

Физические процессы в сцинтилляторах: от макромасштаба до квантовых эффектов

А.Н.Васильев^{1,*}, И.А.Каменских², М.В.Коржик^{3,4},
В.М.Ретивов⁴

¹ НИИЯФ им. Д.В.Скобелева МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

² Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

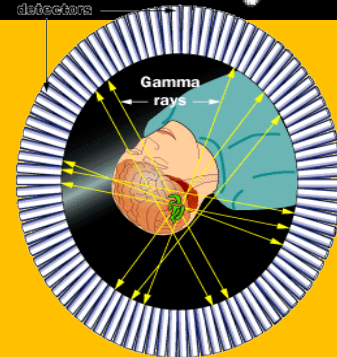
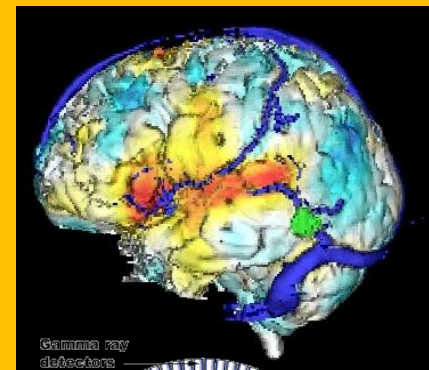
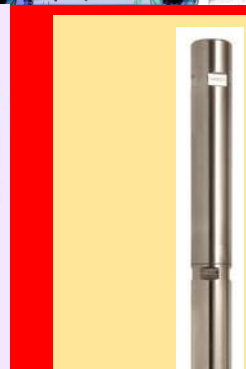
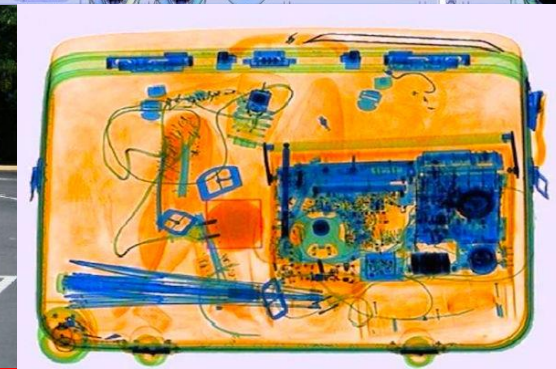
³ НИИ ядерных проблем Белорусского госуниверситета, Минск

⁴ Курчатовский комплекс химических исследований НИЦ
«Курчатовский институт», Москва

*e-mail: anv@sinp.msu.ru



НИЦ «Курчатовский институт»
Курчатовский комплекс
химических исследований (ИРЕА)

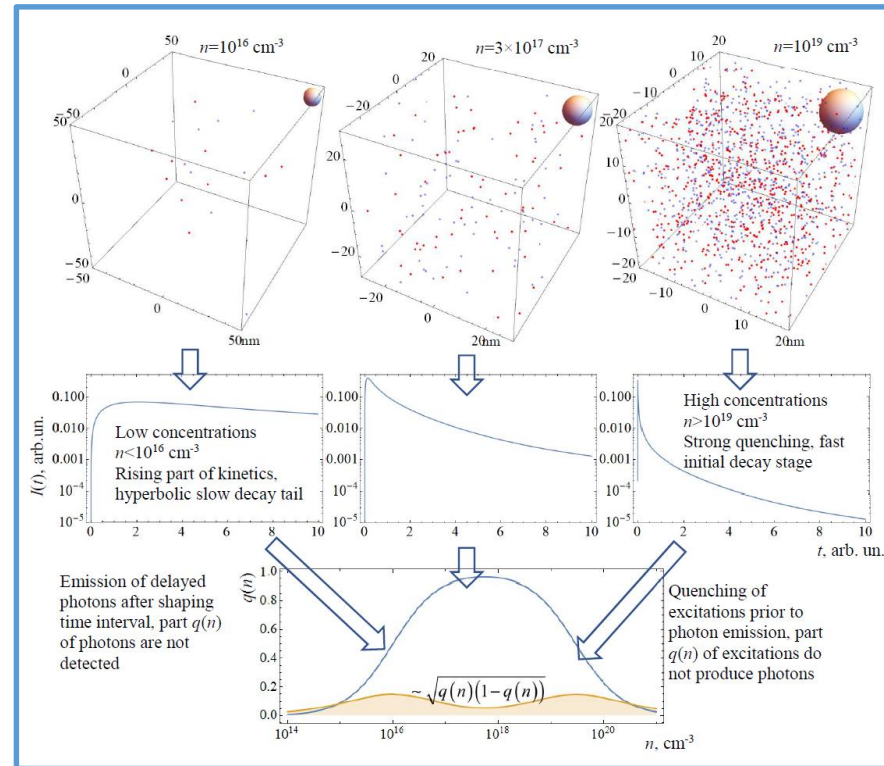
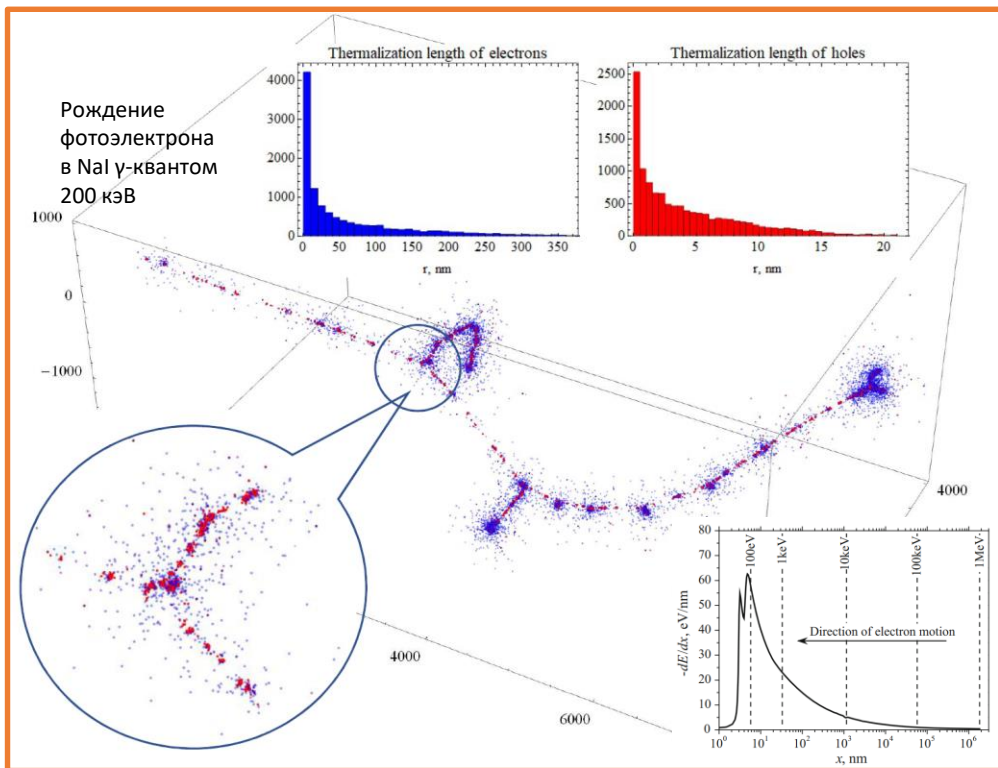
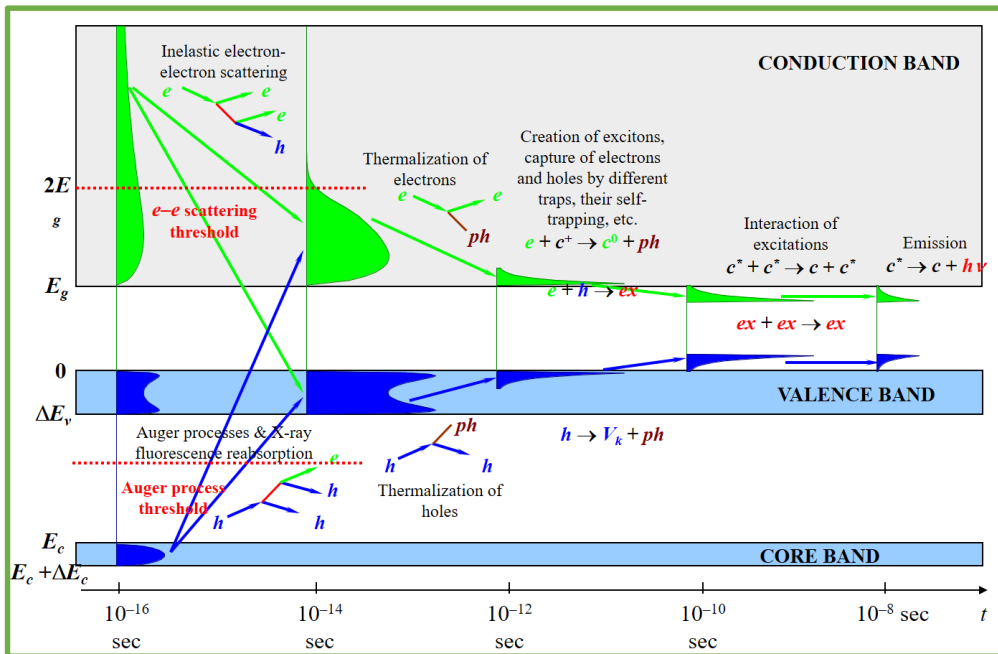


Применения сцинтилляторов

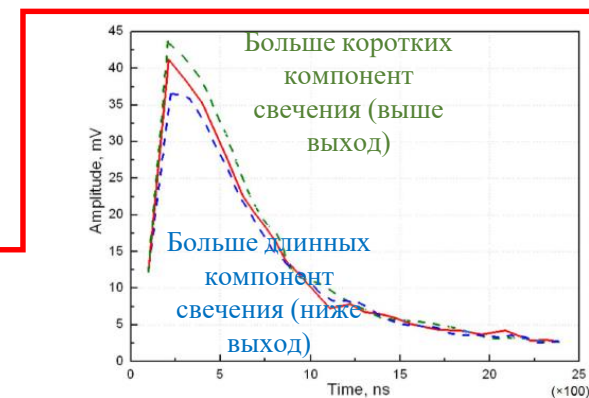


Сцинтилляторы – актуальные требования

- Высокий выход
- Энергетическое разрешение
- Пропорциональность отклика сцинтиллятора энергии γ -кванта
- Быстродействие (CTR – coincidence time resolution)
- Отсутствие медленных компонент
- Радиационная стойкость
- Специальные применения (редкие события, нейтрино, нейтроны...)
-



Выход, кинетика затухания и энергетическое разрешение сцинтилляторов определяются флуктуациями структуры трека ионизирующей частицы (флуктуациями Ландау) и потерями в областях высоких и низких плотностей электронного возбуждения.



За счет различия кинетики сцинтилляций из треков с разным числом ветвлений энергетическое разрешение можно повысить в 2 раза при обработке данных по кинетике каждого импульса

A.Gektin, A.Vasil'ev, Radiation Measurements, 122:108–104, 2019, DOI:10.1016/j.radmeas.2019.02.004

Треки с большим числом ветвлений - ускорение начальной стадии кинетики

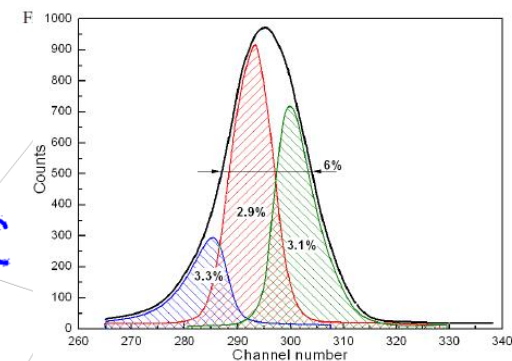
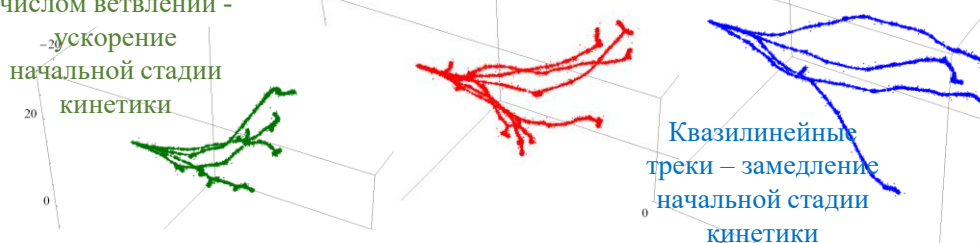
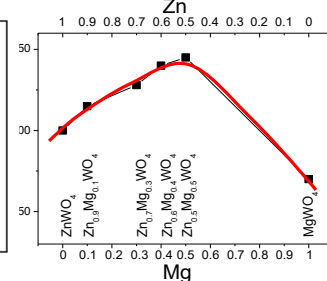
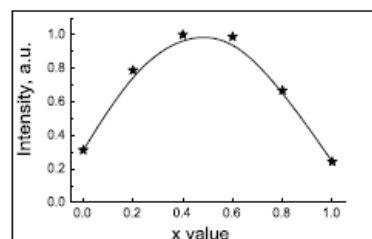
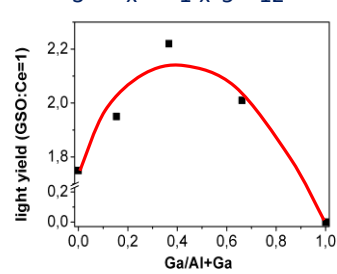
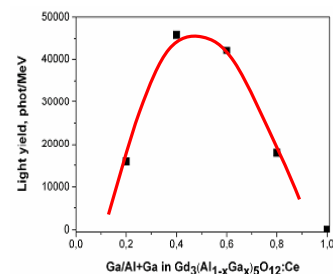
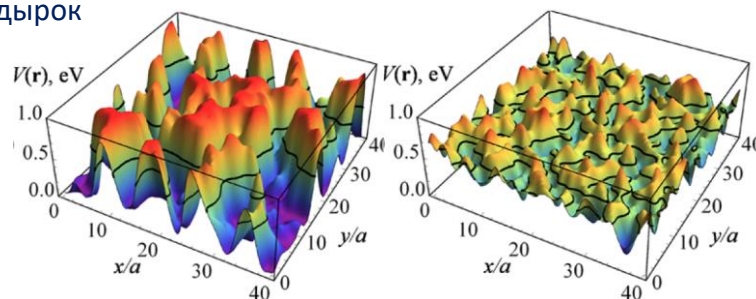


Fig. 5. Example of decomposition of the ^{137}Cs full absorption peak in pulse spectrum by three clusters.

Выход сцинтилляции в твердых растворах



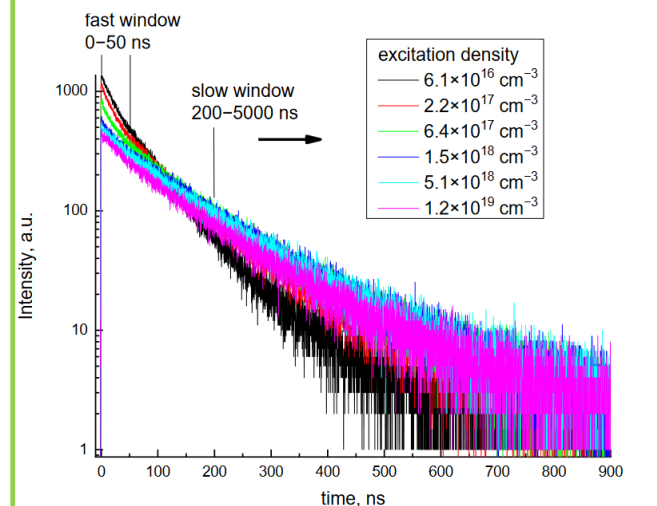
Распределение дна зоны проводимости бинарного твердого раствора при кластеризации (слева) и без нее (справа) влияет на длину термализации электронов и дырок



A. Belsky, A. Gektin, A.N. Vasil'ev, Physica Status Solidi (B) 257 (2020), 1900535, DOI: 10.1002/pssb.201900535
V. Retivov et al, Nanomaterials 12 (2022), 4295. DOI: 10.3390/nano12234295
Y. Talochka et al, J. Appl. Phys. 132, 053101 (2022); doi: 10.1063/5.0098905
D. Spassky et al, Optical Materials 36 (2014) 1660, DOI: 10.1016/j.optmat.2013.12.039
D. Spassky et al, Optical Materials 80 (2018) 247, DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.019

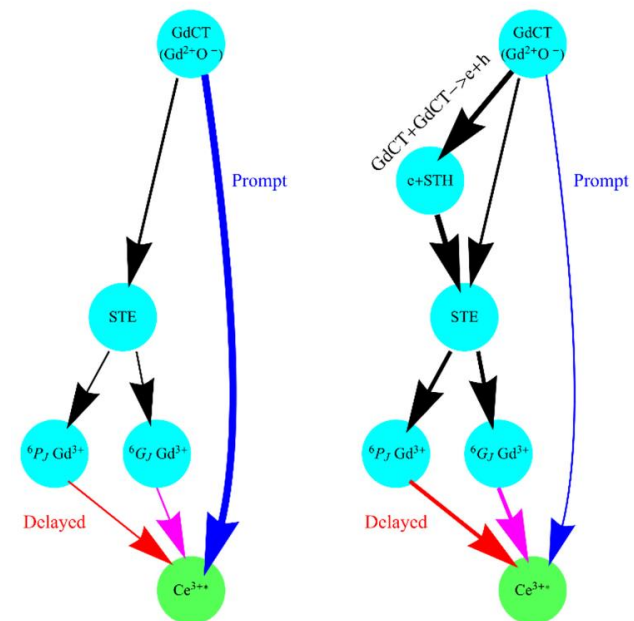


4fGd³⁺ экситоны Френкеля образуют дополнительный канал передачи на Ce³⁺

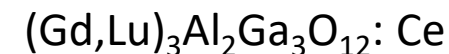


Low excitation density

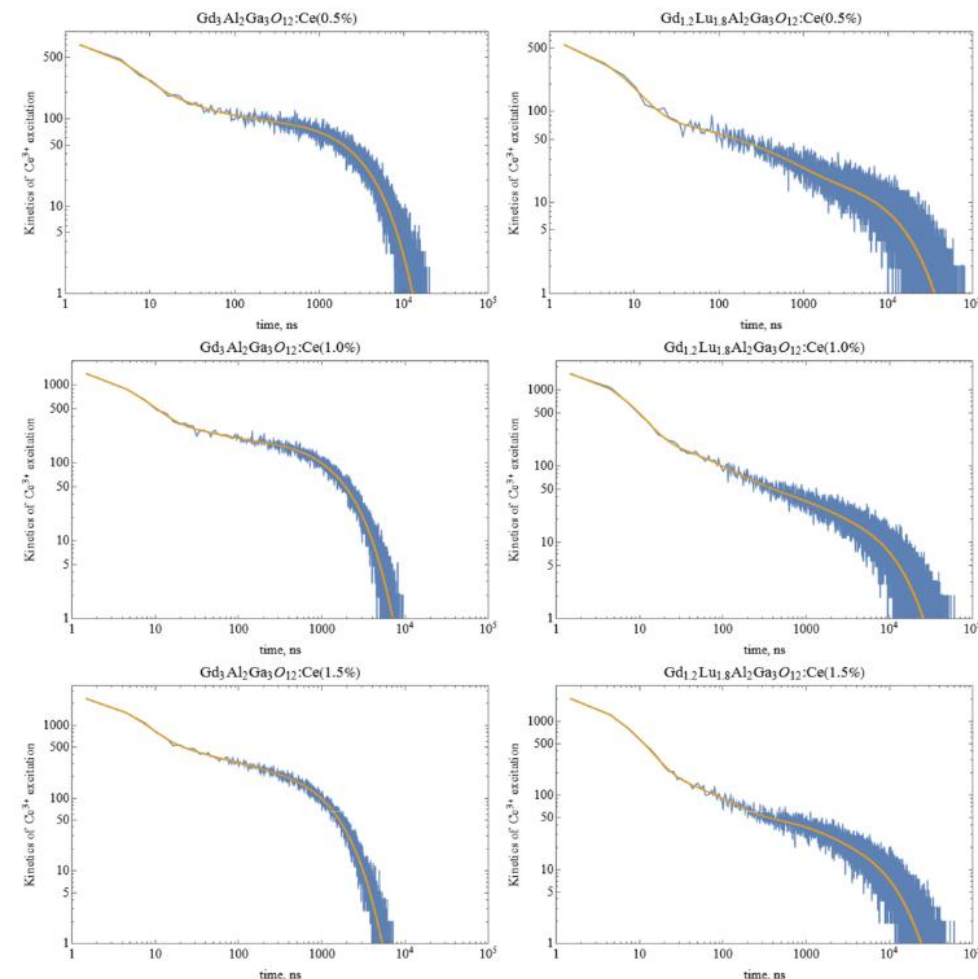
High excitation density



D. Spassky et al, Materials 16 (2023), 971. DOI: 10.3390/ma16030971



Модификация кинетики Ce³⁺ путем «разбавления» подрешетки 4fGd³⁺ ионами Lu³⁺



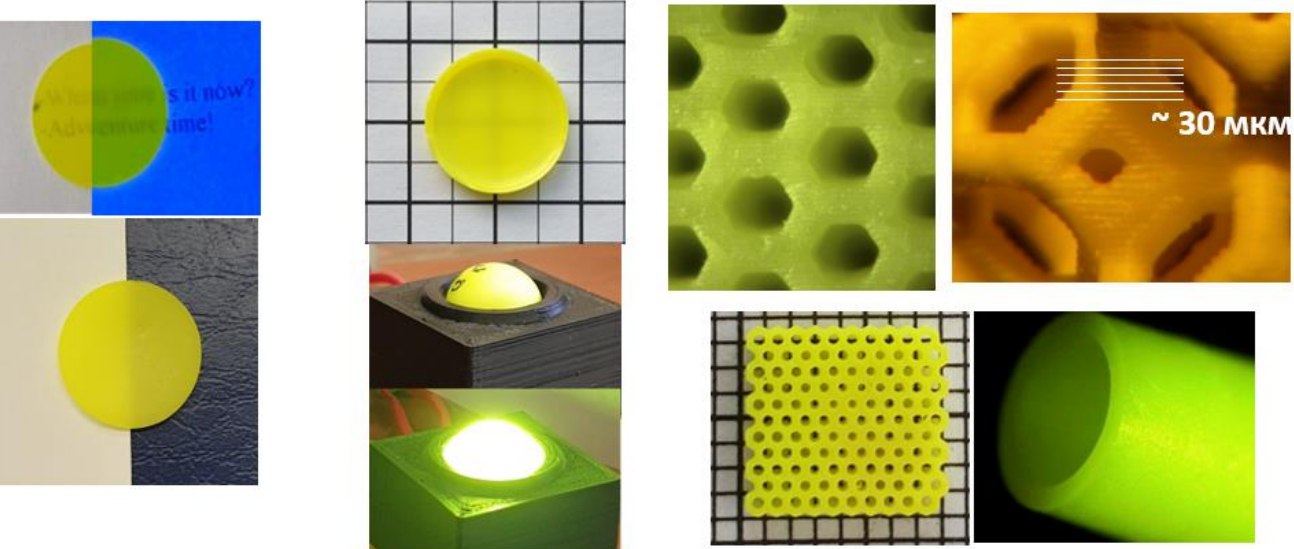
M. Korzhik et al, Crystals 12 (2022) 1196. DOI: 10.3390/cryst12091196

Возможности формования керамики GYAGG

Тонкие плоские пластины
0,5-2 мм (можно тоньше)

Непланарные пластины

Объекты сложной формы
с деталями 0,5 мм и менее (3D-печать)



Journal of Applied Physics ARTICLE pubs.aip.org/aip/jap

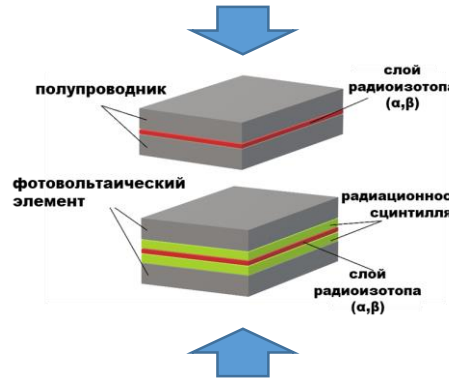
Customizing the luminescent properties of compositionally disordered ceramics (Gd, Y, Yb, Tb, Ce)₃Al₂Ga₃O₁₂: From an ultra-fast scintillator to bright, wide-spectrum phosphor

Cite as: J. Appl. Phys. 135, 053104 (2024); doi: 10.1063/5.0186860
Submitted: 9 November 2023 · Accepted: 13 January 2024 ·
Published Online: 5 February 2024

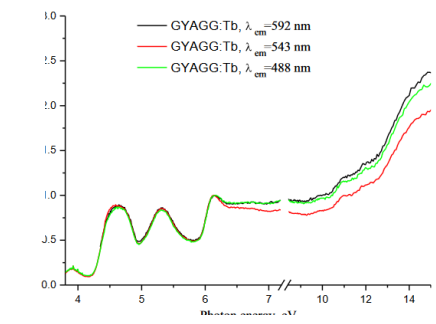
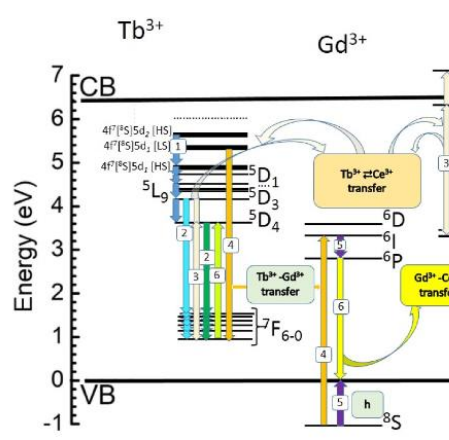
Valery Dubov,¹ Aliaksei Bondarau,² Daria Lelekova,¹ Ilya Komendo,¹ Georgii Malashkevich,³ Viktoryia Kouhar,³ Vladimir Pustovarov,⁴ Dmitry Tavrunkov,⁴ and Mikhail Korzhik^{1,2,a}

Керамика (Gd,Y)₃Al₂Ga₃O₁₂:Tb с медленным свечением для долгоживущих радиоизотопных ядерных батареек с непрямым преобразованием

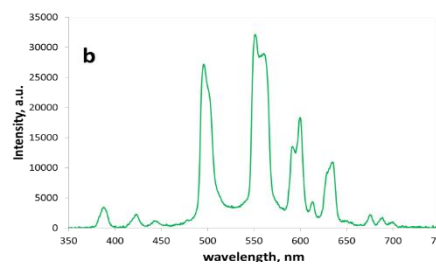
Прямое преобразование



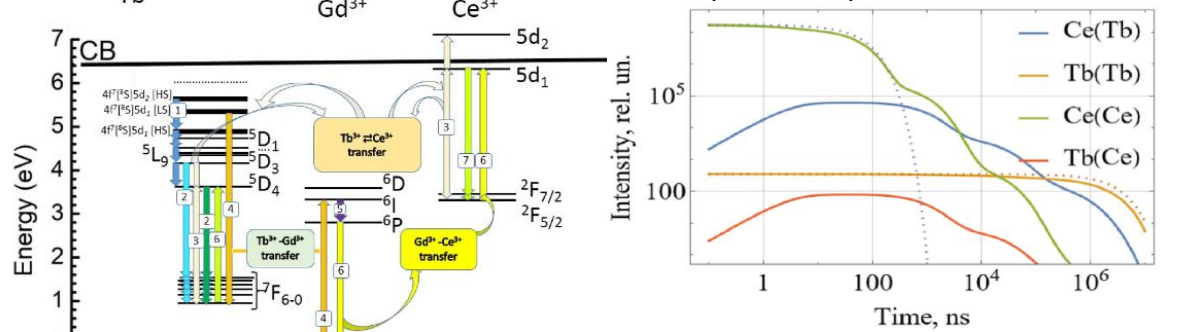
Непрямое преобразование



Спектр возбуждения люминесценции (Gd,Y)₃Al₂Ga₃O₁₂:Tb



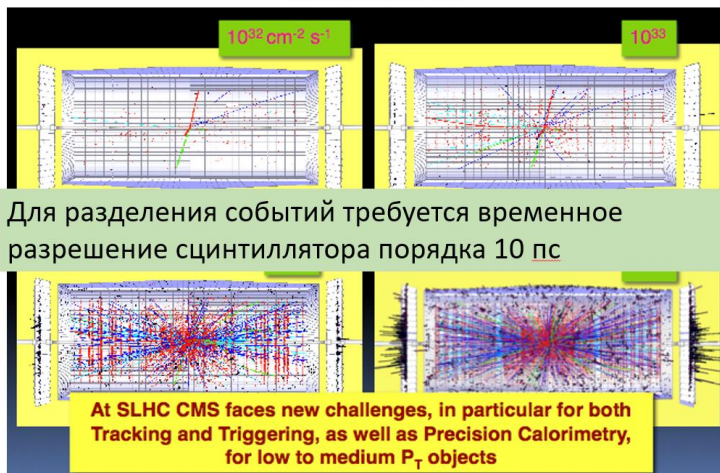
Спектр сцинтилляции (Gd,Y)₃Al₂Ga₃O₁₂:Tb под электронным пучком 150 кэВ



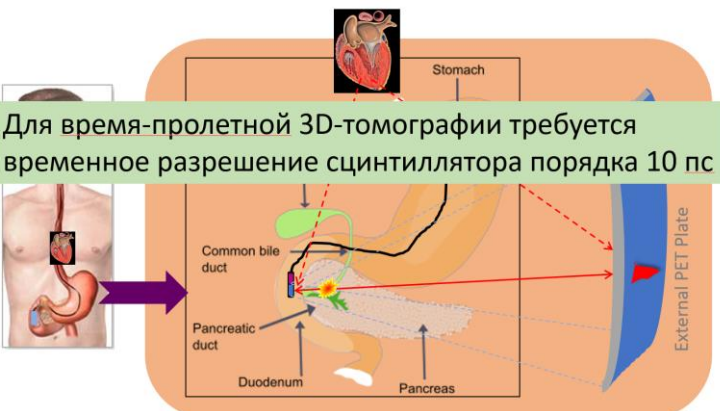
Модельные кинетики затухания свечения (Gd,Y)₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce,Tb (0.2 Tb, 0.05 Ce) для различных видов возбуждения

M. Korzhik et al, J. Lumin. 265 (2024) 120226, DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.120226
M. Korzhik et al, Phys. Status Solidi RRL, 17 (2023) 2200368, DOI: 10.1002/pssr.202200368
P. Karpyuk et al, Appl. Sci. 13 (2023) 13, 3323. DOI: 10.3390/app13053323
M. Korzhik et al, J. Lumin. 234 (2021) 117933, DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.117933
M. Korzhik et al, Nucl. Eng. Tech. 54 (1922) 2579, DOI: 10.1016/j.net.2022.02.007

Перекрывание событий при высокой светимости

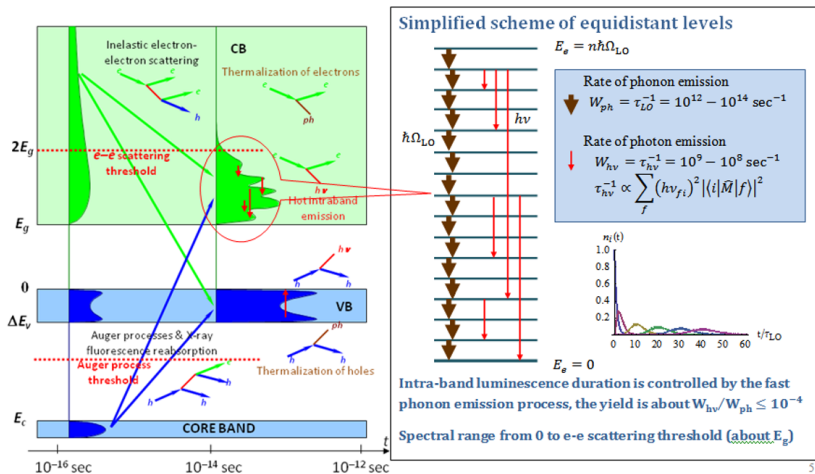


EndoTOFPET-US: Принцип работы время-пролетного ПЭТ



10 ps CTR challenge

Схема внутризонной люминесценции, которая дает разрешение до единиц пикосекунд

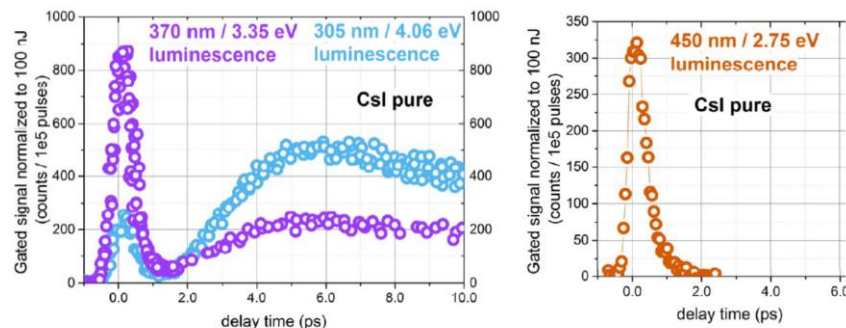


P.Lecoq, M.Korzhik, A.Vasil'ev, IEEE TNS, 61 (2014) 229-234 (46 cit.)

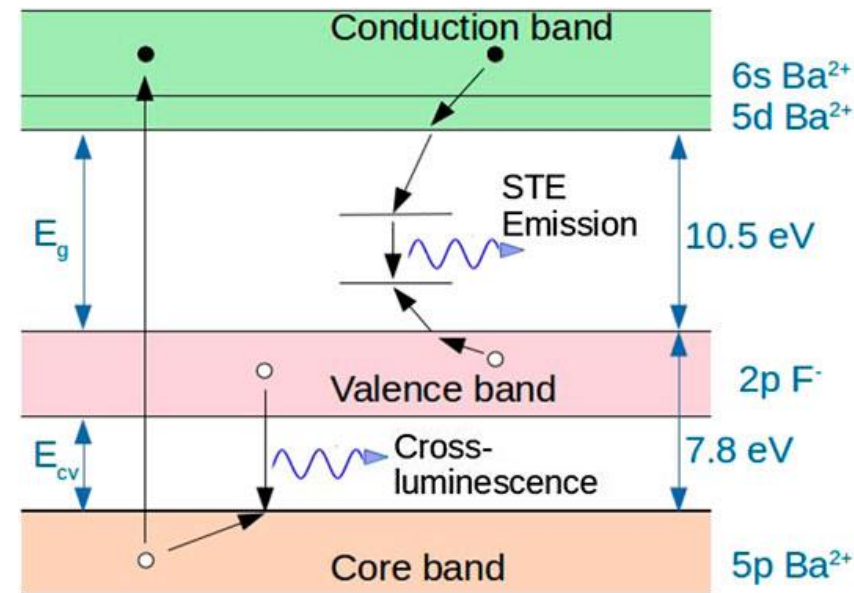
Прямое измерение времени высвечивания внутризонной люминесценции в CsI с субпикосекундным временным разрешением на ЛСЭ FLASH

Natalia Gerasimova, Sendai, 01.10.2019

Measurements



European XFEL



BaF2: 190 фотонов на 511 кэВ, 900 пс с фронтом <500 фс



П.А.Родный

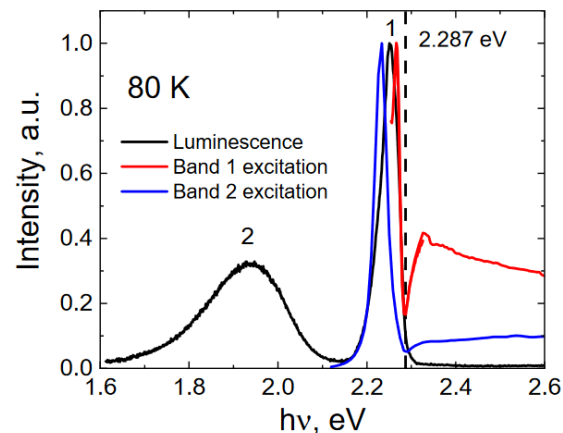
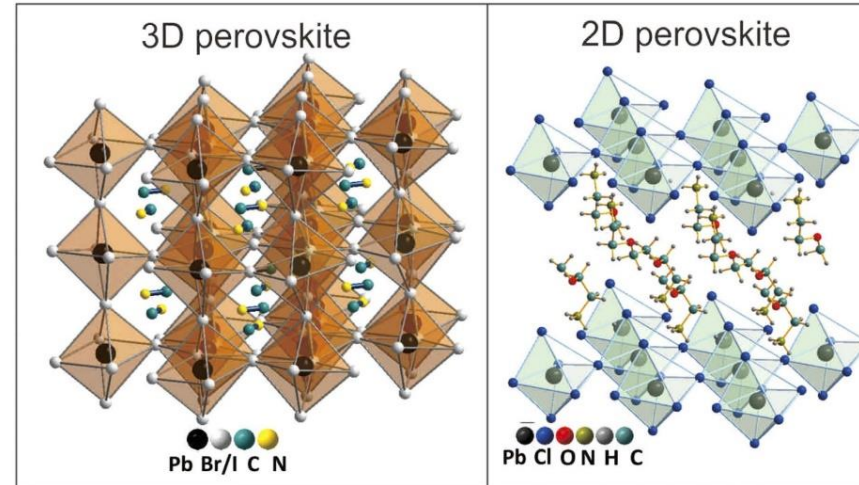
Гибридные органо-неорганические перовскиты

Преимущества

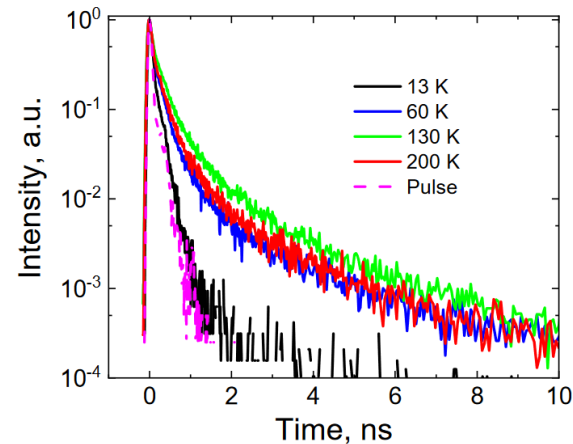
- Высокий выход при низких T
- Наносекундная кинетика
- Высокая подвижность носителей
- Возможность изменения цвета свечения

Проблемы

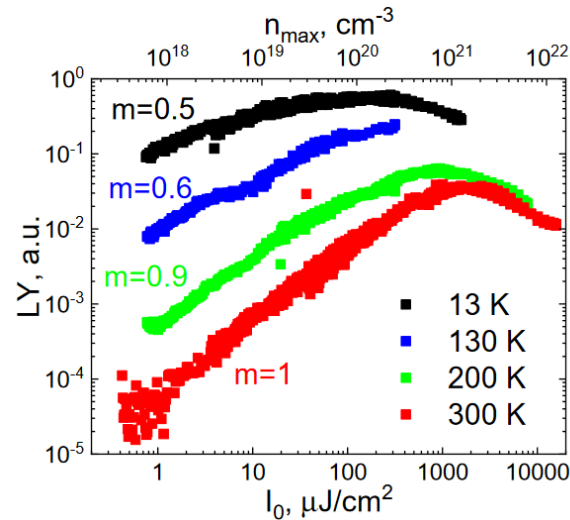
- Температурное тушение
- Низкая стабильность



Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции MAPbBr₃, 80 K



Кинетика люминесценции MAPbBr₃ при различных температурах



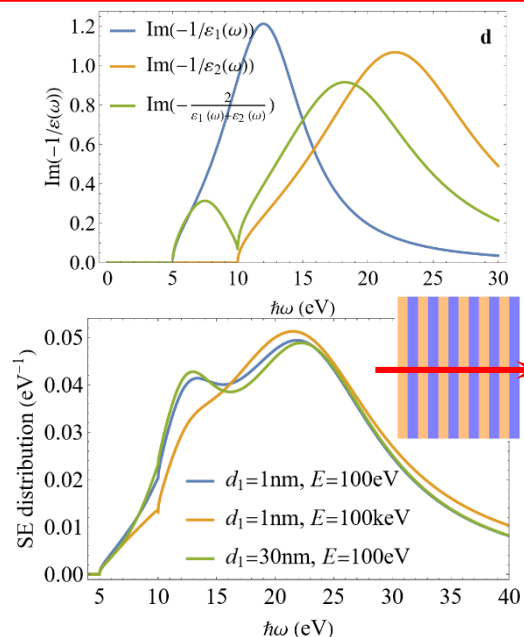
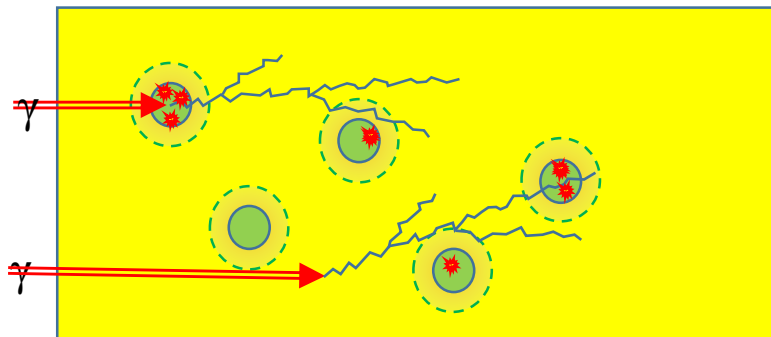
Зависимость световыхода от плотности возбуждения при различных температурах, $LY \sim (I_0)^m$



Кристаллы MAPbCl_xBr_{3-x} (MA=метиламмоний CH₃NH₃)

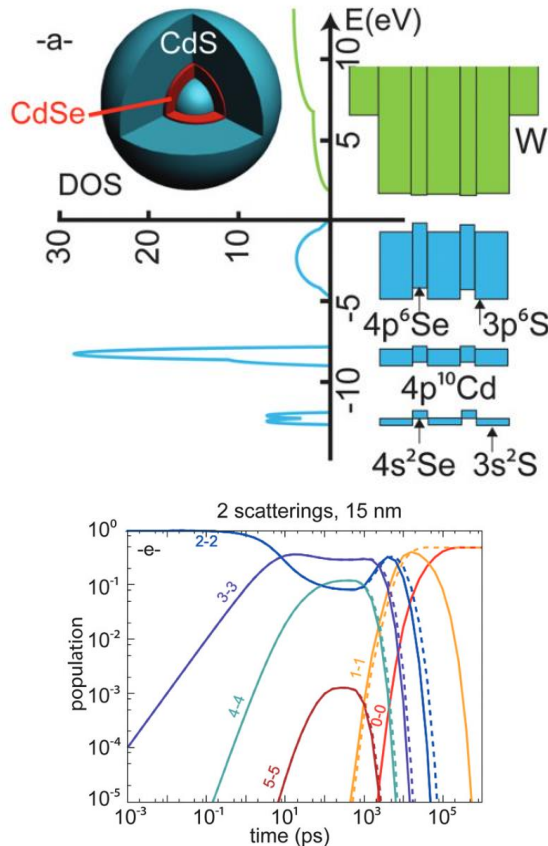
- Возможность изменять люминесцентные свойства изменением состава
- Возможность управления кинетикой свечения вплоть до субнаносекундного диапазона

Взаимодействие ионизирующего излучения с наночастицами и композитами на их основе



Поверхностные плазмоны в потерях энергии быстрого электрона в гетероструктурах

А. Н. Васильев, Вестник МУ. Физика, астрономия **79** (2024), no. 1, 2410501, DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2410501



Размножение и релаксация возбуждений в сферических квантовых ямах при возбуждении ионизирующим излучением
Z. Meng et al, Nanoscale 13 (2021), 19578–19586, DOI: 10.1039/d1nr04781g

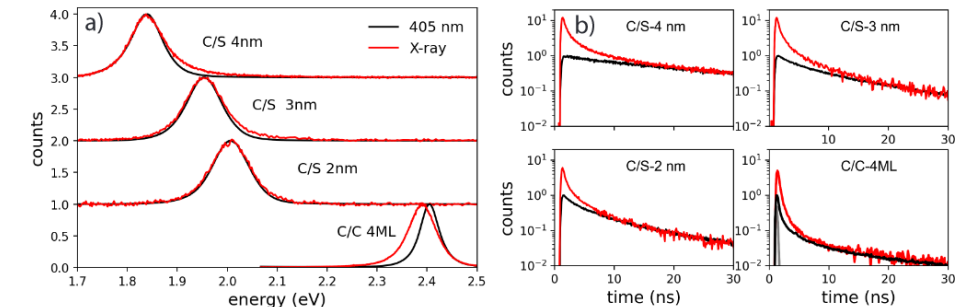


Figure 6 -a- Emission spectra and -b- fluorescence decay times at room temperature of the series of NPLs having different thicknesses ranging for C/C 4 ML (1.2 nm), and C/S 2 nm, 3 nm and 4 nm under low power density of optical excitation (405 nm) and X-ray excitation

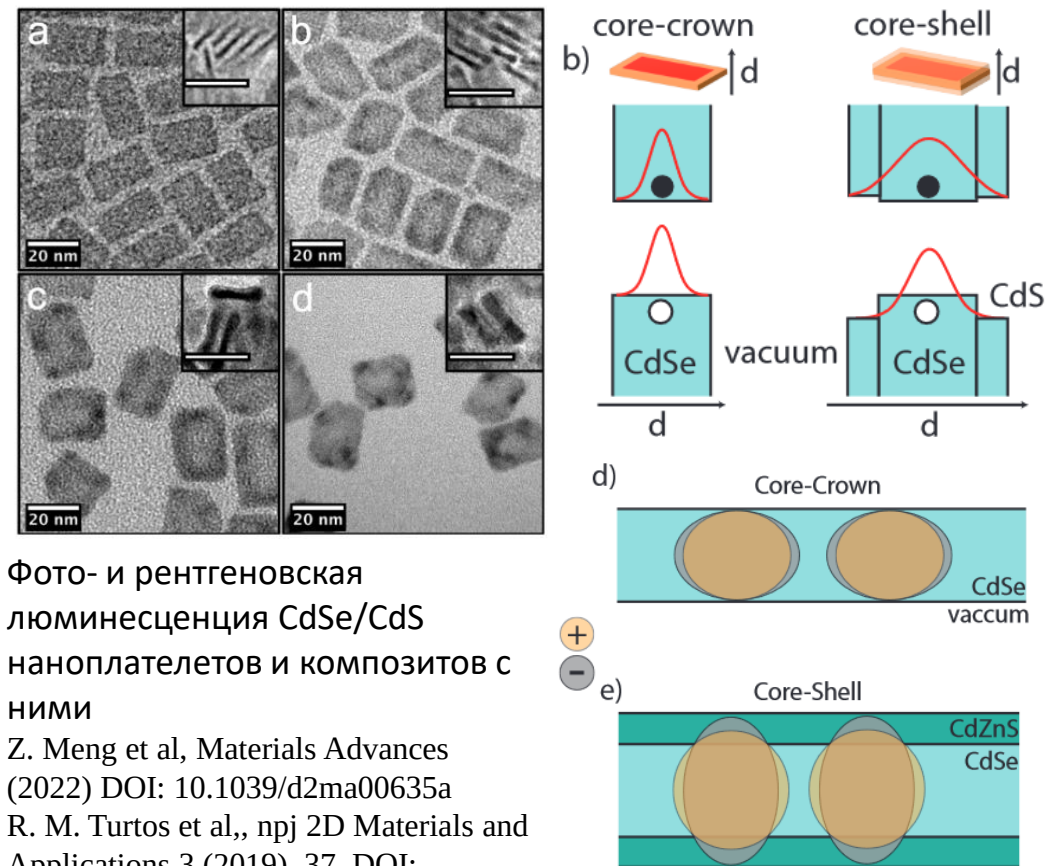
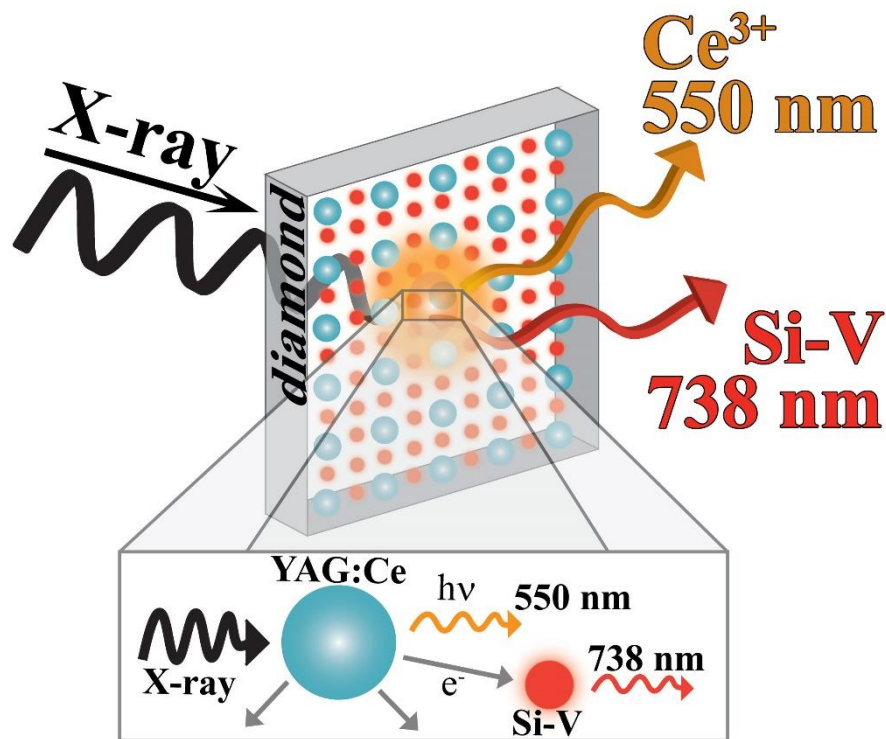


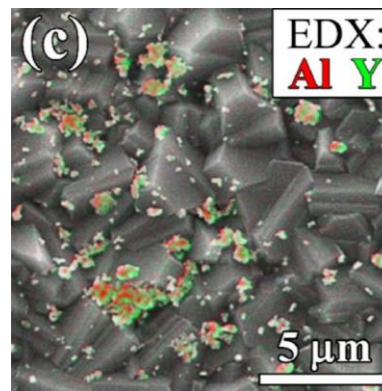
Фото- и рентгеновская люминесценция CdSe/CdS наноплателетов и композитов с ними
Z. Meng et al, Materials Advances (2022) DOI: 10.1039/d2ma00635a
R. M. Turtos et al., npj 2D Materials and Applications 3 (2019), 37, DOI: 10.1038/s41699-019-0120-8

Композитные материалы на основе алмаза с наночастицами YAG-Ce

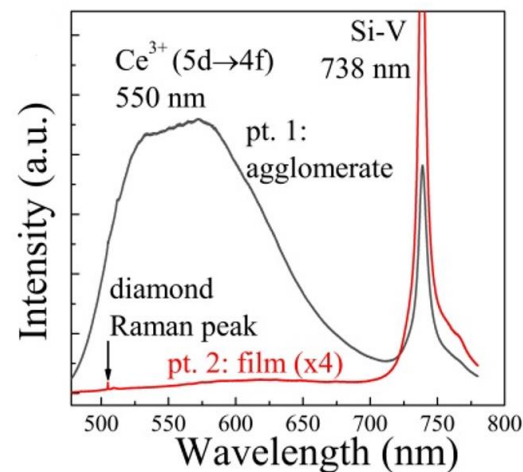


V. Sedov et al, Carbon **174** (2021) 52-58, DOI: 10.1016/j.carbon.2020.12.020

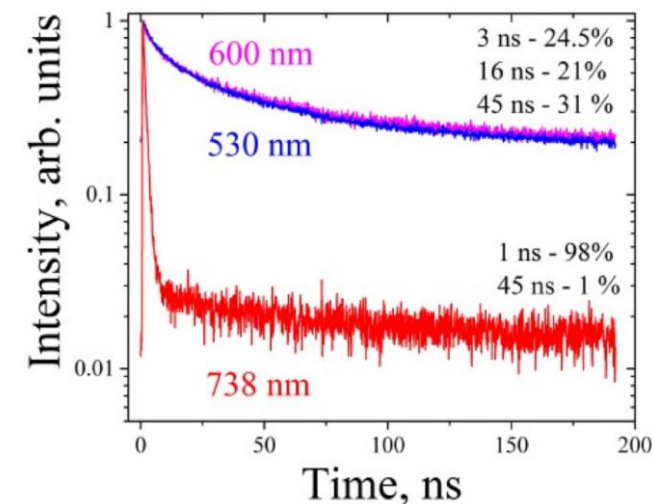
V. Sedov et al, ACS Applied Nano Materials **3** (2020) 1324-1331, DOI: 10.1021/acsnanm.9b02175



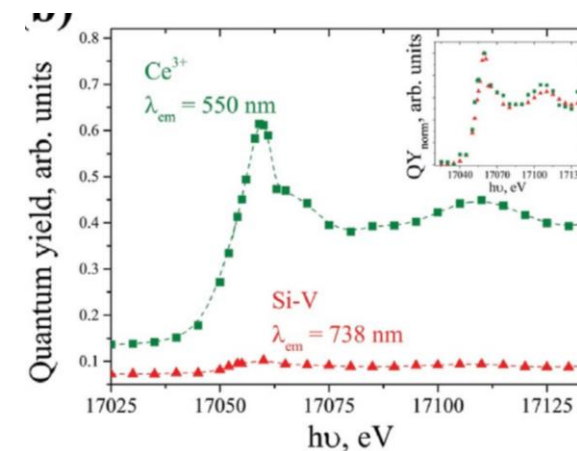
Изображение СЭМ наночастиц YAG-Ce на поверхности поликристаллической алмазной пленки до CVD осаждения



Спектры свечения Ce³⁺ и Si-V центров



Кинетика затухания свечения при возбуждении 19 кэВ



Спектр возбуждения люминесценции около К-края иттрия

Заключение

Актуальные темы для исследования сцинтилляторов:

- Многокомпонентные твердые растворы
- Органо-неорганические сцинтилляторы (перовскиты)
- Гетероструктурные и нанокомпозитные сцинтилляторы
- Сцинтилляторы со сверхвысоким временным разрешением
- Детекторы с фотонными кристаллами и управлением временем свечения на основе эффекта Парселла
- Сцинтилляторы и преобразователи ионизирующих излучений для специфических применений: онкология, медицинская диагностика, детекторы для будущих суперколлайдеров в физике высоких энергий, регистрация редких событий (темная материя и проч.), изотопные источники тока с непрямым преобразованием
-

Благодарю за внимание!

Работа выполнена при частичной поддержке

- гранта Минобрнауки РФ «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и инфраструктуры для материалов энергетики нового поколения и безопасного захоронения радиоактивных отходов» (№075-15-2021-1353 от 12 октября 2021 г.) и

- гранта РНФ «Повышение эффективности преобразования энергии в люминесцентных и сцинтилляционных материалах на основе твердых растворов и композитов» (проект № 21-12-00219)

Particle Acceleration and Detection

Mikhail Korzhik
Gintautas Tamulaitis
Andrey N. Vasil'ev

Physics of Fast Processes in Scintillators

 Springer