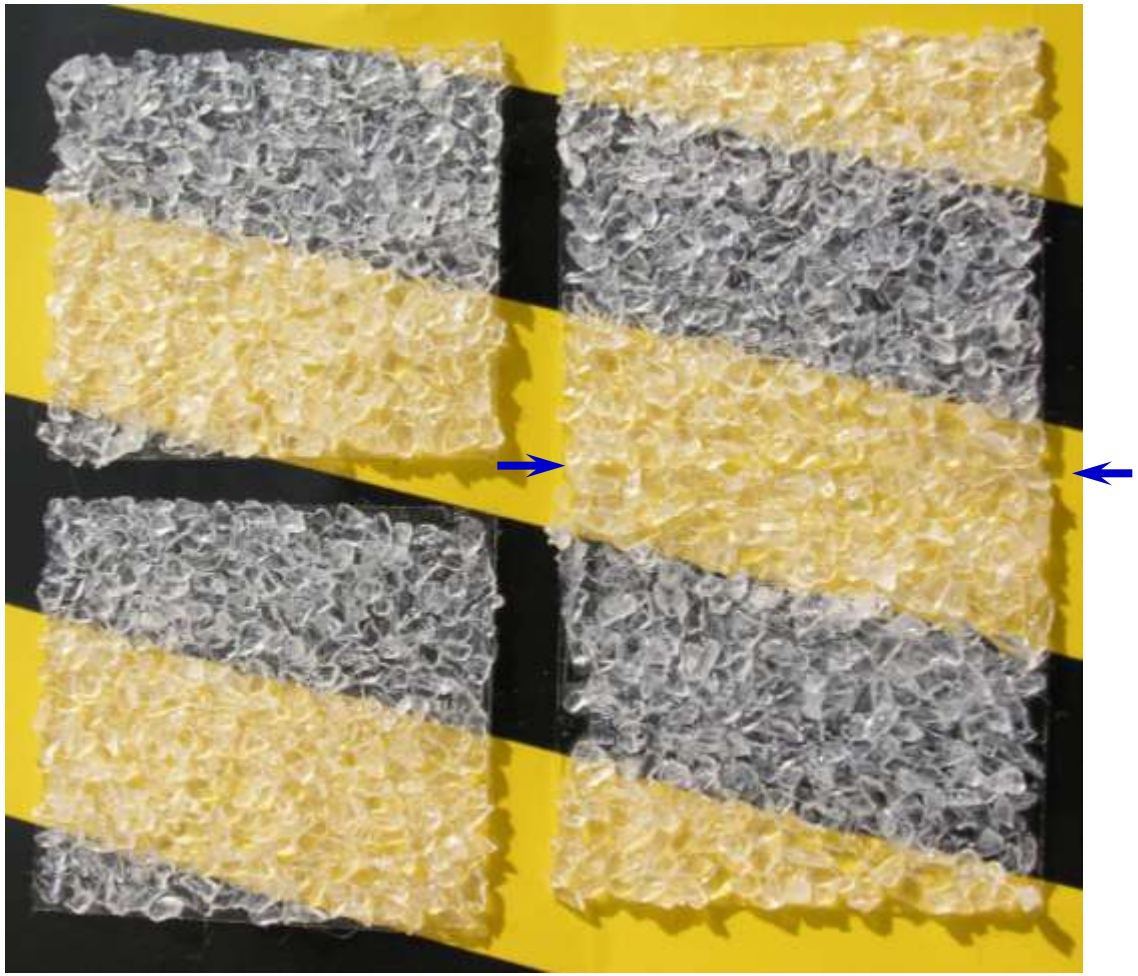
Микрофотография (в проходящем свете) микромонокристаллов в композиционном сцинтилляторе. Светлые участки заполнены гелиевой композицией (Sylgard-527)

Особенности композиционного сцинтилляционного материала

1. Бесконечная площадь входного окна. **Так ли это?**

Линия соединения

2. Для того чтобы получить гранулы надо вырастить монокристалл. **Так ли это?**



Детекторы быстрых нейтронов и альфа-частиц

1. ***Radiation Measurements***.– 2007.- Vol.42. , No. 4-5 – P.565-568.
2. ***IEEE Transactions on Nuclear Science***. – 2007. – Vol. 54, No.6 – P. 2734 – 2740
3. ***Journal of Nuclear Science and Technology.*** – Supplement 5 – 2008. – P. 367 – 370.
4. ***Journal of Instrumentation*** , 2011. – Vol.6, No 07007. – P. 1–10
5. ***IEEE Transactions on Nuclear Sciences***. – 2009. – Vol.56, No. 3 – P.904-910.
6. ***Functional Materials***. – 2009. – Vol.16, No. 1 – P.92-96.
7. ***Radiation Measurements***.– 2010.- Vol.45. , No. 3-6 – P.380-382.
8. ***Functional Materials***. – 2012. – Vol. 19, No.3. – P.394-403.

1. ***Патент Украины 37010,*** МПК15 G01T1/00, G01T 3/00. Опубликован 10.11.2008
2. ***Патент Украины 86136,*** МПК15 G01T 1/20, G01T 3/00. Опубликован 25.03.2009

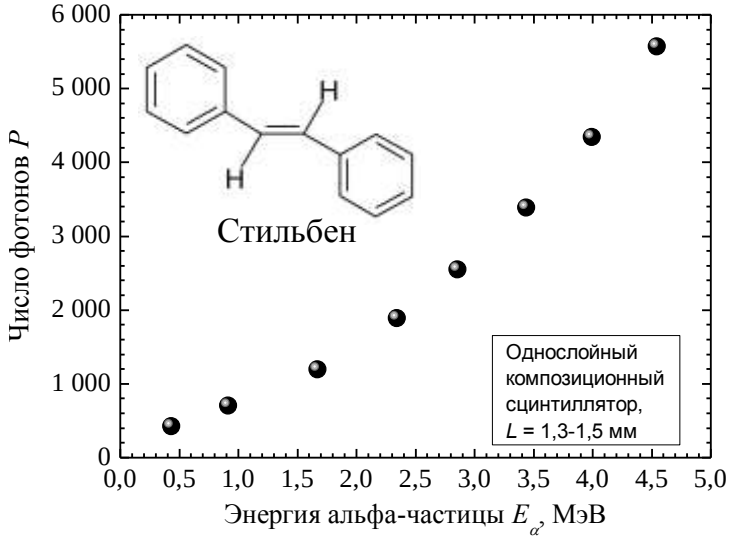
Различные подходы к получению композиционного сцинтиллятора

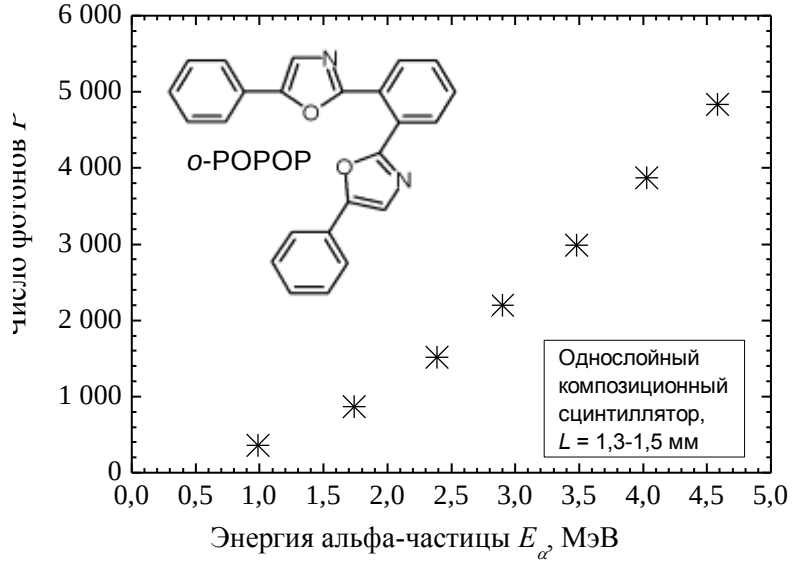
Технологические стадии	Образец на основе гранул монокрис- талла (Технология I)	Образец на основе гранул первичного кристалла (Технология II)
	Продолжительность технологических операций, часы	
Очистка сырья методом направленной кристаллизации	168	168
Подготовка ампулы с сырьем для выращивания	**7**	–
Выращивание монокристалла ø20мм × 10мм	**240**	–
Дробление при низкой температуре	1,5	1,5
Получение композиционного сцинтиллятора	61	61
Всего, часов	**477,5**	**230,5**

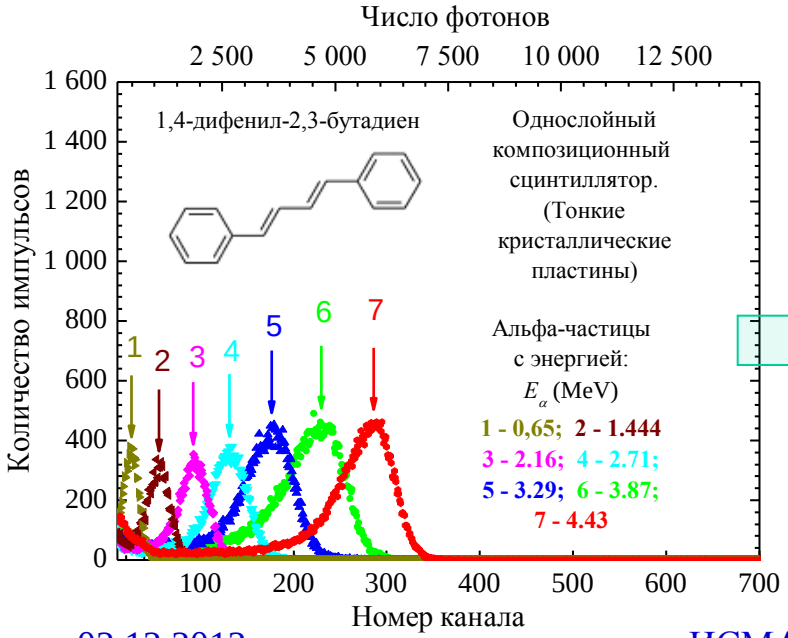
Сцинтиллятор	Относительная эффективность регистрации быстрых нейтронов, отн.ед	Световой выход (^{137}Cs), в тыс. фотонов/MeV
Монокристалл	**100**	**17.8**
Комп. Сц. Технология I	**93**	**16.6**
Комп. Сц. Технология II	**93**	**16.5**

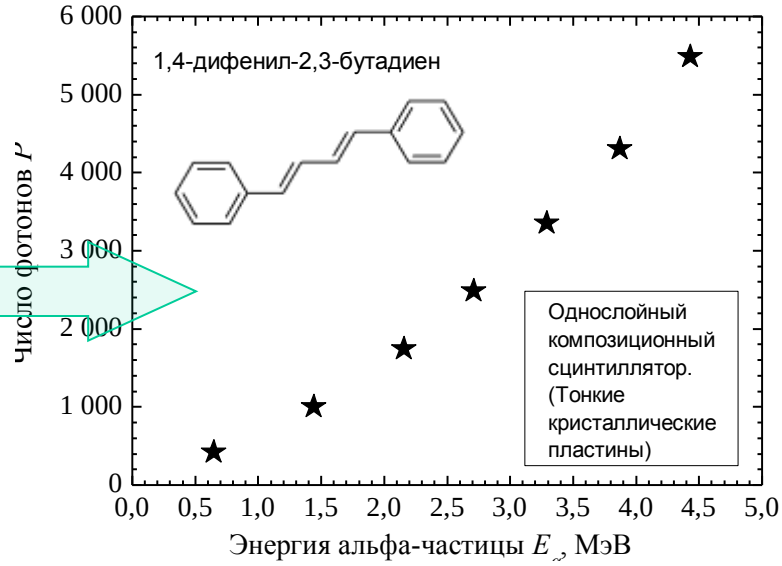
Время эксплуатации образца на основе гранул первичного кристалла **(Технология II)**	Относительная эффективность регистрации быстрых нейтронов, отн. ед.	Световой выход (^{137}Cs), в тыс. фотонов/МэВ
1 месяц эксплуатации	95	16,6
3 месяца эксплуатации	93	16,5
6 месяцев эксплуатации	94	16,2
1 год эксплуатации	94	16,3

Сцинтилляционный сигнал P композиционных сцинтилляторов, полученных без выращивания массивного монокристалла







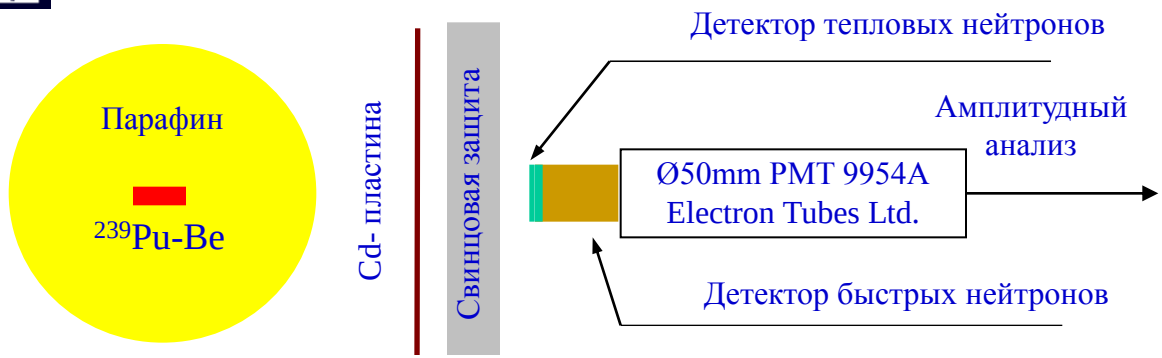


Детекторы тепловых нейтронов

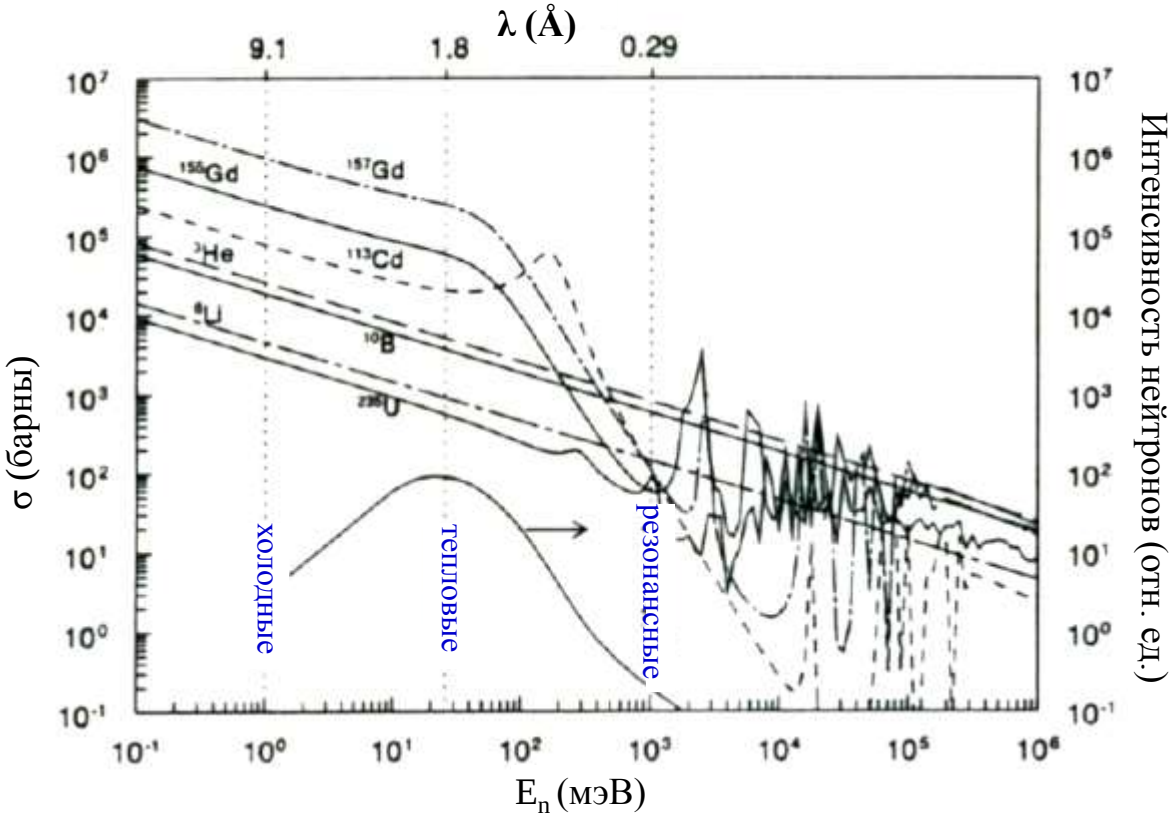
1. ***Functional Materials.*** – 2010. – Vol.17, No. 3– P. 379 -385.
2. ***Functional Materials***. – 2010. – Vol.17, No. 4 – P. 549 – 553 .
3. ***IEEE Transactions on Nuclear Sciences***. – 2011 . – Vol.58, No. 1 – P. 339– 346.
4. ***Functional Materials***. – 2012. – Vol. 19, No.3. – P.394-403.

1. ***Патент Украины 94678,*** МПК15 G01T 1/20. Опубликован 20.05.2011

Детектирование нейтронов



Быстрые и тепловые нейтроны, γ- радиация



Комбинированный детектор состоит из детектора быстрых нейтронов на основе органических микромоно-кристаллов и детектора тепловых нейтронов на основе Gd-содержащих неорганических микромоно-кристаллов.

Gd- содержащие сцинтилляторы

	Изотоп				
	$^{3}_{2}He$	$^{6}_{3}Li$	$^{10}_{5}B$	$^{155}_{64}Gd$	$^{157}_{64}Gd$
Сечение σ, кб (природная смесь)	5,4	0,9 (0,52)	3,8 (2,1)	60 (17)	250 (70)
Содержание в природной смеси, %	$1{,}37\ 10^{-4}$	7,59	19,9	14,8	15,65

В результате захвата теплового нейтрона гадолинием излучаются электроны конверсии с энергией E_e = 33кэВ и вероятностью (в расчете на один нейтронный захват) p_e = 0,65. Это может сопровождаться характеристическим рентгеновским излучением (E_X = 44кэВ, p_X = 0,39). Наблюдается и гамма – излучение с энергией E_γ ~ 8 МэВ. Регистрация электрона конверсии приводит к появлению сцинтилляционного пика 33 кэВ (в шкале гамма – сцинтилляций), а одновременная регистрация электрона конверсии и рентгеновского излучения приводит к появлению сцинтилляционного пика 77 кэВ.

Эффективности детектирования тепловых нейтронов ε_{Th} и фотонов гамма – излучения ε_γ

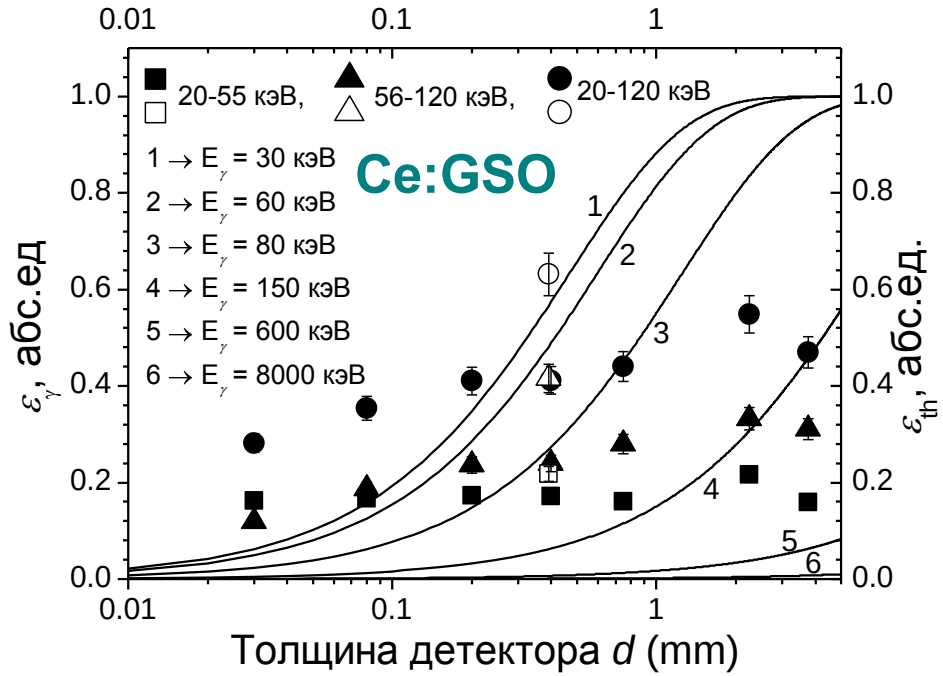
$$\varepsilon_{th} = \frac{N_\Sigma}{t \cdot F_{fast} \cdot \eta_{th} \cdot \dfrac{S}{4\pi R^2}} \qquad (1)$$

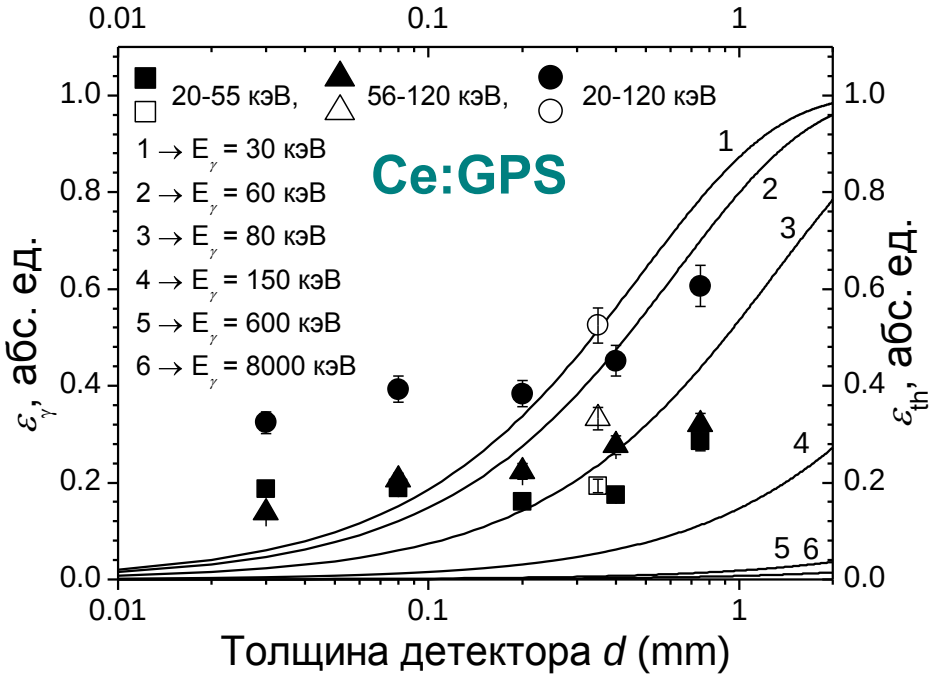
$$\xi_{th} = \frac{\varepsilon_{th}^{Comp} S_{Comp}}{\varepsilon_{th}^{S} S_{SC}} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{th}^{Comp} / \varepsilon_{th}^{SC} \approx 0{,}7 - 0{,}9 \\ S_{Comp} > S_{SC}^{\max} \geq S_{SC} \end{cases}$$

$$\varepsilon_\gamma = 1 - \exp\left(-\mu_\rho \xi d\right) \qquad (2)$$

N_Σ- число детектируемых событий, t - время измерений; F_{fast} – поток быстрых нейтронов, η_{th} =0.09, S – площадь входного окна, R – расстояние меду источником и детектором.

μ_ρ - массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения веществом с плотностью ρ, ξ - объемная доля микромонокристаллов (т.е. 0.28 и 0.38 для Ce:GSO и Ce:GPSсоответственно), d - толщина сцинтиллятора. Принималось $d = L_{av}$.





Заключение

Детекторы быстрых нейтронов

1. Композиционные сцинтилляторы, построенные из гранул органических монокристаллов (гранулы с L ~ 1 - 3 мм), обладают рядом тех же преимуществ, что и органические молекулярные кристаллы. Это – высокий световой выход, хорошее энергетическое разрешение. Они не гигроскопичны и не горючи. Они позволяют разделять сигналы от различных излучений по различиям в форме сцинтилляционной вспышки (в отличие от пластмассовых сцинтилляторов).

2. Подобно жидкостям отдельные фрагменты композиционных сцинтилляторов могут создаваться как гомогенные изотропные сцинтилляционные материалы. Они принимают форму и размер, кюветы в которой готовятся, но в отличие от жидкостей (после отвердевания) могут использоваться без нее.

3. Композиционные сцинтилляторы могут использоваться для спектрометрии быстрых нейтронов, альфа-частиц в присутствии интенсивного гамма-фона. Для их создания нет необходимости выращивать объемный кристалл из расплава.

Детекторы тепловых нейтронов

5. Очень тонкий сцинтилляционный слой (гранулы с L ~ 30 - 60 мкм) композиционного сцинтиллятора достаточен для детектирования тепловых нейтронов с эффективностью ε_{th} ~ 20 %. При этом используется лишь сцинтилляционный пик от конверсионных электронов с энергией 33 keV.

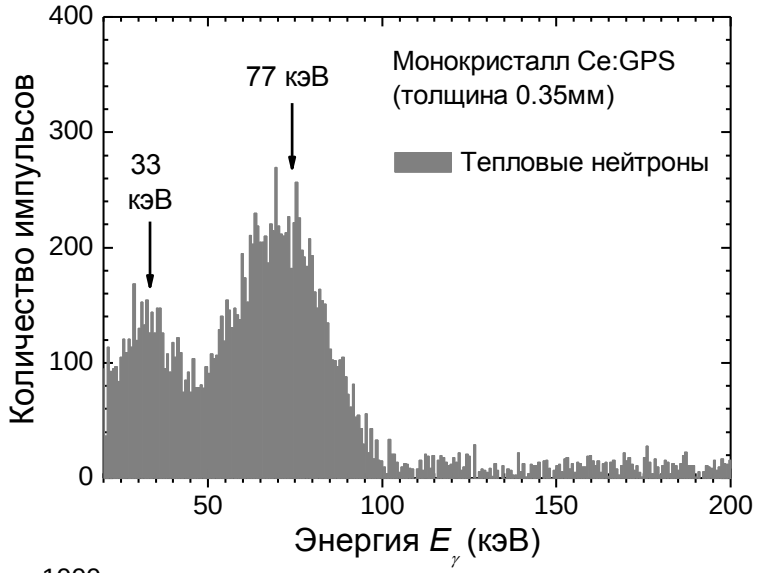
6. Значение ε_{th} ~ 40-50 % достижимо при регистрации суммарного сигнала 33 кэВ и 77 кэВ (гранулы с L ~ 100 - 200 мкм). В этом случае надо выбирать энергетическое окно регистрации 20-120 кэВ.

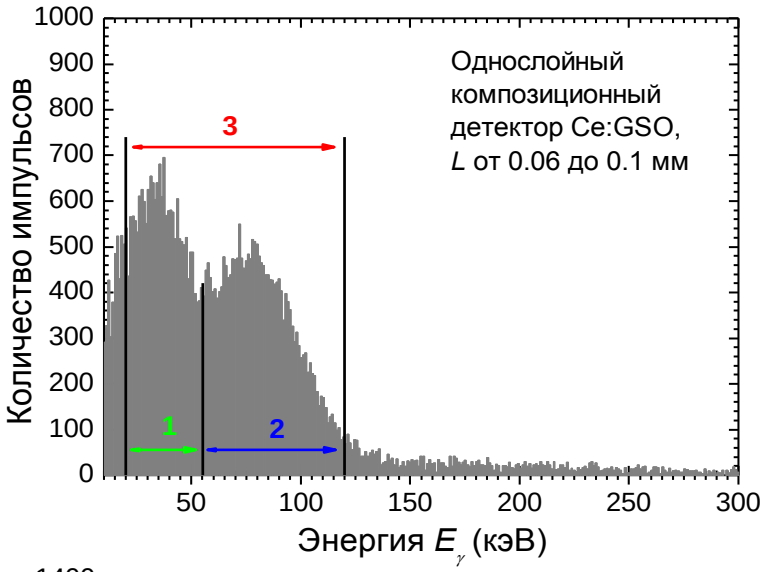
7. Средний размер гранул не должен превышать 0,5 мм, т.к. с ростом размера гранул растет энергия регистрируемого фонового сигнала. Эффективность фотонов гамма- излучения с энергиями E_γ > 120 кэВ для сцинтилляторов, содержащих гранулы со средним размером $L \leq$ 0,5 мм, пренебрежимо мала.

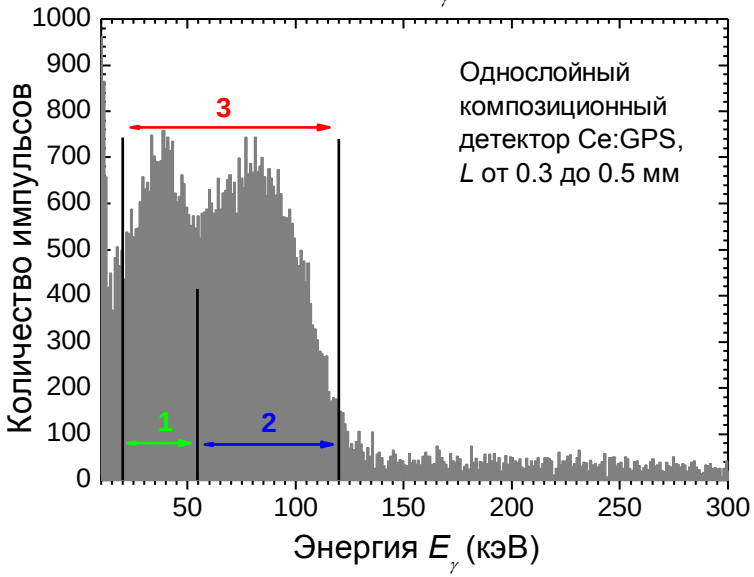
8. Композиционные Gd- содержащие сцинтилляторы - не гигроскопичные, эффективные детекторы тепловых нейтронов, для которых отсутствуют какие- либо технологические ограничения на их форму и площадь их входного окна.

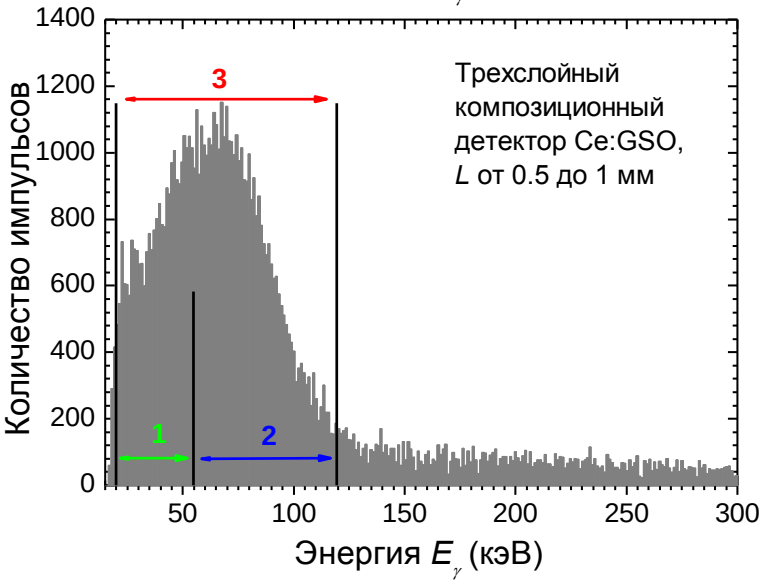
Спасибо за внимание

Сцинтилляционные спектры тепловых нейтронов





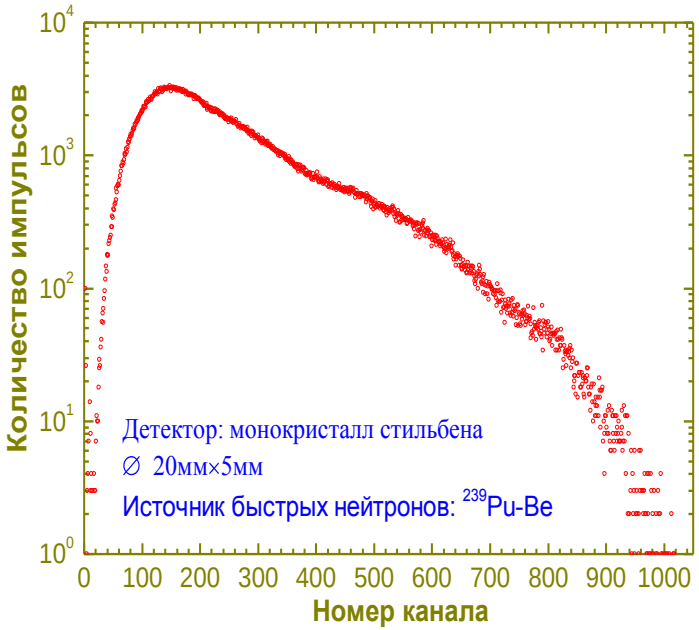




Ce:GSO Монокристалл толщиной 0.39 мм имел площадь входного окна **S = 100 мм^2**. У монокристалла **Ce:GPS** толщиной 0.35 мм **S = 120 mm^2.** Для композиционных сцинтилляторов **S = 514 mm^2**

Спектрометрия быстрых нейтронов

Спектр протонов отдачи полученный за счет применения ДФИ

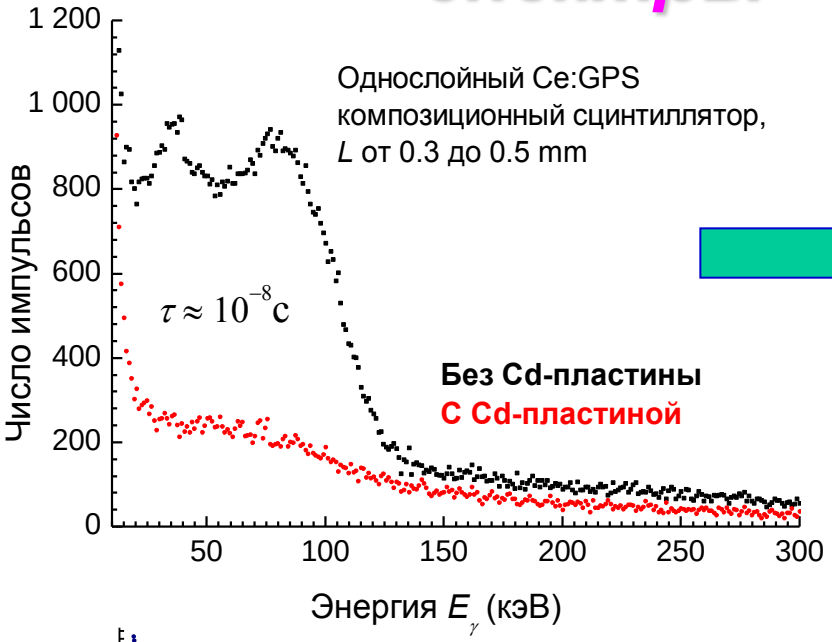


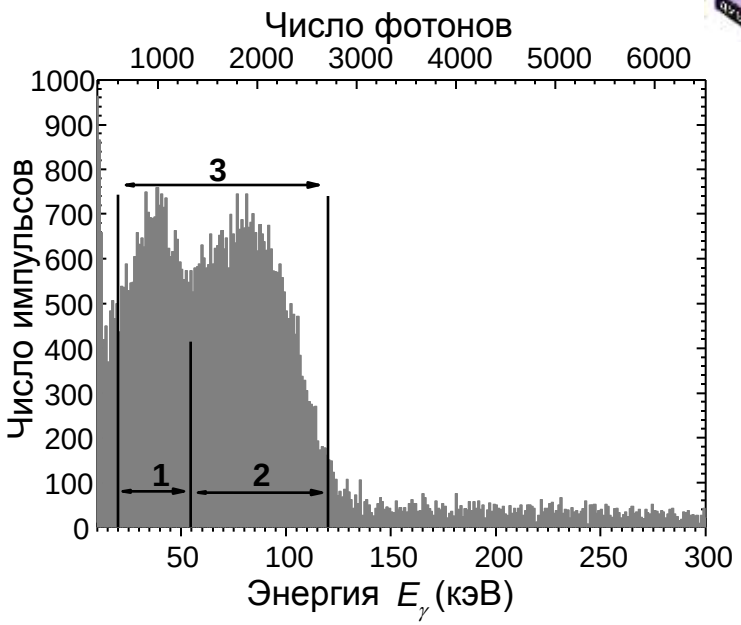
Восстановленный спектр быстрых нейтронов

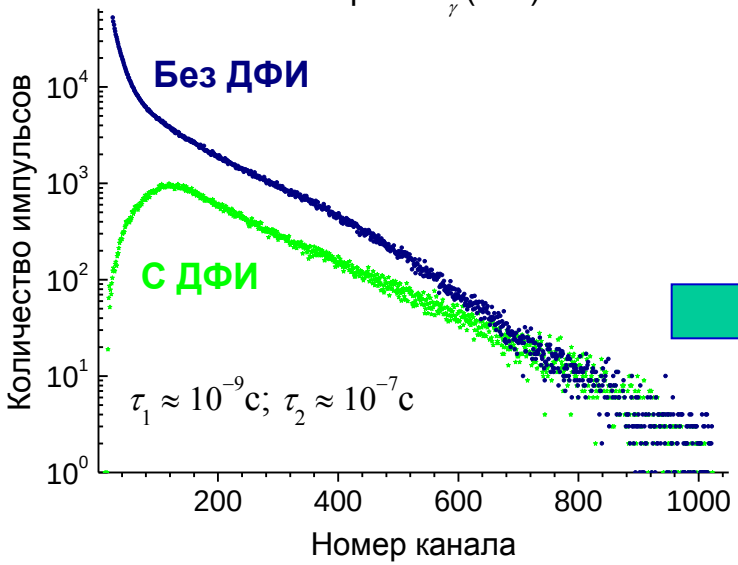
$$\varphi(E_n) = -\frac{E_n}{\varepsilon(E_n)} \times \left.\frac{du(E_p)}{dE_p}\right|_{E_p = E_n}$$

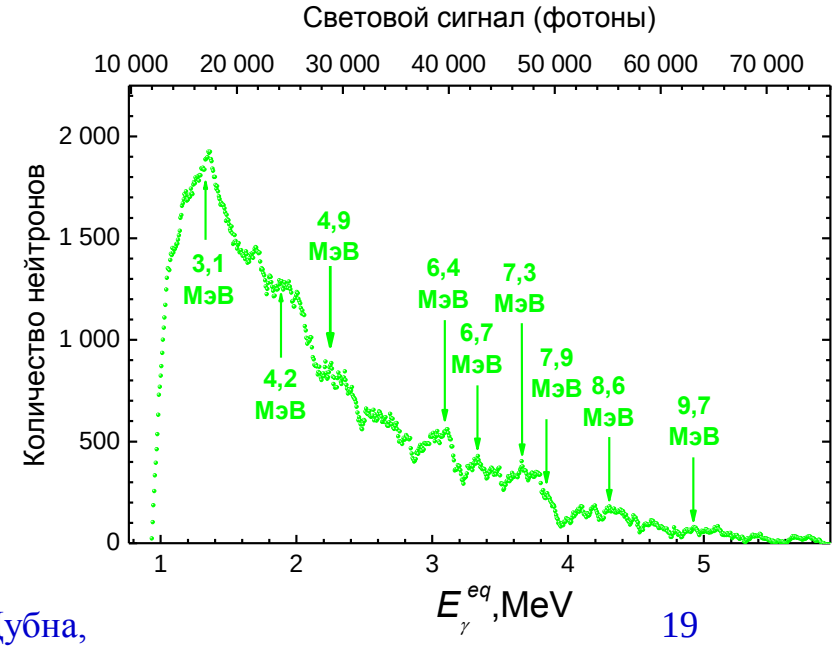
1. Iwanowska J., et.al, //***Journal of Instrumentation*** , 2011. – Vol.6, No 07007. – P. 1–10
2. Lee S. K., at. al., // ***Progress in Nuclear Science and Technology***, 2011. – Vol.1, No 1. – P. 292 – 395

Сцинтилляционные спектры

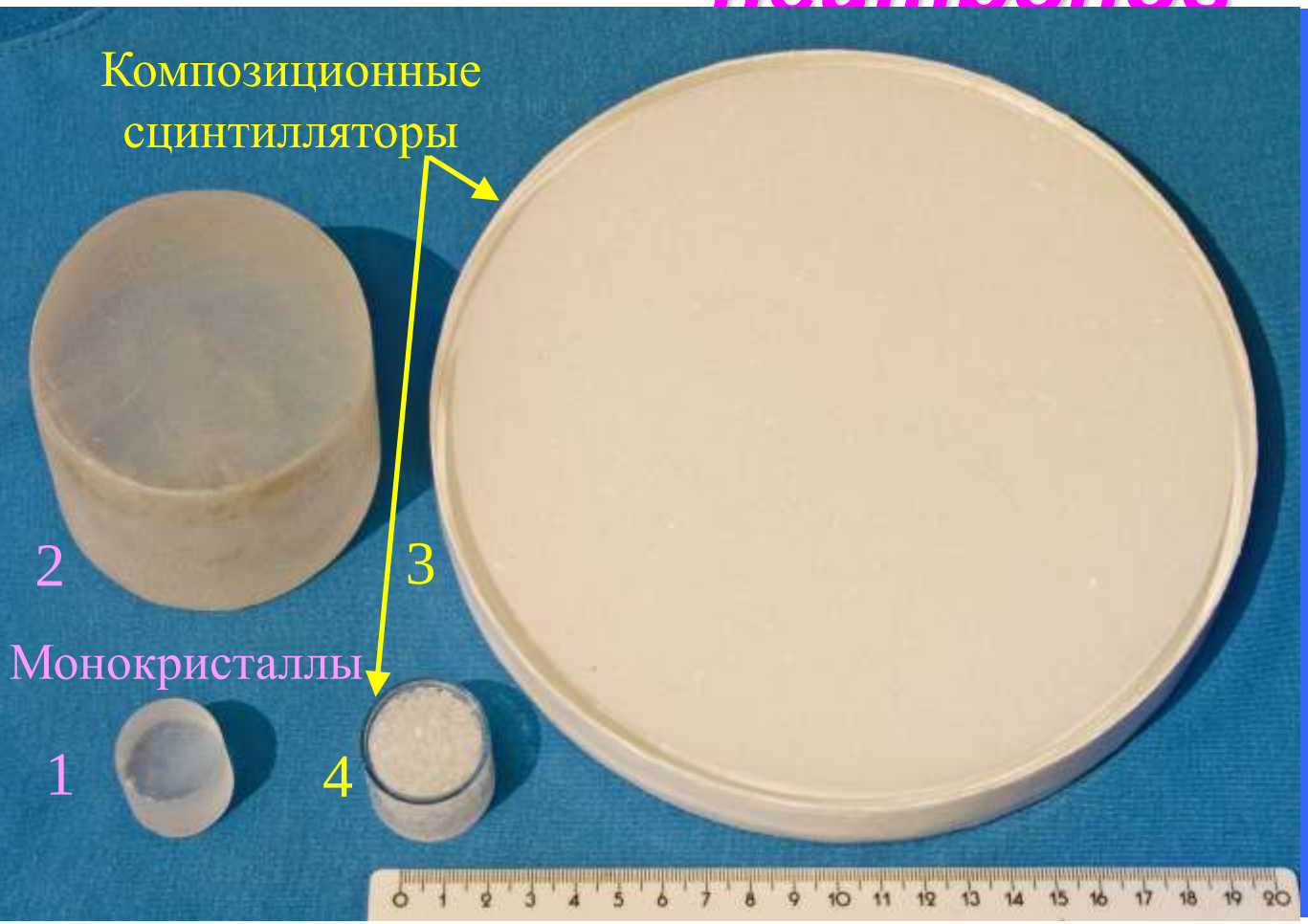








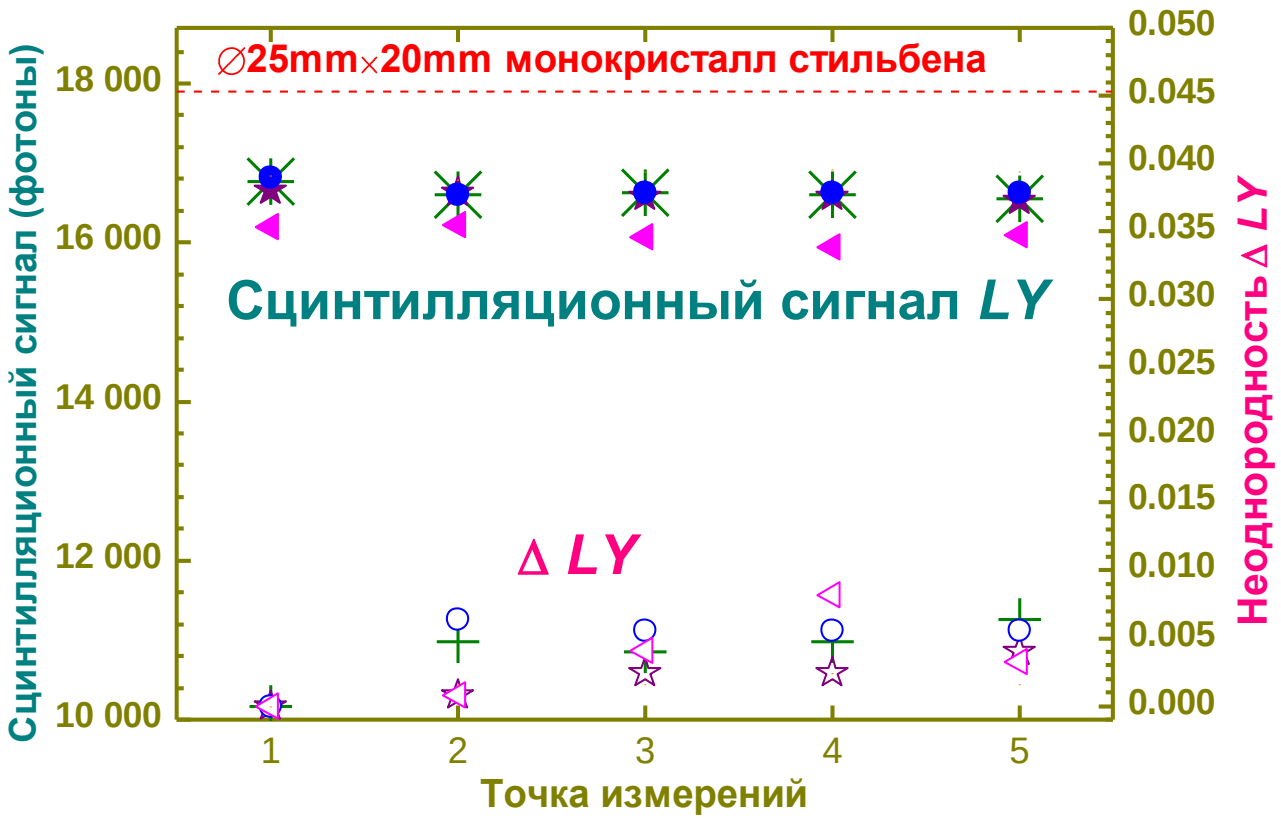
Детекторы быстрых нейтронов

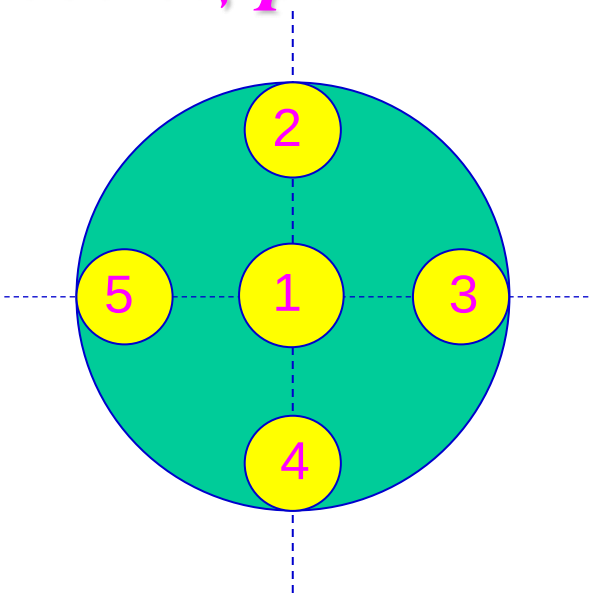


Монокристаллы:
1- стильбена
(Ø25 мм ×20 мм)
2 – *n*- терфенила
(Ø80 мм×50 мм)

Композиционные детекторы на основе стильбена
3 - (Ø200мм×20мм);
4 -(Ø30мм×20мм).

Неоднородность ΔLY сцинтилляционного сигнала LY композиционного сц-ра

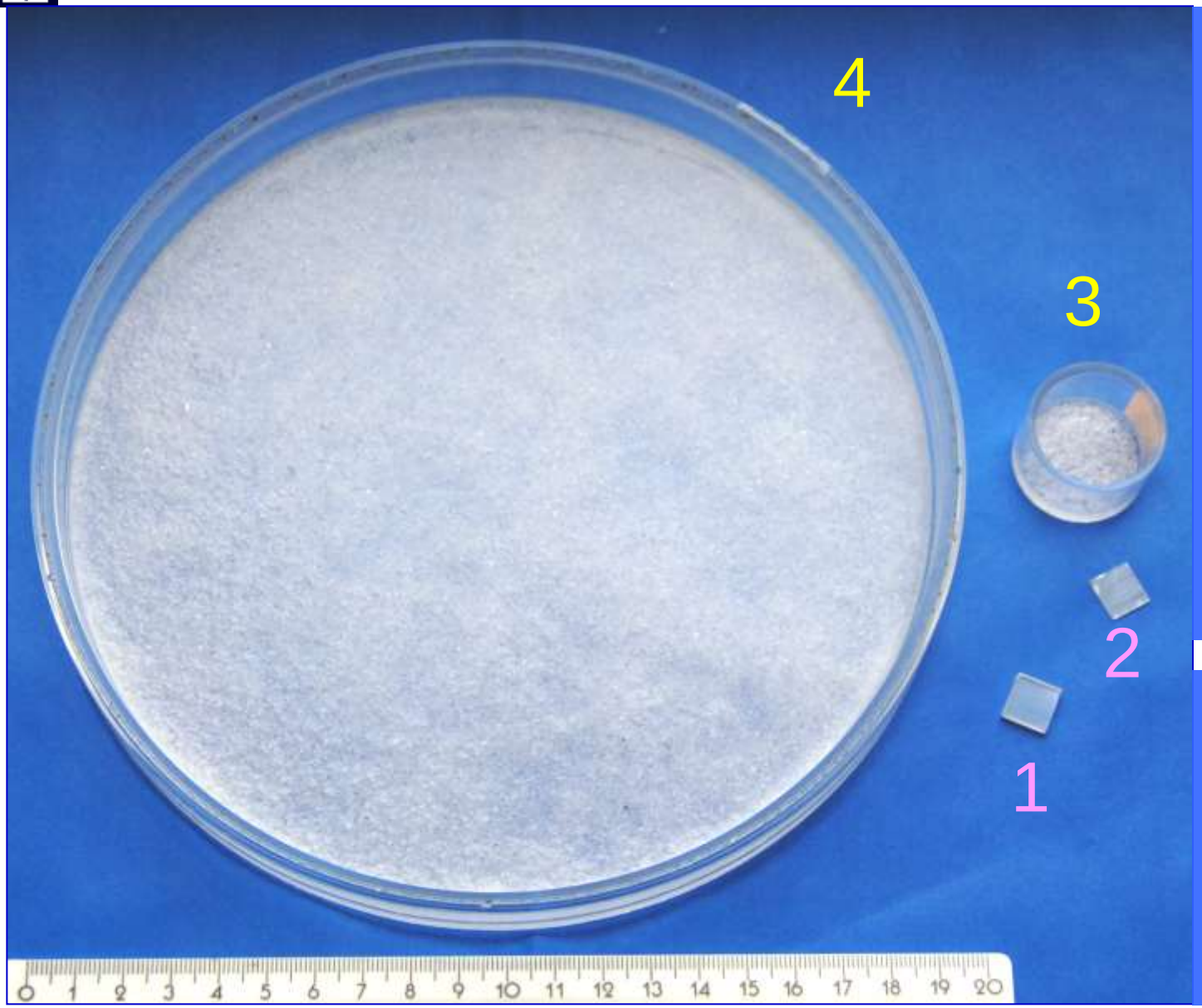




$$\Delta LY_i = \frac{\left| LY_1 - LY_i \right|}{\left| LY_1 + LY_i \right|}$$

Значение сцинтилляционного сигнала при возбуждении ^{137}Cs измерялось в точках 1-5 для 4-х композиционных сцинтилляторов на основе стильбена размером ∅200мм×20мм (верхнее семейство точек). Нижнее семейство точек показывает значение соответствующей неоднородности сигнала Δ*LY*.

Детекторы тепловых



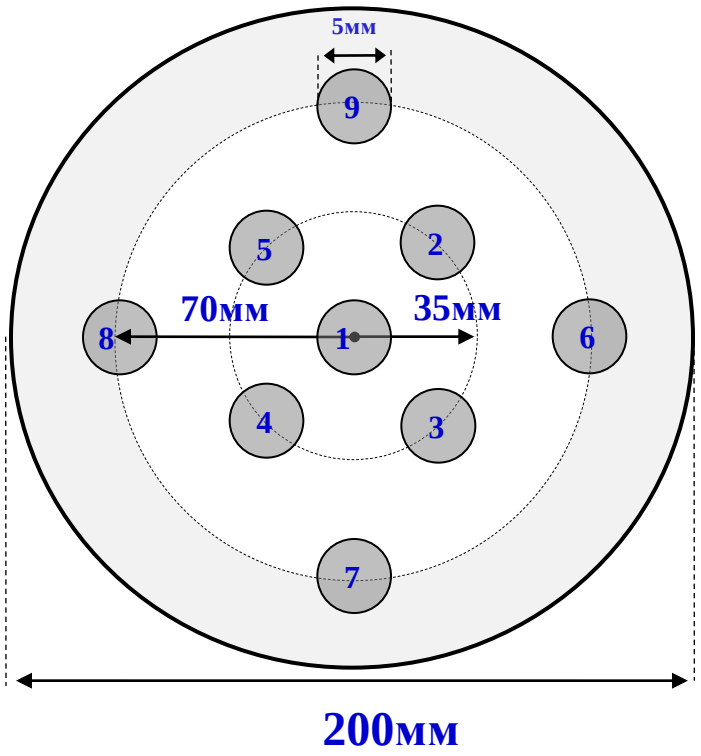
Активированные монокристаллы (~ 1см×1см):

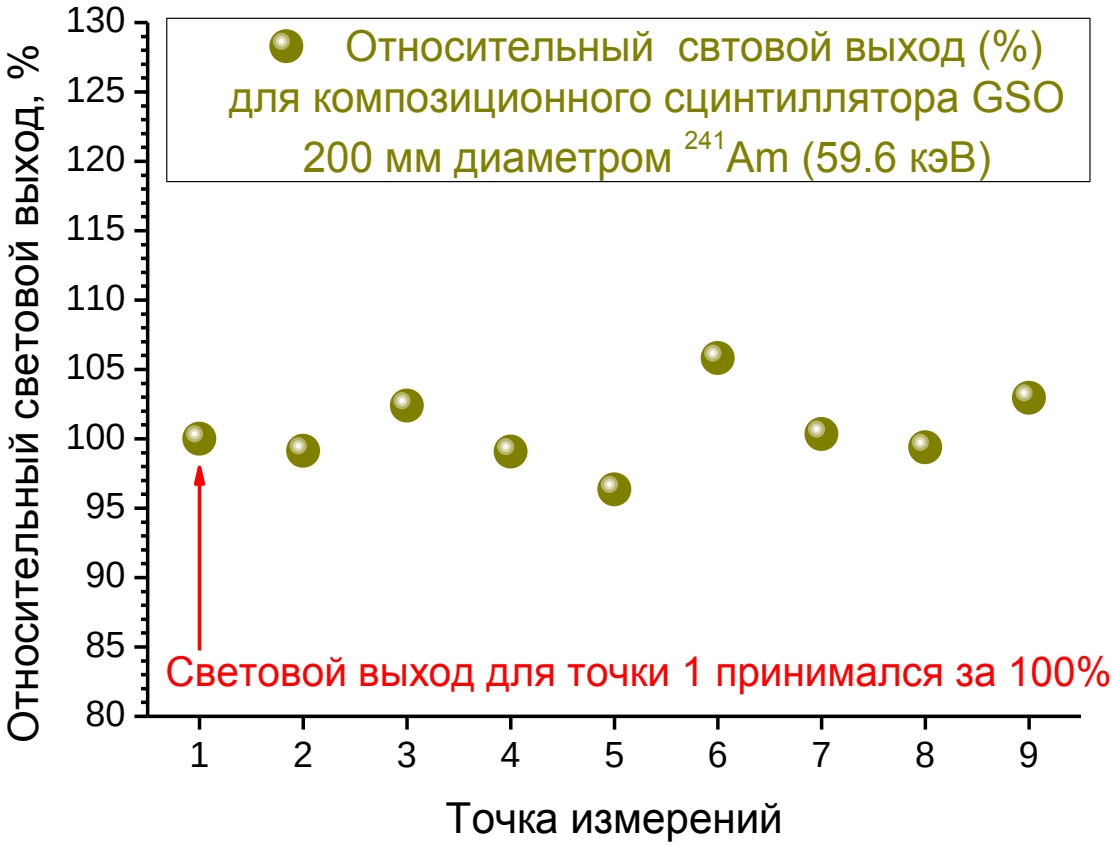
1- $Ce:Gd_2Si_2O_7$ пиросиликата гадолиния (Ce:GPS)

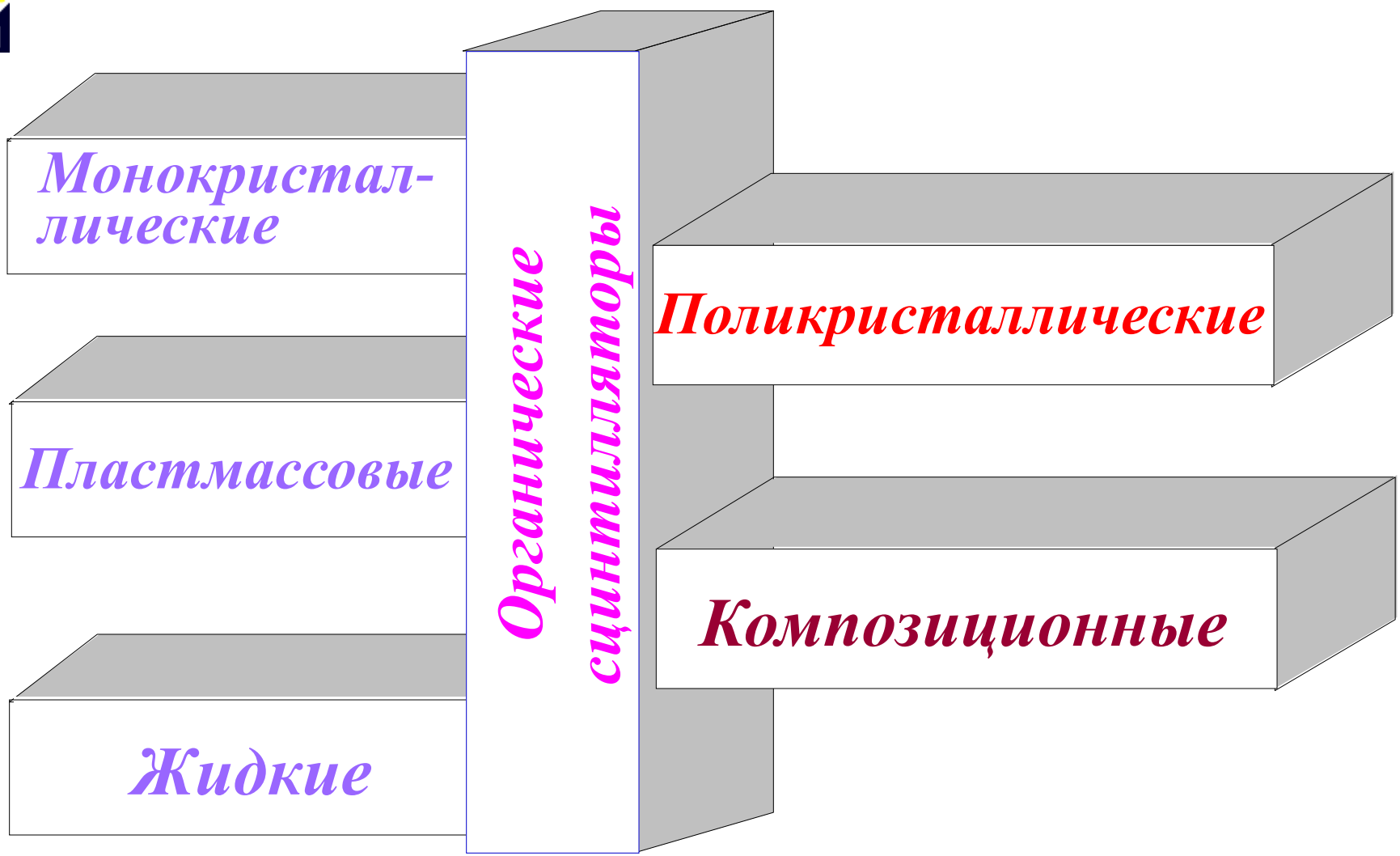
2- $Ce:Gd_2SiO_5$ силиката гадолиния (Ce:GSO)

Однослойные композиционные сцинтилляторы ($0.3 \le L \le 0.5$ мм)
3 – Ø 3 см;
4 – Ø20 см

Композиционные сцинтилляторы диаметром 20 см



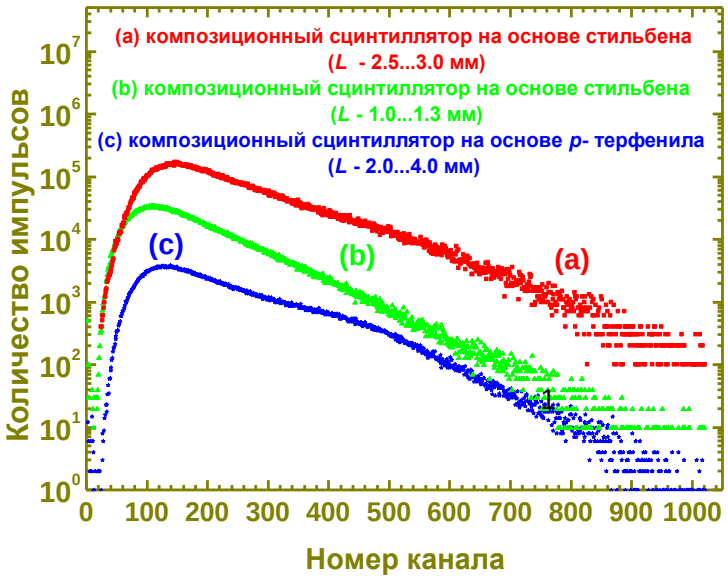


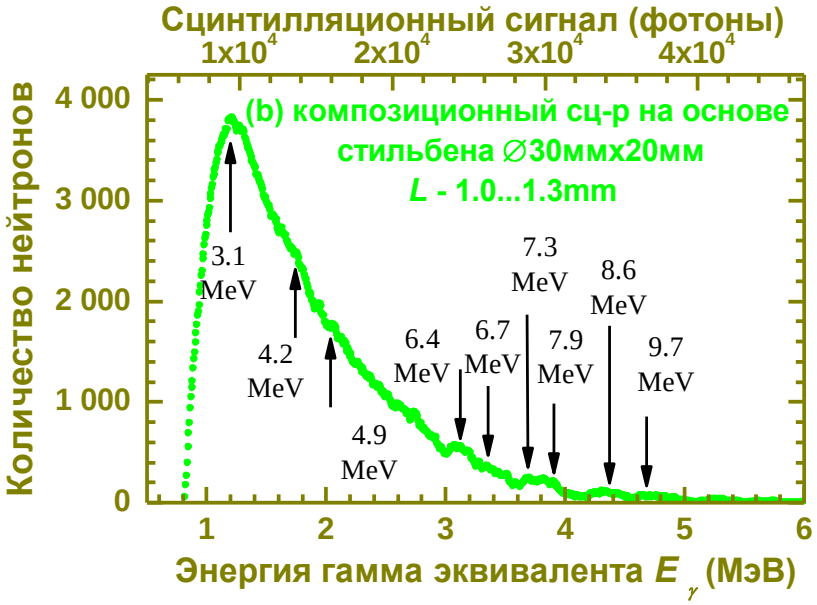


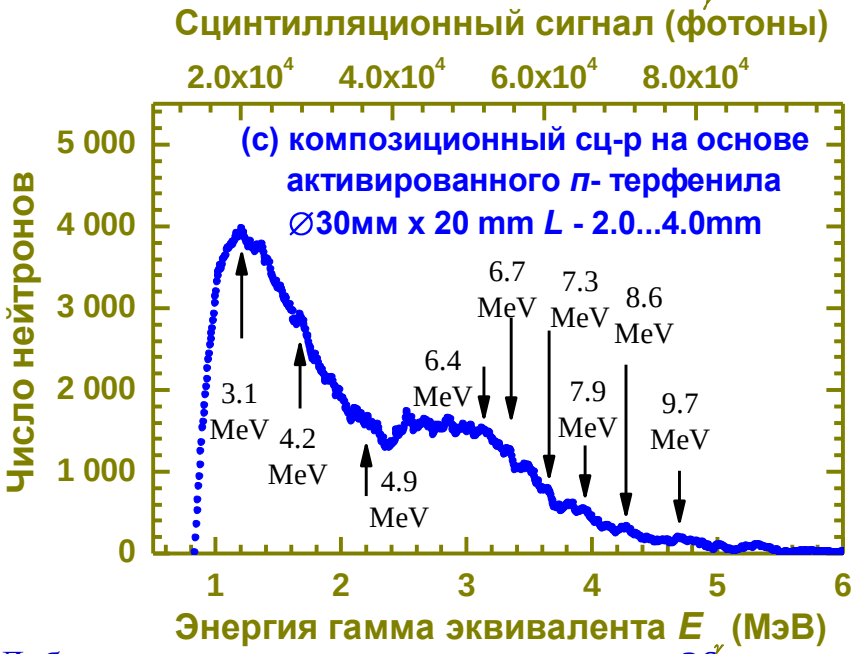
Галунов Н.З., Семиноженко В.П. *Теория и применение радиолюминесценции органических конденсированных сред*. Київ.: Наукова Думка, 1997.

Galunov N.Z., et. al. *Journal of Luminescence*. – 2003. – Vol.102-103. – P.464-468.

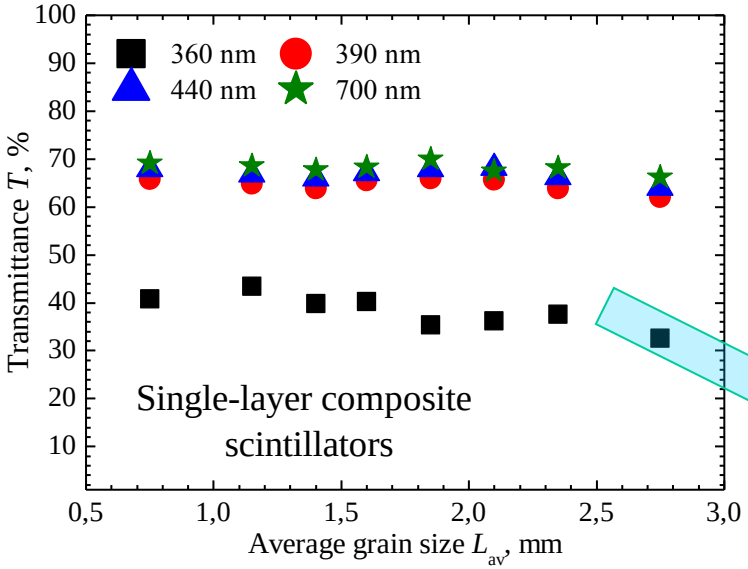
Спектры быстрых нейтронов





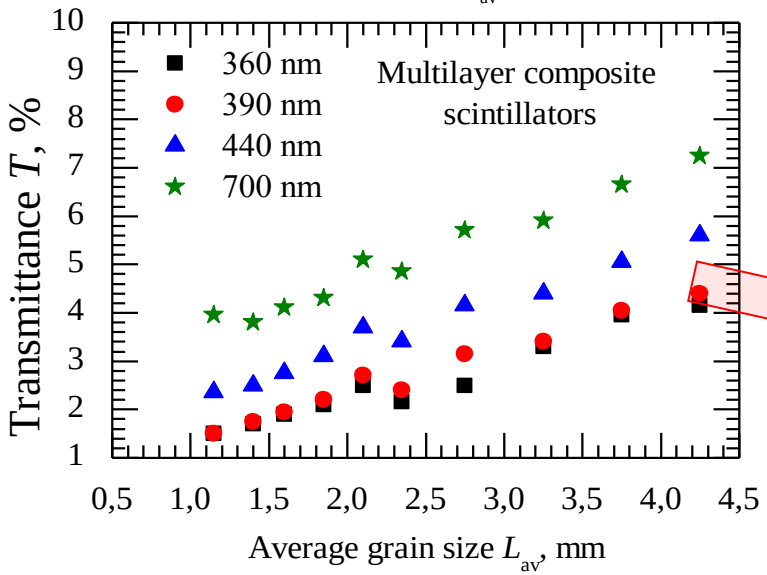


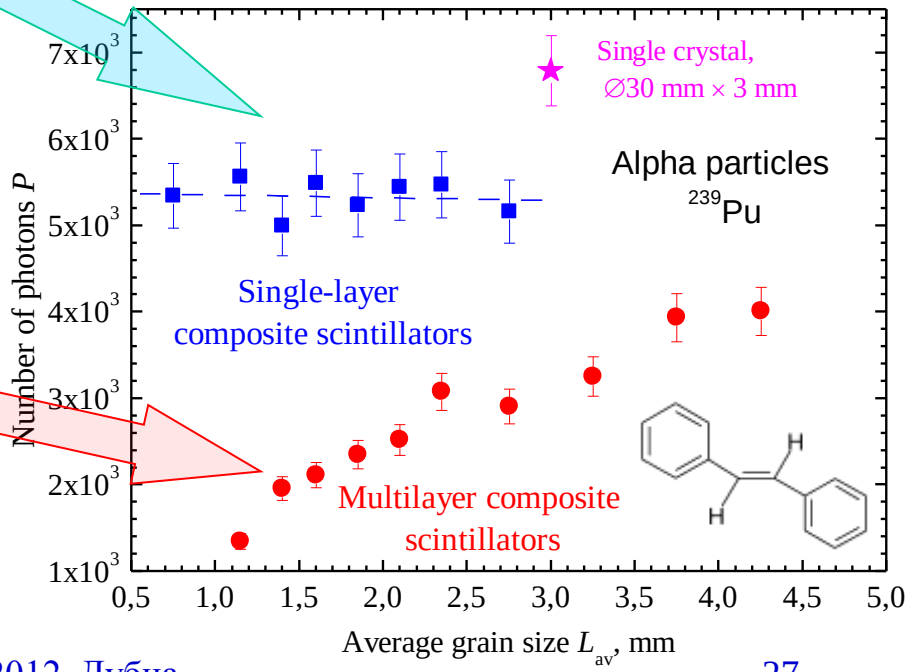
Correlation between the transmittance and the scintillation signal of the composite scintillators



Composite scintillators: ø 30 mm × *h*. For multilayer composite scintillators the thickness *h* = 20 mm .

For a multilayer composite scintillator with L_{av} increase the number of the grain surfaces those can scatter the scintillation light decreases.





Энергетические спектры $^{239}{}_{94}$Pu-Be и Cf радионуклидных источников

Литература:

1. *Anderson M.E., Neff R.A.* Neutron energy spectra of different size ^{239}Pu–Be (α,n) sources // **Nucl. Instr. and Meth.** – 1972. – Vol. 99, No.2. – P. 231-235.
2. *Geiger K.W., Van der Zwan L.* Radioactive neutron source. Spectra from ^{9}Be (α, n) cross section data // **Nucl. Instr. and Meth.** – 1975. – Vol. 131, No.2. – P.315-321.
3. *Горячев И.Г., Ковалеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А.* **Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений: справочное руководство**. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
4. *Мухин К.Н.* **Экспериментальная ядерная физика**. Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Энергоатомизат, 1993. – Т. 1: Физика атомного ядра. Ч. 1. Свойства нуклонов ядер и радиоактивных излучений. – 299 с.

Энергетические спектры $^{239}_{94}$Pu-Be и Cf радионуклидных источников

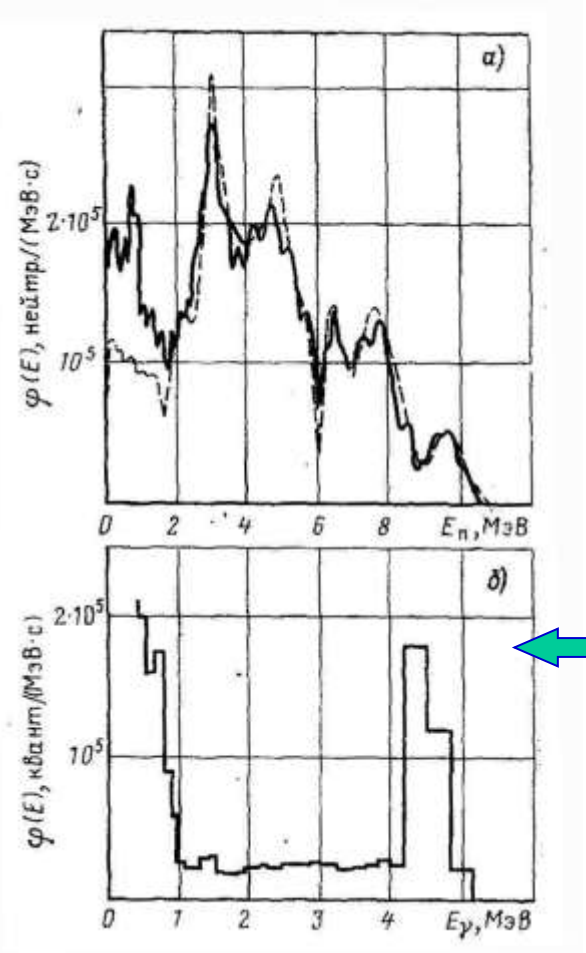
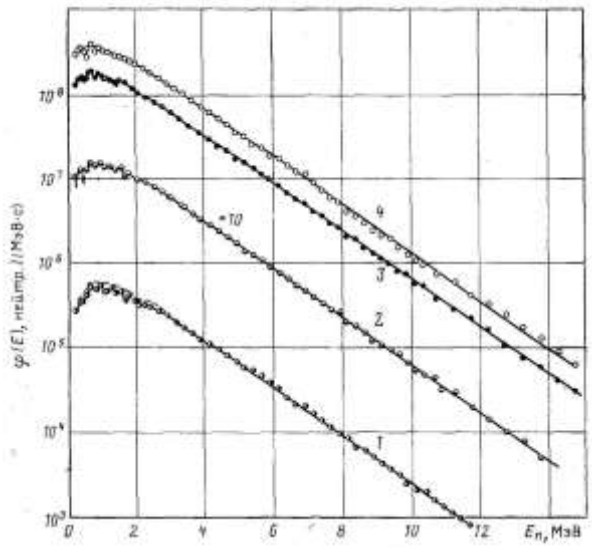
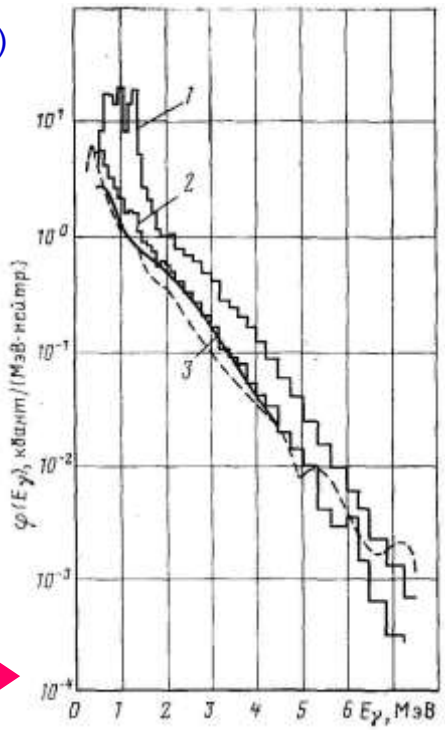


Рис. 1. Радионуклидный источник $^{239}_{94}$Pu-Be.
а) энергетический спектр нейтронов: ——— эксперимент, – – – – расчет;
б) энергетический спектр гамма-излучения.



а)

б)



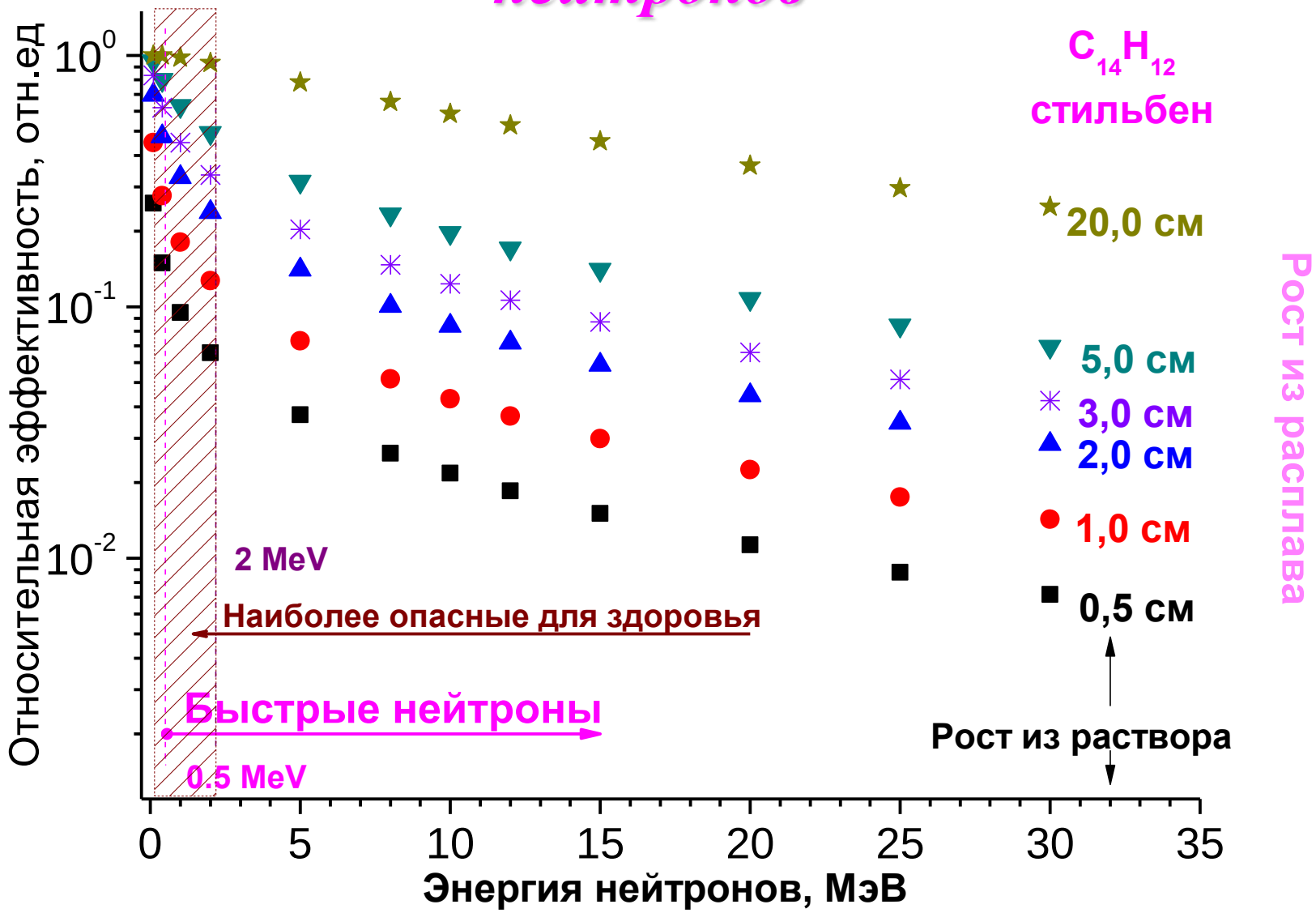
На один нейтрон приходится:
3 фотона гамма-излучения ;
от 2 до 15 фотонов гамма-излучения

Рис. 2. Энергетические спектры источника $^{252}_{98}$Cf.

а) – нейтроны: 1 – источник №1 (в виде иглы диаметром 1,7 и высотой 36 мм), 2 – источник №2 (в ампуле из стали диаметром 8 и высотой 40 мм), 3 – источник №3 (в двойной ампуле из нержавеющей стали диаметром 10 и высотой 8 мм и внешней ампуле из меди диаметром 15 и высотой 14 мм), 4 – источник №4 (состоит из 4-х отдельных источников в ампулах из нержавеющей стали, упакованных в ампулу из стали диаметром 20 и высотой 30 мм);

б) – фотоны гамма-излучения: 1 – источник №1, 2 – источник №3, 3 – источник №4, – – – – – спектр мгновенного гамма излучения при делении ^{235}U тепловыми нейтронами.

Размер – эффективность регистрации быстрых нейтронов



Гранулы Gd-содержащих сцинтилляторов

1. Мы использовали активированные церием сцинтилляционные монокристаллы силиката гадолиния $Ce:Gd_2SiO_5$ (Ce:GSO) и пиросиликата гадолиния $Ce:Gd_2Si_2O_7$ (Ce:GPS). Содержание гранул в композиционном сцинтилляторе ~ 70 весовых %.

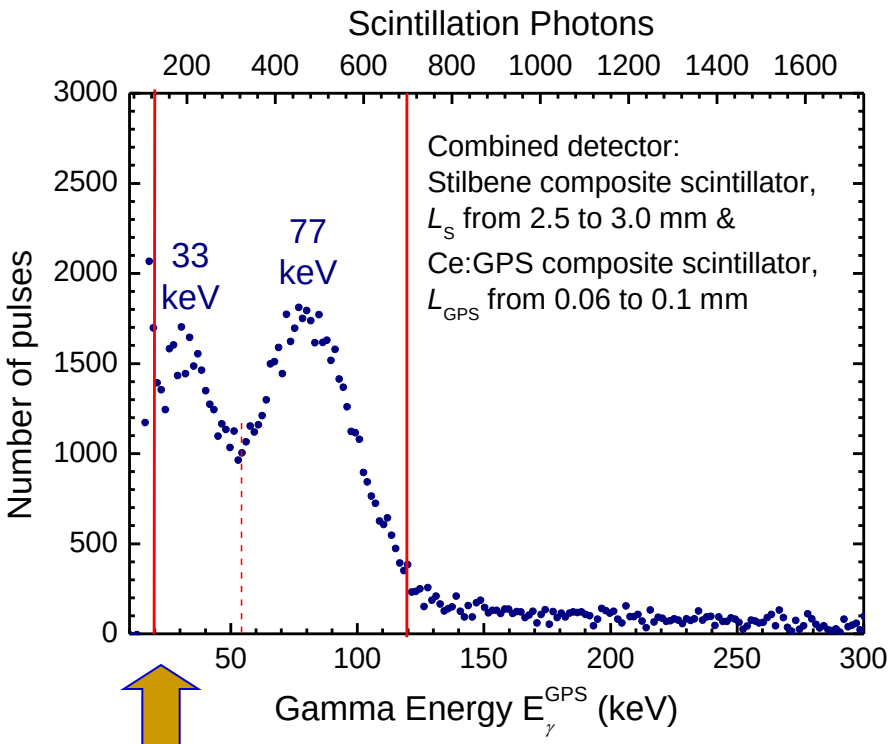
2. Ce:GSO и Ce:GPS кристаллы были выращены методом Чохральского. Содержание Ce в GSO ~ 0.5 мол.%, а в Ce:GPS ~ 7 мол.%.

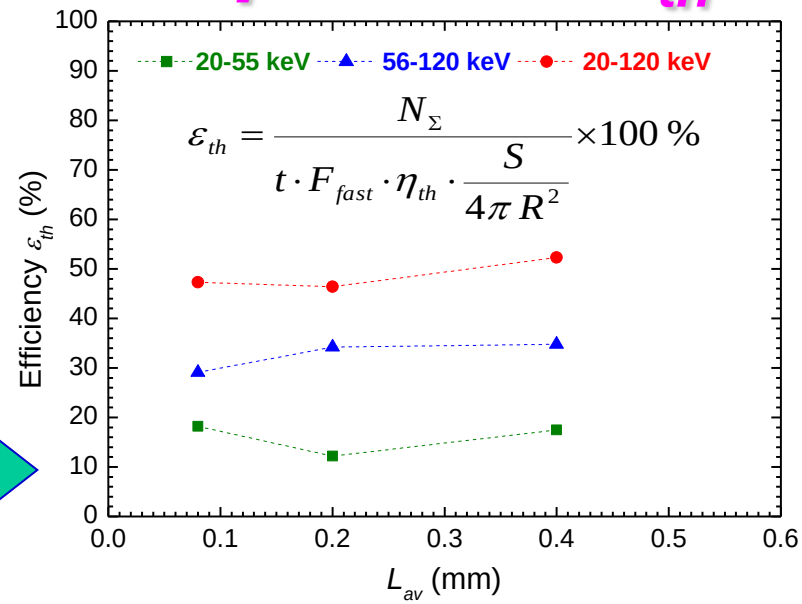
3. Световой выход Ce:GSO (6-9)x10^3 фотонов/МэВ (τ ~ 30 - 60нс). У Ce:GPS (τ ~ 46нс) световой выход в 2,5 раза выше чем у GSO.

4. Для получения сцинтилляторов большого объема необходимы кардинальные изменения технологий роста кристаллов.

Технология создания композиционных сцинтилляторов – это иной (альтернативный) подход к получению детекторов тепловых нейтронов с неограниченной площадью входного окна

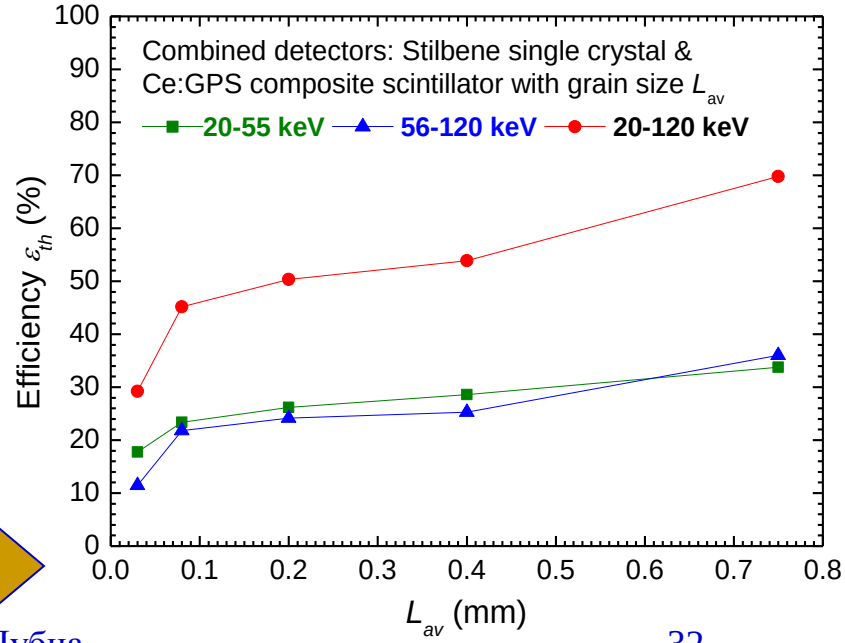
Эффективность детектирования ε_{th}



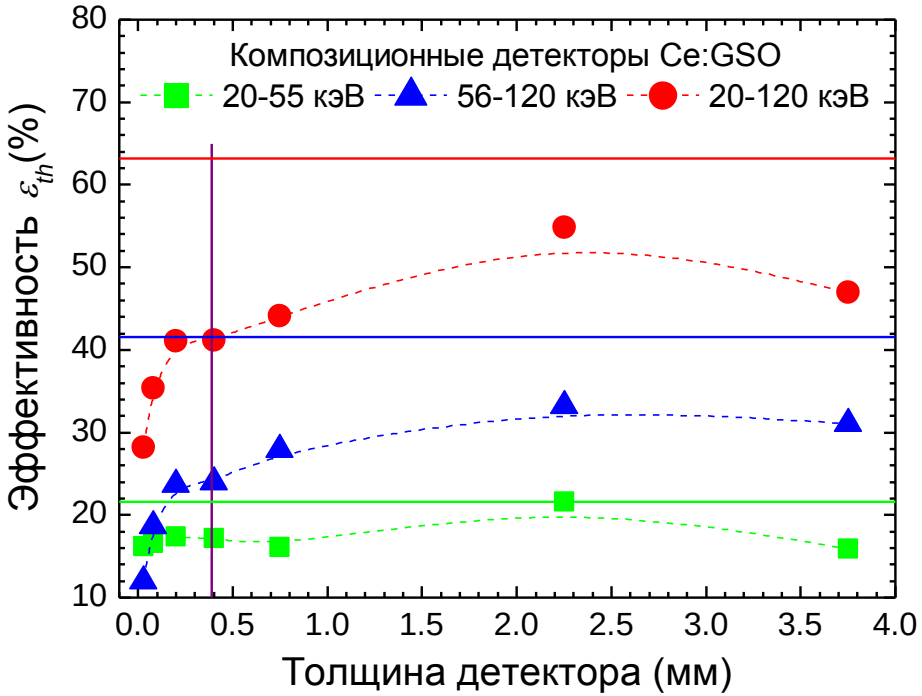


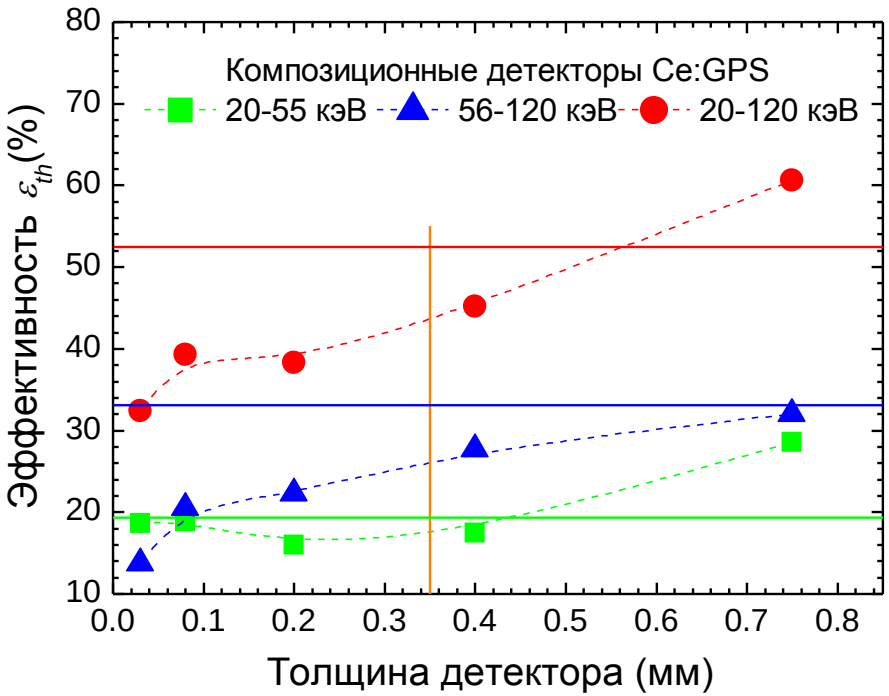
A scintillation amplitude spectrum of the combined detector (stilbene composite scintillator with L_{Stilb} from 2.5 to 3.0 mm and Ce:GPS composite scintillator with L_{GPS} from 0.06 to 0.1 mm)

Stilbene single crystal & Ce:GPS composite scintillator with grain size L_{GPS}



Эффективность ε_{th} детектирования тепловых нейтронов



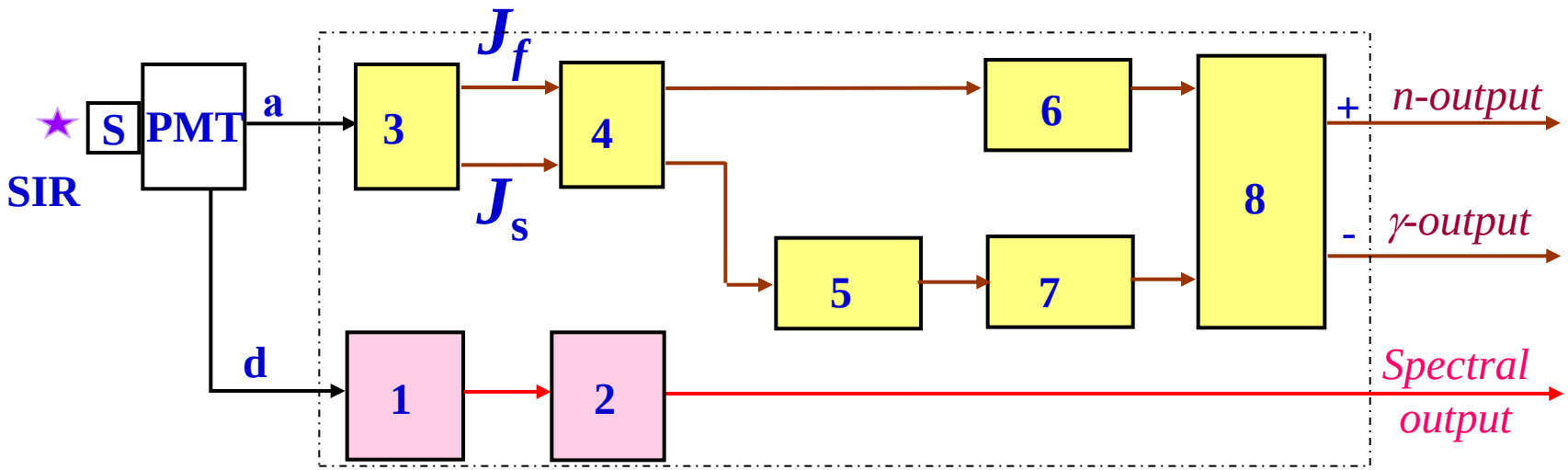


$$\varepsilon_{th} = \frac{N_\Sigma}{t \cdot F_{fast} \cdot \eta_{th} \cdot \dfrac{S}{4\pi R^2}}$$

$$\xi_{th} = \frac{\varepsilon_{th}^C S_C}{\varepsilon_{th}^S S_S}; \xi_{th} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{th}^C / \varepsilon_{th}^S \approx 0.7 - 0.9 \\ S_S \le S_S^{\max} \\ S_C \text{ нет ограничений} \end{cases}$$

N_Σ - число детектируемых событий, t - время измерений; F_{fast} – поток быстрых нейтронов, η_{th} =0.09, S – площадь входного окна, R – расстояние меду источником и детектором. Обозначения $\varepsilon_{th}{}^C$ и $\varepsilon_{th}{}^S$, S_C и S_S введены для композиционных и монокристаллических сцинтилляторов, соответственно.

Block-diagram of set-up for selective detection the ionizing radiations with different dE/dx



SIR is a source of ionizing radiation; **S** is a scintillator; **PMT** is a photomultiplier tube; **a** is a PMT anode output; **d** is the output of the next to the last dynode of a PMT;

1 is a charge sensitive amplifier; **2** is a pulse former amplifier; **3** is a discrimination circuit (it separates "fast" and "slow" signals); **4** is an integrator; **5** is an inverter; **6**, **7** are amplifiers with adjusted gain; **8** is a summer;

n-output is the neutron control output; γ-output is gamma control output; spectral output is the spectrometric output.

Decay times

For organic single crystal or composite scintillator:

$\tau_F = 3 — 4$ ns, $\tau_S \sim 300$ ns

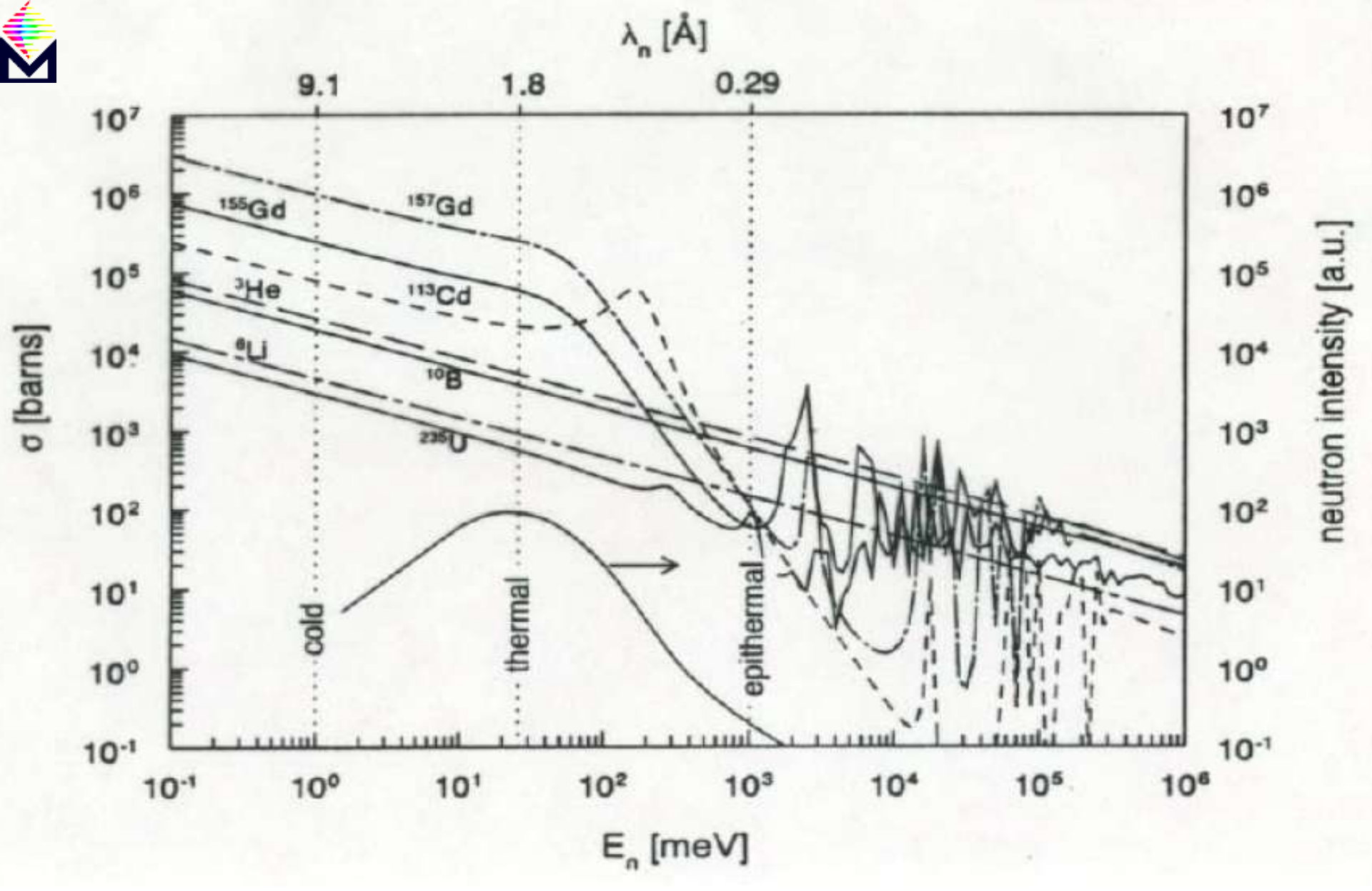
Detector	Decay Time, ns
Ce:GSO single crystal, thickness 0.39 mm (0.5 mol.% Ce)	33.0
Single-layer composite detector, Ce:GSO, grains from 0.06 to 0.1 mm	44.5
Single-layer composite detector, Ce:GSO, grains from 0.3 to 0.5 mm	44.5
Ce:GPS single crystal, thickness 0.35 mm (7 mol.% Ce)	45.2
Single-layer composite detector, Ce:GPS, grains from 0.06 to 0.1 mm	42.1
Single-layer composite detector, Ce:GPS, grains from 0.3 to 0.5 mm	42.1

Мотивация

Эквивалентная доза (в зильвертах (S_v)) равна поглощенной дозе гамма – излучения умноженной на w_R, где w_R – это радиационно – весовой фактор (ранее использовался фактор качества Q).

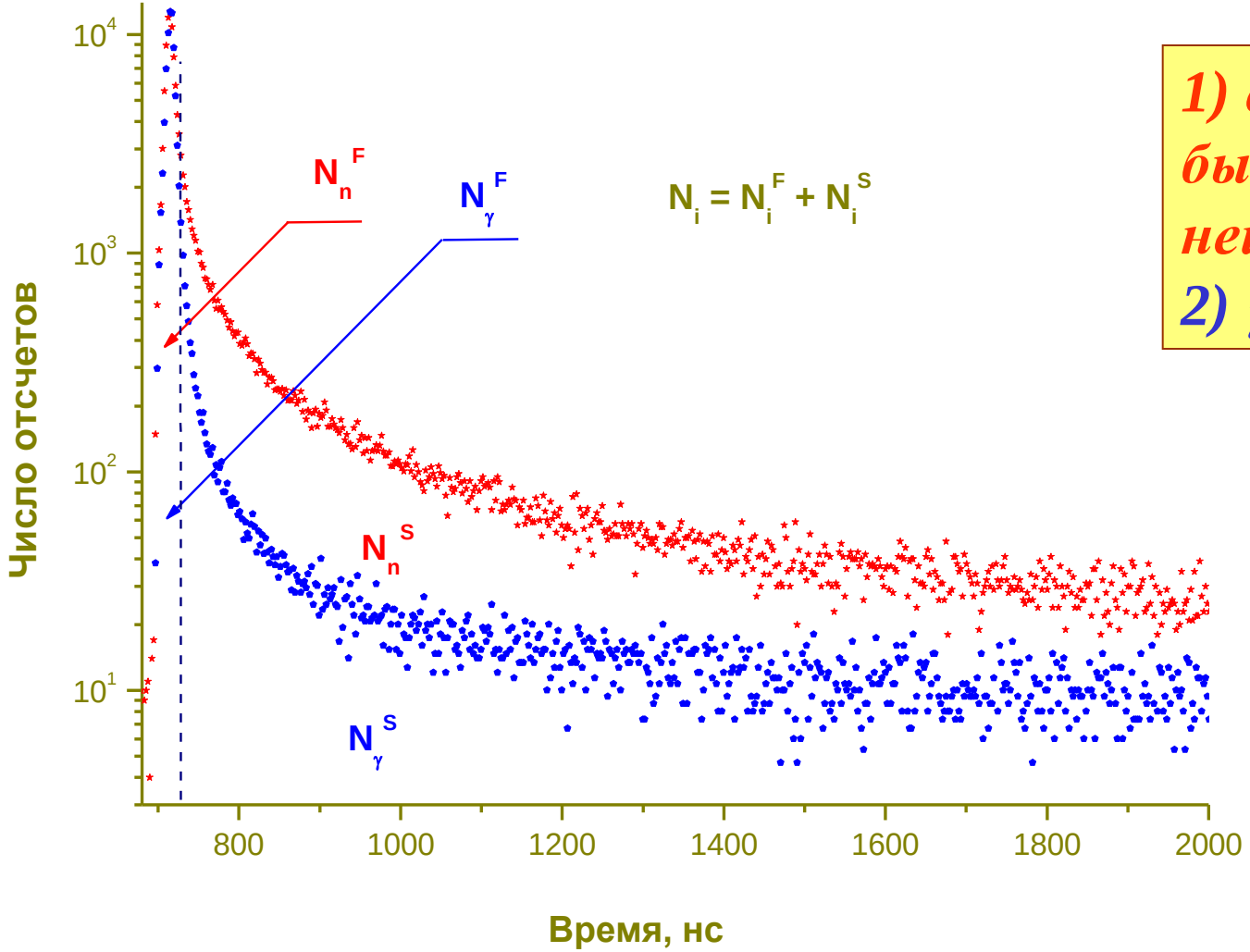
[The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. - Annals of the ICRP. - 2007. - Vol.37. - P.1-332.].

Радиационно – весовой фактор w_R – это величина выражающая долгосрочную опасность постоянного облучения малыми и сверхмалыми дозами (рак, лейкемия, тяжелые легочные аллергии т.д.). Эта величина в первую очередь определяется типом облучения. Например, для γ- облучения $w_R = 1$, в то время как для быстрых нейтронов $E_n \leq 2$ МэВ и альфа частиц $w_R = 20$.


λn [Å]
9.1
1.8
0.29
σ [barns]
neutron intensity [a.u.]
155Gd
157Gd
3He
113Cd
6Li
10B
235U
cold
thermal
epithermal
En [meV]

G. Smith, (BNL)

Задержанная радиолюминесценция и дискриминация по форме сцинтилляционного импульса (ДФИ)



1) возбуждение быстрыми нейтронами;

2) γ- возбуждение

ДФИ

$$\left(\frac{N_n^F}{N_n^S}\right) \Big/ \left(\frac{N_\gamma^F}{N_\gamma^S}\right)$$

$$ {}_0^1n + {}_2^3\mathrm{He} \Rightarrow {}_1^3\mathrm{H} + {}_1^1p \quad \left[0{,}76\,\text{МэВ}\left(2{,}5\times10^4\,\textit{пар / нейтрон},\quad 4\times10^{-15}\,\text{Кл}\right)\right] $$

$$ {}_0^1n + {}_3^6\mathrm{Li}\,(7{,}5\%) \Rightarrow {}_1^3\mathrm{H}\,(2{,}75\,\text{МэВ}) + {}_2^4\mathrm{He}\,(2{,}05\,\text{МэВ})\left[\sigma = (0{,}5-0{,}9)\times10^3\ \text{барн}\right] $$

$$ \left[\sigma = (2{,}1-3{,}8)\times10^3\ \text{барн}\right] \Rightarrow \begin{cases} {}_0^1n + {}_5^{10}\mathrm{B}\,(20\%) \\ {}_3^7\mathrm{Li}\,(1{,}0\,\text{МэВ}) + {}_2^4\mathrm{He}\,(1{,}8\,\text{МэВ}) \quad \{7\%\} \\ {}_3^7\mathrm{Li}\,(0{,}83\,\text{МэВ}) + {}_2^4\mathrm{He}\,(1{,}47\,\text{МэВ}) + \gamma\,(0{,}48\,\text{МэВ})\{93\%\} \end{cases} $$

$$ {}_0^1n + {}_{64}^{155}\mathrm{Gd}\,(15\%) \Rightarrow {}_{64}^{156}\mathrm{Gd} + \gamma's + e^-_{\textit{конверсии}} + X\ \{80\%\} \quad \left[\sigma = (1{,}7-6)\times10^4\ \text{барн}\right] $$

$$ {}_0^1n + {}_{64}^{157}\mathrm{Gd}\,(16\%) \Rightarrow {}_{64}^{158}\mathrm{Gd} + \gamma's + e^-_{\textit{конверсии}} + X\ \{85\%\} \quad \left[\sigma = (0{,}7-2{,}5)\times10^5\ \text{барн}\right] $$

$$ \mu_n = N_A\,\rho\,\sigma\,w/A, $$

где μ_n – линейный коэффициент поглощения $\left(\text{см}^{-1}\right)$, N_A – число Авогадро, ρ – плотность сцинтиллятора, σ – сечение реакции, w – концентрация нейтронно – чувствительных ядер, A – их атомная масса.

$$ {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}p + 0.77\,\text{MeV} \quad (1) $$

$$ {}^{6}_{3}Li + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{4}_{2}He + 4.79\,\text{MeV}\ (520\text{b}) \quad (2) $$

$$ {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He + 2.78\,\text{MeV}\ (0.7\%) \quad (3) $$

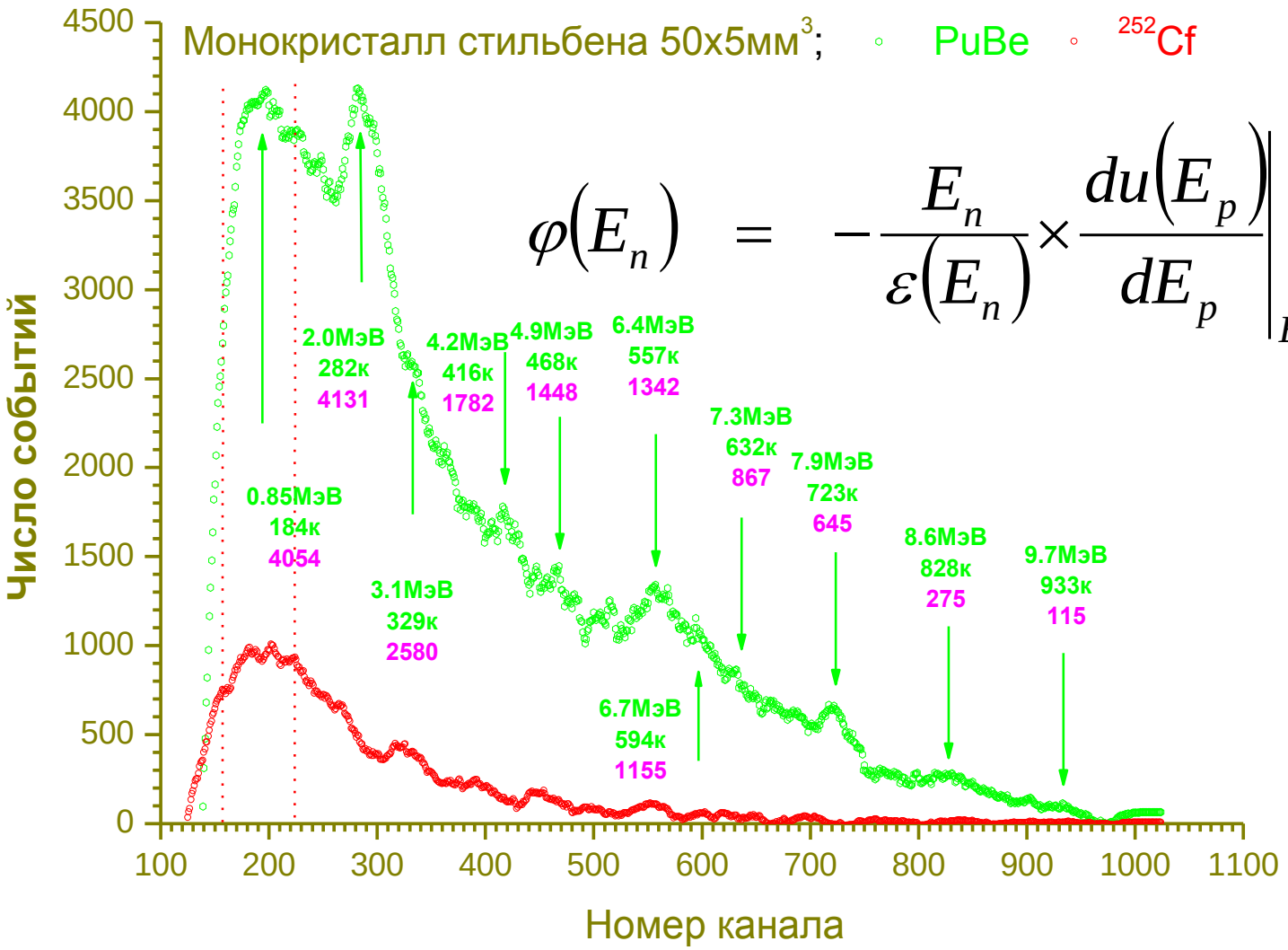
$$ \begin{aligned} {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n &\Rightarrow {}^{7}_{3}Li^{*} + {}^{4}_{2}He + 2.30\,\text{MeV}\ (93\%) \Rightarrow \\ &\Rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He + \gamma\,(0.48\,\text{MeV}) \end{aligned} \quad (4) $$

$$ {}^{113}_{48}Cd + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{114}_{48}Cd + \gamma + \begin{cases} 558\,\text{keV}\ (\sigma = 1860\ \text{barns}) \\ 651\text{keV}\ (\sigma = 358\ \text{barns}) \\ \ldots(95 - 5934\,\text{keV}) \end{cases} \quad (5) $$

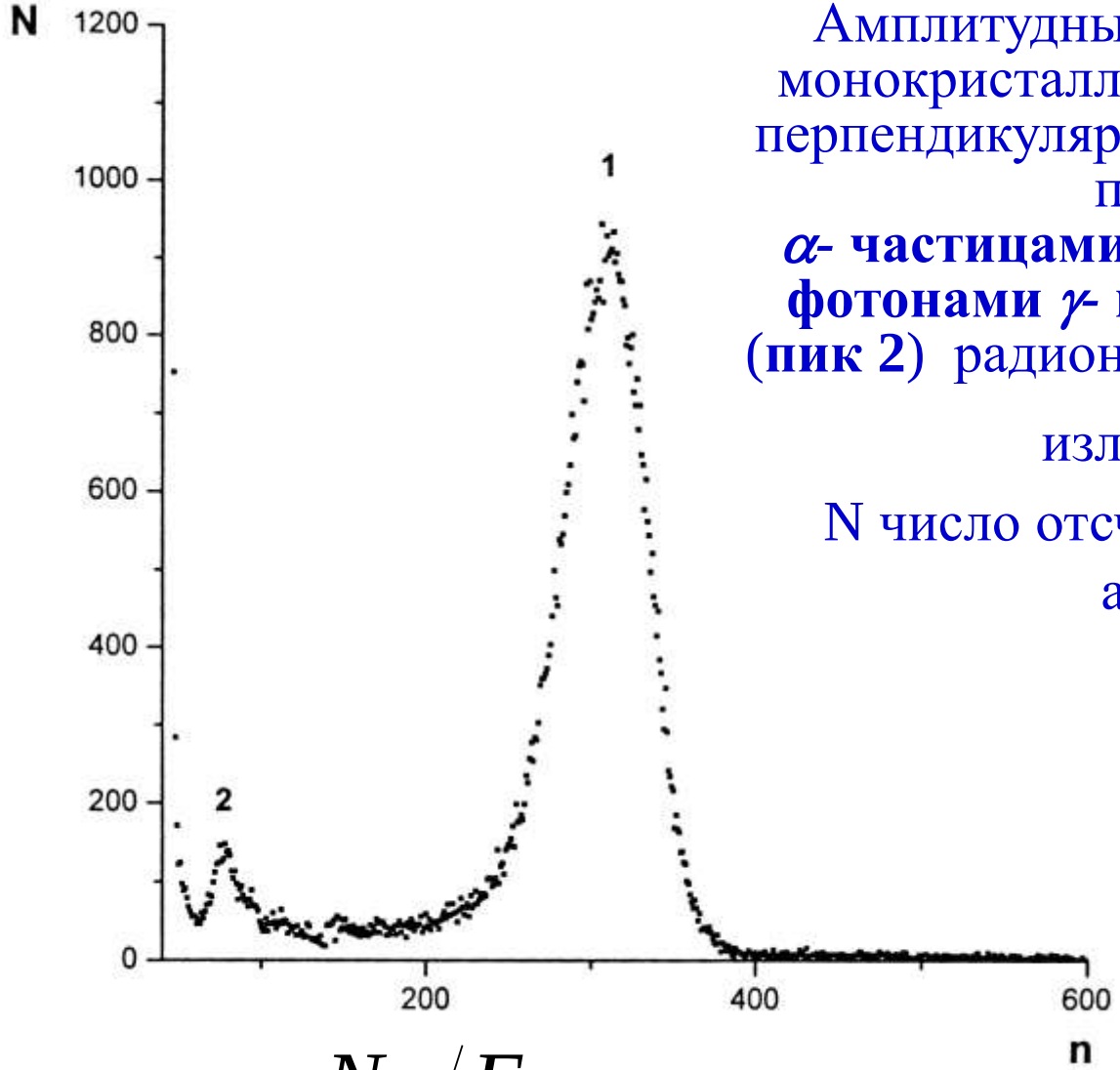
$$ {}^{155}_{64}Gd + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{156}_{64}Gd + \gamma + conversion\ \ electrons\,(7.9\,\text{MeV}) \quad (6) $$

$$ {}^{157}_{64}Gd + {}^{1}_{0}n \Rightarrow {}^{158}_{64}Gd + \gamma + conversion\ \ electrons\,(8.5\,\text{MeV}) \quad (7) $$

Восстановленные нейтронные спектры



$$\varphi(E_n) = -\frac{E_n}{\varepsilon(E_n)} \times \left.\frac{du(E_p)}{dE_p}\right|_{E_p = E_n}$$



Амплитудный спектр сцинтилляций монокристалла антрацена облучаемого перпендикулярно кристаллографической плоскости *ab*

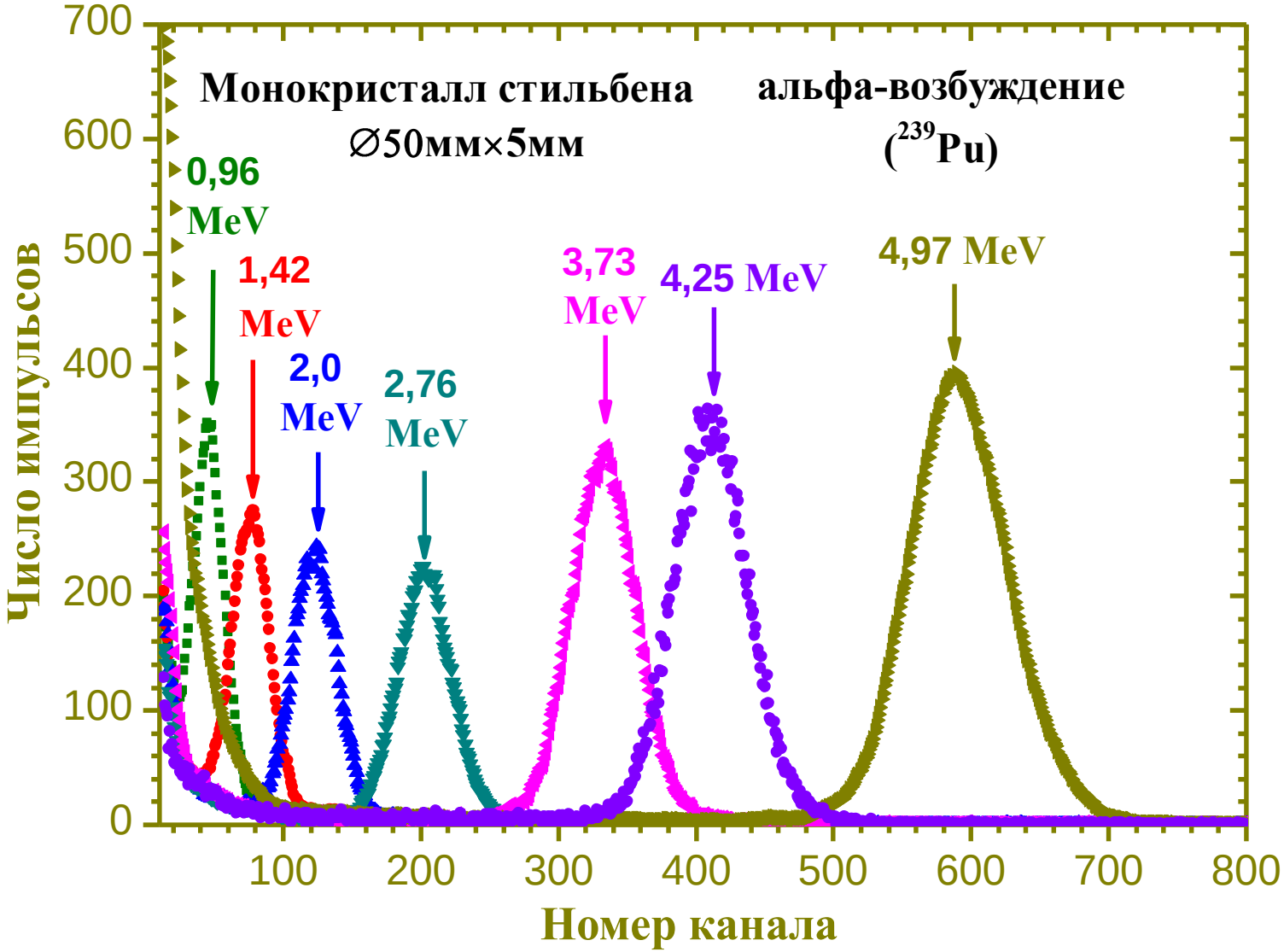
α- частицами E_α = 5.25 МэВ (пик 1) и **фотонами γ- излучения E_γ = 59,6 кэВ (пик 2)** радионуклидного источника α/γ-излучений ^{241}Am.

N число отсчетов, n – номер канала анализатора.

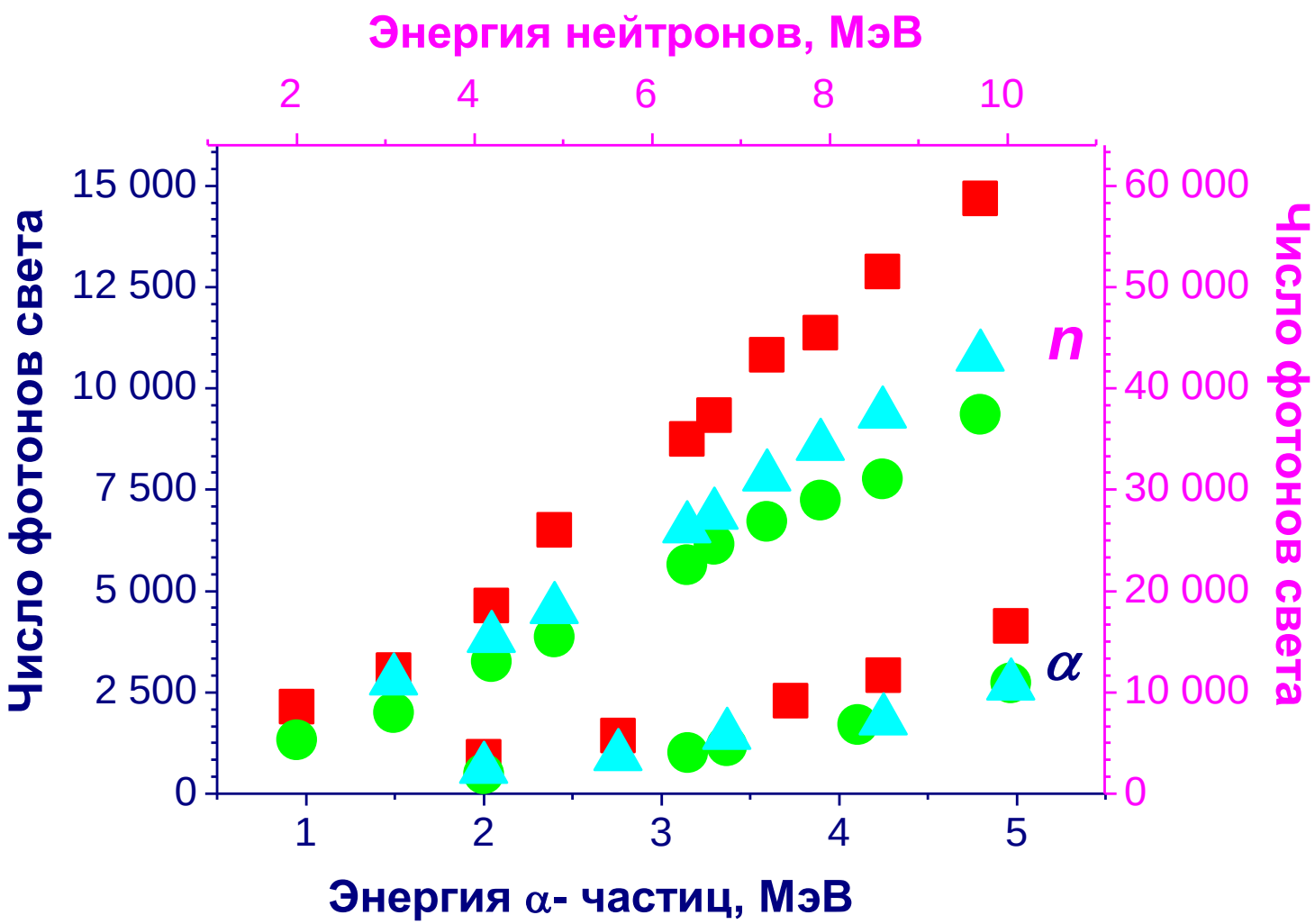
$$\xi_{\alpha\gamma} = \frac{N_\alpha / E_\alpha}{N_\gamma / E_\gamma}$$

Моно-кристалл	$\xi_{\alpha\gamma}$
Антрацен	0.04
Стильбен	0.05
n-Терфенил	0.07

Спектрометрия альфа излучений



Выход света



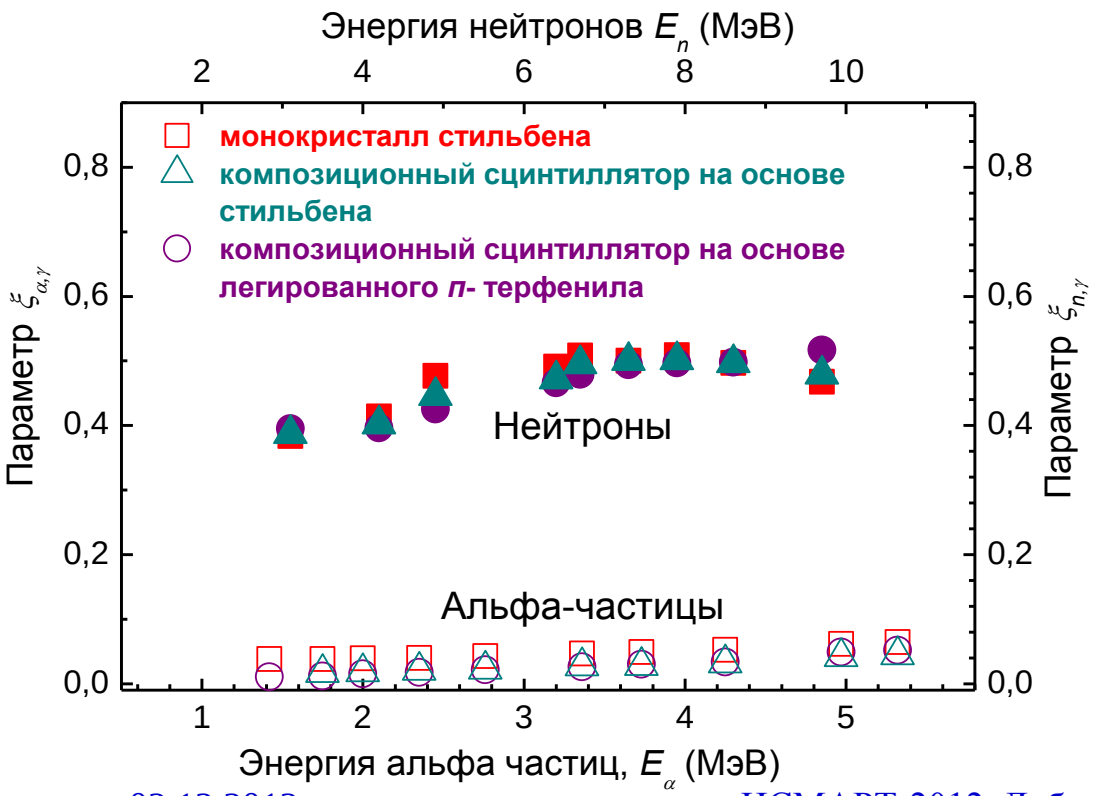
Baker J. H., Galunov N. Z., et. al. *Radiation measurements* 2004, Vol. 38, No.4-6 pp 817-820

Galunov N. Z., Martynenko E.V. *Radiation Measurements*, 2007, Vol.42, p.715-718

S. V. Budakovsky, N. Z. Galunov, et. al. *IEEE Transactions on Nuclear Sciences. – 2007 Vol. 54, No. 6. P. 2734– 2740*

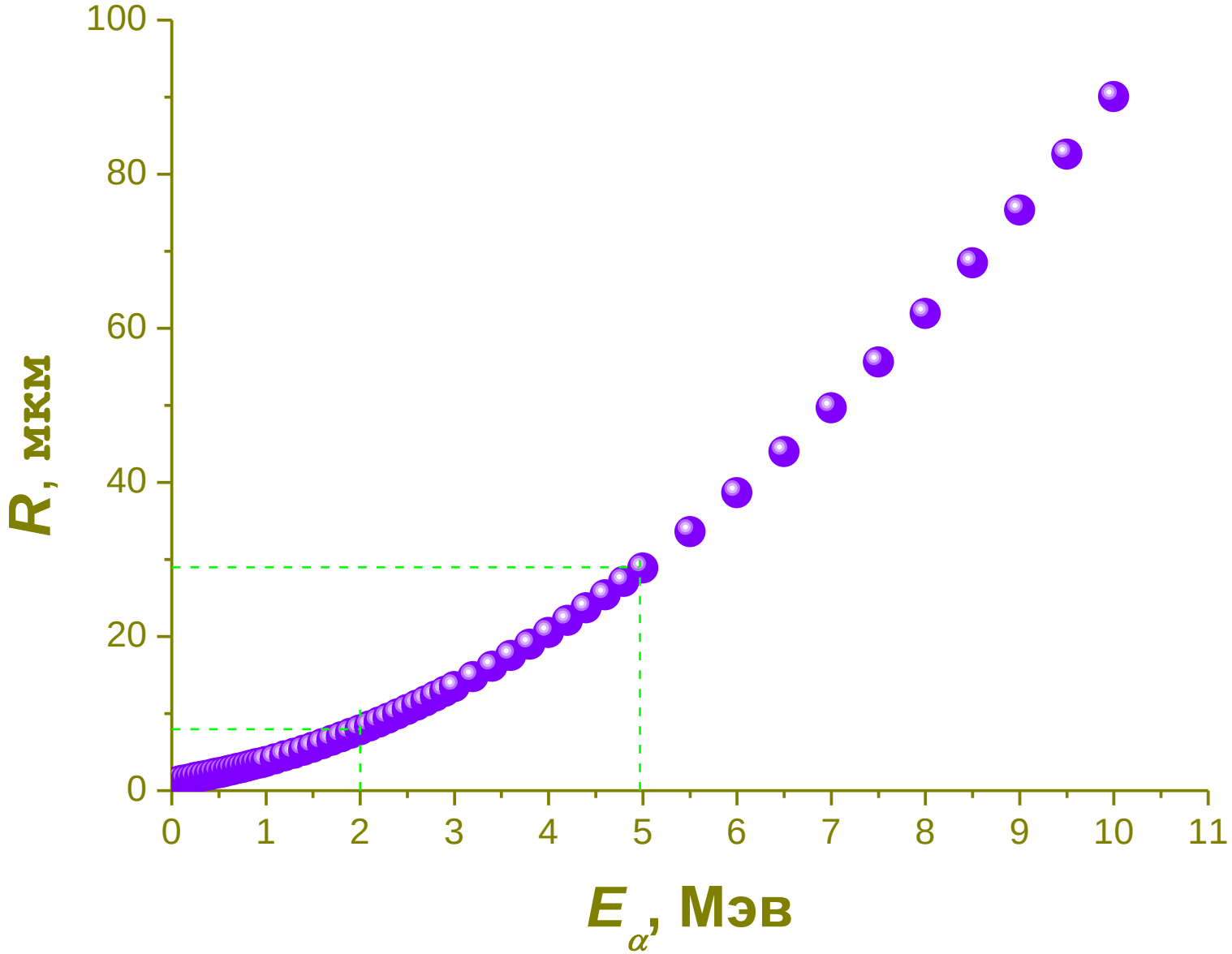
Экспериментальные данные подтверждают, что “одношаговое (скачкообразное изменение)” – это наиболее близкое описание реальной ситуации

$$\xi_{i,\gamma} = \left(\frac{M_i}{E_i}\right) \Big/ \left(\frac{M_\gamma}{E_\gamma}\right) = \frac{E_\gamma}{E_i}\Bigg|_{M_i = M_\gamma} \qquad (4)$$

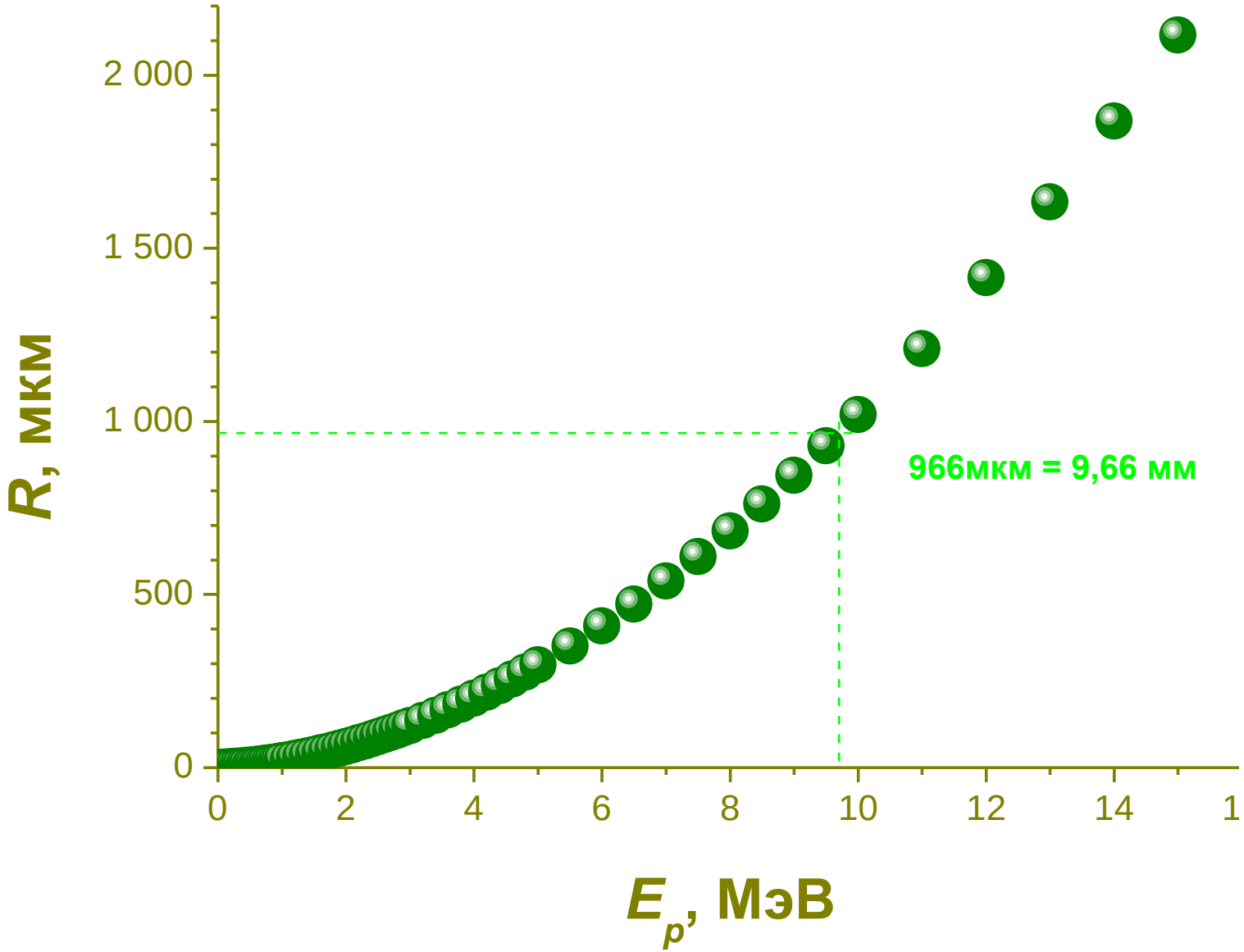


M_i и M_γ - измеряемые амплитуды сцинтилляционных импульсов, при возбуждении i-типа и γ- возбуждении с энергиями E_i and E_γ, соответственно. Если выбирать $M_i = M_\gamma$, то $\xi_{i,\gamma} = E_\gamma / E_i$.

Пробеги α- частиц с энергией E_α в стильбене



Пробеги протонов с энергией E_p в стильбене



Характерные энергии нейтронов ^{239}Pu-Be радионуклидного источника

Номер пика	1	2	3	4	5
Энергия нейтронов, МэВ	0.85	2.0	3.1	4.2	4.9

Номер пика	6	7	8	9	10	11
Энергия нейтронов, МэВ	6.4	6.7	7.3	7.9	8.6	9.7

$$ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \Rightarrow \begin{cases} {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n \\ 3\times{}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n \\ \text{деление } {}^{239}\mathrm{Pu} \\ \ldots \end{cases}. $$

Энергии пиков в спектре нейтронов ^{239}Pu-Be источника

Anderson M.E., Neff R.A. Neutron Energy Spectra of Different Size ^{239}Pu — Be(α, n) Sources. / Transactions of ANS, 1968, v.11, p. 193— 198.

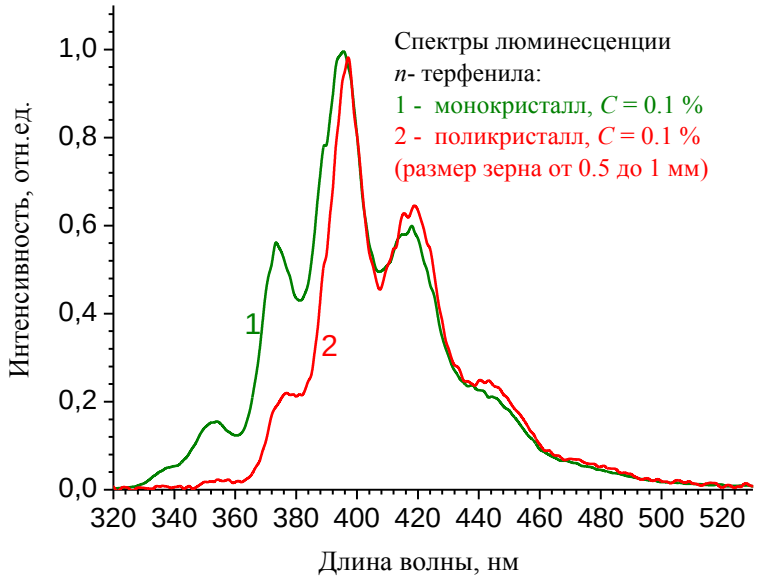
E_n, МэВ	0.85	2.0	3.06	4.8	6.73	7.87	9.8
φ(E), н/(МеВ с), (отн.ед.)	3	1.87	3.6	3.13	1.90	1.93	0.8

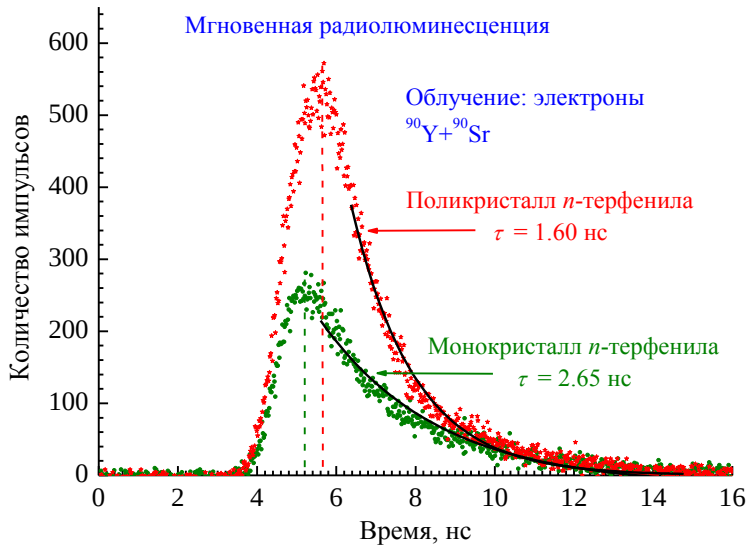
Geiger K.W., Van der Zwan L. Radioactive Nutron Source. Spectra from ^{9}Be(α, n) Cross Section Data. / Nuclear Instruments and Methods 1975 V.131, No.2 p. 315— 322.

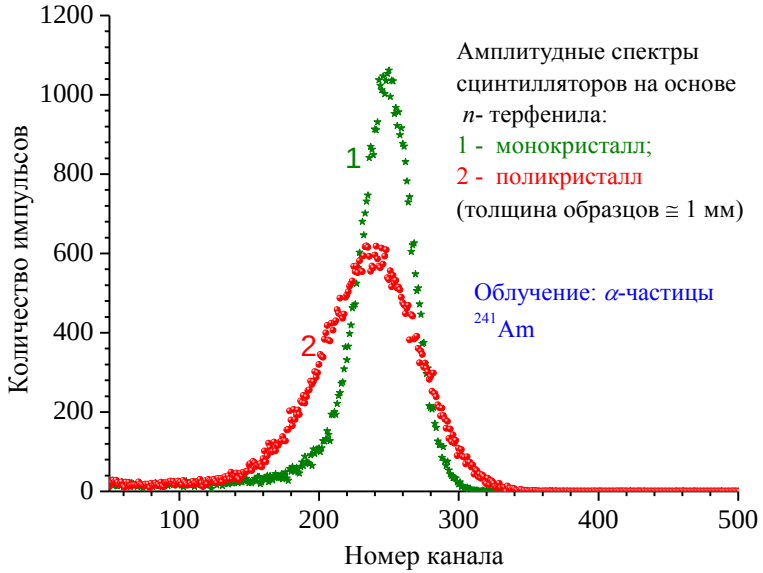
E_n, МэВ	0.85	3.05	5.0	6.43	7.57	8.57	9.71
φ(E), н/(МэВ с), (10^5)	No	3.07	2.35	1.42	1.43	No	0.5

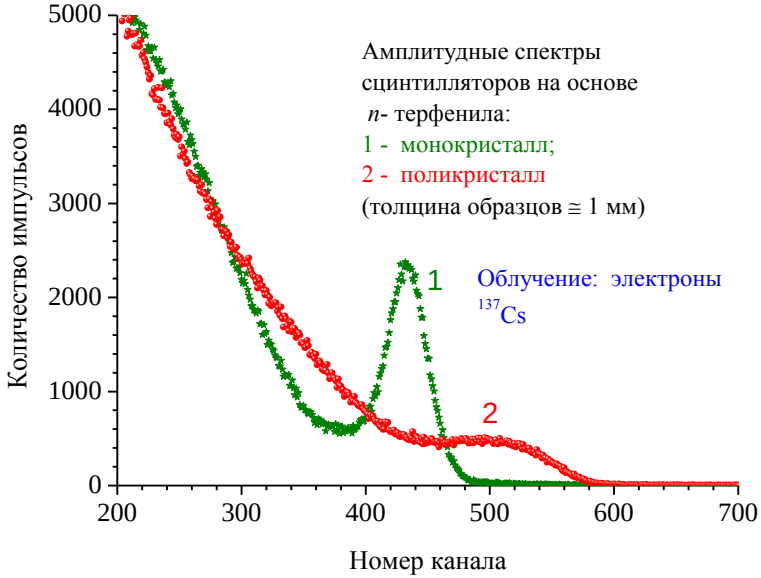
E_n, МэВ	0.85†	3.05	(4.2) 4.85†	6.43	(7.28) 7.86†	8.57	9.71
φ(E), н/(МэВ с), (10^5)	2.28†	2.7	2.14†	1.35	1.28†	1.57	0.5

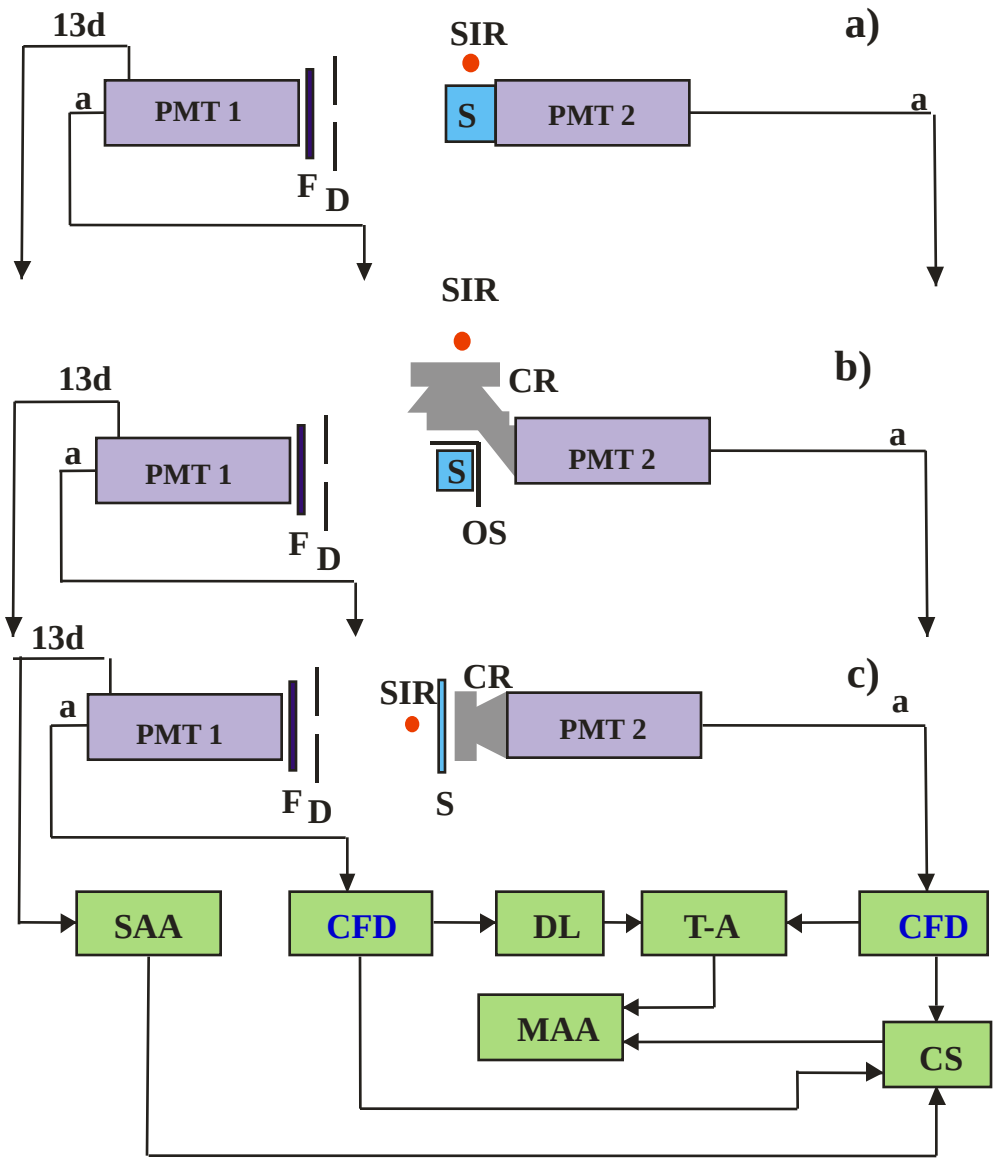
Отсутствует в расчетах (Красный) Фрагментирована (Синий). † — Наиболее интенсивная.


Спектры люминесценции
n- терфенила:
1 - монокристалл, C = 0.1 %
2 - поликристалл, C = 0.1 %
(размер зерна от 0.5 до 1 мм)
1
2
Интенсивность, отн.ед.
Длина волны, нм


Мгновенная радиолюминесценция
Облучение: электроны
90Y+90Sr
Поликристалл n-терфенила
τ = 1.60 нс
Монокристалл n-терфенила
τ = 2.65 нс
Количество импульсов
Время, нс


Амплитудные спектры
сцинтилляторов на основе
n- терфенила:
1 - монокристалл;
2 - поликристалл
(толщина образцов ≅ 1 мм)
Облучение: α-частицы
241Am
1
2
Количество импульсов
Номер канала


Амплитудные спектры
сцинтилляторов на основе
n- терфенила:
1 - монокристалл;
2 - поликристалл
(толщина образцов ≅ 1 мм)
Облучение: электроны
137Cs
1
2
Количество импульсов
Номер канала



Block diagrams of the set-up for measuring of time parameters of radioluminescence pulse by single-photon technique.

a) For studying of delayed radioluminescence pulse shape by referencing to scintillation pulse of a sample; **b)** for studying of prompt radioluminescence by referencing to Cherenkov's emission; **c)** for studying of scintillation pulse of thin samples.

Blocks of optical part of the set-up are following: **S** is a sample; **PMT 1** and **PMT 2** are photomultipliers; **CR** is a Cherenkov radiator; **SIR** is a source of ionizing radiation; **OS** is an optical separator; **D** is a diaphragm, **F** is an optical filter.

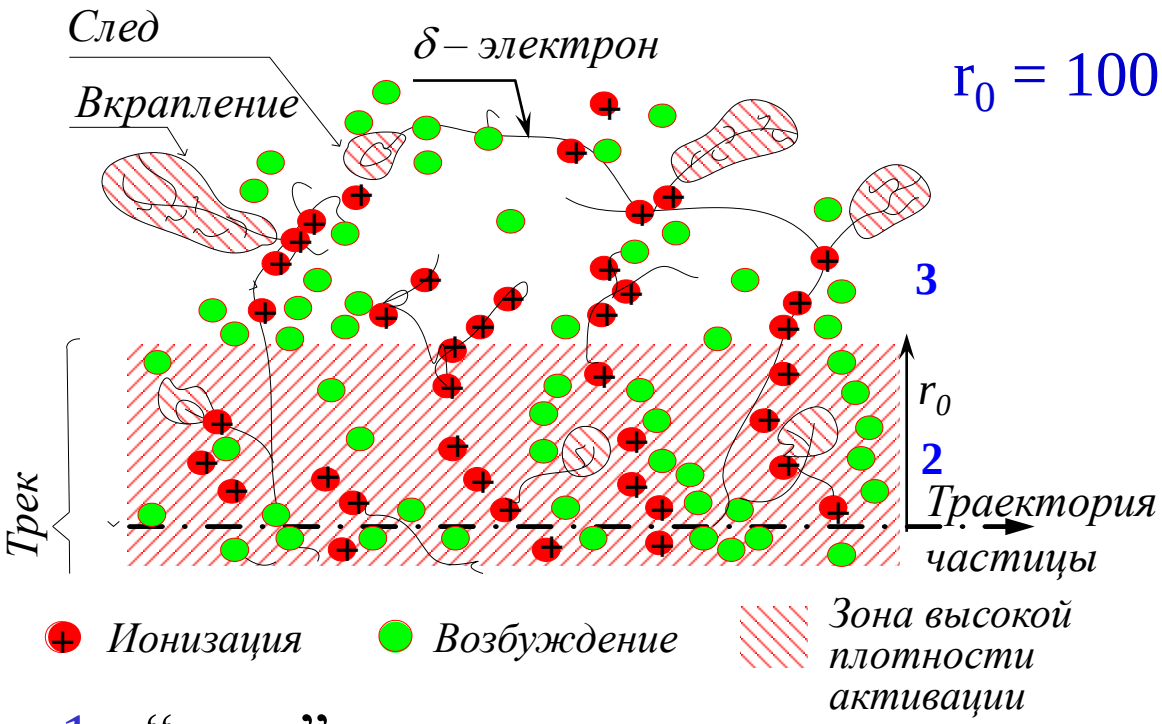
Blocks of electronic part of the set-up are following: **SAA** is a single-channel amplitude analyzer; **CFD** – constant fraction discriminator; **DL** is a delay line; **T-A** is a time-to-amplitude converter; **MAA** is multichannel amplitude analyzer; **CS** is a coincidence scheme; a is an anode output of photomultiplier tubes; **13d** is a signal from the 13th dynode of PMT 1.

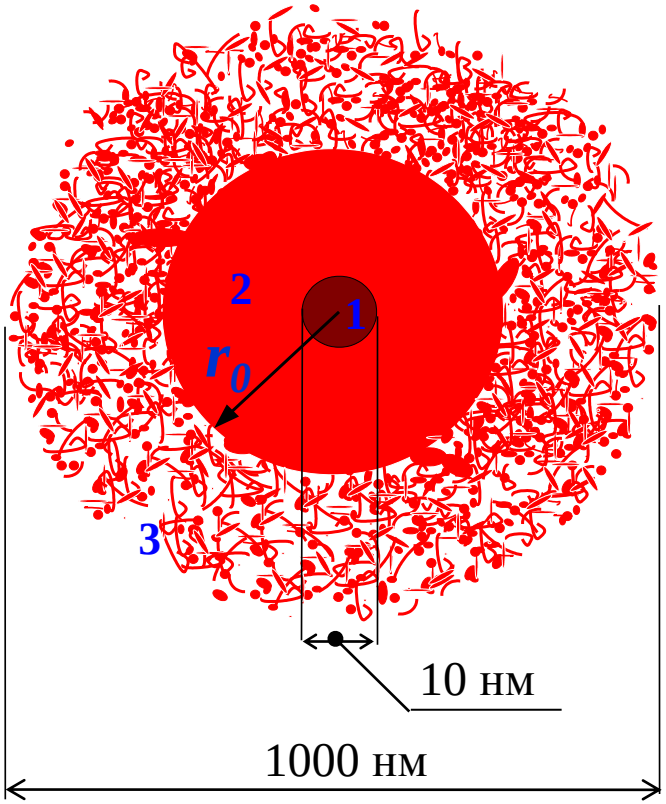
$r_0 = f(dE/dx)$

Радиальное сечение трека

$dE/dx = 10^{-2}$ МэВ/см → 10^3 МэВ/см

$r_0 = 100$ нм → 50 нм





1 - “ядро” трека

2 - зона высокой плотности активации (“ореол” трека)

3 - зоны низкой плотности активации

Galunov N.Z., et. al. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*.– 2001,Vol.355.–P.479–490

Введение