

Эволюция представлений о факторах, ограничивающих энергетическое разрешение сцинтилляторов

Кудин Александр Михайлович

**Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины
Проспект Ленина, 60, Харьков, Украина**

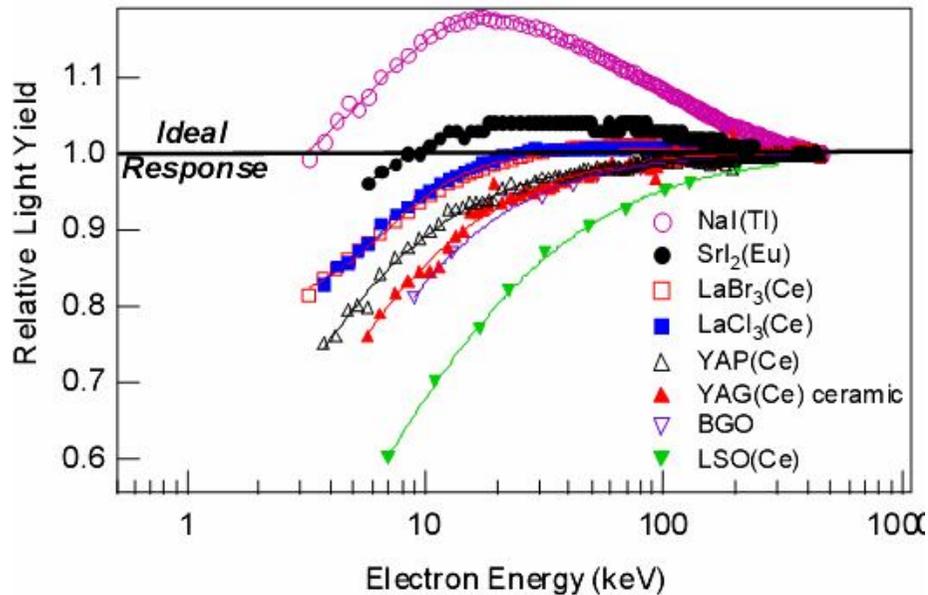
Содержание доклада:

1. Исторический экскурс
2. Теоретический и практический подход к R
3. Непропорциональность отклика (nPR)
4. Взаимосвязь между R и nPR
5. Современные представления о природе nPR
6. Экспериментальные методы изучения

Эволюция представлений об R

Теоретические представления

$$R_c^2 = R_n^2 + R_{inh}^2 + R_{tr}^2$$



W. Moses, SCINT-11

Непропорциональность отклика

Теоретики не занимаются доводкой конкретного кристалла

Сцинтилляцион. материаловедение

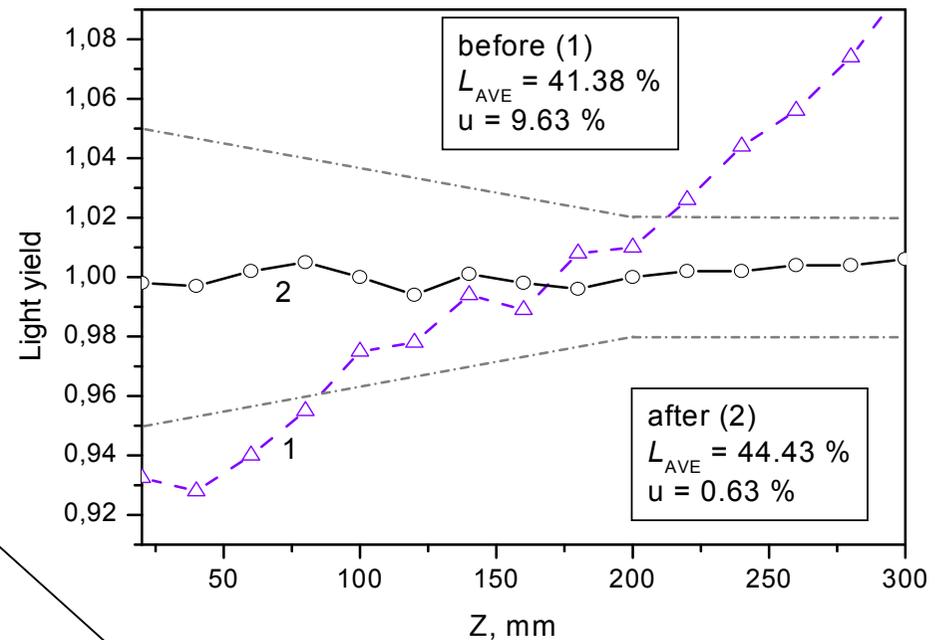
Здесь n-PR прижилась

Сцинтилляционная техника

$$L = \eta G(Z, t_{RC})$$

$$R_c^2 = R_n^2 + R_G^2$$

G – коэффициент светосбора (x, y, z)

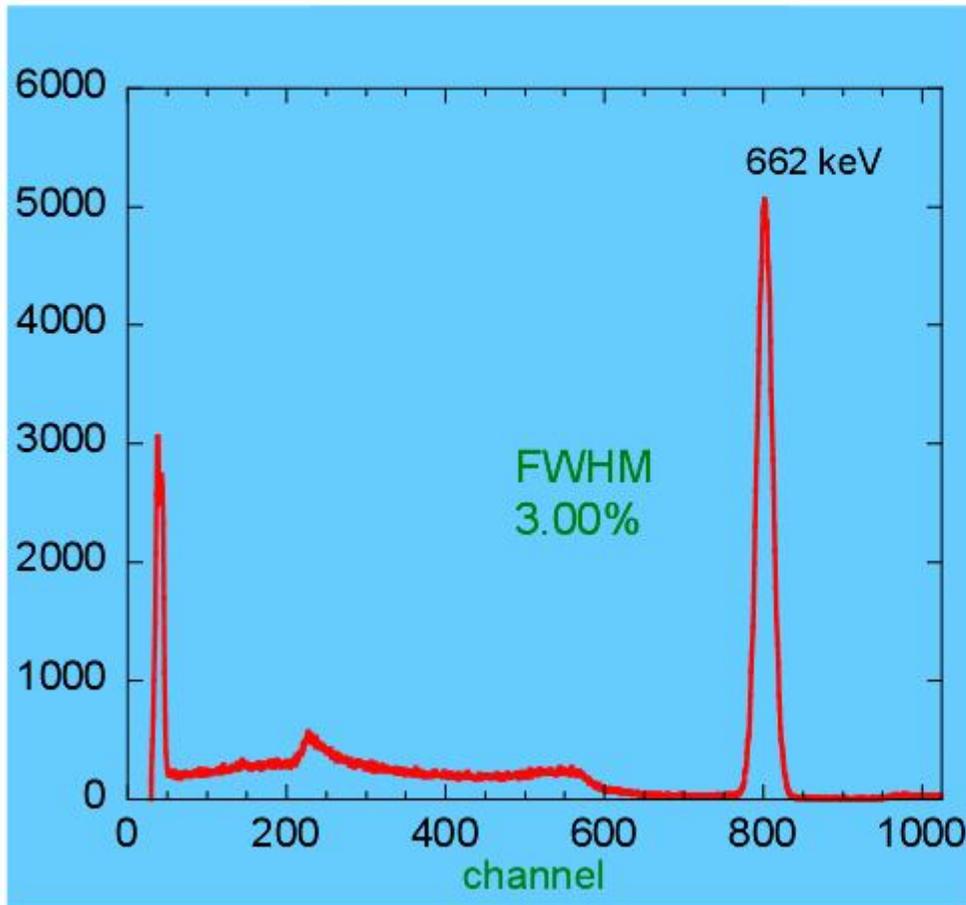


Пример доводки осевой неоднородности светового выхода

Практики не учитывают непропорциональность

Лучшие значения энергетического разрешения
LaBr₃:Ce **$R = 3.0\%$** для ¹³⁷Cs ($E = 662$ кэВ)

LaBr₃:Ce
3" x 3"

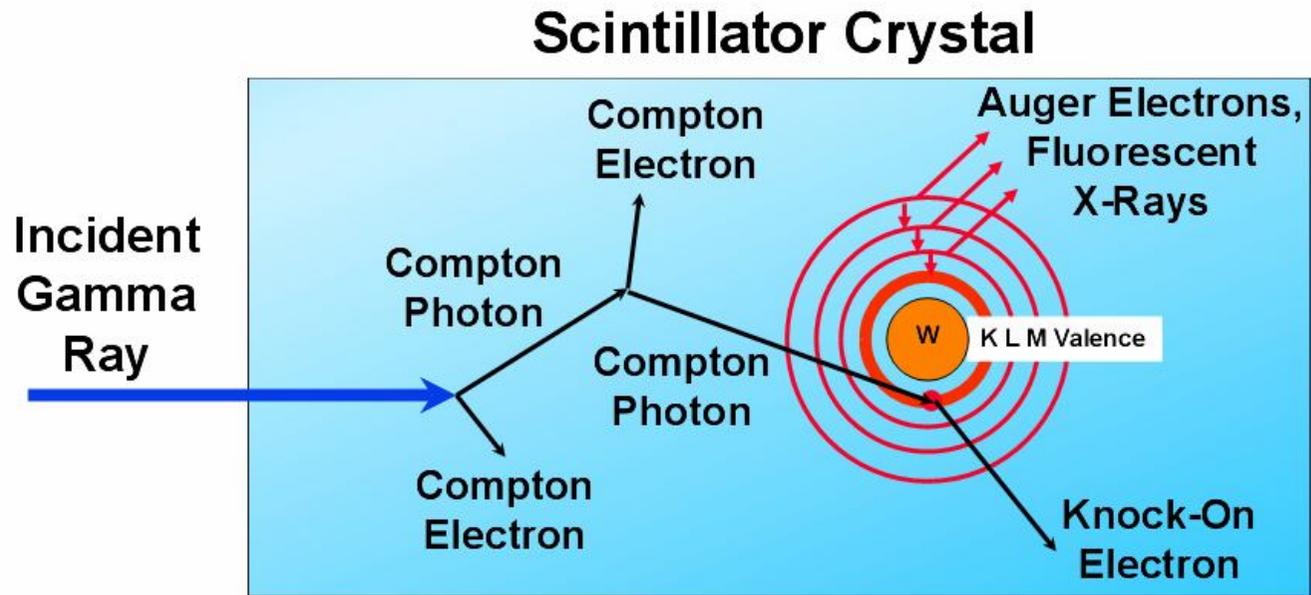


345 cm³ volume



Фундаментальные ограничения энергетического разрешения

How Does Non-Proportionality Degrade Energy Resolution?

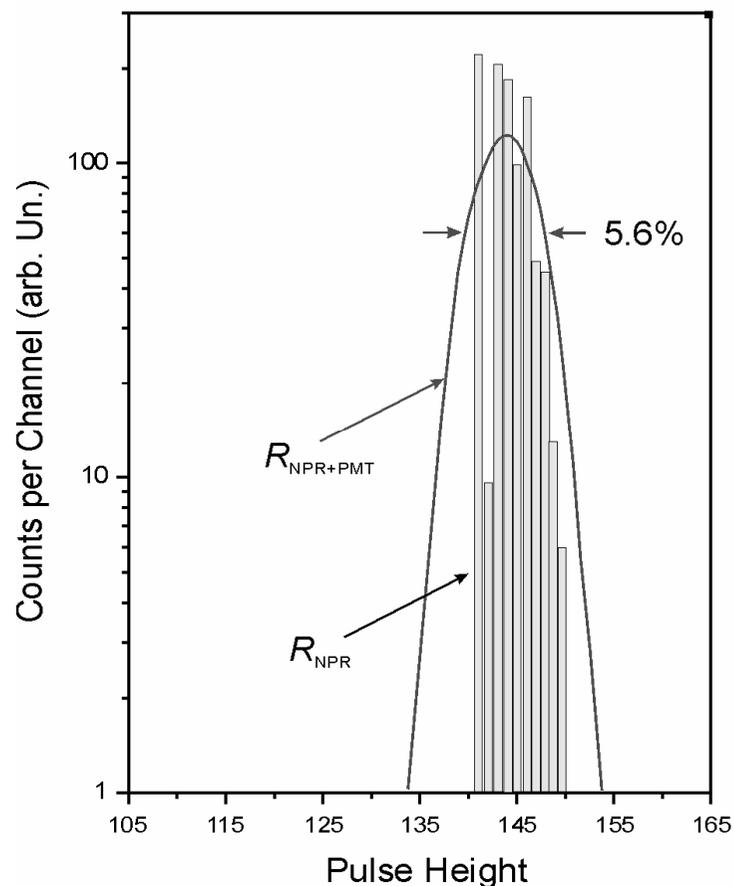


Multiple Energy Deposits Combined With Different Efficiency for Each Deposit

W. Moses, SCINT-11

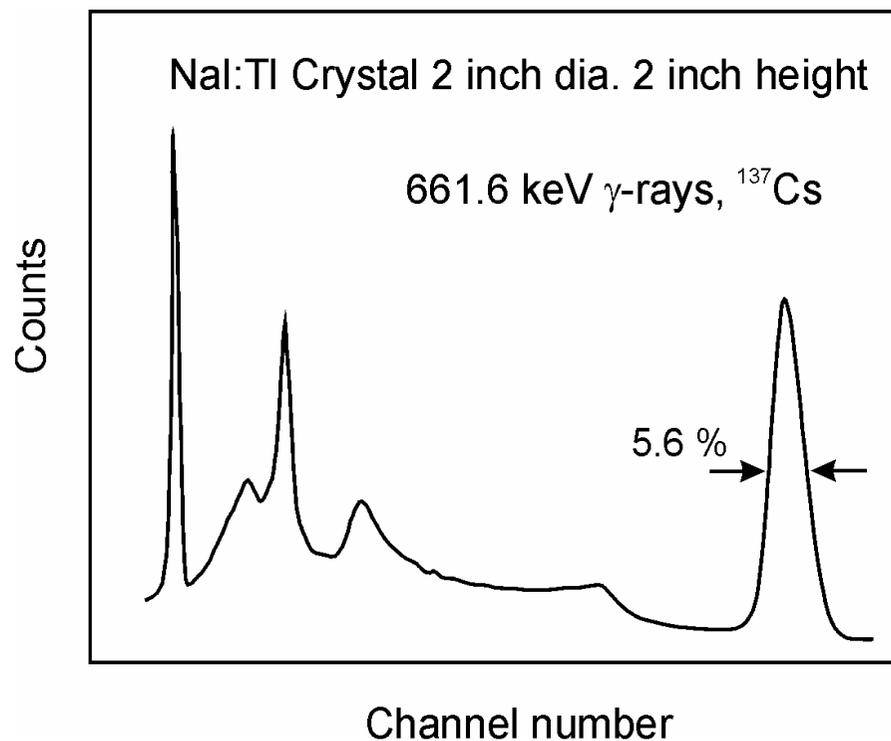
Как оценить вклад составляющей R_N ?

Теория



Оценка вклада R_N в R методом Монте-Карло
(Zerby, et al., 1961)

Практика



$$R_N \sim 4,5\%; \quad R_G \ll R_N$$

(D. Persik and T. Moi, 1978)

Сцинтилляционная эффективность:

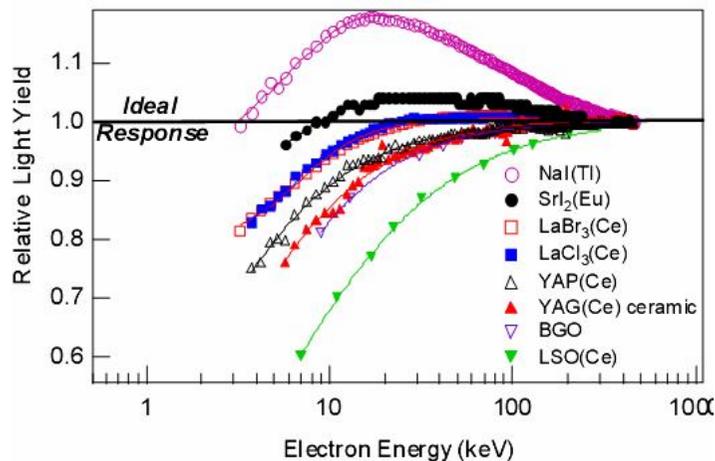
$$\frac{L}{E} = \frac{1}{\varepsilon} S G Q \quad (\text{в первом приближении})$$

ε – средняя энергия образования e - h -пары;

S – эффективность миграционного этапа;

G – коэффициент светосбора;

Q – квантовый выход ЦС.



Было много попыток объяснить nPR коэффициентами S , G , ε но не Q .

В общем случае коэффициент G следует понимать не как $G(x, y, z)$, но $G(x, y, z, t_{RC})$, т.е. и от времени формирования сигнала.

Фундаментальные ограничения R

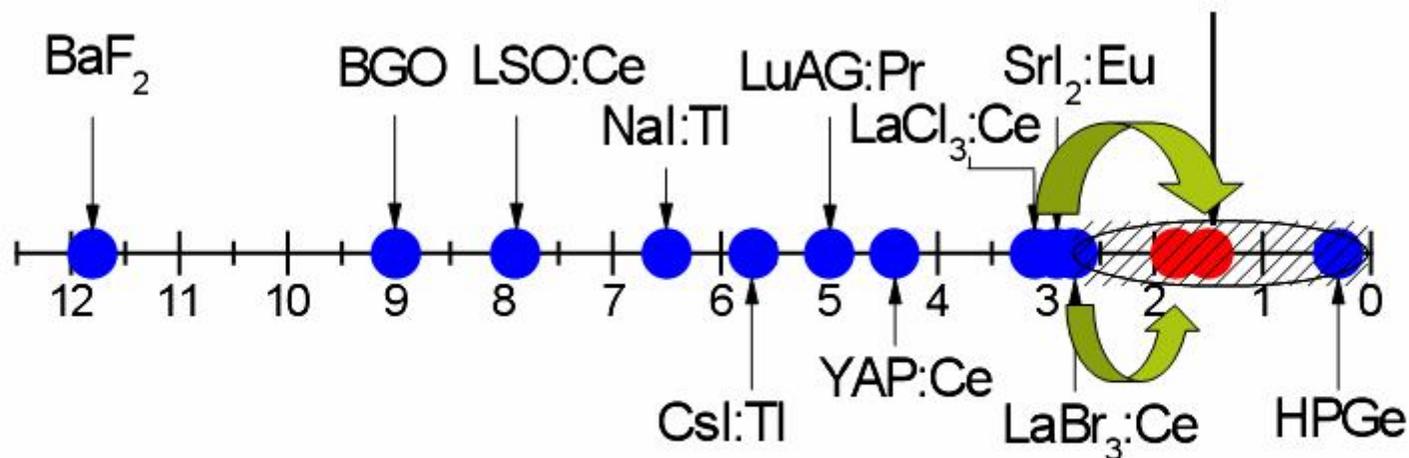
High energy resolution scintillators

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = R_{np}^2 + R_{inh}^2 + R_{tr}^2 + R_M^2 \longrightarrow R_M = 2.35 \sqrt{\frac{1 + v(M)}{N_{phe}}}$$

LaBr₃:Ce $N_{phe} = 22000$ phe/MeV⁽¹⁾

SrI₂:Eu $N_{phe} = 32000$ phe/MeV⁽²⁾

Ultimate energy resolution



(1) I.V. Khodyuk et al. J.Phys.: Condens. Matter 22 (2010) 485402.

(2) M.S. Alekhin et al. IEEE Trans. Nucl. Csi. 58 (5) (2011) to be published.

Можно ли достичь значений $R \sim 4-5\%$ для NaI:Tl ?

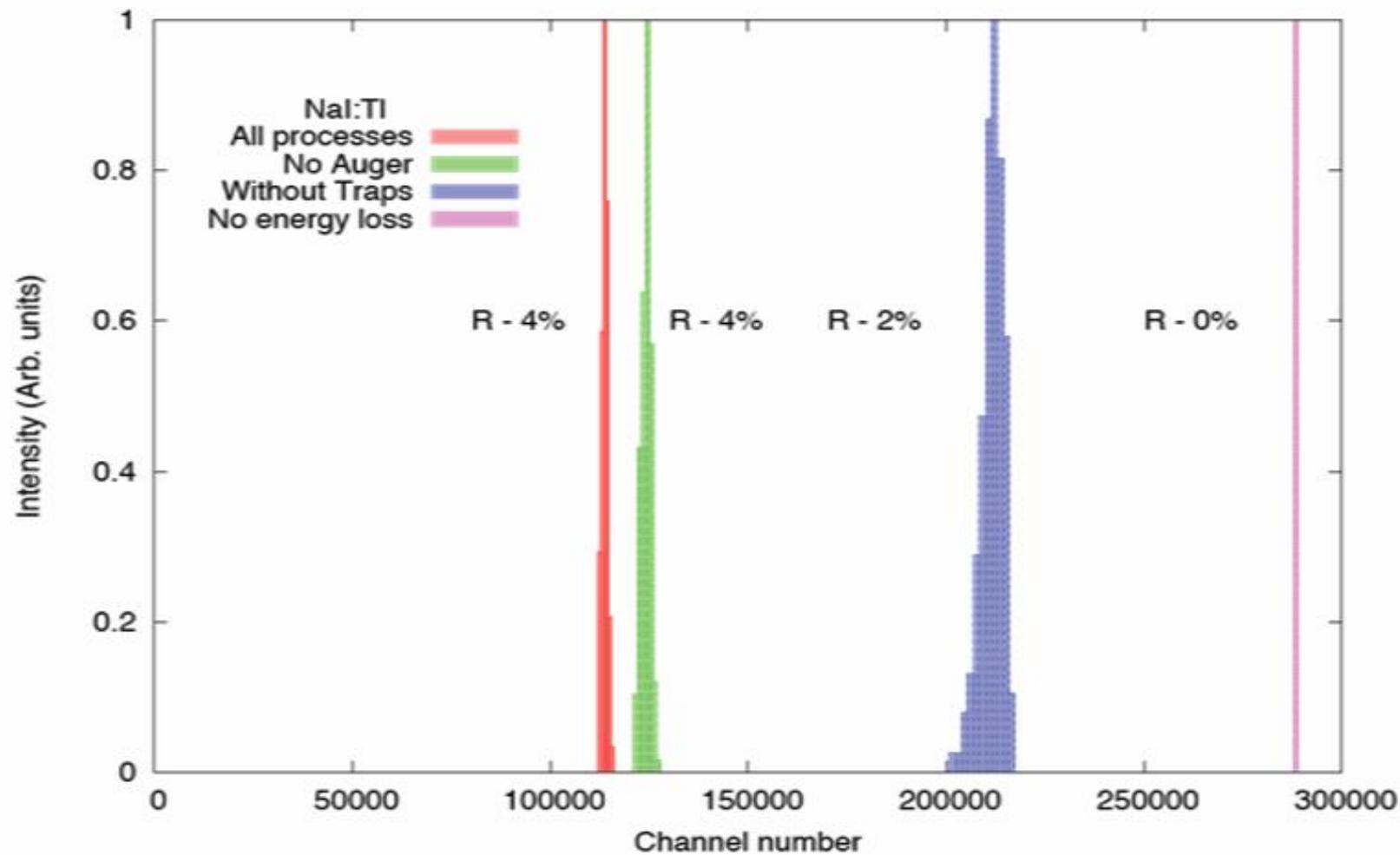
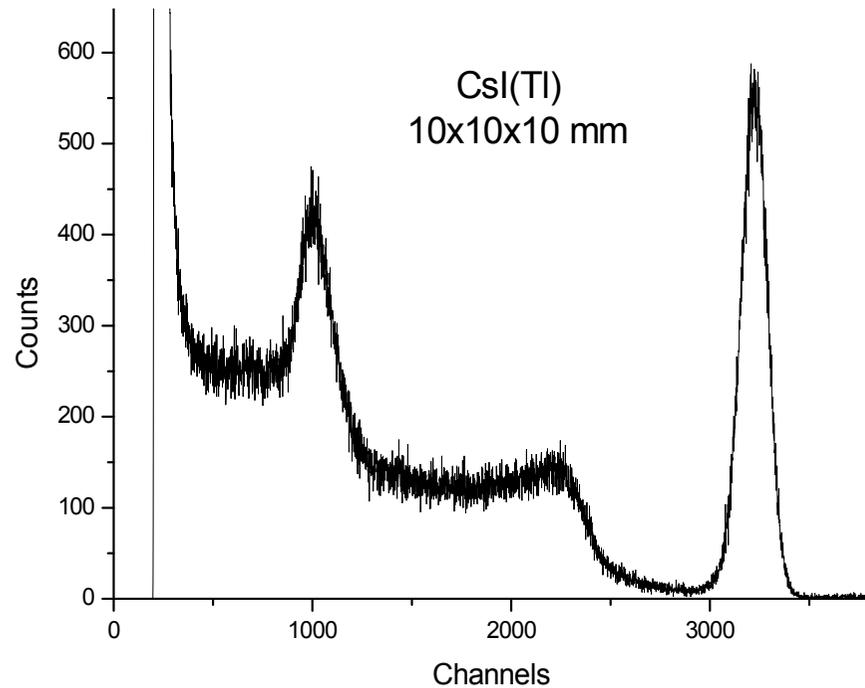


Figure from G. Bizarri, et al., Presentation I8-2 at SCINT09, Jeju Island, Korea

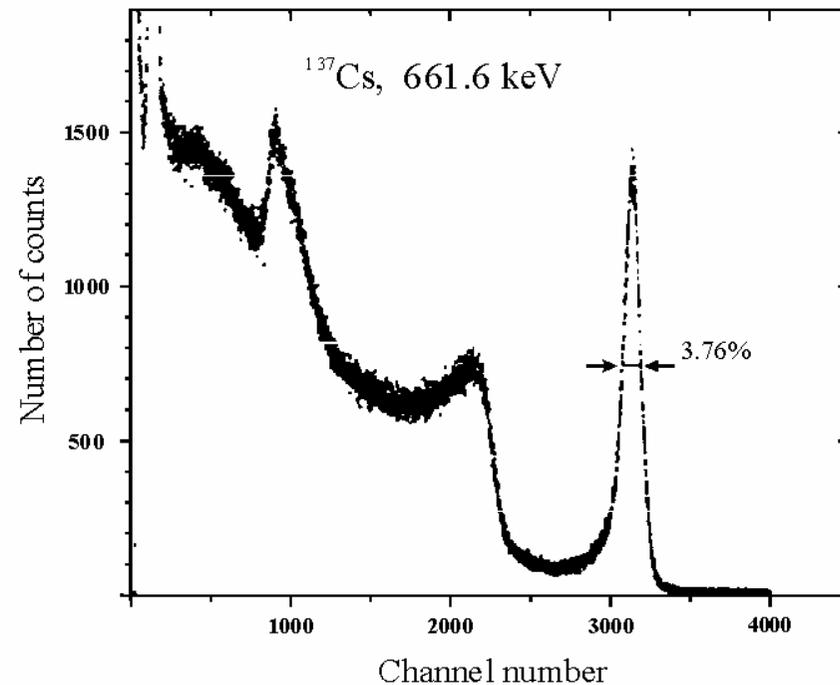
«Доводка» выходных параметров сцинтиллятора



ФД 10×10 мм $R = 4,8\%$

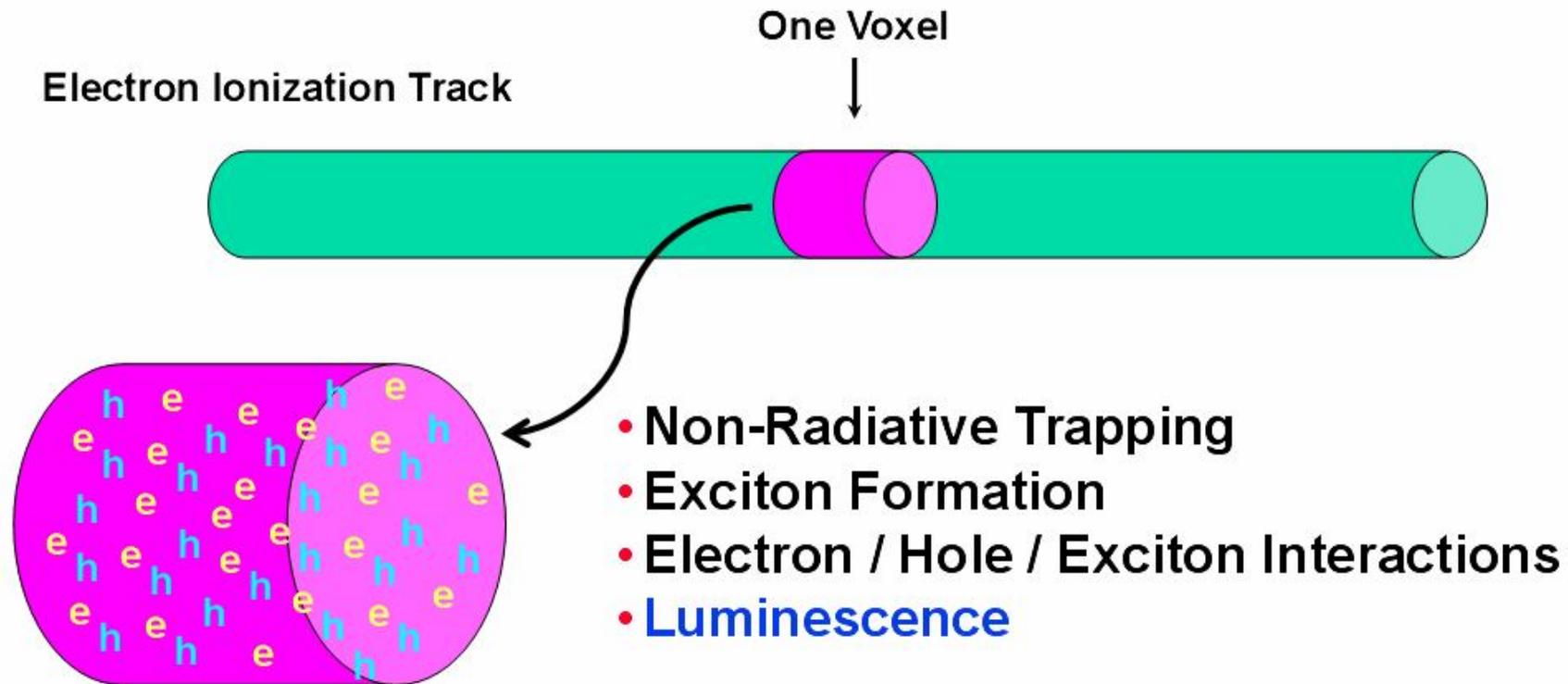
ФД 4×4 мм $R = 4,4\%$

Бороденко Ю.А. и др. ПТЭ, 2010.



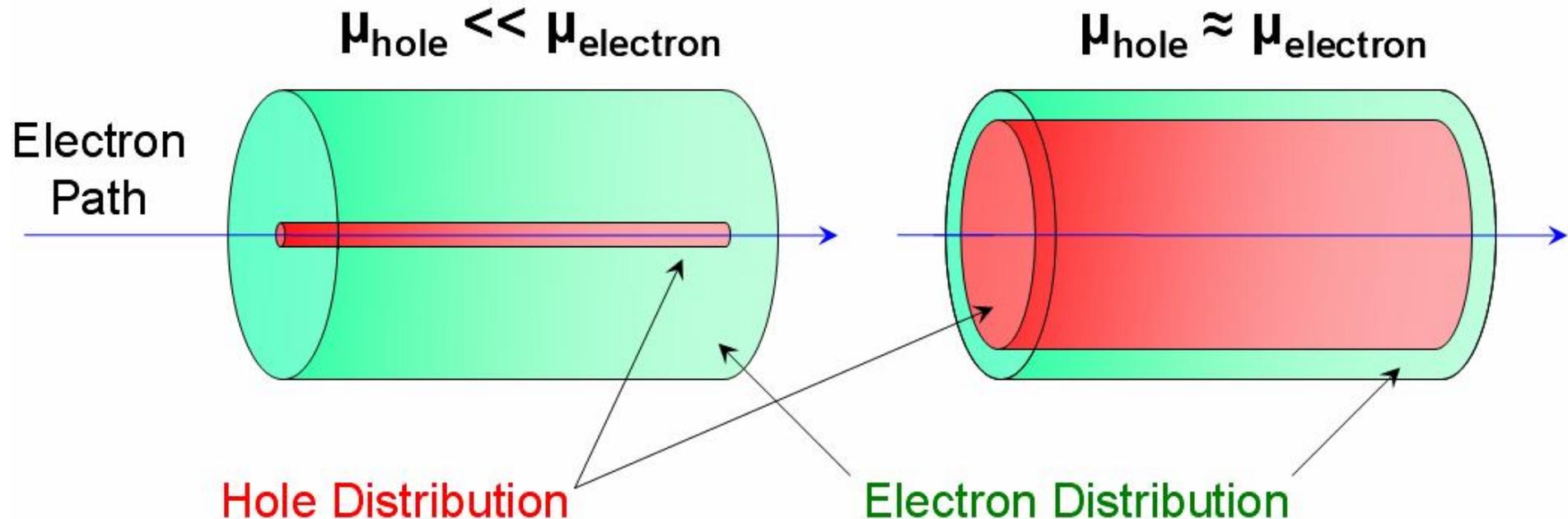
Moszynski M., et al. IEEE TNS. 2003.

Competing Processes for e/h Recombination



- Many Ways for e/h Pairs in a Voxel to Recombine
 - Not All Recombinations Produce Light

Both Electrons & Holes Diffuse



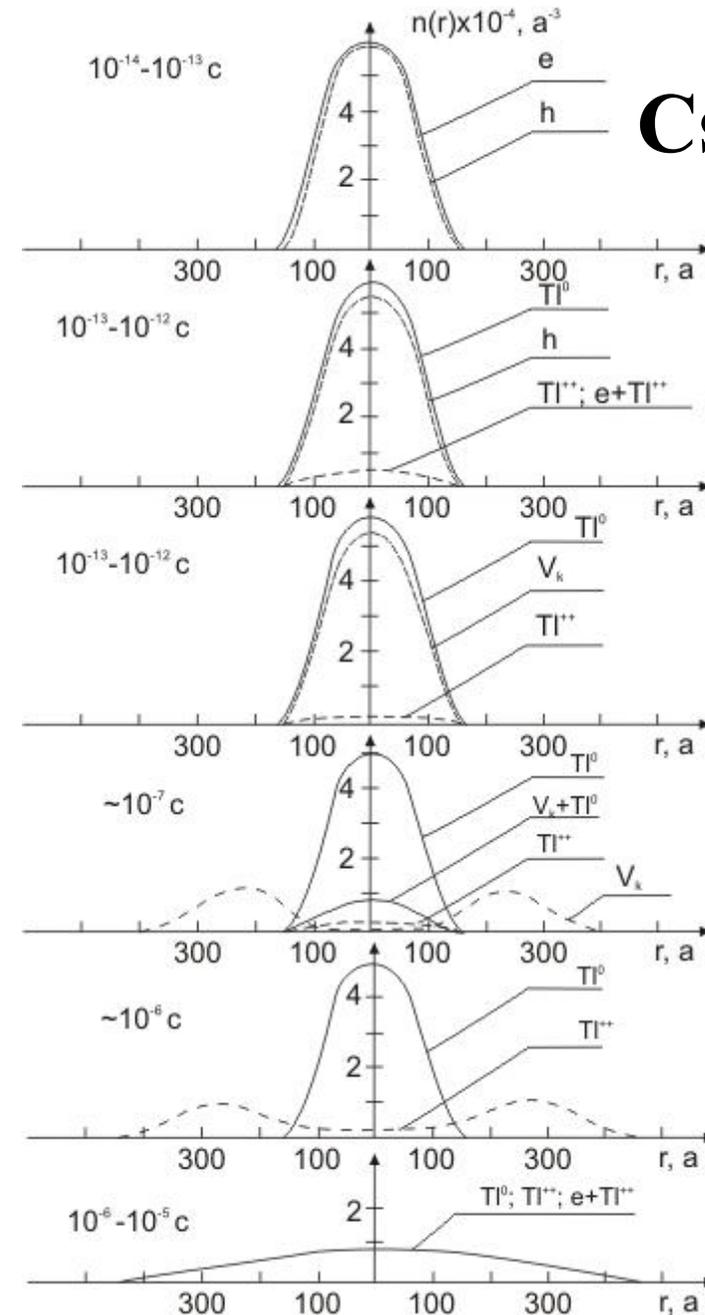
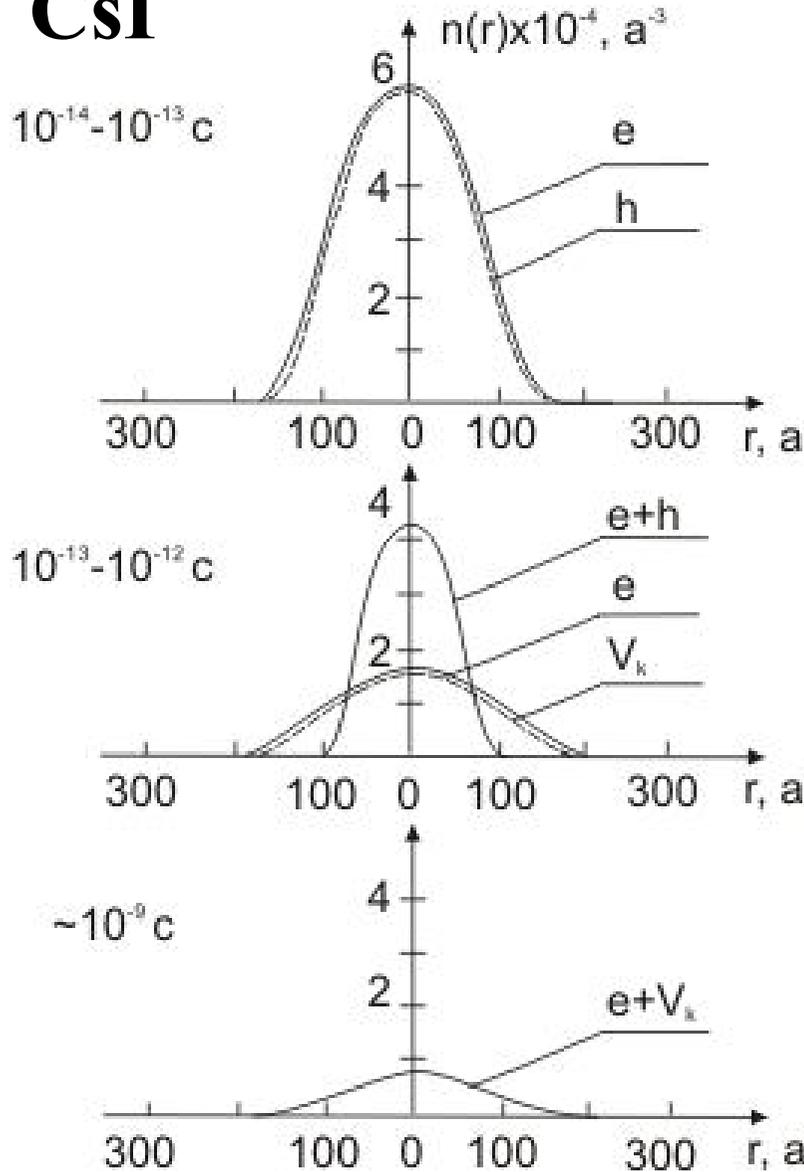
- Ratio of Diameters \propto Ratio of Mobilities
- Similar Diameters \rightarrow High Recombination Probability
- $\mu_{\text{hole}} \approx \mu_{\text{electron}} \rightarrow$ Proportional Scintillator

Осевое распределение возбуждений в треке α -частицы

Ляпидевский и Аверкиев, 1984

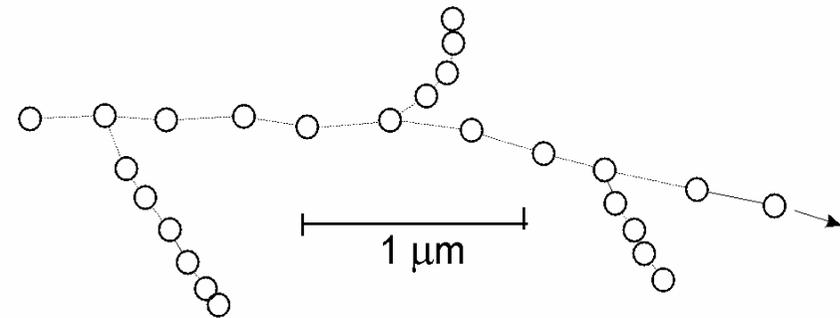
CsI

CsI:TI

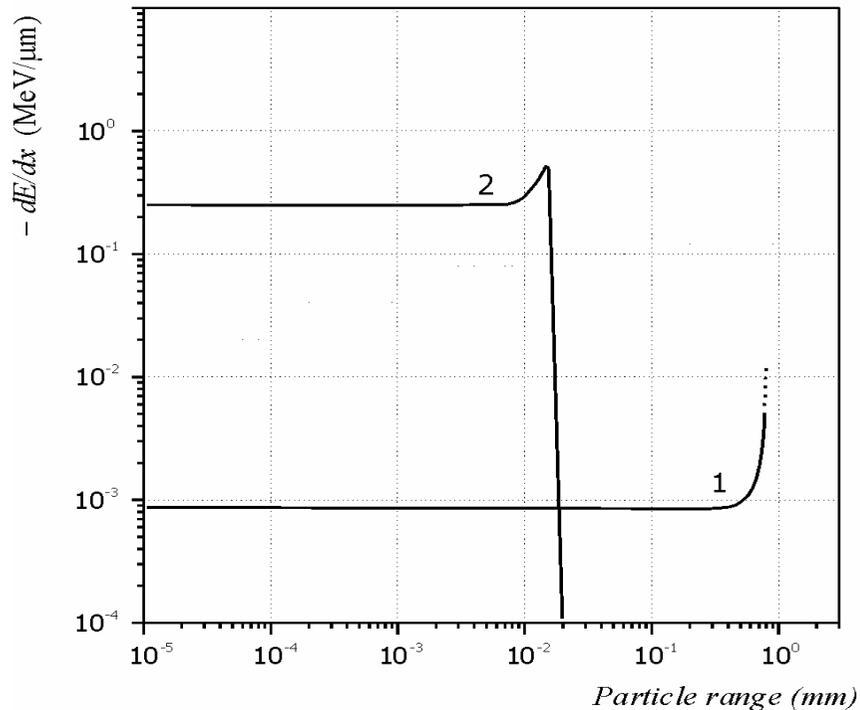
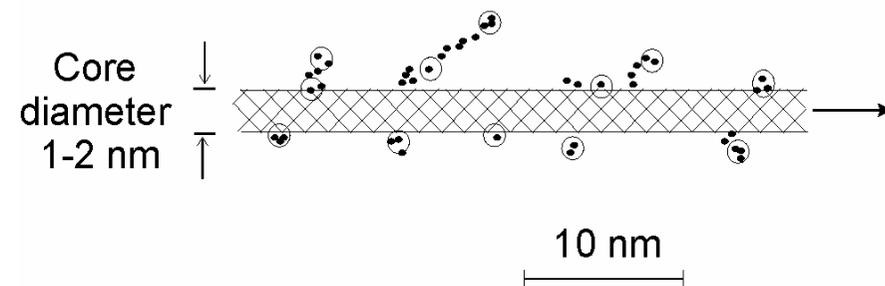


**Схематическое
представление
структуры трека
электрона и α -частицы
в конденсированной
среде
(В.К. Ляпидевский)**

fragment of the 1 MeV electron track



4 MeV α -particle

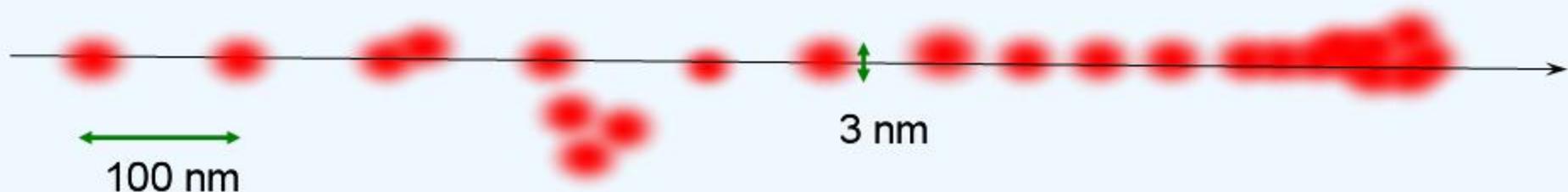


**Цилиндрическая симметрия только
для трека α -частицы, но не электрона**

Track spatial and temporal structure

The sizes of the excited clusters of excitations just after initial recombination and thermalization of electrons and holes (ps time domain) depend on the thermalization length, which is determined by electron-phonon interaction. For ionic crystals it can be estimated to be about 2-4 nm, for piezoelectric crystals it can be even shorter, and for covalent crystals longer.

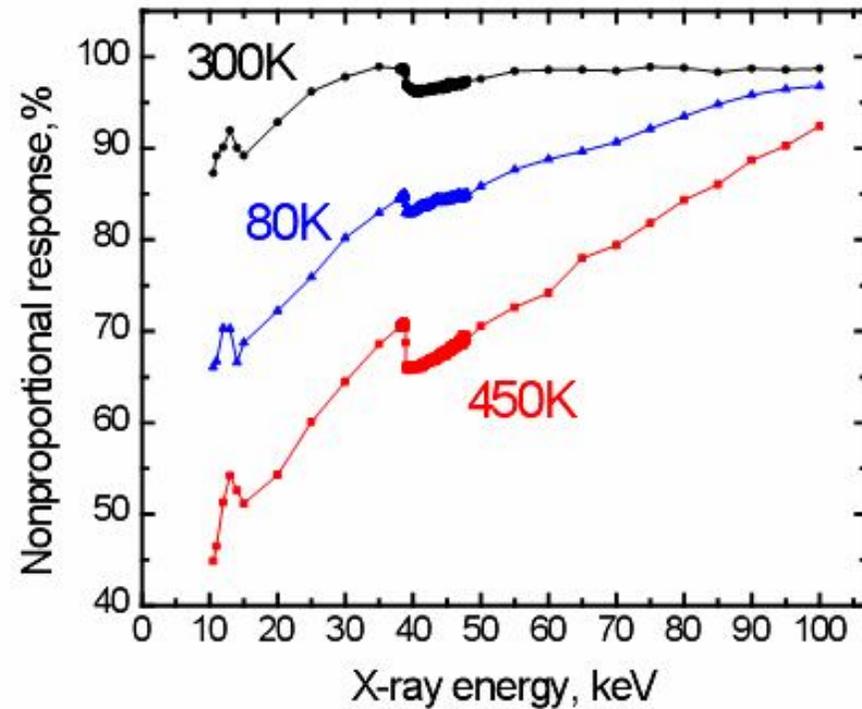
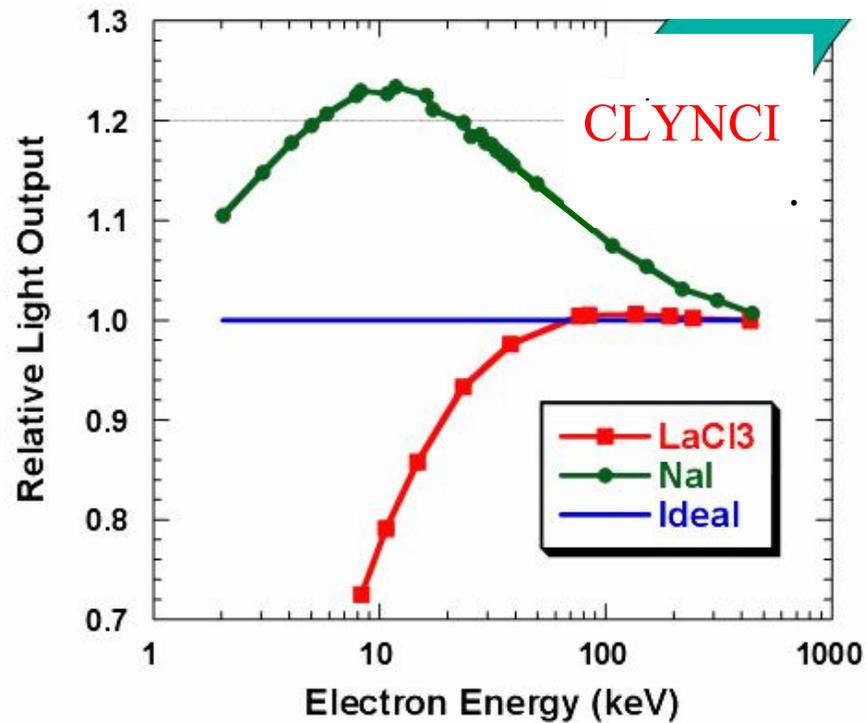
Initial electron track structure in NaI is defined by isolated and overlapped clusters of excitations with initial size of about 3 nm. Distances between clusters are about 1 to 100 nm. The shown track is straitened along the path of the primary electron.



15

Экспериментальные методы изучения nPR

SLYNCI – Scintillator Light Yield Non-proportionality Compton Instrument
K-deep spectroscopy



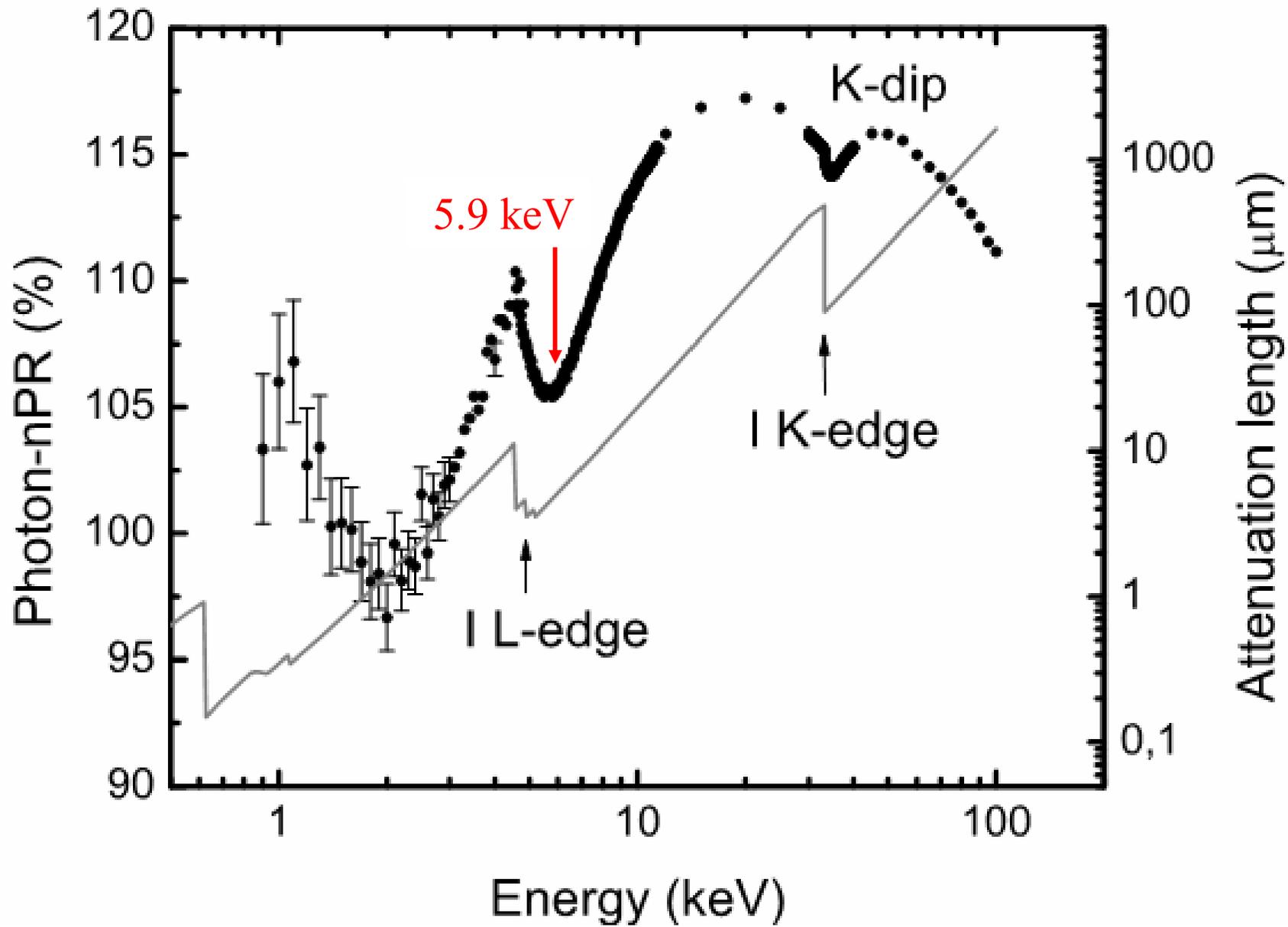
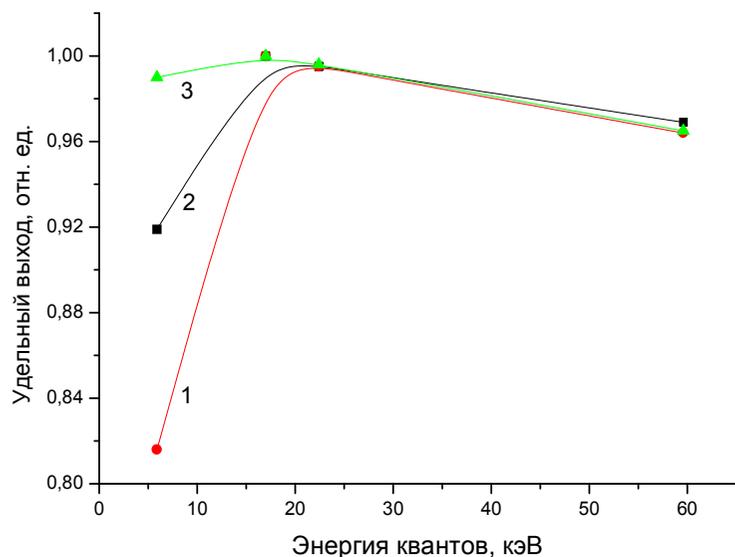


Figure from: *I. Khodyuk and P. Dorenbos*, IEEE TNS, 2012

Фотохимическая модификация поверхности кристаллов NaI:Tl

Мертвый слой

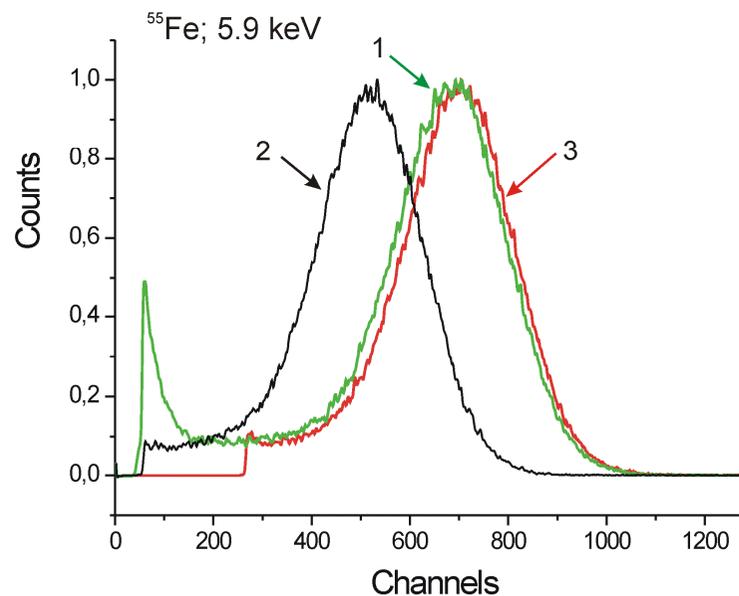


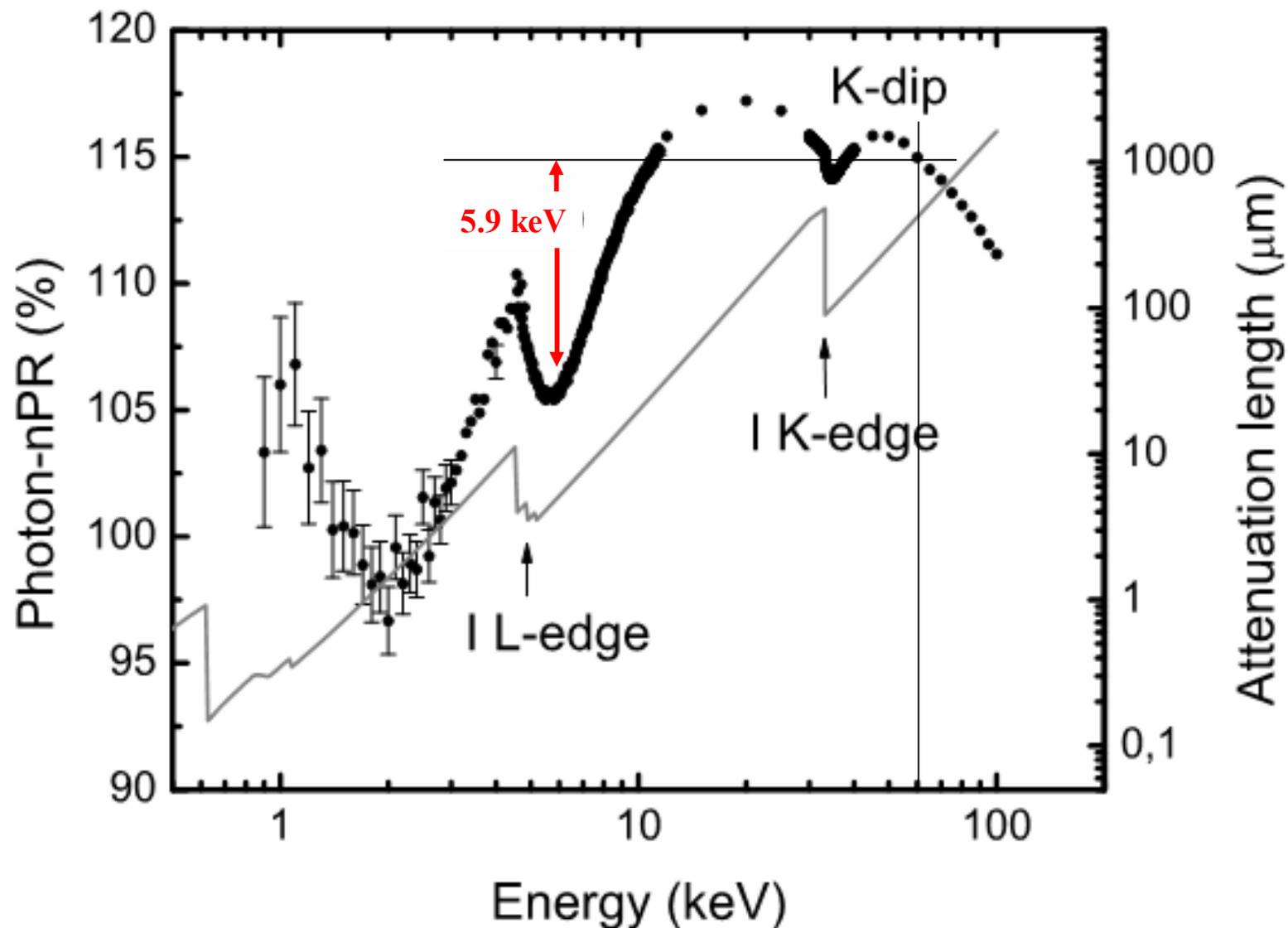
Влияние РХО на световой выход и энергетическое разрешение кристаллов NaI:Tl

Условия измерений	L , каналы	R , %
Свежий скол	662	40.5
Гидратирован. скол	502	50.2
РХМ, через час	645	38.6
РХМ, через день	702	37.9

nPR в области низких энергий для кристалла NaI:Tl

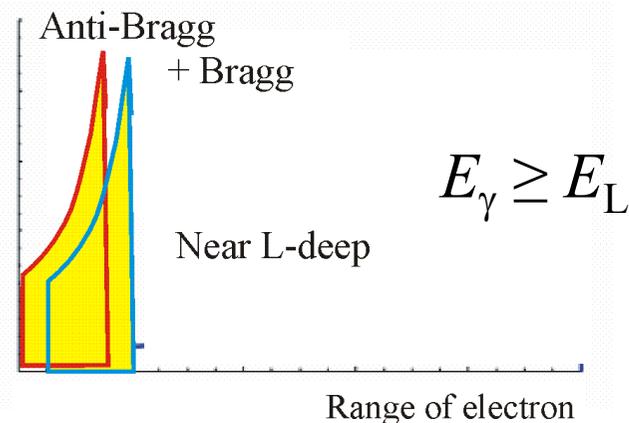
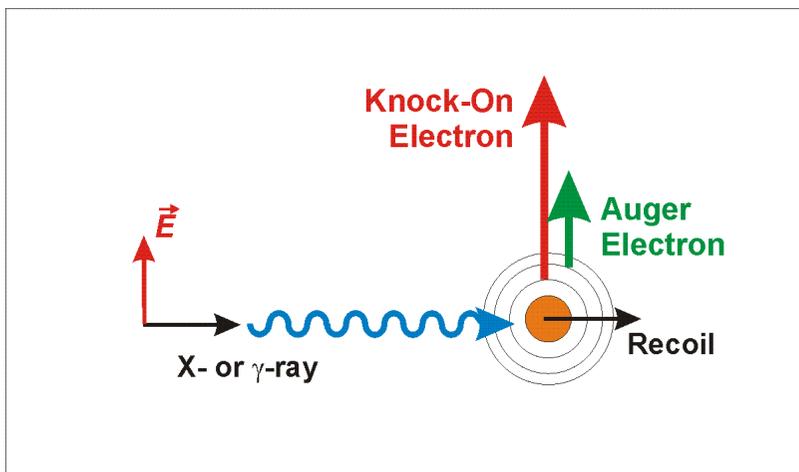
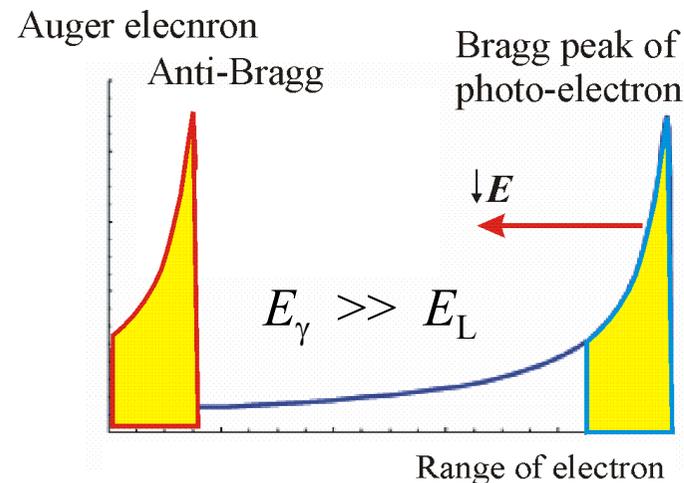
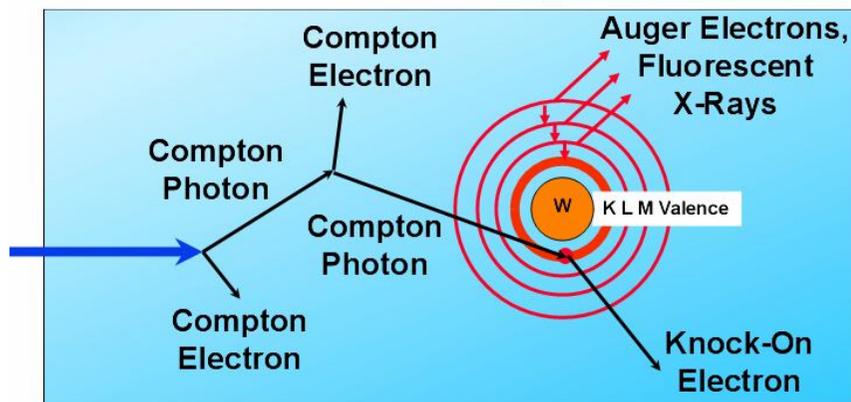
Амплитудные спектры кристалла NaI:Tl
 зеркальный скол (1),
 гидратированный скол (2),
 на следующий день после РХО (3).





Точку 5,9 кэВ можно поднять от 106 до 115% за счет C_{TI}
 Известно, что $(L/E)_{5,9}$ не меньше $(L/E)_{60}$, если $C_{TI} > 0.1\%$

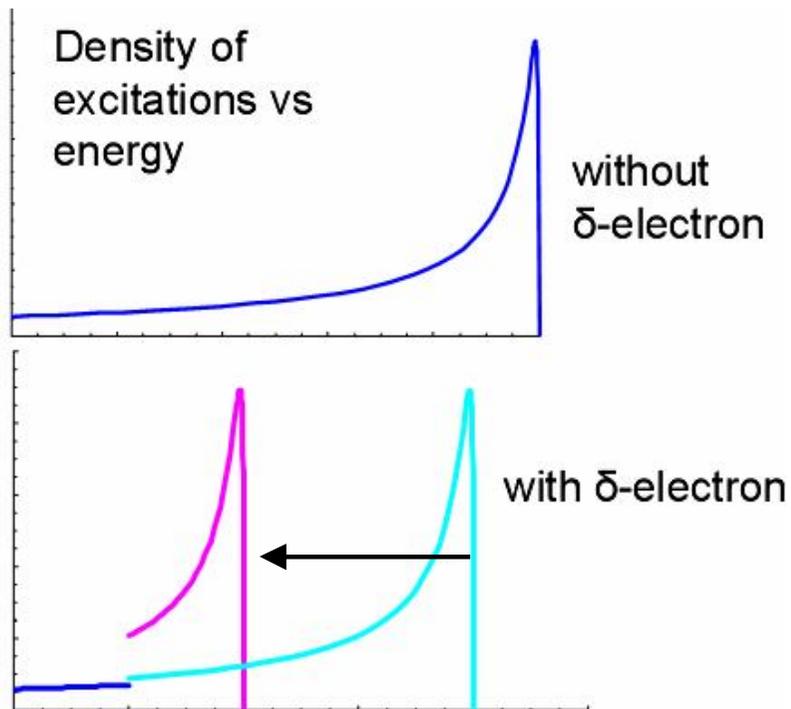
Антибрэгговский пик в месте рождения



Ядро получает импульс отдачи
 Направление электрона совпадает с \vec{E}

Плотность ионизации резко
 увеличена у L-края

Антибрегговский пик в точке рождения каскада и фотоэлектрона

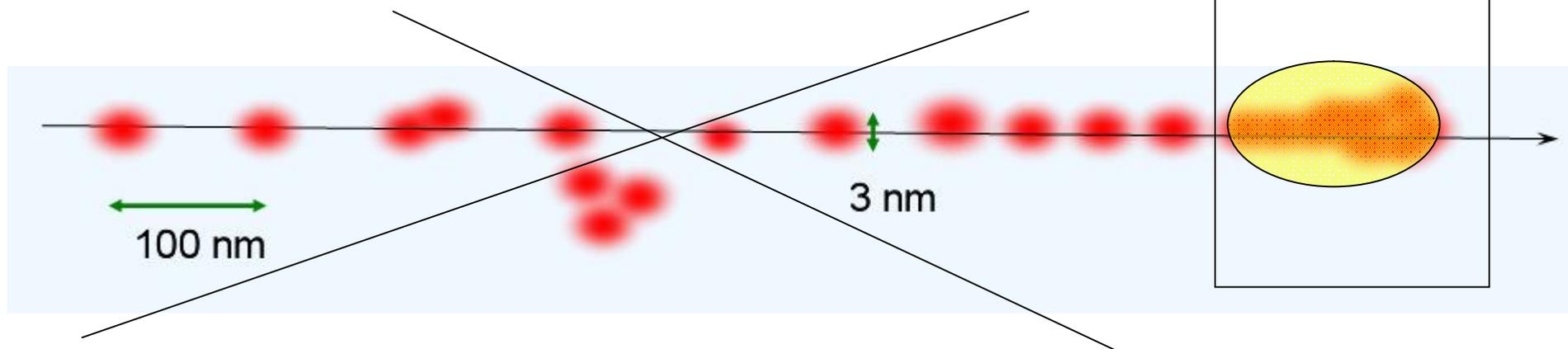


Возле L -края NaI
 0,871 кэВ
 0,871 кэВ
 3,445 кэВ
 $E_\gamma - 5.187$ кэВ

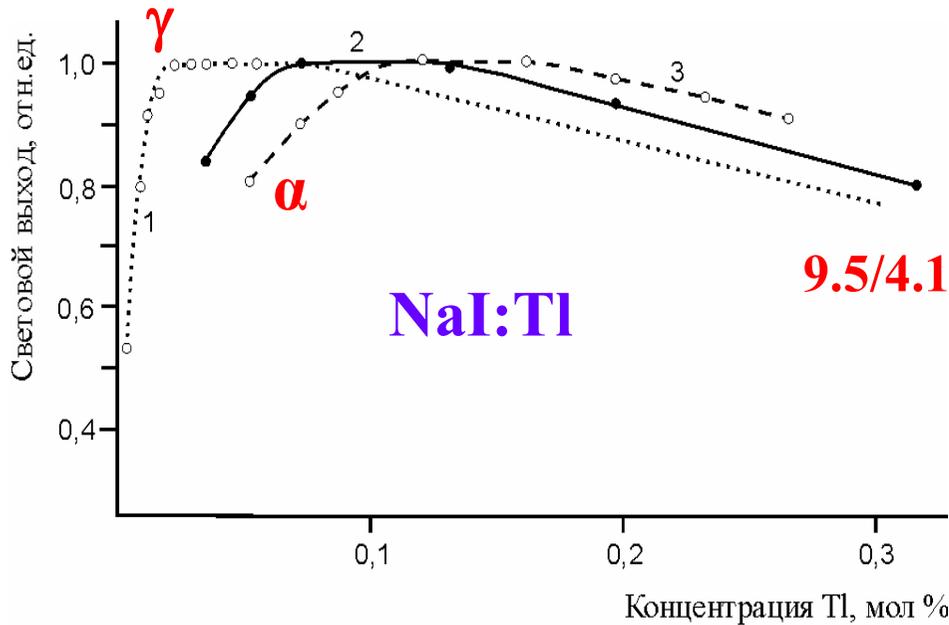
Если в точке рождения
 Брэгг +
 Антибрэгг, то

$dE/dx^3 \times 2$!!!

Всё событие



Концентрационные зависимости выхода

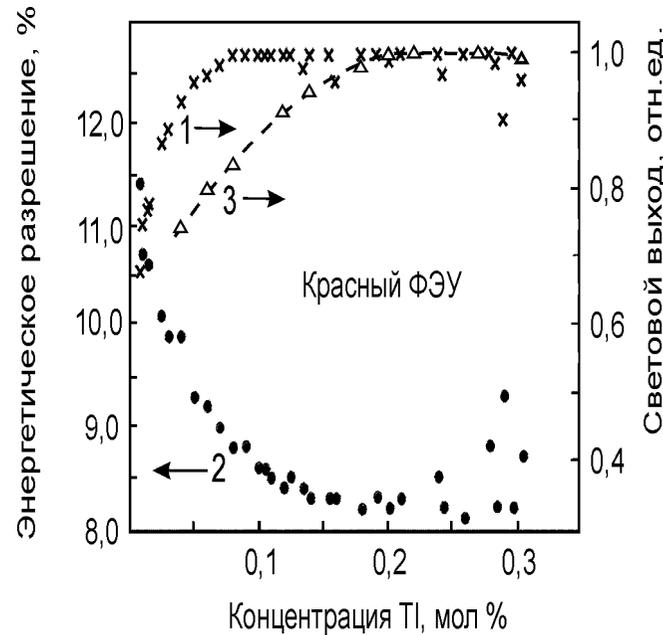
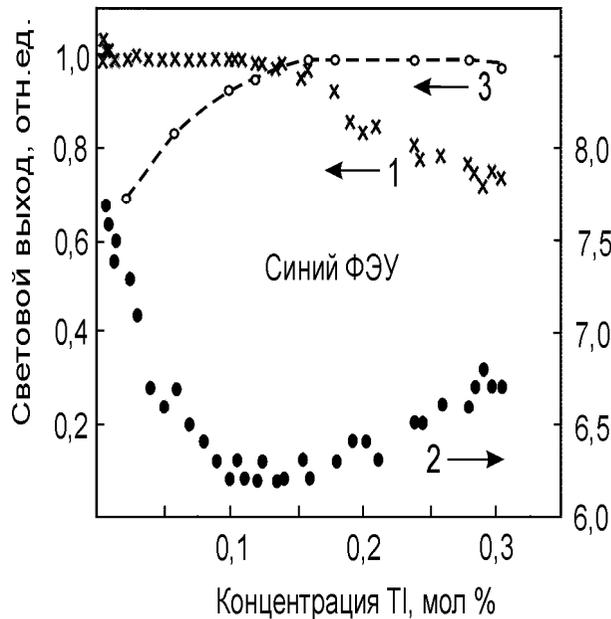


Концентрация пар $e-h$ -пар в треке электрона:

- $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для 662 кэВ (1, γ)
- $9,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для 5,9 кэВ (2)
- $1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для α (5,15 МэВ)

Объемная dE/dx^3 увеличена вдвое в провале у L-края

CsI:Tl



Только каскад
(Оже-электрон
+ X-кванты)
не увеличивает
 dE/dx

Каскад +
фотоэлектрон
увеличивает
 dE/dx

Для роста
 dE/dx нужен
второй электрон

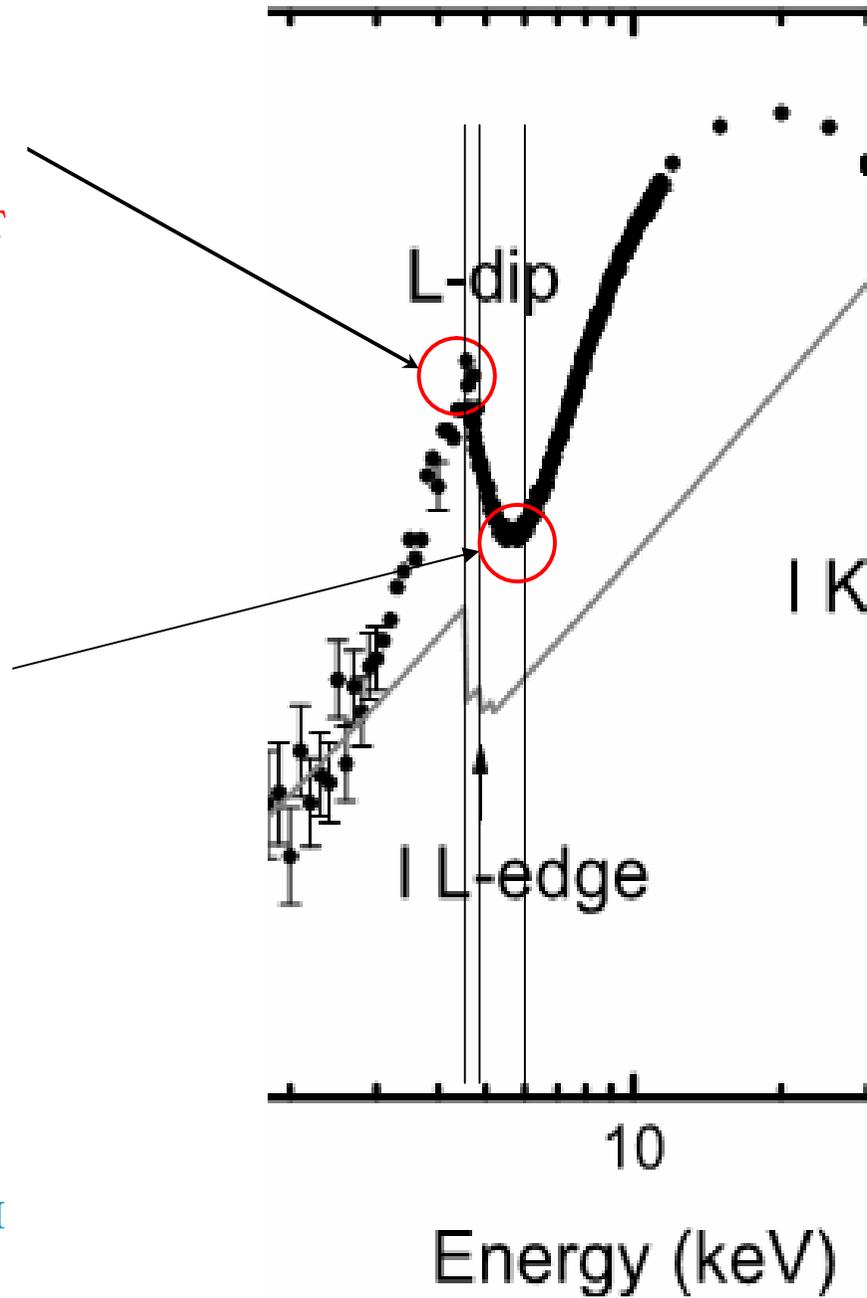
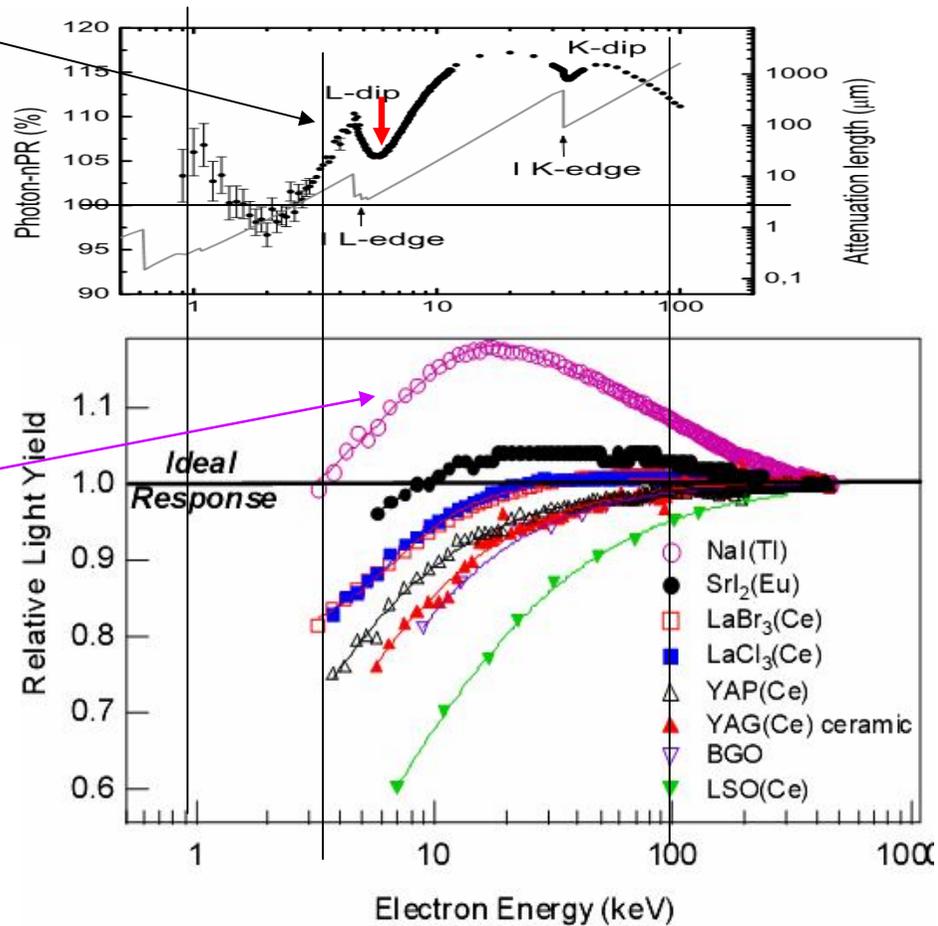


Figure from: I. Khodyuk and P. Dorenbos, IEEE TNS, 2012

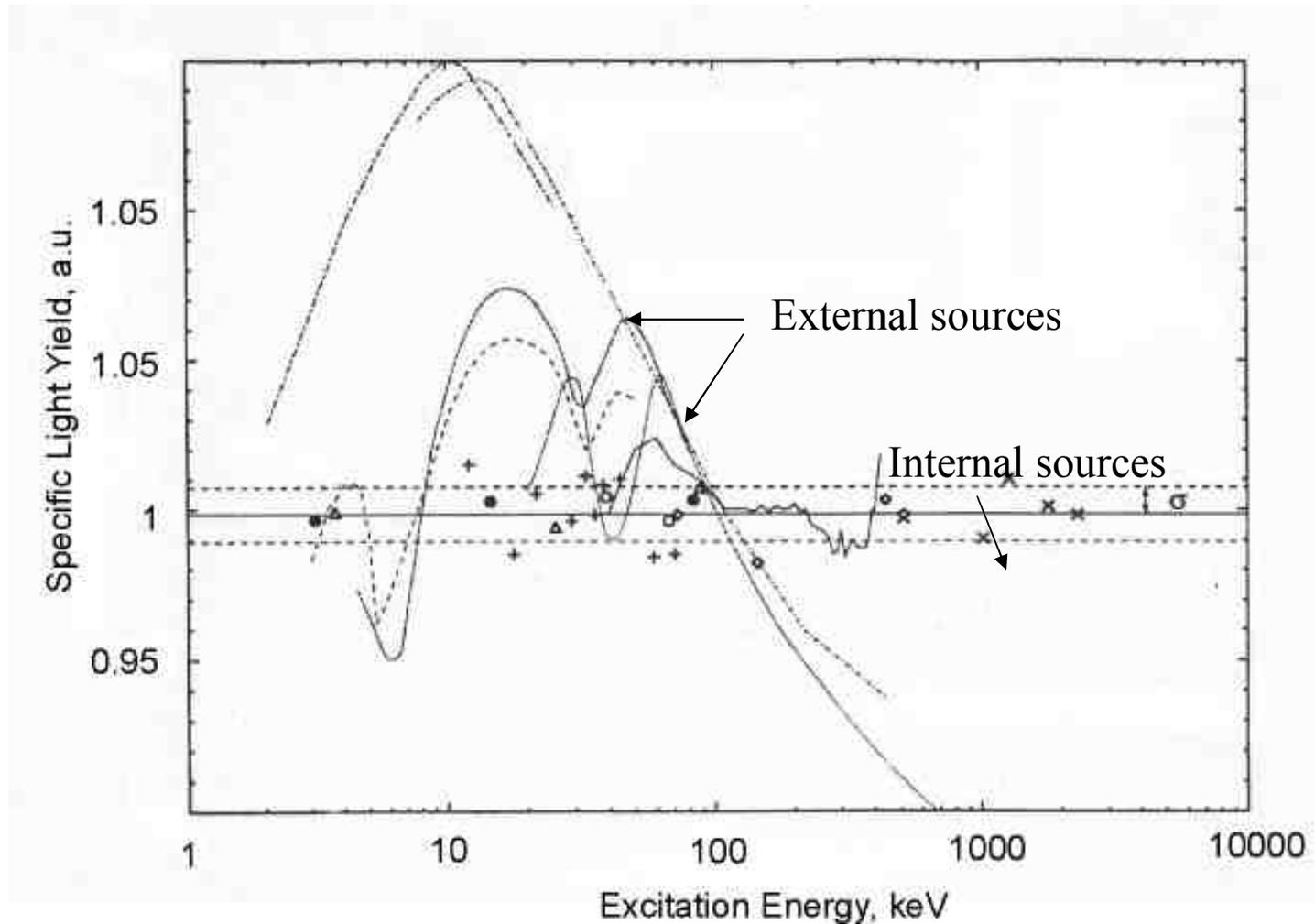
Фотонный и электронный отклик кристаллов NaI:Tl

Концентрация Tl
повлияет на
глубину провала

Мертвый слой
повлияет на ход
электр. отклика
(абсурд?!!!)



Dependence of L/E on E for internal and external sources



(Leutz H. and D'Ambrosio C., 1997)

Thank you for attention!

