



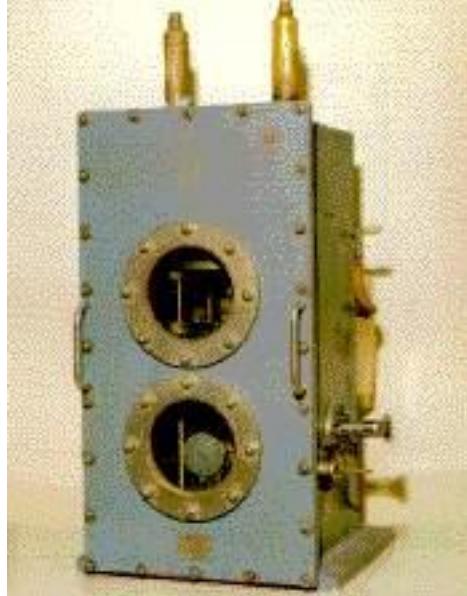
75 ЛЕТ НИИЯФ
МГУ

От квантовых гироскопов до нано-сцинтилляторов

А.Н.Васильев

ОФПКЭ НИИЯФ МГУ

anv@sinp.msu.ru

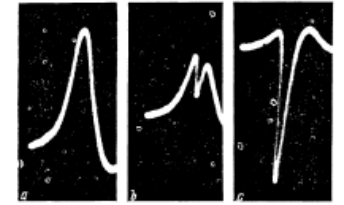


Трехуровневый мазер на 3 ГГц на монокристалле корунда с хромом - ЖЭТФ, 34, 1660 (1958)

Эта деятельность привела к возникновению в 1954 году лаборатории радиоспектроскопии (позднее отдел физических проблем квантовой электроники), руководимой А.М.Прохоровым и Л.С.Корниенко



Лауреат Нобелевской премии академик А.М. Прохоров и профессор Л.С. Корниенко.



Photograph of the $M = 3/2 + 1/2$ absorption line at 3000 Mcs for different power levels of the auxiliary radiation P_{aux} . Fig. 1a corresponds to $P_{aux} = 0$. Fig. 1c corresponds to a value of P_{aux} for which saturation is reached. Fig. 1b corresponds to an intermediate case.

corundum was investigated in a number of papers.⁶⁻⁸ The Cr^{3+} ion in corundum is in an axial electrical field which splits the spin quadruplet of the lower orbital singlet level into two doublets, the distance between which is equal to $2D = -0.3824 \text{ cm}^{-1}$. The spin-lattice relaxation time of Cr^{3+} , even at liquid nitrogen temperatures, is sufficiently long,¹⁰ $\sim 10^{-4}$ sec.

For a paramagnetic amplifier, we have used the levels that are characterized by the quantum numbers $M = 3/2, \pm 1/2$ when the crystalline axis is oriented parallel to the constant external magnetic field. If the axis of the crystal is turned, the states mix and transitions between all three levels become allowed. The levels $M = -1/2, 1/2$ were used for amplification, and the auxiliary radiation excited transitions between the levels $M = 1/2, -3/2$. The frequency at which emission (or generation) occurred was ~ 3000 Mcs and the frequency of the auxiliary radiation ~ 15000 Mcs.

In the figure we show photographs of the line corresponding to the $-1/2 \rightarrow +1/2$ transition at a frequency of 3000 Mcs, as a function of the power level of the auxiliary radiation. It is clear from the photographs how the absorption line (1a) goes over into an emission line (1c) when the power of the auxiliary radiation is increased. At $T \sim 2^\circ K$, the system became self-excited and acted as a generator.

Detailed data on the operation of the constructed amplifier will be published later.

The authors express their gratitude to Professor A. I. Shal'nikov for his assistance with the performance of the experiments at low temperatures.

¹ N. G. Basov and A. M. Prokhorov, J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 28, 249 (1955), Soviet Phys. JETP 1, 184 (1955).

² N. Bloembergen, Phys. Rev. 104, 324 (1956).

³ Scovil, Feher, and Seidel, Phys. Rev. 105, 762 (1957).

A CHROMIUM CORUNDUM PARAMAGNETIC AMPLIFIER AND GENERATOR

G. M. ZVEREV, L. S. KORNIENKO, A. A. MANENKOV, and A. M. PROKHOROV

P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Submitted to JETP editor April 1, 1958

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 1660-1661 (June, 1958)

IN reference 1 it was proposed to use a molecular system possessing three energy levels for the construction of molecular amplifiers and generators. Later this problem was considered in more detail as applied to paramagnetic crystals.² There are reports about the construction of three-level paramagnetic amplifiers using a single crystal of gadolinium ethylsulphate³ and a single crystal of chromium cyanide.^{4,5} We have investigated the possibility of constructing a paramagnetic amplifier and generator using a single crystal of chromium corundum ($Al_2O_3 \cdot Cr_2O_3$). The spectrum of Cr^{3+} in

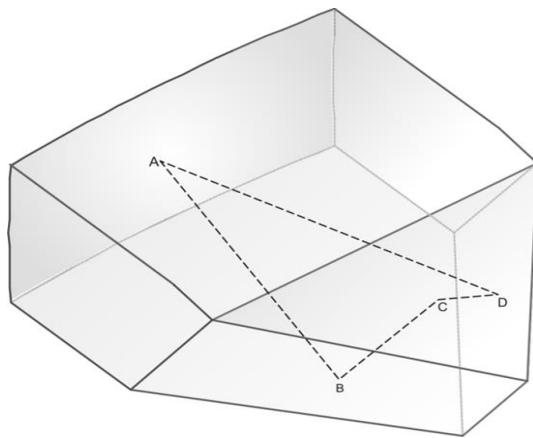
Теоретические и экспериментальные разработки твердотельных кольцевых лазеров (кольцевые чип-лазеры)



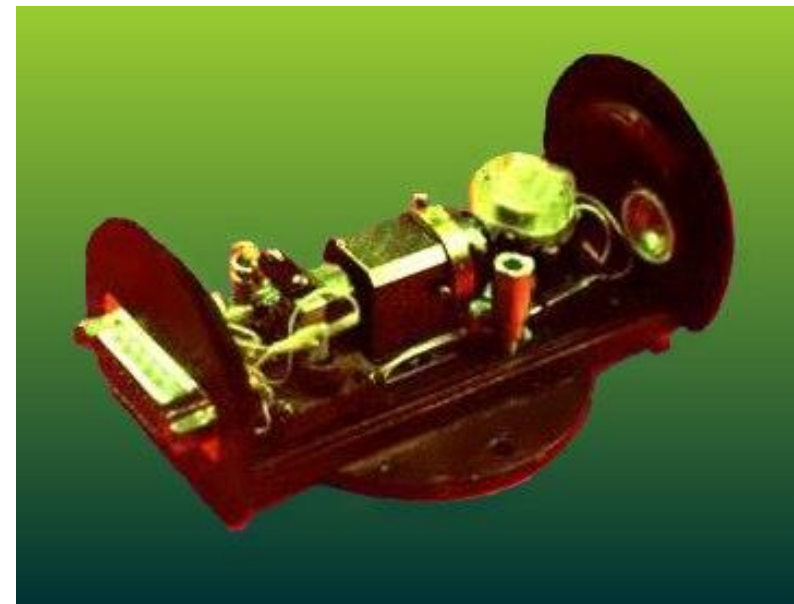
Н.В.Кравцов

Области применения:

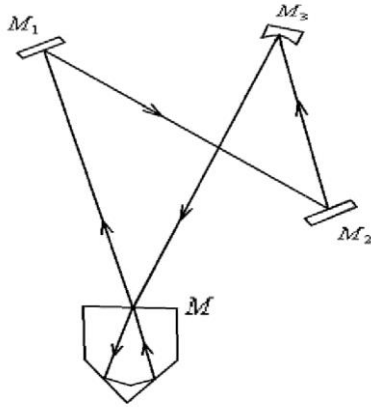
- Оптические линии связи.
- Лидары и радары на основе лазеров.
- Контрольно-измерительная аппаратура.
- Космическая и автомобильная промышленность.
- Навигационные системы



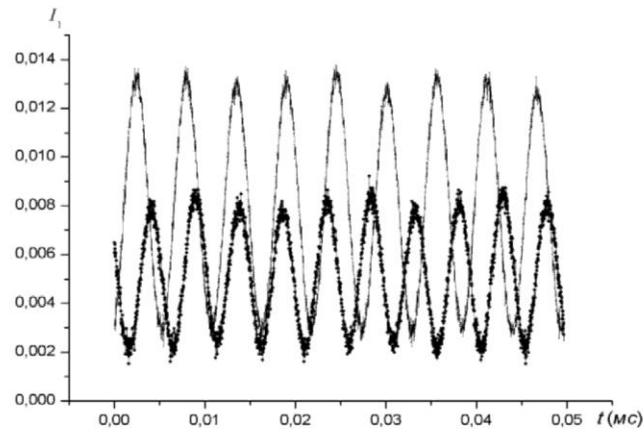
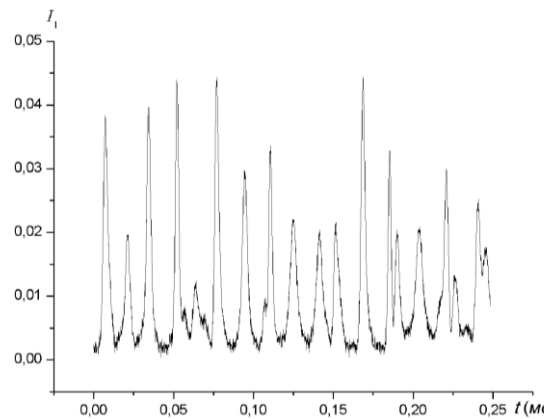
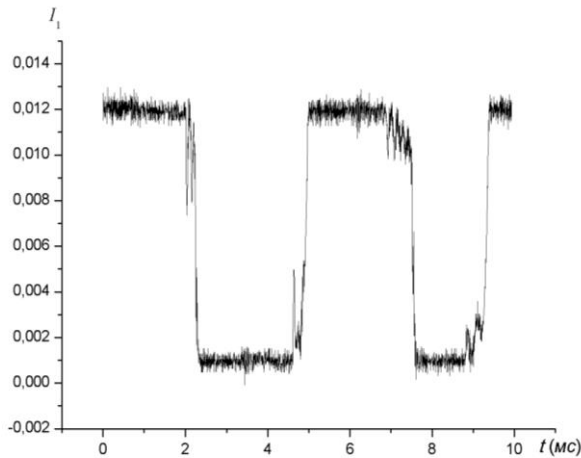
Неплоская траектория хода лучей в моноблоке
кольцевого чип-лазера на YAG:Nd^{3+}



Режимы генерации твердотельного кольцевого лазера Nd:YAG со связанным резонатором



Кольцевой монолитный лазер (периметр 2,8 см)
и дополнительный кольцевой резонатор M1,
M2, M3 (периметр 86,5 см)



Дополнительный резонатор позволяет перестроить генерацию в однонаправленный режим, автомодуляционный режим второго рода, режим динамического хаоса (Эти режимы можно получить и в чип-лазере, например, используя магнитное поле).

И.И. Золотоверх, Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина. Автомодуляционные колебания в твердотельном кольцевом лазере со связанными резонаторами, Квантовая электроника, 48, 1-6, 2018.

Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина. Режимы генерации твердотельного кольцевого лазера со связанными резонаторами – Квантовая электроника, Квантовая электроника, 48, 703-705, 2018.

История исследований ЯМР-гироскопа в НИИЯФ МГУ

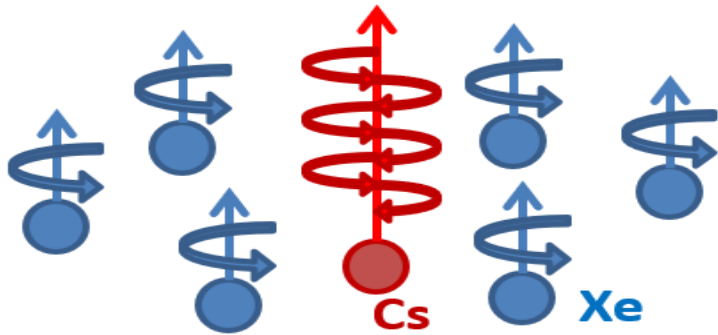
1. 1963 г. - начало исследований по ЯМР- гироскопии.
2. 1978 г. – закрыта госпрограмма создания ЯМР гироскопа. Работы в НИИЯФ продолжаются по хоздоговорам.
3. В рамках ЯМР тематики выполнены следующие работы:
 - а) поиск арионов;
 - б) поиск запрещённых дипольных моментов;
 - в) исследован квантовый магнитометр с лазерной накачкой при спин-обменном взаимодействии.

Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018

Р. М. УМАРХОДЖАЕВ, Ю. В. ПАВЛОВ, А. Н. ВАСИЛЬЕВ

**ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ ГИРОСКОПА НА ОСНОВЕ
ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА
В РОССИИ В 1960–2000-е ГОДЫ**

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЯМГ



^{129}Xe , ^{131}Xe :

$$\omega_1 = \gamma_1 \cdot B + \Omega$$

$$\omega_2 = \gamma_2 \cdot B - \Omega$$

$$\Omega = (\gamma_2 \omega_1 - \gamma_1 \omega_2) / (\gamma_1 + \gamma_2)$$

$$B = (\omega_1 + \omega_2) / (\gamma_1 + \gamma_2)$$

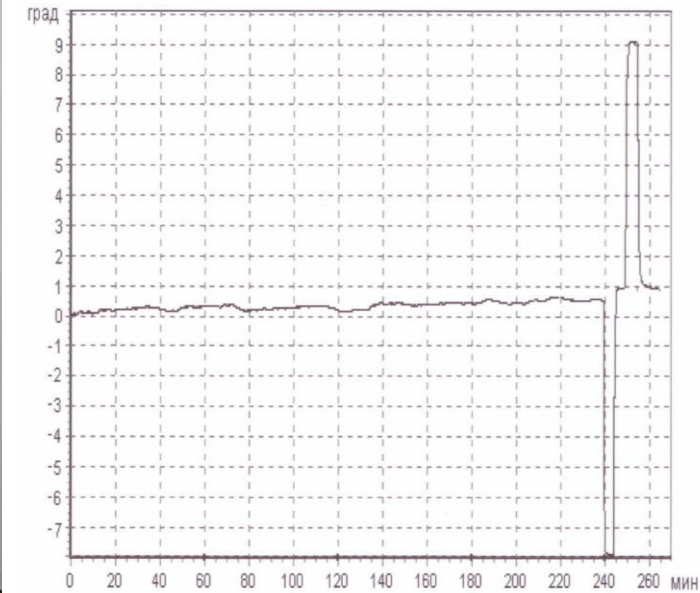
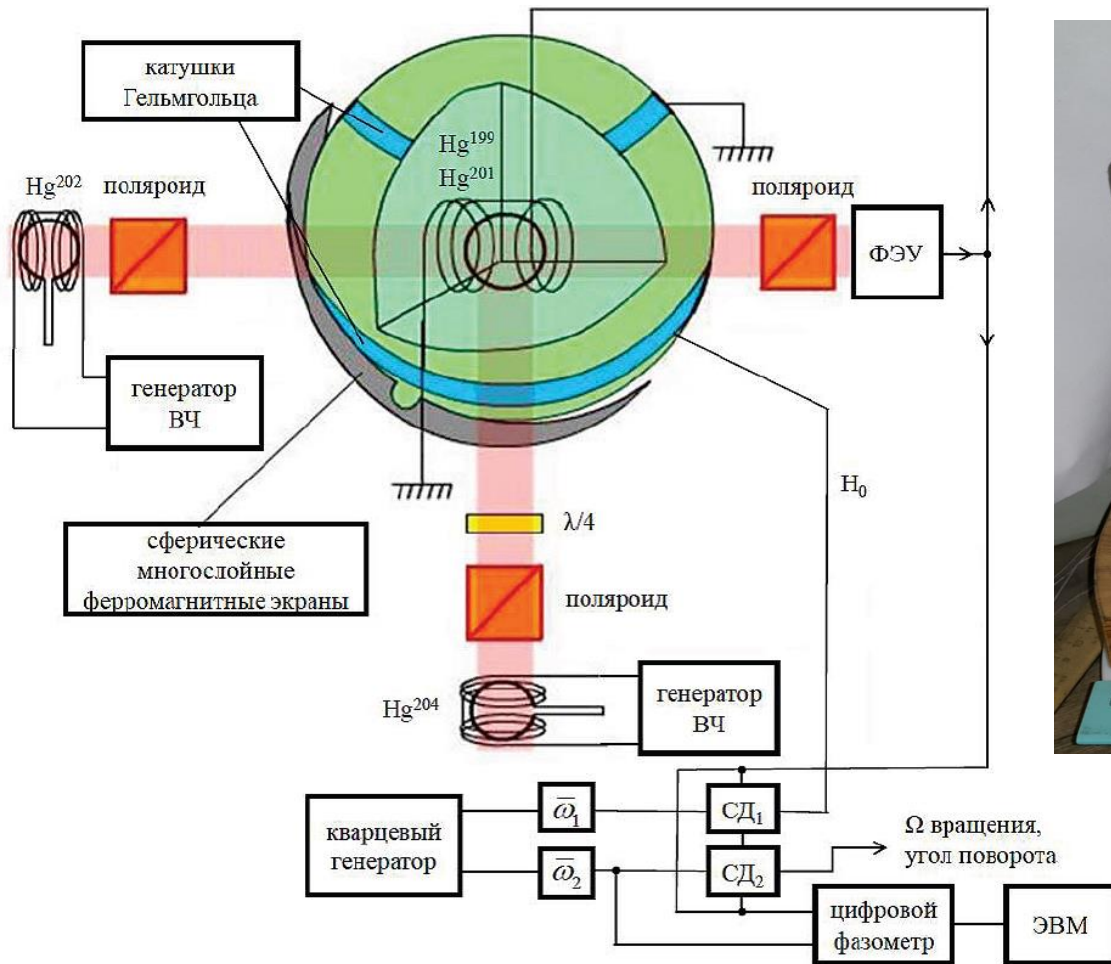
1. Оптическая накачка атомов щелочи (Cs или Rb) в магнитном поле B ;
2. Передача ориентации от атомов Cs к ядрам двух изотопов Xe (спин-обмен);
3. Фазирование прецессии Xe радиочастотным полем;
4. Регистрация сигнала поперечной намагниченности изотопов Xe магнитометром на атомах Cs;
5. Выделение из сигнала резонанса в Cs частот прецессии изотопов ^{129}Xe и ^{131}Xe , а из этих частот – информации о скорости вращения.



6. Стабилизация магнитного поля по суммарной частоте прецессии изотопов ^{129}Xe и ^{131}Xe .

Благодаря образованию комплексов Cs-Xe при соударениях созданное ядерными спинами Xe магнитное поле, которое «ощущает» Cs, усиливается почти в 1000 раз.

Схематическое устройство ЯМР датчика угловой скорости на изотопах Hg, разработанного в НИИЯФ МГУ



Общий вид макета ЯМР гироскопа на изотопах ртути, разработанного в НИИЯФ МГУ. 1 – чувствительный элемент, 2 – ФЭУ с поляризатором, 3 – спектральные лампы накачки и опроса с генератором возбуждения разряда. Вверху – запись дрейфа нулевого сигнала макета ЯМР гироскопа в течение четырех часов. Скачки соответствуют калибровочному повороту гироскопа на $\pm 8^\circ$.

Рис. 1. Двухлучевая схема ЯМГ на ртути

ЯМР датчик измерения угловой скорости со случайной составляющей нулевой линии $\sim 0,04$ град/час^{1/2} (2003 г.), рабочее вещество – изотопы ртути, объём рабочей ячейки 1,65см³

Макет ЯМР-гироскопа на обменном взаимодействии ядер двух изотопов ксенона с ядрами цезия (проект СПИН-НИИЯФ, заказчик – Фонд перспективных исследований, 2017)

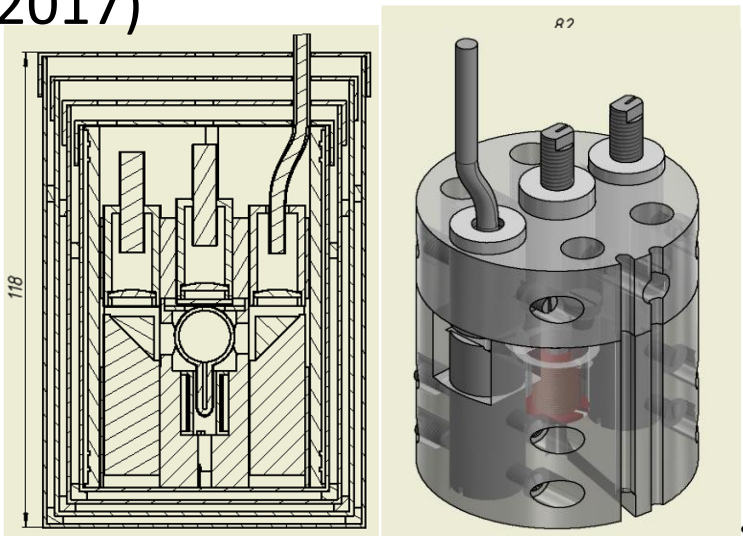


Рис. 62. Сборочный эскиз конструкции экранированного блока чувствительного элемента.

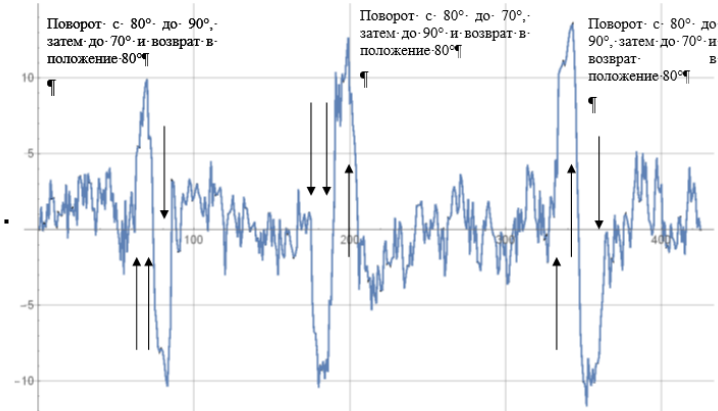
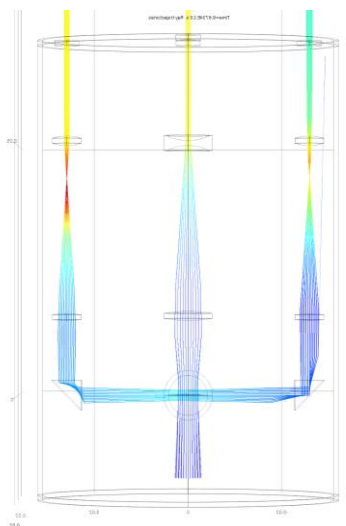
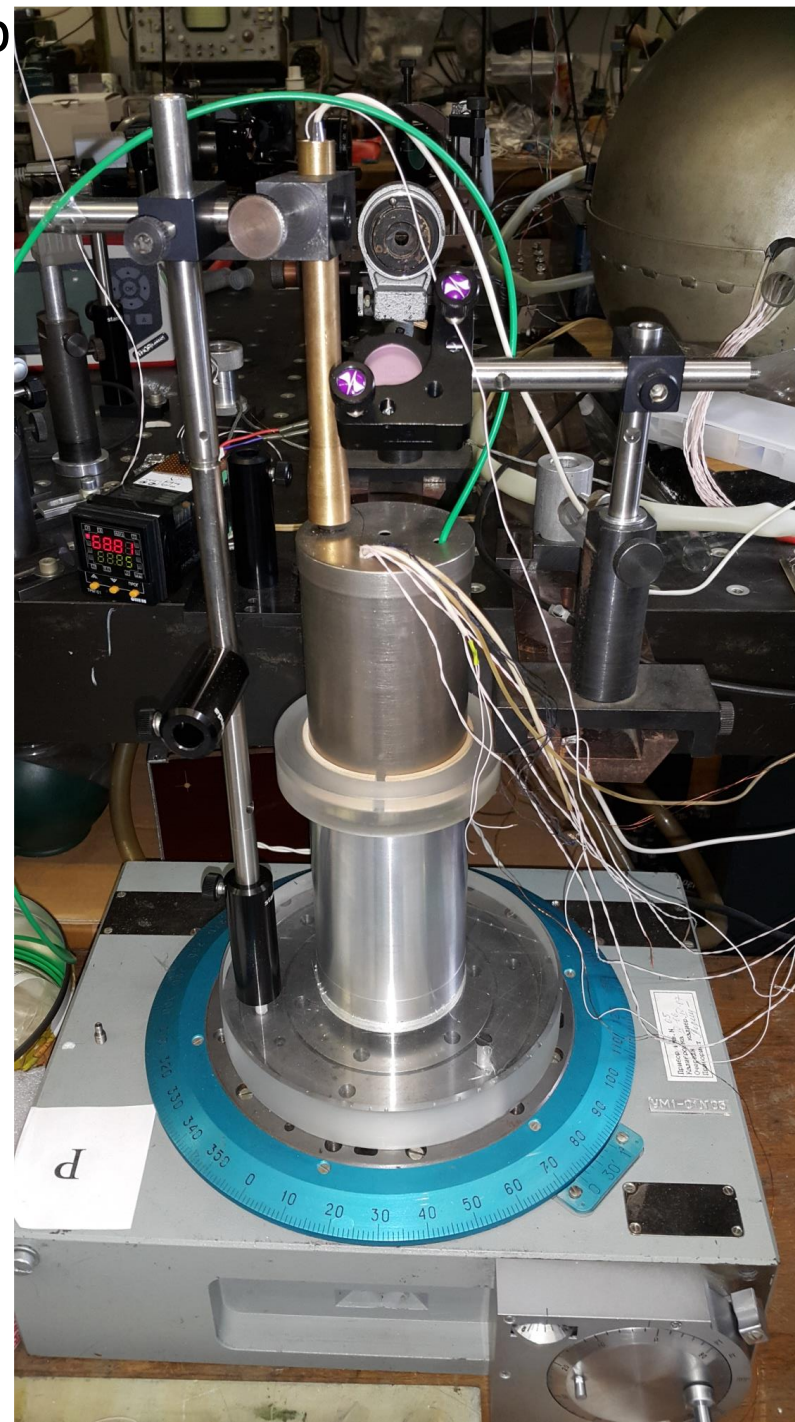


Рис. 42. Третья серия исследований, вторая запись. Фаза генерации на частоте прецессии изотопа ^{131}Xe относительно опорного сигнала прецессии изотопа ^{131}Xe (вверху) в градусах от времени в секундах, и фаза $\varphi_{\text{ан}131}$ после вычитания линейного ухода (внизу).

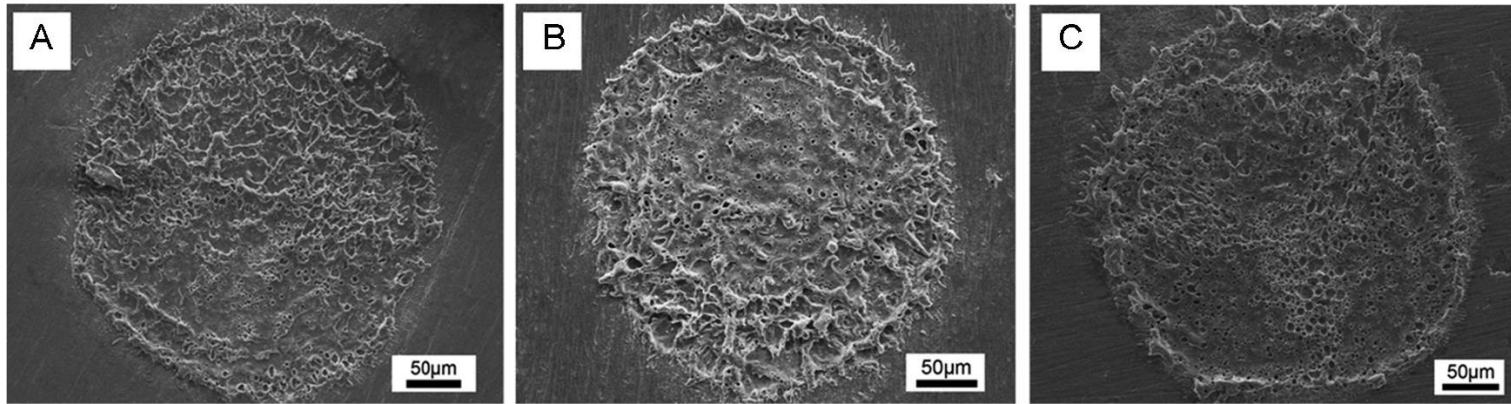


Демонстрация измерения угла поворота с использованием эффекта ядерного магнитного резонанса в изотопах ксенона была проведена на макете ЯМГ №1. Было зафиксировано измерение угла поворота на 5-20 градусов с точностью 2-3 градуса без дополнительной математической обработки, за исключением вычитания постоянного дрейфа.



Исследование морфологии разрушения поверхности мишени интенсивным лазерным импульсом

Алюминиевая мишень в
изопропанол, воде и глицерине



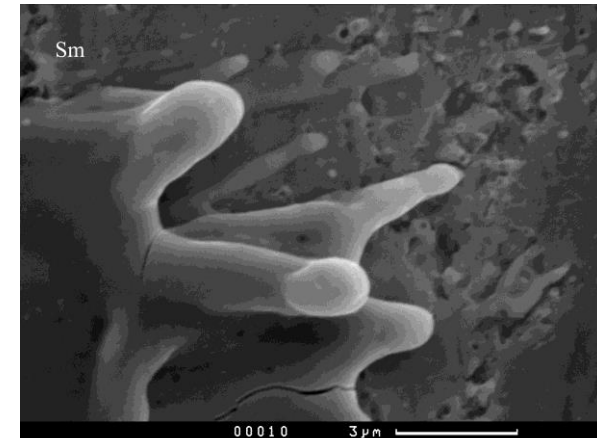
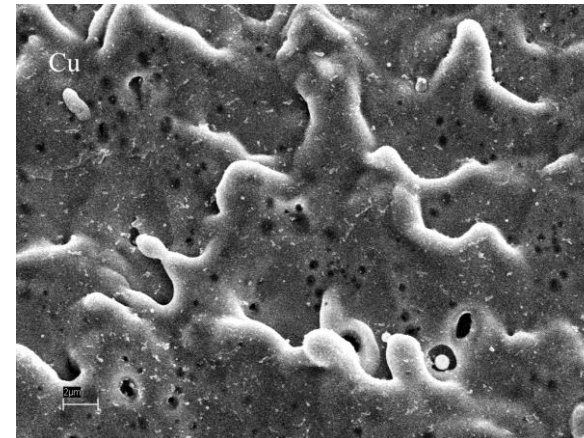
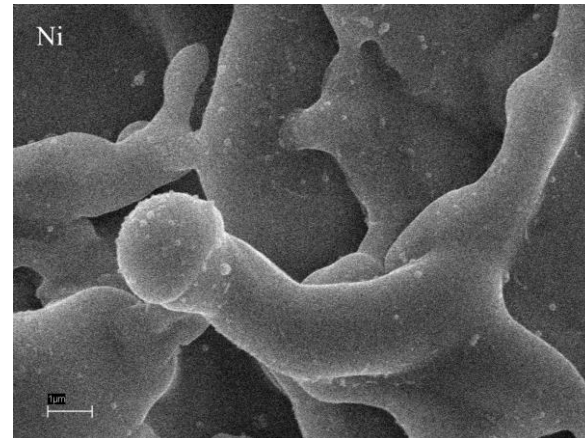
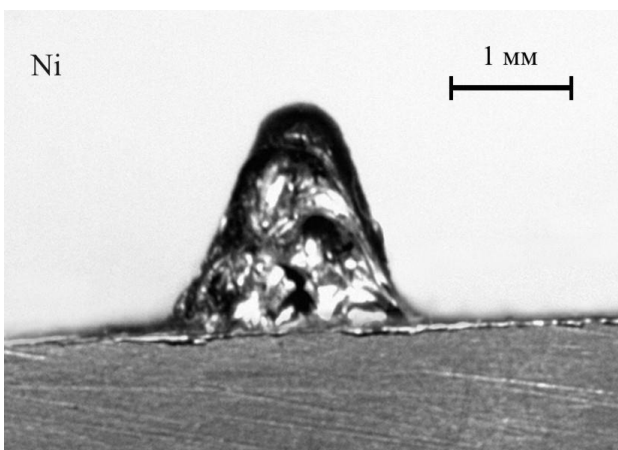
На поверхности мишени в случае малых давлений, наблюдается кратер, а при давлениях больше 10 атм – объемные структуры из пористого материала (Ni, Cu, Sm, соответственно для миллисекундного и наносекундного воздействия).

Результат воздействия лазерного излучения (10 нс) на поверхность алюминиевой мишени, помещенной в изопропанол, воду и глицерин.

Peixuan Ouyang, Peijie Li, **Leksina E.G.**, **Michurin S.V.**, Liangju He

Effect of liquid properties on laser ablation of aluminum and titanium Alloys

Applied Surface Science Volume 360, Part B, 1 (2016), 880–888



С увеличением давления в плотной плазме начинает проявляться перколяция-пороговый процесс, ведущий к формированию фрактальных наноструктур и увеличению связанности плазмы. В результате до некоторого порогового давления наблюдаются одиночные фрактальные кластеры (рис.1 (Si)), тогда как выше порога – фракталы объединяются в связные структуры (рис.2 (Si), 3 (C), 4 (C)).

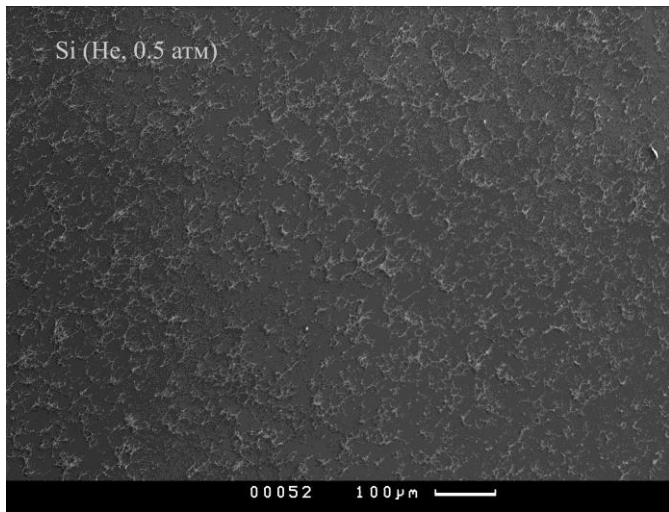


Рис.1

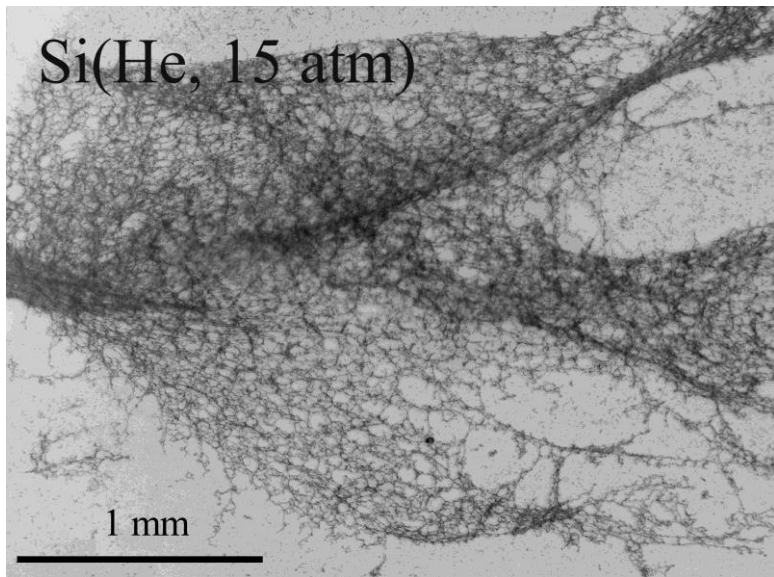
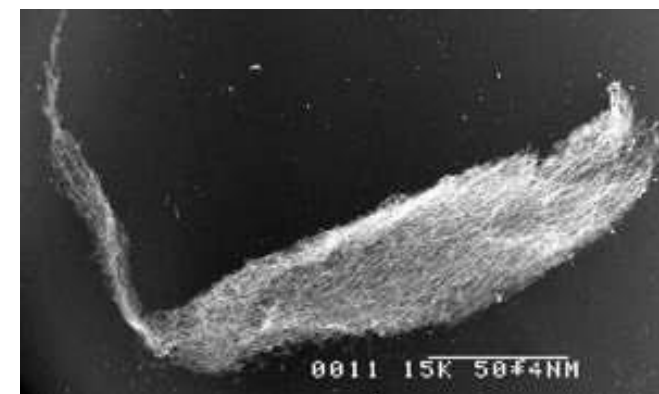
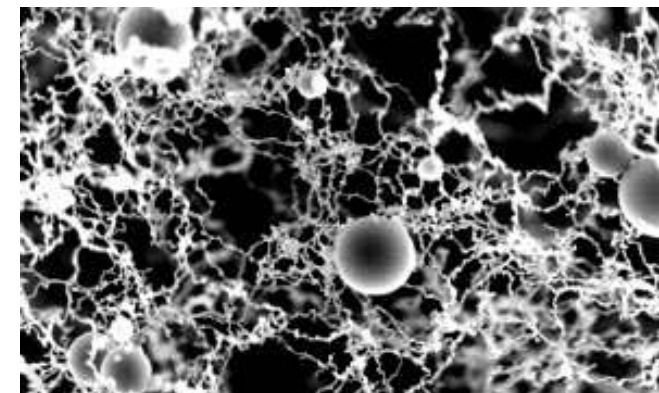
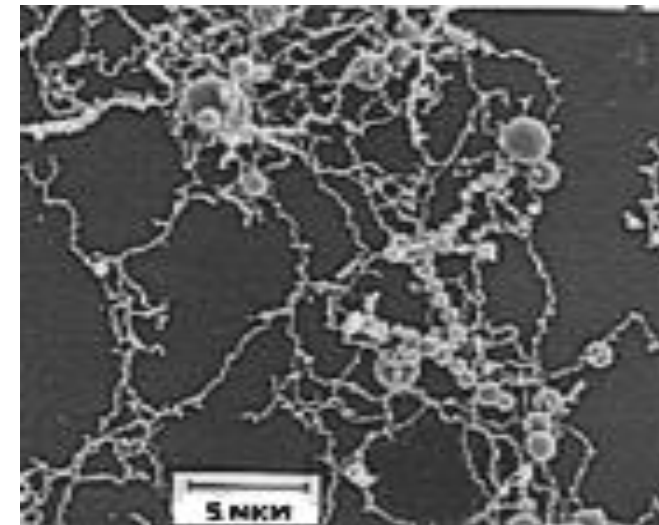


Рис.2

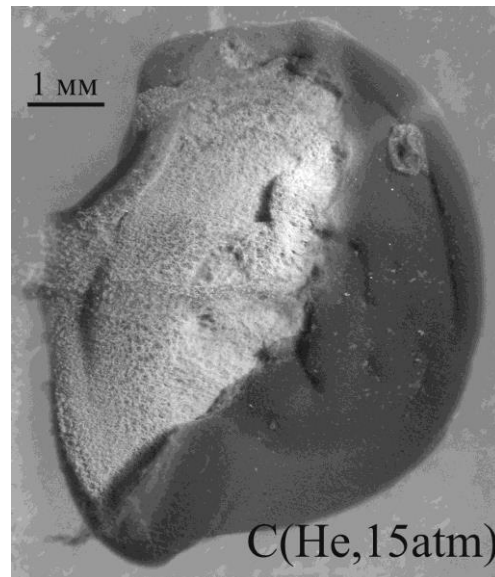


Рис.3

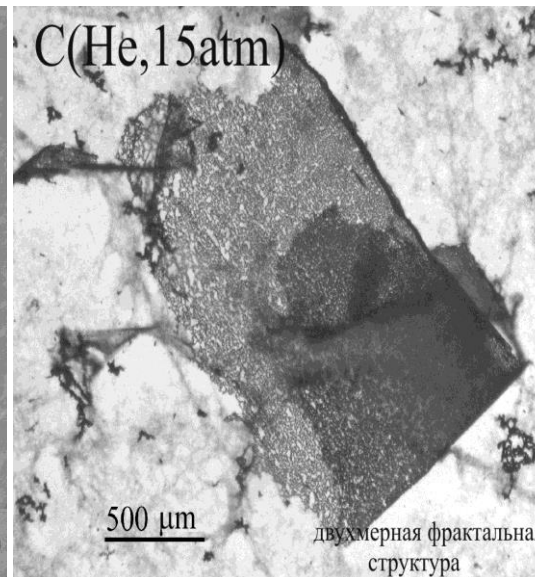
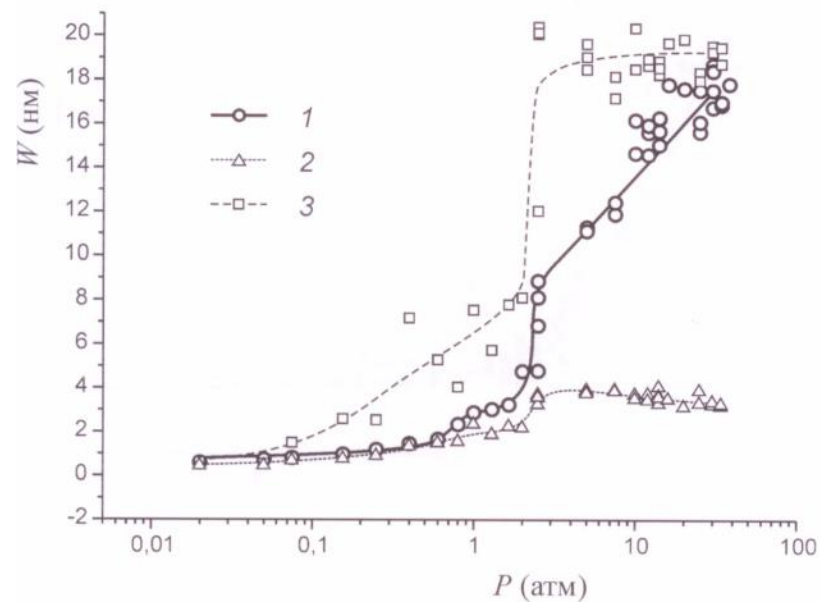
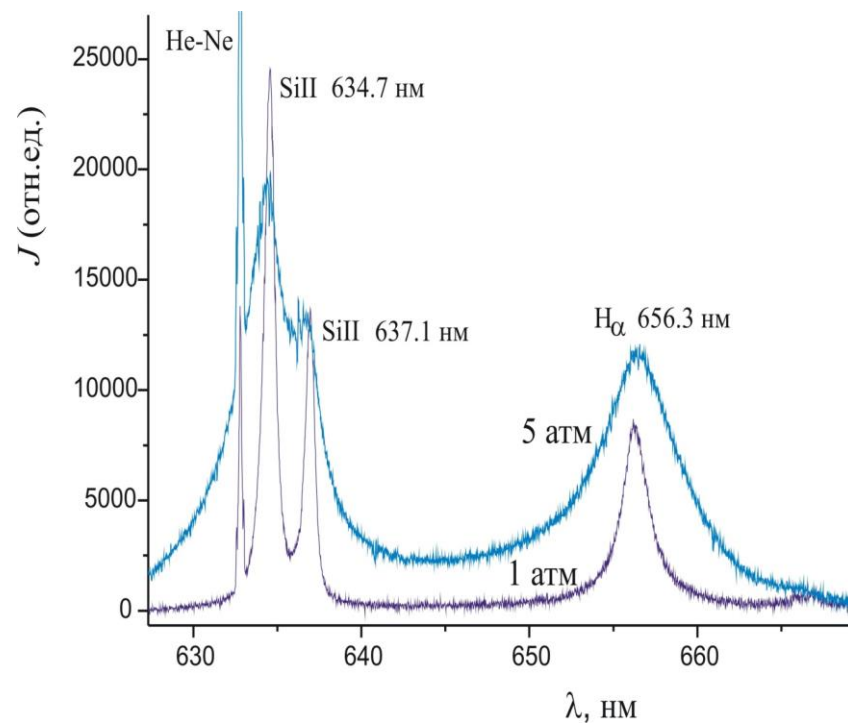


Рис.4

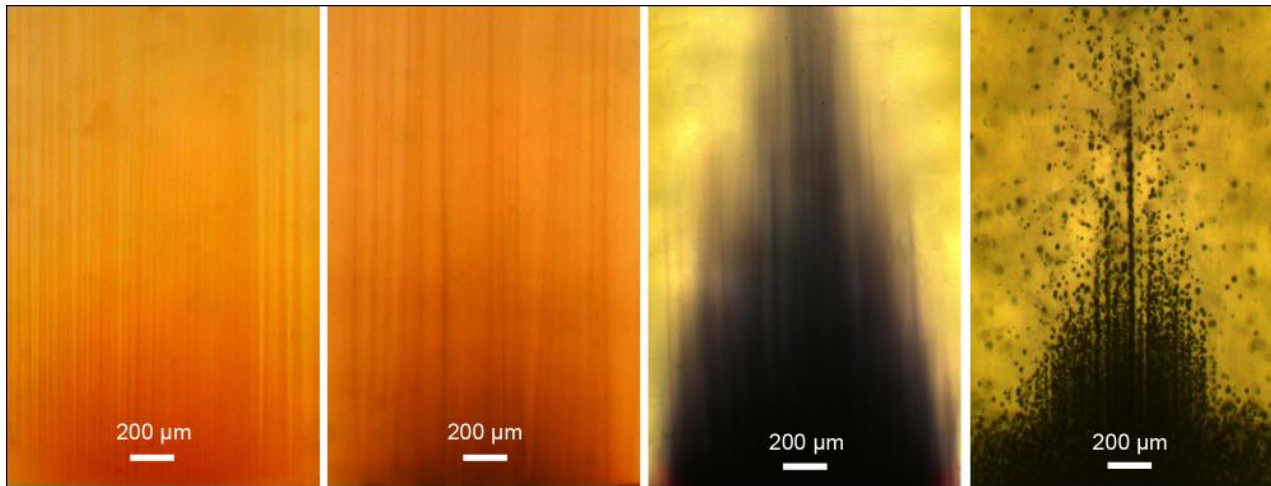
Уширение и смещение спектральных линий атома водорода и иона кремния в лазерной плазме в зависимости от расстояния до мишени и начального давления газа. Пороговый характер этих зависимостей связан с процессом формирования виртуальных перколяционных кластеров в плотной горячей плазме.

Контур с меньшей шириной соответствует атомам газа, не испытывающим влияния перколяционного кластера, широкий контур – атомам газа вблизи такого кластера



Образование наночастиц благородных металлов и кремния при лазерном и других видах воздействия и их свойства (А.О.Рыбалтовский, Ю.С.Заворотный)

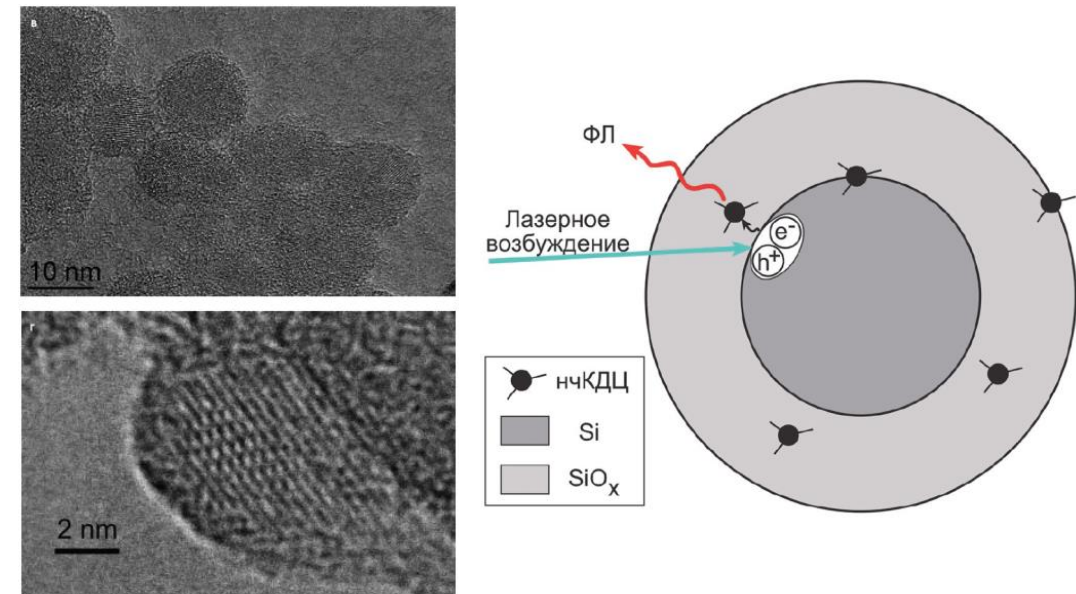
- Образование нитевидных структур из НЧ благородных металлов при лазерном воздействии



OUM + Ag(hfac)COD OUM + AgNO₃ OUM + H[AuCl₄] Vycor + H[AuCl₄]
Фотографии с оптического микроскопа для импрегнированных образцов полимера OUM и пористого стекла Vycor, полученные при воздействии лазерного излучения

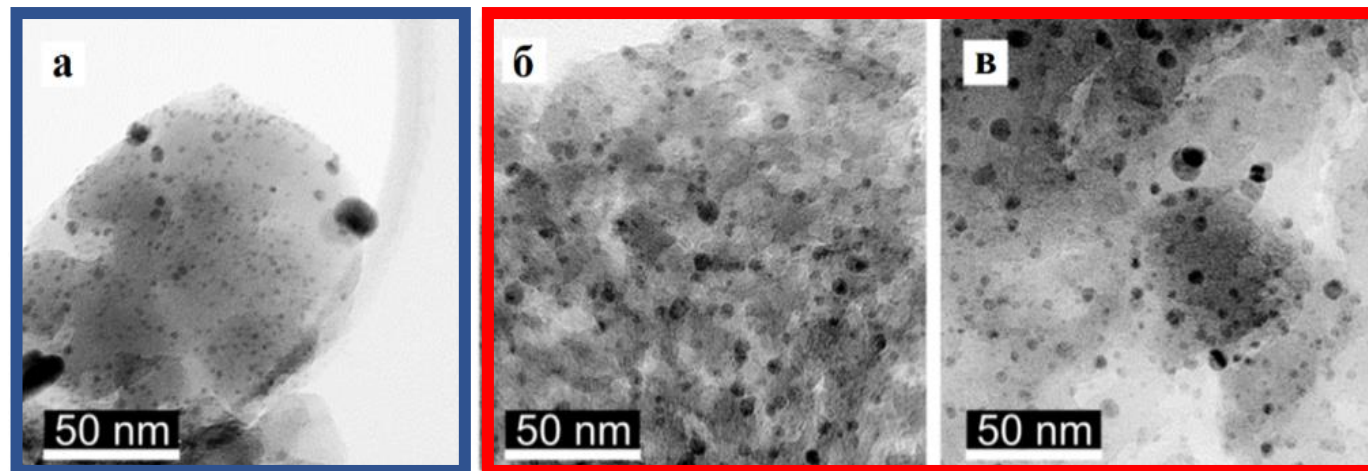
- Кислород-дефицитные центры люминесценции в наночастицах Si-SiO_x

Структура наночастиц кремния (электронная микроскопия) и образование кислород-дефицитных центров в оболочечных НЧ кремния



Лазерно-индуцированный управляемый синтез металлических наночастиц в пористых стеклах в сверхкритической двуокиси углерода (А.Рыбалтовский, Ю.Заворотный)

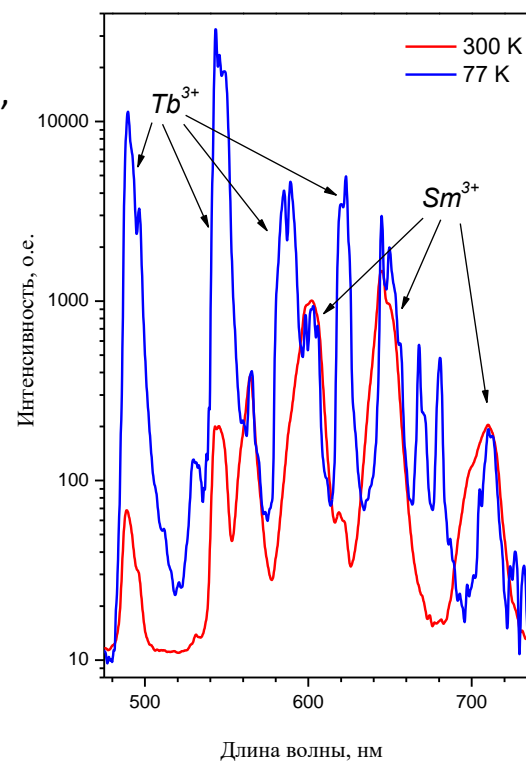
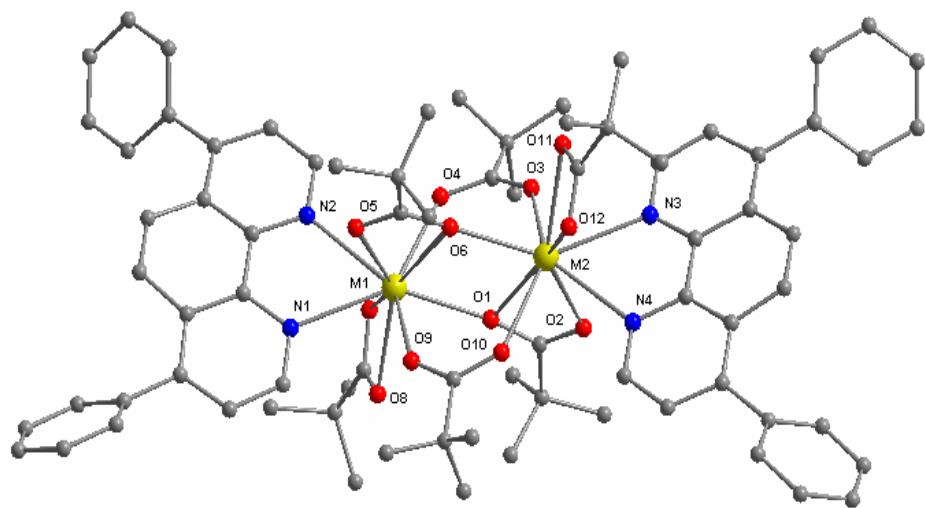
Синтез наночастиц серебра в стекле наблюдался под действием лазерного излучения с различной длиной волны. Пористые кварцевые стекла пропитывались в сверхкритическом диоксиде углерода растворенными молекулами металлоорганических соединений серебра. При **резонансном облучении (относительно плазмонного поглощения)** происходит преимущественно увеличение размеров сферических наночастиц и появление несферических, а **нерезонансное облучение** стимулирует появление большого количества мелких частиц размером 2-4 нм. Rybaltovsky A. et al, *Supercritical Fluids*. 2018. Vol.140. P. 159



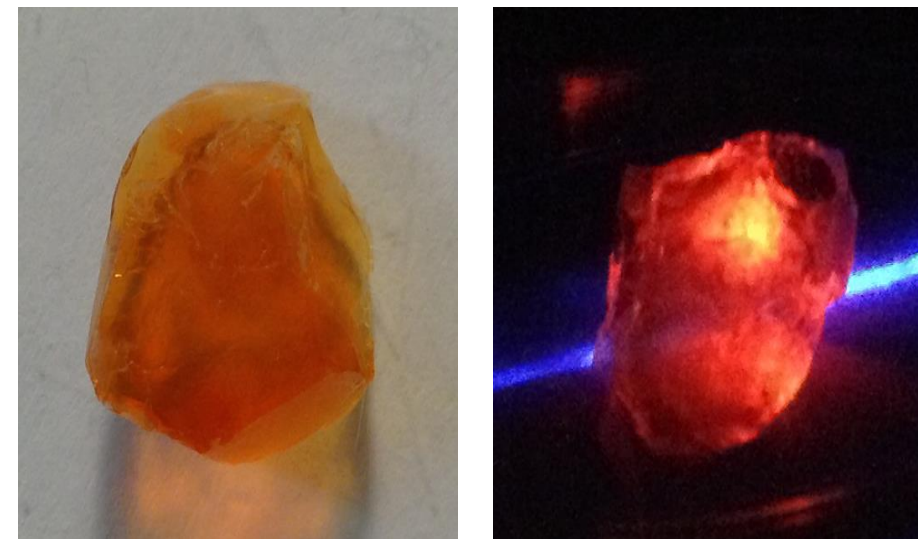
Обнаружен «антенный эффект» (перенос энергии возбуждения с лиганда на металл) в новых синтезированных гетеробиметаллических карбоксилатных комплексах $(bath)_2SmTb(piv)_6$ и $(phen)_2SmTb(piv)_6$

Проведены исследования фотолюминесцентных (ФЛ) свойств новых синтезированных гетеробиметаллических карбоксилатных комплексов $(bath)_2SmTb(piv)_6$ и $(phen)_2SmTb(piv)_6$ с целью получения на их основе гибридных функциональных материалов с управляемыми физико-химическими свойствами.

В представленной молекулярной системе создаются конкурирующие каналы релаксации возбужденных состояний, что открывает перспективы для инженерии люминесцентных датчиков температуры.



Фотография образца аэрогеля (плотность 0.16 г/см^3) из диоксида кремния после его пропитки молекулами $Eu(tta)_3 \cdot 2H_2O$ (вверху) в среде сверхкритического диоксида (слева), и того же образца под воздействием импульсного лазерного излучения с $\lambda=337\text{нм}$ (справа)

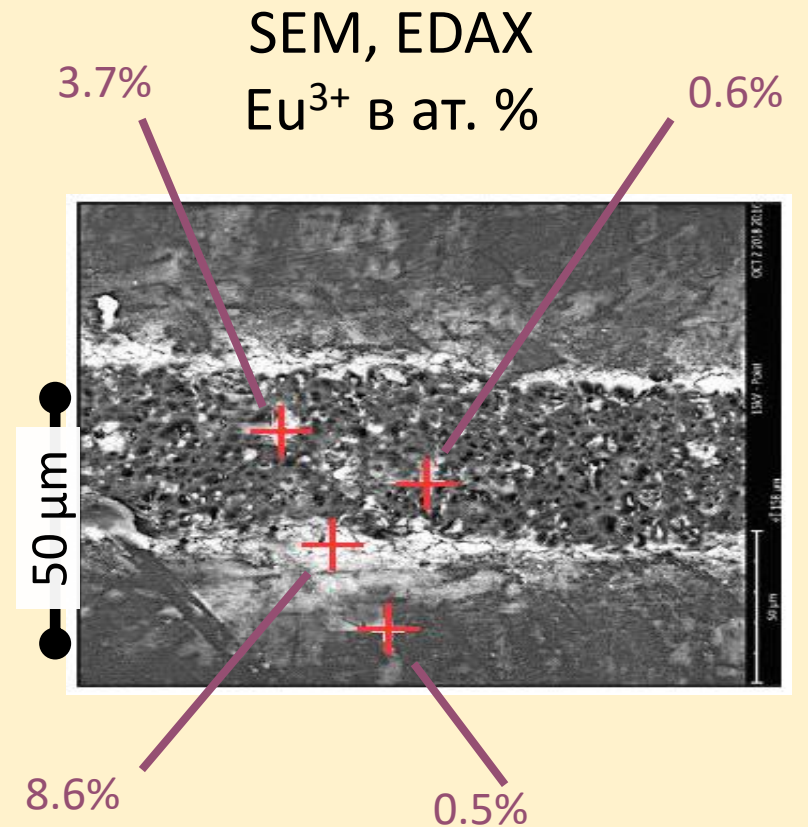
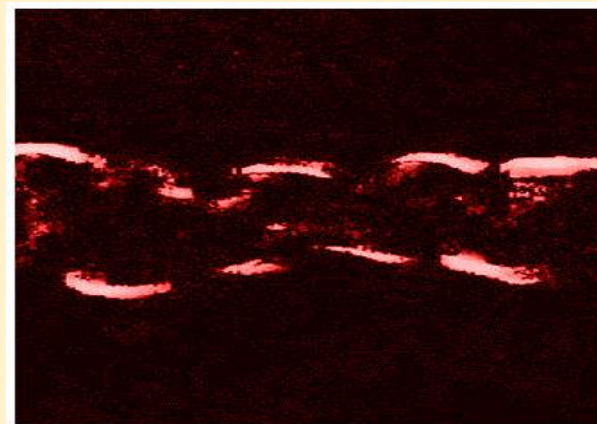
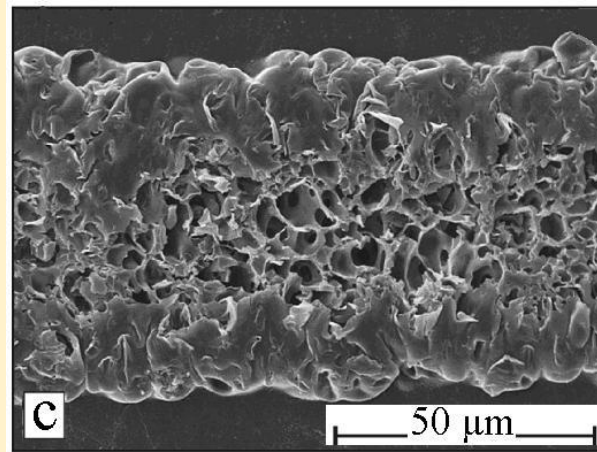


Получены и исследованы новые функциональные нанокompозитные материалы на основе оксидных, полупроводниковых и металлических наночастиц. В качестве основы при этом используются пористые матрицы на основе диоксида кремния (нанопористое стекло, кварцевые аэрогели) и ряд полимерных матриц (волокнистые, мембранные и вспененные структуры). С помощью лазерного воздействия на поверхности полимера создаются пеноподобные структуры, после чего проводится их пропитка в среде сверхкритического CO_2 с растворенными люминесцирующими органическими молекулами с европием.

Фото со сканирующего электронного микроскопа (СЭМ: фрагмент пеноподобной структуры обработанной лазерным воздействием исходной пленки из полибензимидазола

и пленки после импрегнации в СК CO_2 молекулами, содержащими Eu^{3+} , при возбуждении

(A.O.Rybalтовskii et al, *Russ. J. Phys. Chem. B* 14 (2020) 1-9).



Электронно-микроскопический анализ структуры на содержание европия

Спектроскопия твердого тела с синхротронным излучением и исследование физических процессов в сцинтилляторах



С 1998 года по 2013 год отдел ФПКЭ и кафедру оптики и спектроскопии возглавлял Виталий Васильевич Михайлин, которые принес в тематику отдела новое направление, связанное с спектроскопическими исследованиями диэлектрических кристаллов с использованием синхротронного излучения вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов

Ломоносовская премия МГУ 2000 года А.Н. Васильев, В.В. Михайлин и И.А. Каменских «Исследование механизмов релаксации энергии в диэлектриках с применением синхротронного излучения»

Some crystals studied
by Crystal Clear Collaboration



BGO
 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

PWO
 PbWO_4

CeF₃

LuAP
 $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$

LSO
 $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$

YAP
 $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$

BaF₂

LiGdF₄

LiYbF₄

LiErF₄

ErF₃

GGG
 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$

BaLiF₃

GSO
 $\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$

PbF₂

AFG (AFG450)

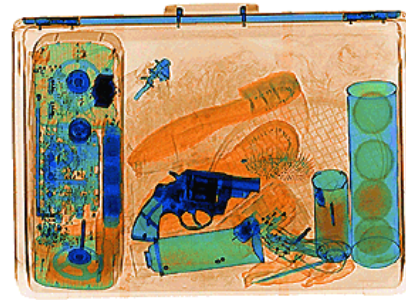
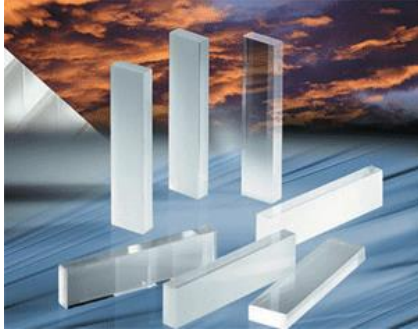
HFG (HFG320)

ZFG (ZFG320)



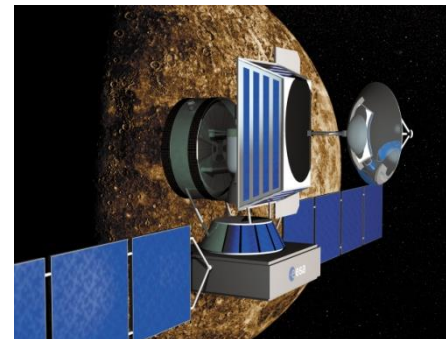
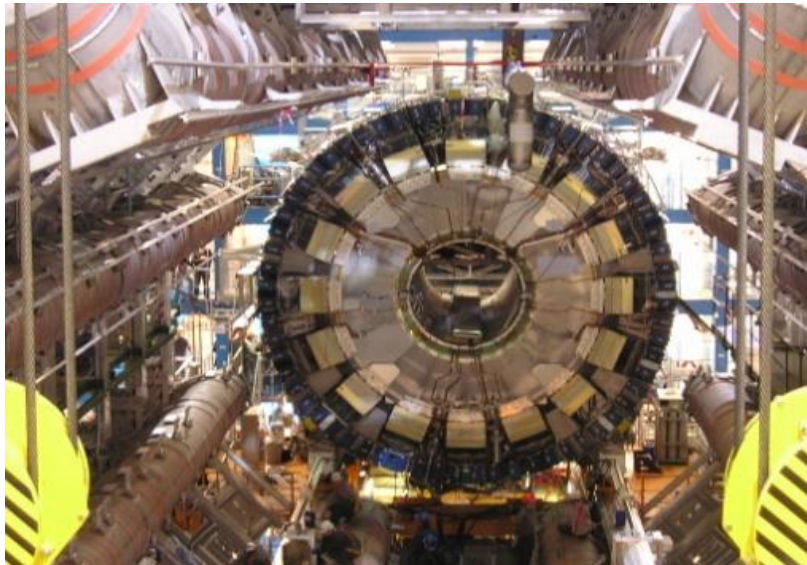
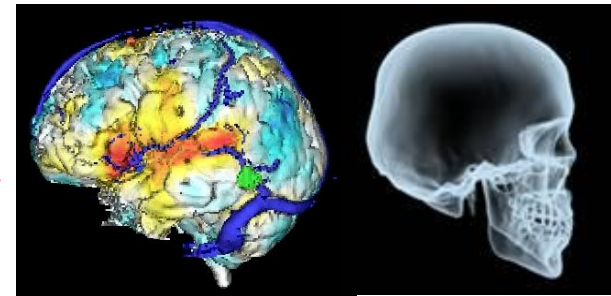
CRYSTAL CLEAR COLLABORATION



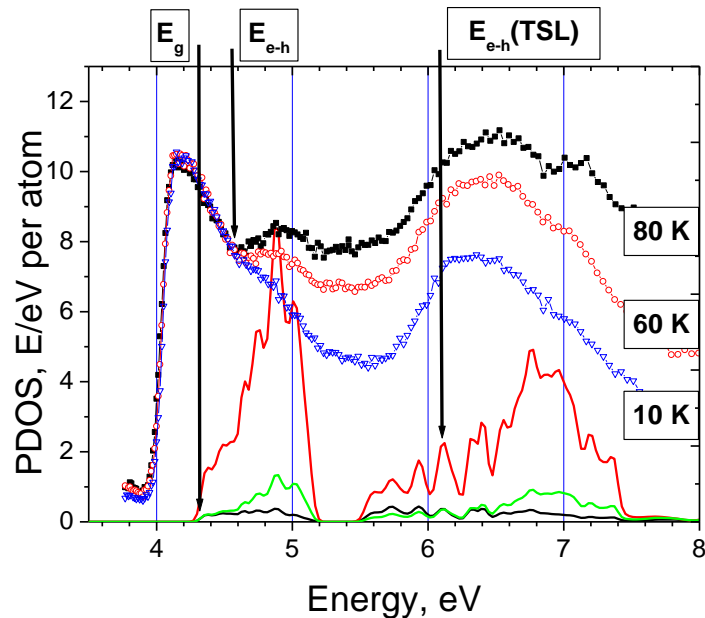


Применения сцинтилляторов

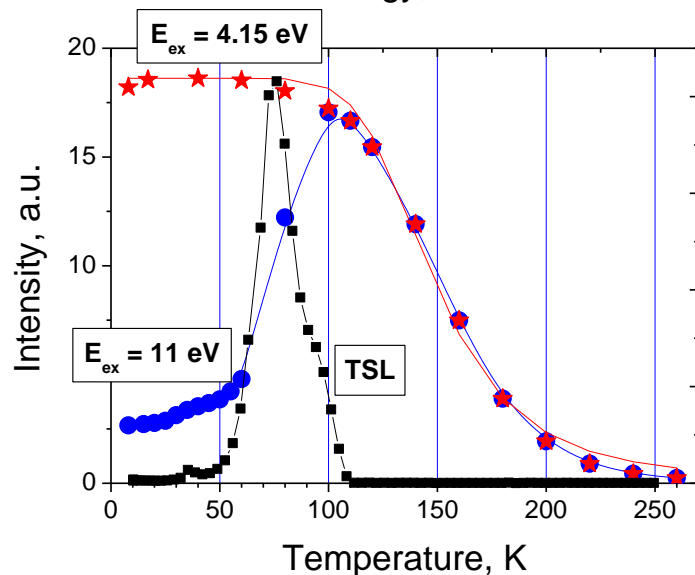
- безопасность
- медицинская диагностика
- промышленность и наука
- космические исследования
- физика высоких энергий



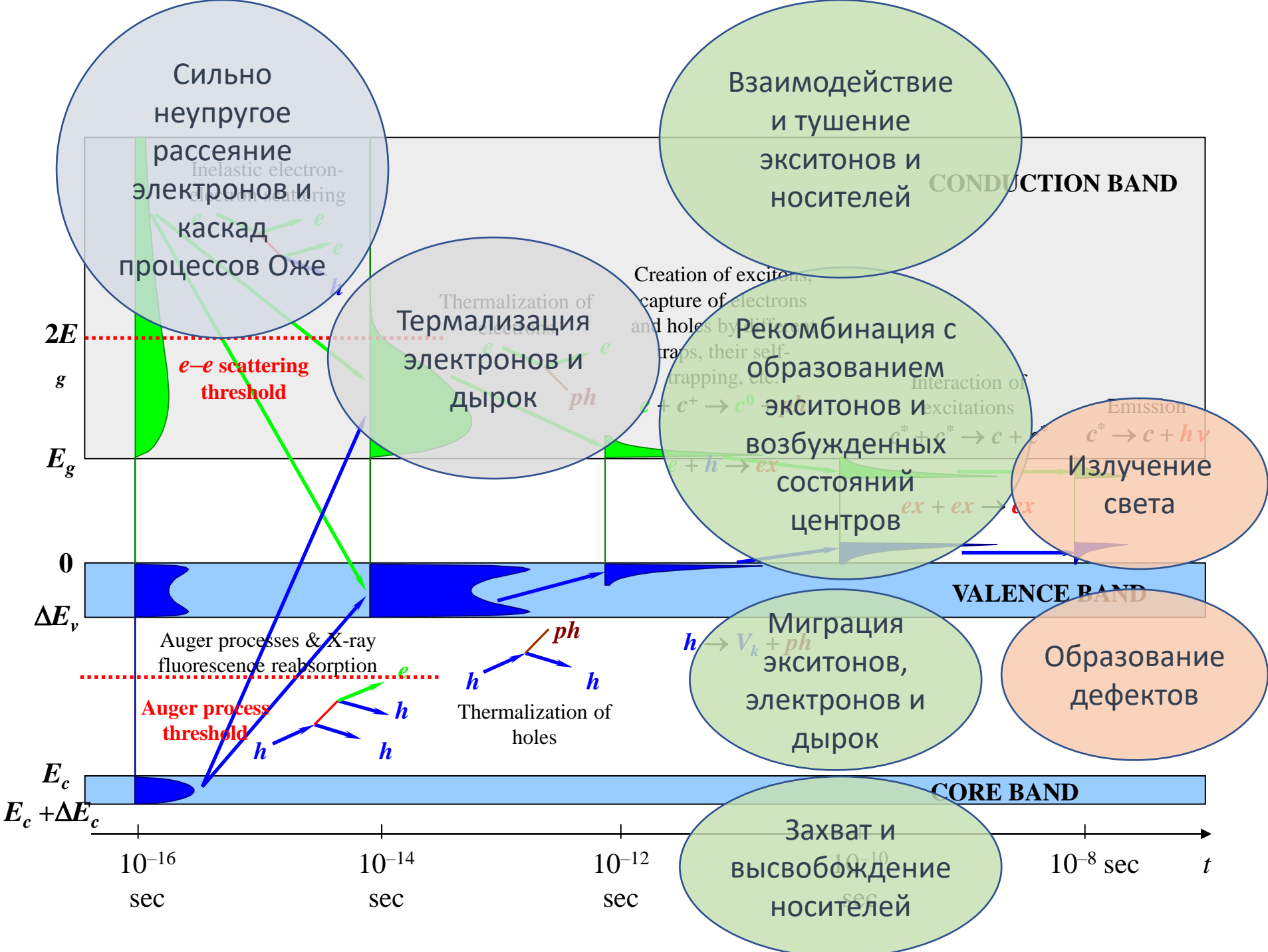
Сцинтилляторы ZnMoO_4 обогащенные ^{100}Mo для поиска двойного безнейтринного β -распада



Проведена оценка светового выхода сцинтилляций молибдатов при низких температурах при возбуждении синхротронным излучением в экситонном пике и в области создания разделенных электронно-дырочных пар



D. Spassky, V. Mikhailin, A. Savon, et al, *Optical Materials*, vol. 34, pp. 1804–1810, 2012
D. Spassky, V. Nagirnyi, V. Mikhailin, et al, *Optical Materials*, vol. 35, pp. 2465–2472, 2013
Spassky D.A., Vasil'ev A.N., Kamenskikh I.A., Mikhailin V.V., Savon A.E., Hizhnyi Yu A., Nedilko S.G., Lykov P.A. *Journal of Physics Condensed Matter* (23), 365501, 2011 (52 cit.)



Particle Acceleration and Detection

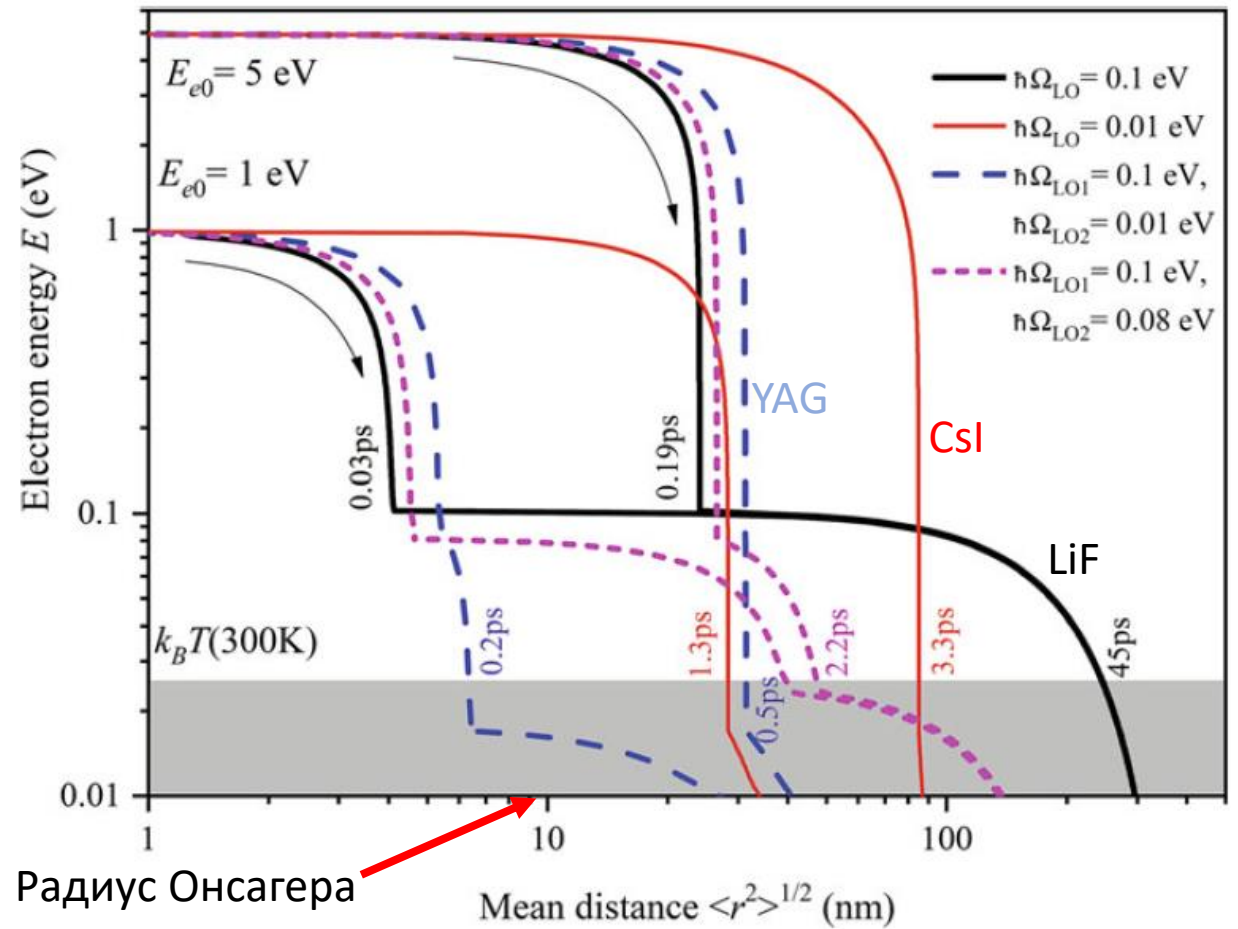
Mikhail Korzhik
Gintautas Tamulaitis
Andrey N. Vasil'ev

Physics of Fast Processes in Scintillators

Springer

Выход сцинтилляторов и их пропорциональность (и связанное с ней энергетическое разрешение) во многом определяется длиной разлета в электронно-дырочных парах, резко сокращающейся в кристаллах со сложным фононным спектром.

1. Получены оценки длины термализации в зависимости от числа фононных ветвей и их энергии (отношение длины термализации к радиусу Онсагера определяет эффективность рекомбинации генетических пар).
2. Показано, что наибольшую эффективность можно ожидать от сцинтилляторов со сложным фононным спектром (кристаллы сложной структуры и твердые растворы).

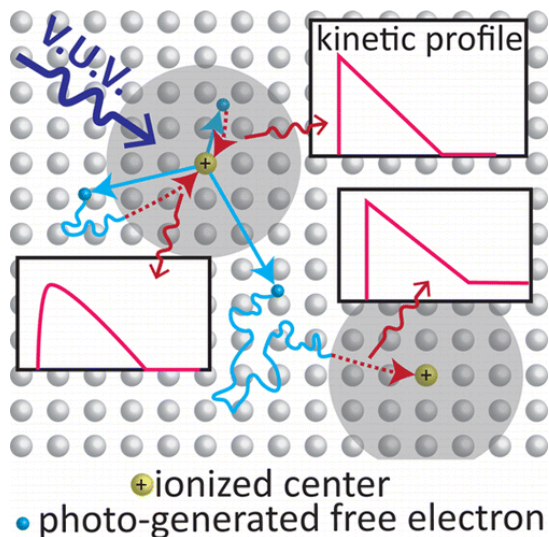


R. Kirkin, V. Mikhailin, A. Vasil'ev, **Recombination of correlated electron-hole pairs with account of hot capture with emission of optical phonons**, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 59, pp. 2057-2064 (2012) (56 cit.)

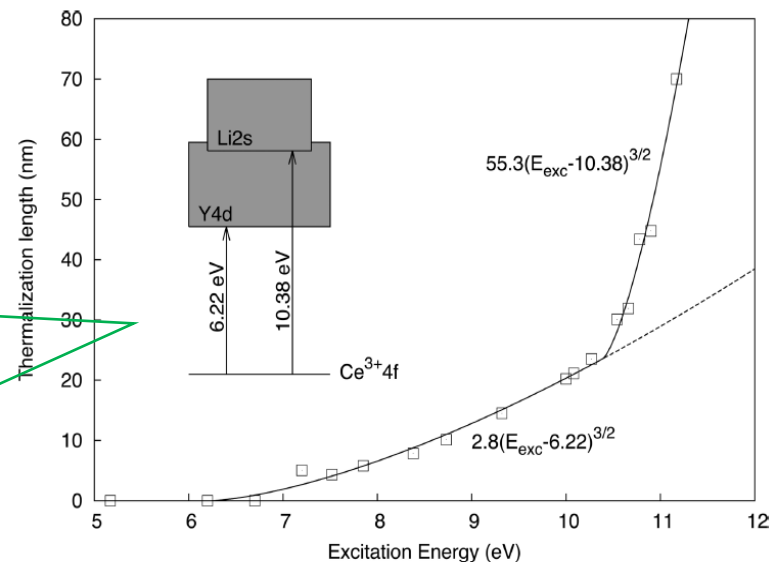
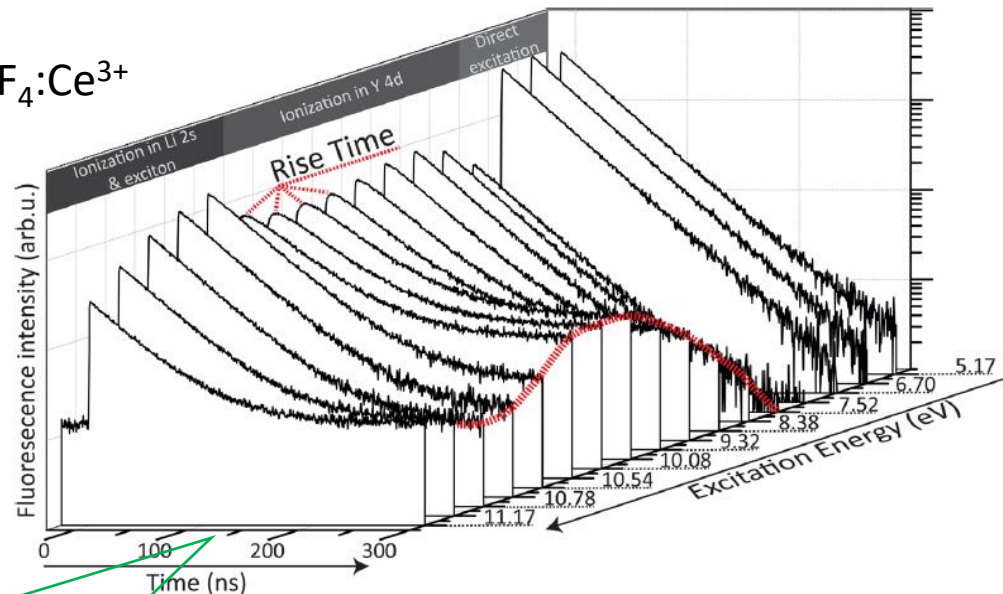
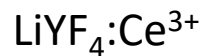
Fig. 3.15 Relationship between the mean distance from the birthplace (horizontal axis) with the electron energy (vertical axis) during thermalization for the cases of single and double LO phonon branches. Arrows show the direction of time. The simulation parameters (effective masses, electron phonon strengths, etc.) are described in [13]. The thermalization times are indicated by the corresponding curves. Gray region corresponds to thermalized carriers at 300 K. (After Ref. [13])

Предложен новый метод определения длины термализации создаваемых светом носителей заряда в зависимости от их начальной кинетической энергии

Метод основан на различии типов кинетик (с разгоранием и появлением длительных компонент) в зависимости от отношения длины термализации электронов к радиусу сферы захвата (радиусу Онсагера).



Экспериментальные кинетики люминесценции при ионизации ионов фотонами синхротронного излучения с различными энергиями позволяют определить длину термализации – расстояния, которое проходит горячий электрон до достижения тепловой энергии, и которое зависит от особенностей зонной структуры диэлектрика.



Эффективность люминесценции НЧ CaF_2 при ВУФ и рентгеновском возбуждении и роль соотношения длины разлета компонент пар и размеров наночастиц (классический размерный эффект)

J. Appl. Phys. **112**, 024325 (2012)

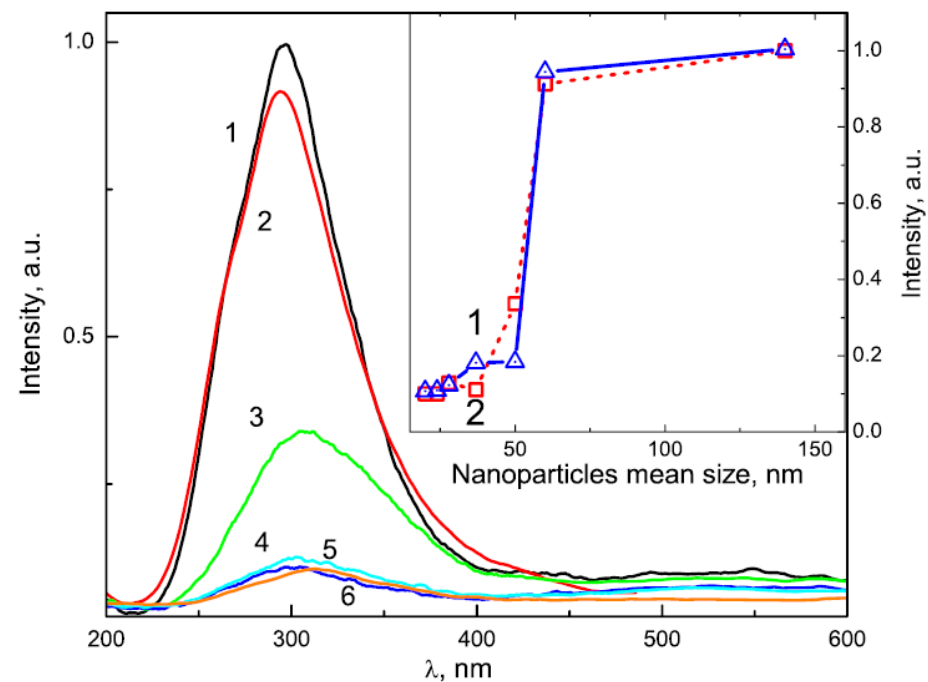
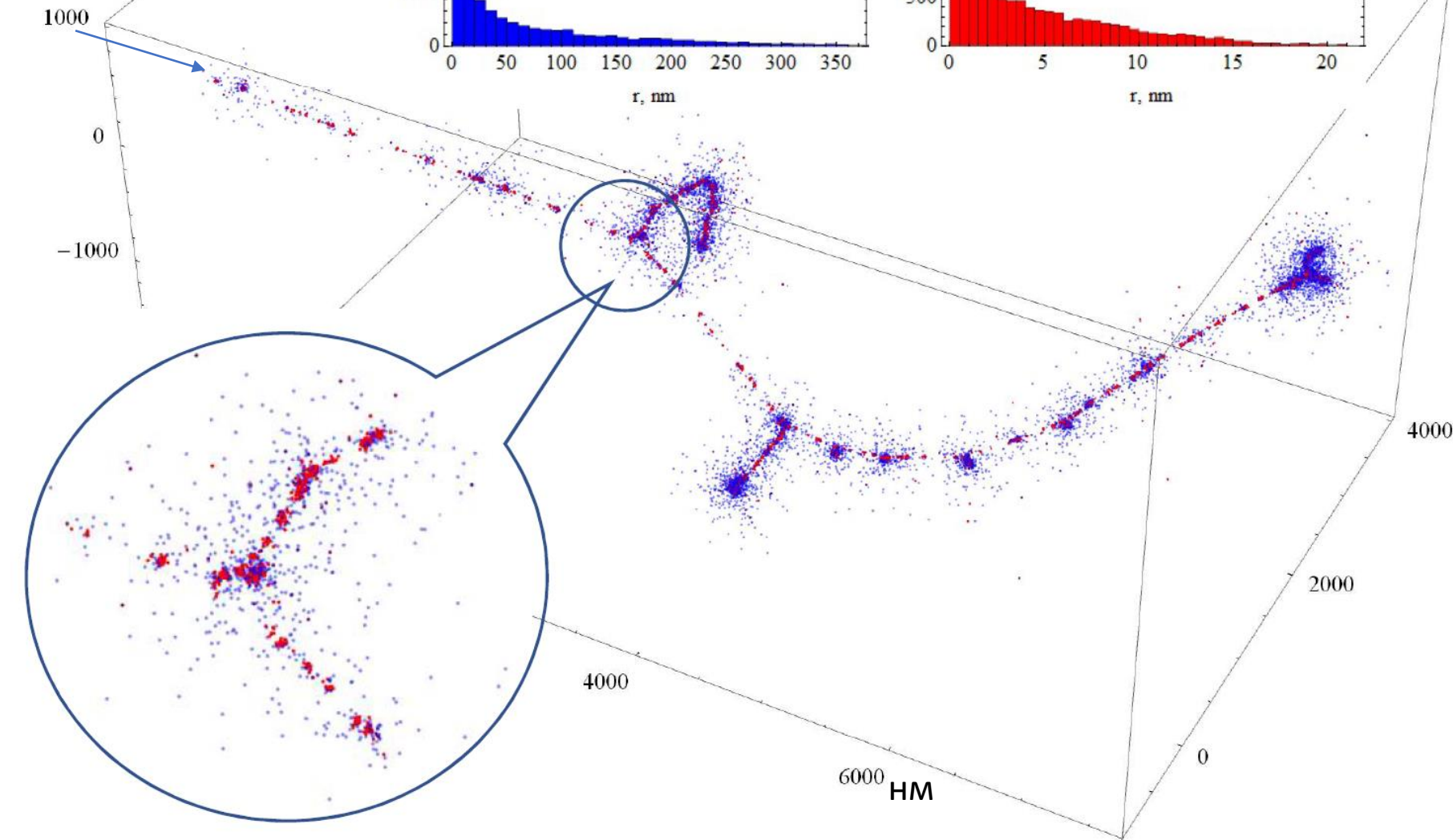
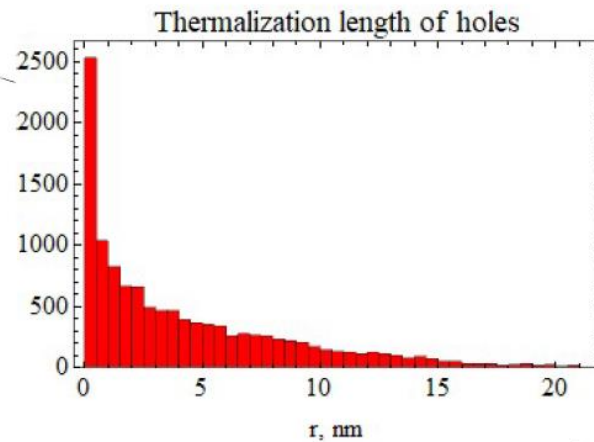
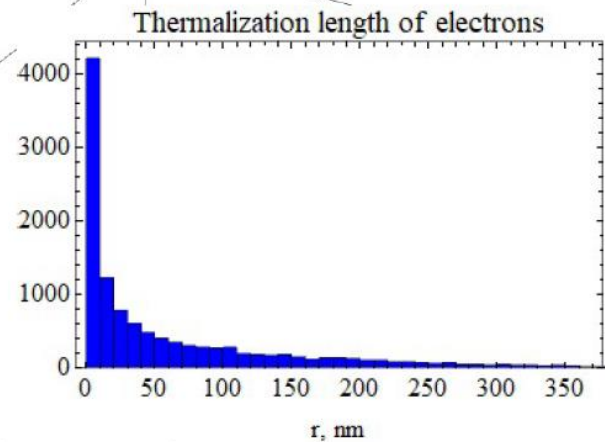


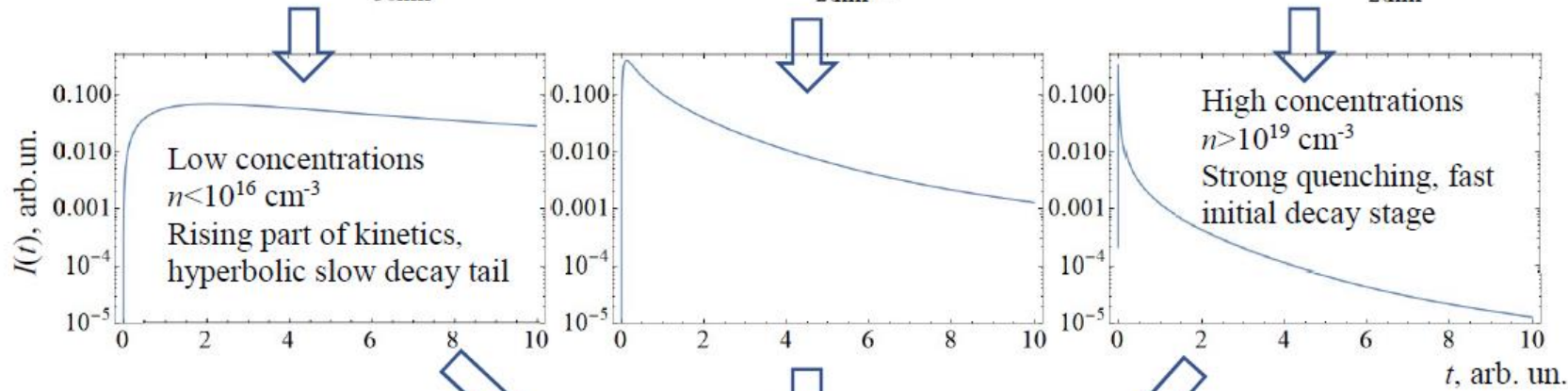
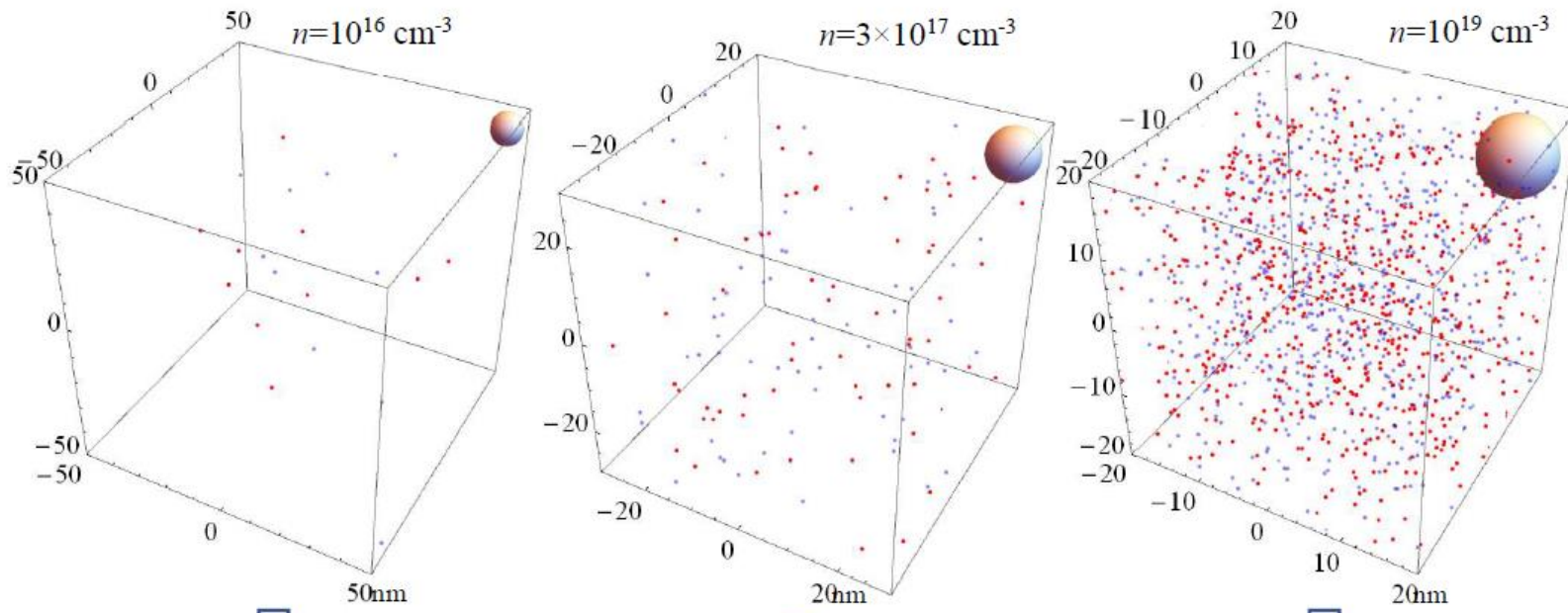
FIG. 6. X-ray excited luminescence spectra of CaF_2 nanoparticles of various size at 300 K. Curves: 1–140; 2–60; 3–50; 4–37; 5–28; 6–20 nm. The dependence of normalized luminescence intensity on the nanoparticle size is shown on inset: curve 1—luminescence intensity upon the excitation by quanta with energy $h\nu_{\text{exc}} = 16 \text{ eV}$, curve 2—X-ray excited luminescence intensity.

Рождение
фотоэлектрона в NaI
 γ -квантом 200 кэВ

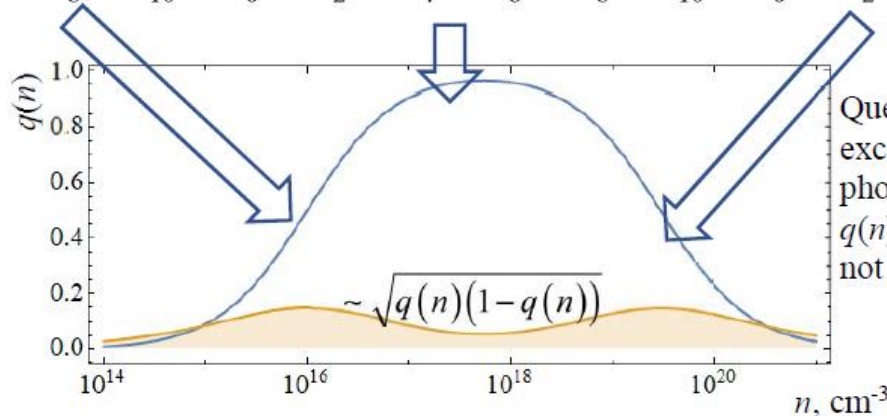


Выход, кинетика затухания и энергетическое разрешение сцинтилляторов определяются флуктуациями структуры трека ионизирующей частицы (флуктуациями Ландау) и потерями в областях высоких и низких плотностей электронного возбуждения.

A.Gektin, A.Vasil'ev, *Radiation Measurements*, 122:108–104, 2019



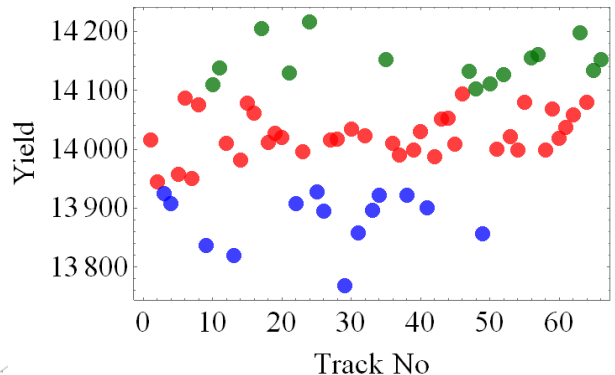
Emission of delayed photons after shaping time interval, part $q(n)$ of photons are not detected



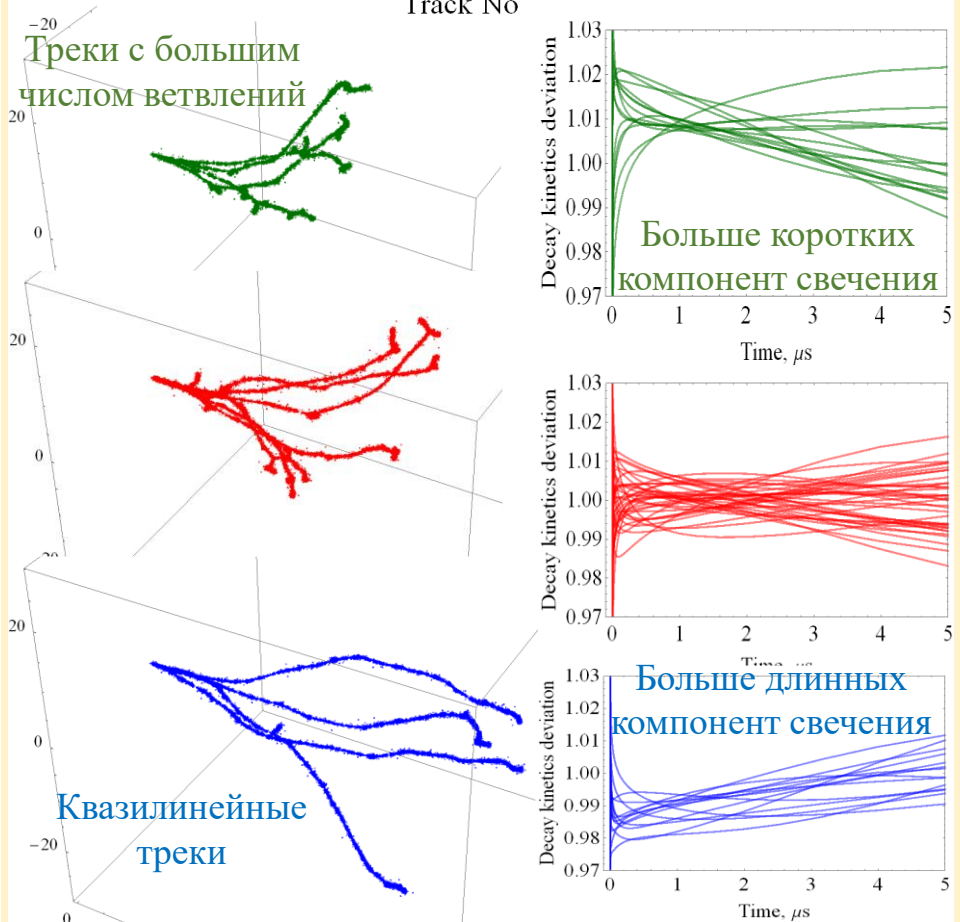
Quenching of excitations prior to photon emission, part $q(n)$ of excitations do not produce photons

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.

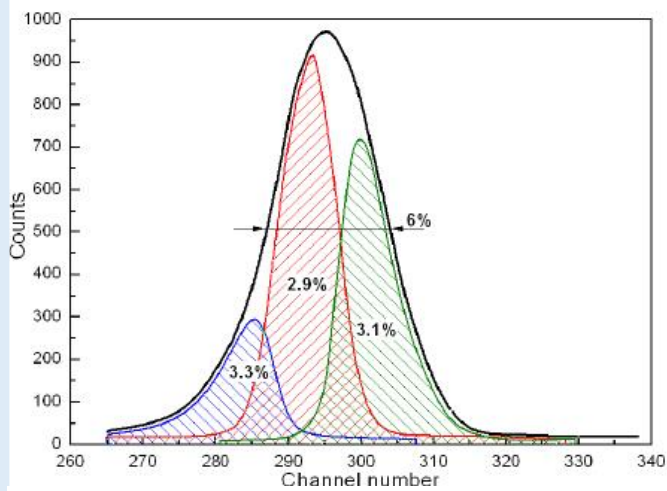
A.Gektin, A.Vasil'ev, Radiation Measurements, 122:108–104, 2019



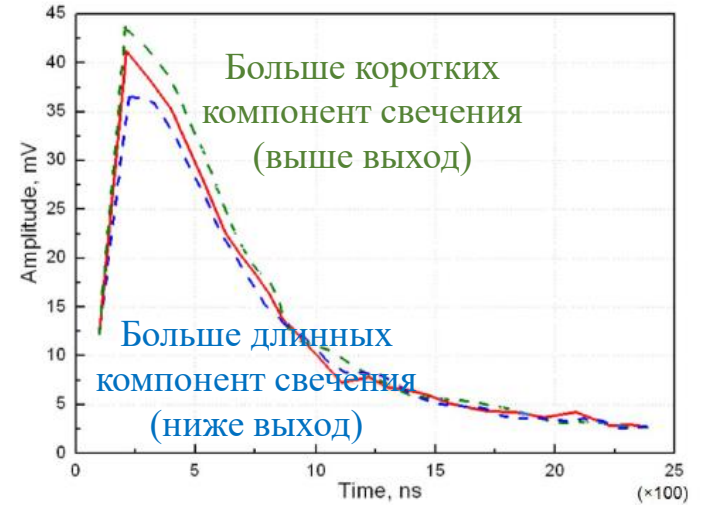
Предложен подход к повышению энергетического разрешения сцинтилляторов за счет цифровой обработки кинетики отдельных импульсов и их группировки в соответствии с формой кинетики затухания одиночных импульсов (цифровая обработка на основе алгоритмов машинного обучения) на основании установленной корреляции сцинтилляционного отклика с топологией трека ионизирующей частицы.



Связь структуры трека электрона с энергией 200 кэВ в NaI с кинетикой сцинтилляции и её выходом



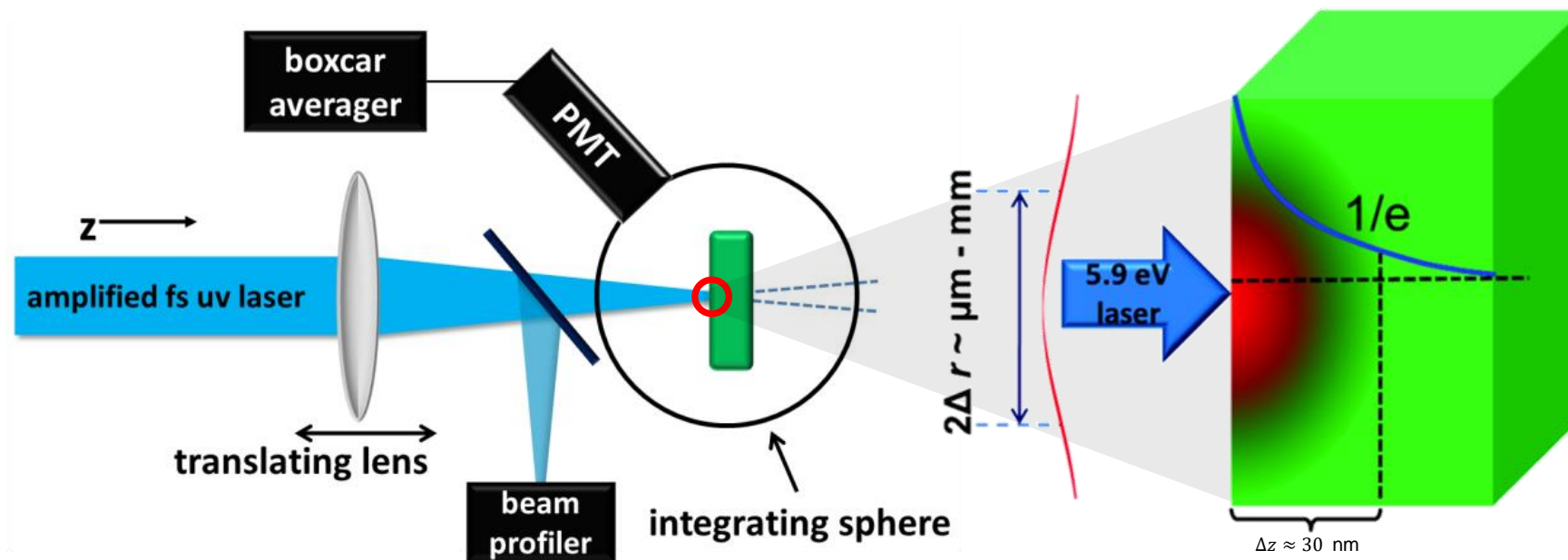
Пример декомпозиции пика полного поглощения ¹³⁷Cs амплитудном спектре (NaI:Tl) на три кластера



Центроиды кинетик сцинтилляционных импульсов для трех кластеров событий

Material	NaI:Tl	NaI:Tl	CsI:Tl	CsI:Tl
Raw resolution, %	5.82	5.54	7.40	10.44
Resolution after treatment, %	3.01	2.83	3.88	5.35

Схема измерения порядка кинетики тушения и скоростей тушения из изменения плотности возбуждения: z-скан выхода люминесценции при межзонном возбуждении



$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -\frac{n(\mathbf{r}, t)}{\tau_r} - \gamma(t, \mathbf{r})n^2(\mathbf{r}, t)$$

$$\gamma(t, \mathbf{r}) \equiv \gamma(t) = (2\pi^{3/2}/3)R_{d-d}^3(t\tau_r)^{-1/2}$$

$$n(\mathbf{r}, t) = n(\mathbf{r}, 0)e^{-t/\tau_r} \left[1 + \frac{2\pi^2}{3}n(\mathbf{r}, 0)R_{d-d}^3 \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_r}}\right) \right]^{-1}$$

$$n(\rho, z, 0) = I_0(\alpha\sigma/\pi a^2)e^{-\rho^2/a^2 - \alpha z}$$

$$N_0^{\max} = I_0(\alpha\sigma/\pi a^2)$$

$$I_{\text{lum}}(t) = \frac{\sigma I_0}{\tau_r} e^{-t/\tau_r} \frac{\operatorname{Li}_2[-2\pi^2 N_0^{\max} R_{d-d}^3 \operatorname{erf}(\sqrt{t/\tau_r})/3]}{2\pi^2 N_0^{\max} R_{d-d}^3 \operatorname{erf}(\sqrt{t/\tau_r})/3}$$

$$\operatorname{Li}_2(x) \equiv \sum_{k=1}^{\infty} z^k/k^2$$

$$W = N_0^{\max} R_{d-d}^3$$

Kirm M., Nagirnyi V., Feldbach E., De_Grazia M., Carre B., Merdji H., Guizard S., Geoffroy G., Gaudin J., Fedorov N., et.al., Exciton-exciton interactions in CdWO₄ irradiated by intense femtosecond vacuum ultraviolet pulses. *Physical Review B* (79), 233103-233103, 2009 (40 cit.)

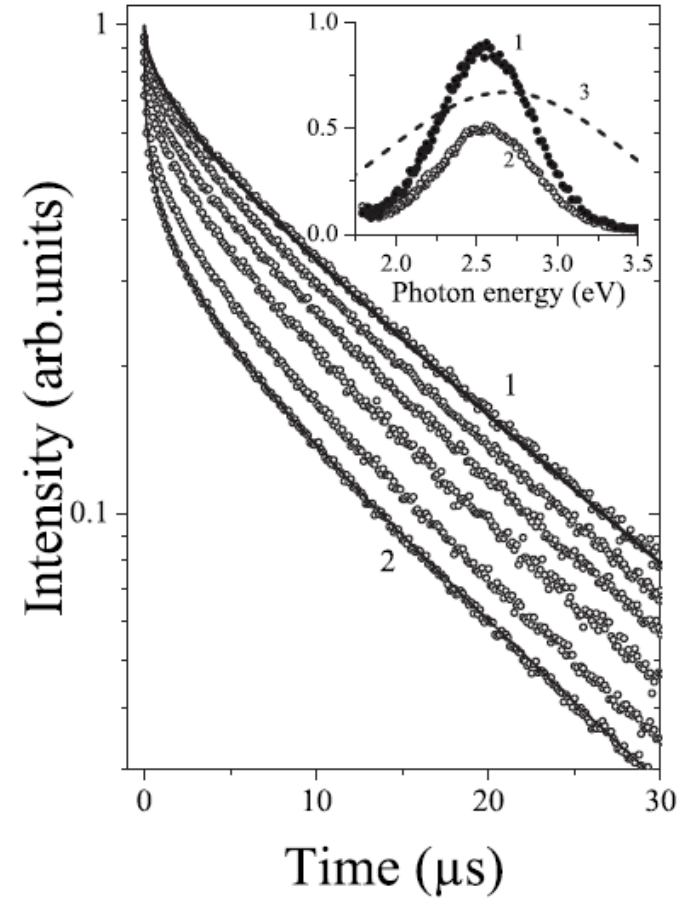


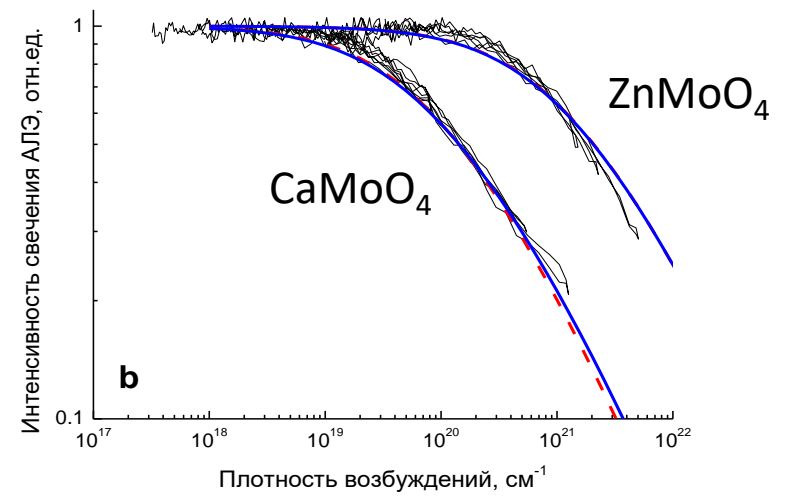
FIG. 1. Normalized decay curves of CdWO₄ emission, recorded at the same intensity but different densities of VUV excitation (circles). Curve (2) corresponds to the focal position with the highest excitation density (spot diameter 10 μm), curve (1) corresponds to 64 times lower density (spot diameter 80 μm). Solid lines show the best fit applying the proposed model. The inset represents the luminescence spectra recorded at the lowest (curve 1) and the highest excitation density (curve 2), and the transient absorption spectrum (curve 3) (Ref. 5).

Проявление плотностных эффектов в люминесцентных свойствах молибдатов

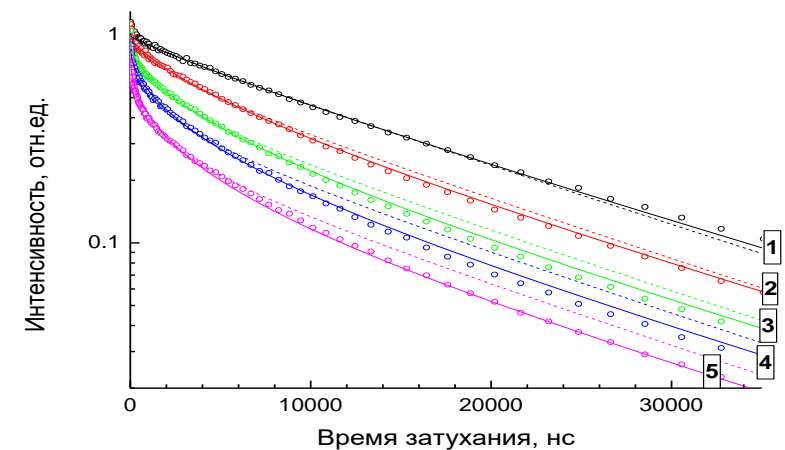
Проведено исследование эффекта взаимодействия автолокализованных экситонов (АЛЭ) под воздействием лазерного излучения высокой плотности в кристаллах CaMoO_4 и ZnMoO_4 . Взаимодействие проявляется в тушении экситонной люминесценции с увеличением концентрации возбуждений и в отклонении от экспоненциальной зависимости кинетики затухания свечения АЛЭ.

Определены пороговые значения концентрации экситонов в этих кристаллах для проявления эффекта взаимодействия АЛЭ - 10^{19} для CaMoO_4 и 10^{20} см^{-3} для ZnMoO_4 при 300 К. Разработана обобщенная модель тушения АЛЭ, которая учитывает эффекты температурного тушения экситонного тушения и подвижности экситонов. С использованием модели проведено численное моделирование экспериментальных результатов, что позволило получить параметры диффузии и радиуса диполь-дипольного взаимодействия АЛЭ в молибдатах кальция и цинка

D. Spassky, A. Vasil'ev, A. Belsky, N. Fedorov, P. Martin, S. Markov, O. Buzanov, N. Kozlova, V. Shlegel, *Excitation density effects in luminescence properties of CaMoO_4 and ZnMoO_4* // **Optical Materials** 90 (2019) 7-13



Зависимость интенсивности свечения АЛЭ от плотности возбуждающего излучения (черные линии) и аппроксимация результатов эксперимента с использованием диполь-дипольной модели тушения в случае отсутствия диффузии экситонов (прерывистая красная линия) и с учетом диффузии экситонов (синяя линия).



Кривые затухания свечения АЛЭ для CaMoO_4 , экспериментальные (полые круги) и полученные в результате численного моделирования с учетом (сплошная линия) и без учета (прерывистая линия) диффузии экситонов. Кривые были получены для случая низкой плотности расфокусированного лазерного излучения (1) и высокой плотности сфокусированного лазерного излучения для следующих энергий лазерного пучка – 5, 20, 100, 600 нДж (2-5), $T = 300 \text{ К}$.

С помощью метода люминесцентного Z-скана с временным разрешением обнаружено anomальное поведение интенсивности и кинетики люминесценции собственной люминесценции кристалла CsI с плотностью возбуждения.

Возбуждение 4-й гармоникой фемтосекундного Ti: Sapphire-лазера (6,2 эВ) позволило измерить в широком динамическом диапазоне плотностей возбуждения (от 10^{17} до 10^{21} возбуждений на кубический сантиметр) свечение CsI. В диапазоне плотностей 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} выход полосы 310 нм (быстрая собственная люминесценция) линейно возрастает с энергией лазерного импульса, а выход полосы 430 нм уменьшается обратно пропорционально этой энергии. В том же диапазоне плотностей субнаносекундное затухание полосы 310 нм замедляется, а в микросекундной кинетике полосы 430 нм увеличивается вклад наносекундных компонент.

A. Belsky, N. Fedorov, S. Gridin, A. Gektin, P. Martin, D. Spassky, and A. Vasil'ev, Time-resolved luminescence z-scan of CsI using power femtosecond laser pulses, Radiation Measurements 124 (2019), 1–8

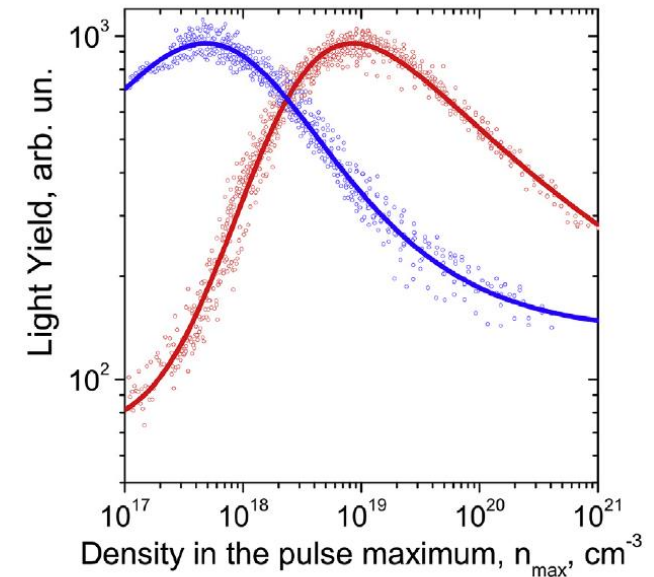


Fig.4. Averaged light yield $\langle \eta_{lum} \rangle(n_{\text{max}})$ the 2.9-eV (blue) and 4.1-eV FIL (red) bands as a function of the maximum excitation density induced by the laser. Solid lines correspond to the fitting procedure described in the text.

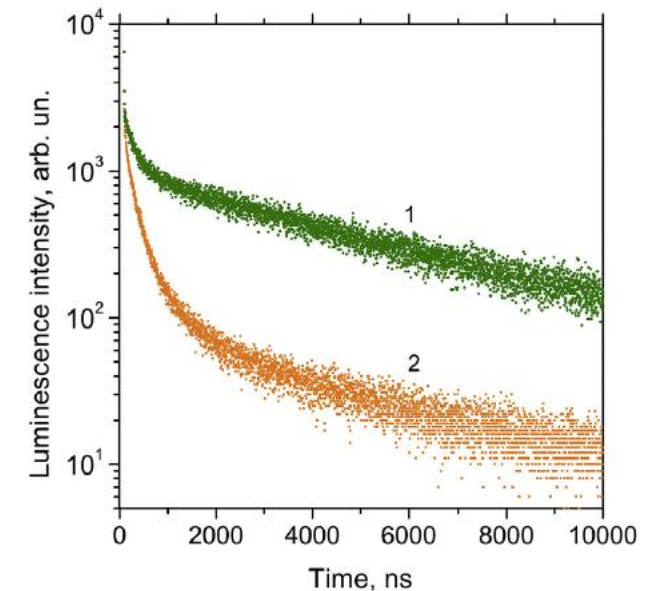
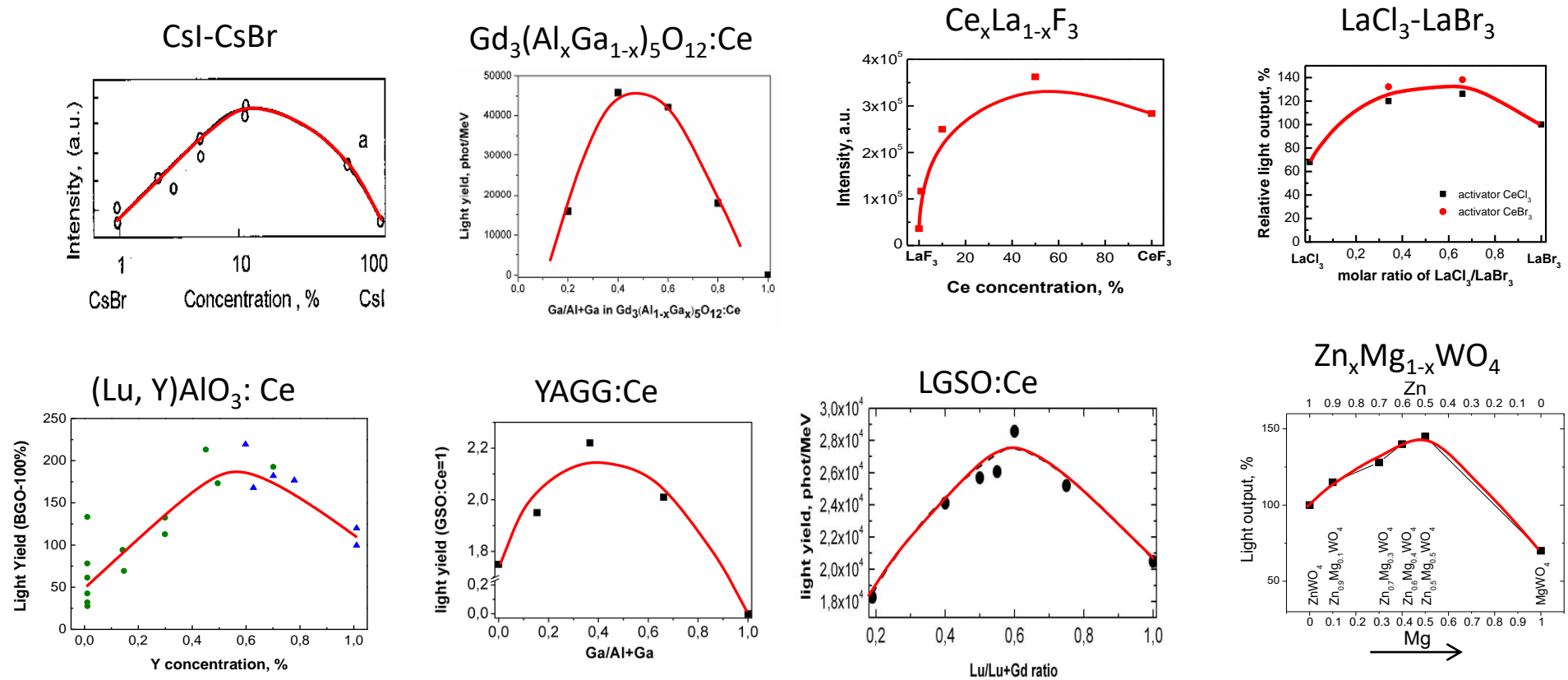


Fig. 6. Decay of the 2.9-eV band at $n_{\text{max}} = 10^{18}$ cm^{-3} (1 - green dots) and 5×10^{20} cm^{-3} (2 - orange dots).

Твердые растворы: интенсивность люминесценции от концентрации



Основные свойства:

Увеличение выхода может быть до 500%

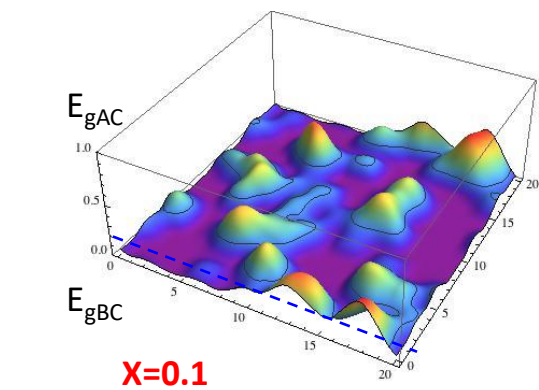
Максимальный выход достигается при промежуточных концентрациях в районе 30-70%

Этот эффект наблюдается как в растворах, основанных на бинарных системах, так и в кристаллах с комплексным анионом

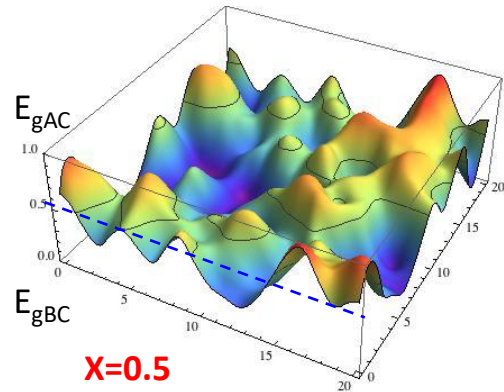
Концентрационная зависимость не симметрична вокруг 50%

Gektin A.V., Belsky A.N., Vasil'ev A.N., Scintillation Efficiency Improvement by Mixed Crystal Use. IEEE Transactions on Nuclear Science (61)1, 262-270, 2014 (61 cit.)

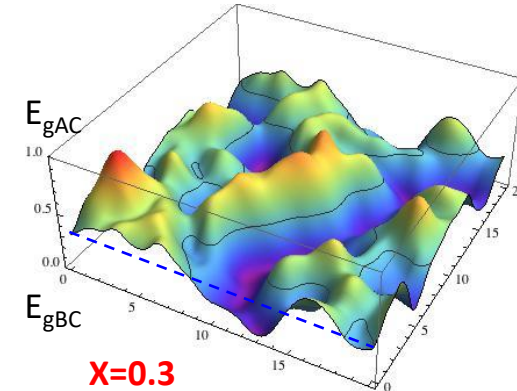
Моделирование пространственного распределения дна зоны проводимости в бинарном твердом растворе $A_{1-x}B_xC$ при сильной корреляции AA



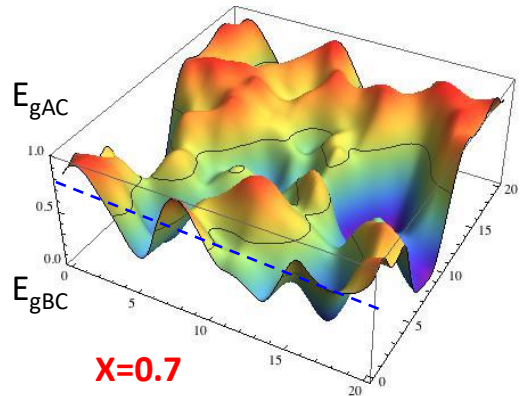
$x=0.1$



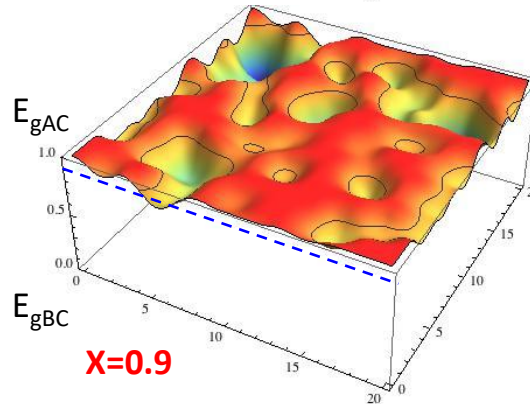
$x=0.5$



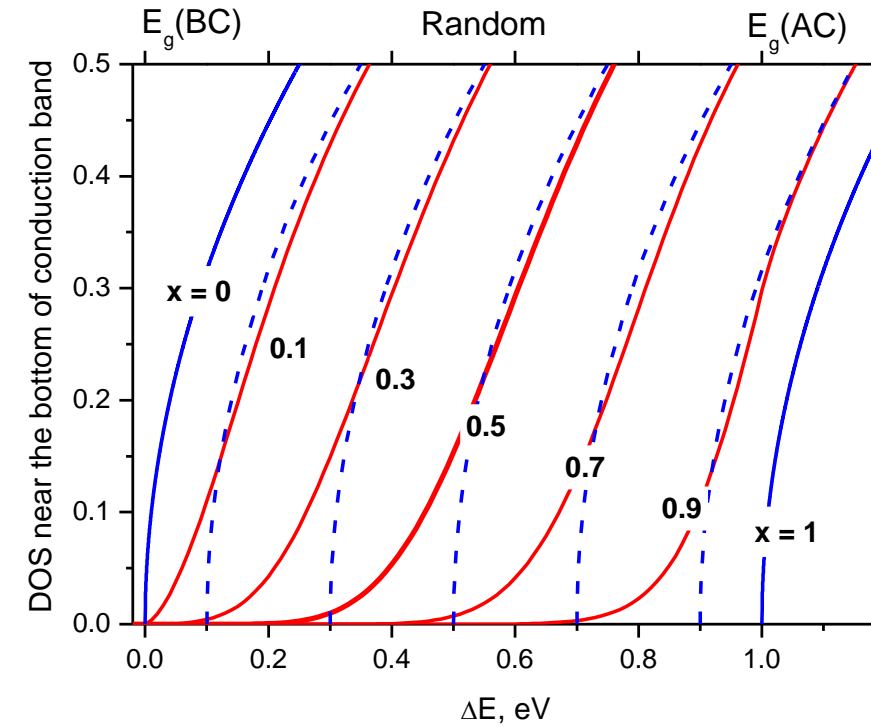
$x=0.3$



$x=0.7$

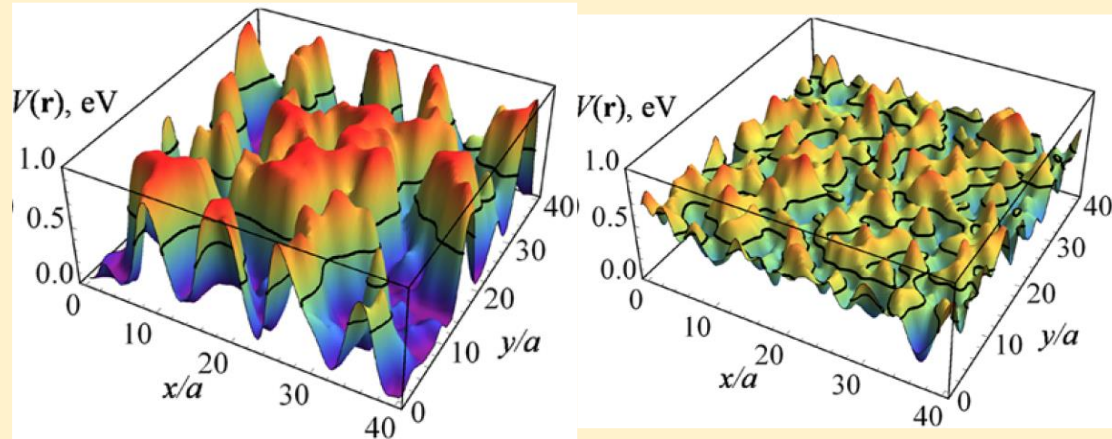


$x=0.9$



Сцинтилляционные свойства во многом определяются флуктуациями запрещенной зоны E_g , а не только смещением средних значений E_g с x .

Объяснение повышенной эффективности передачи энергии центрам свечения в сцинтилляторах на основе твердых растворов диэлектрических кристаллов



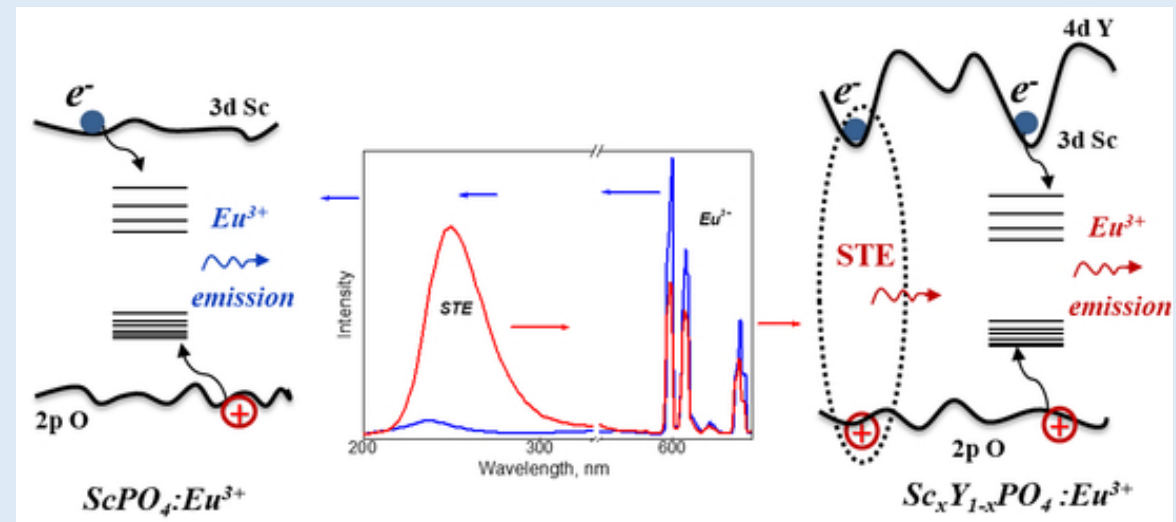
Сравнение распределений потенциала для бинарного твердого раствора $A_{0.5}B_{0.5}C$ в условиях образования кластеров АС и ВС (слева) и случайного распределения ионов А и В (справа)

Моделирование термализации электронов и дырок с учетом пространственных флуктуаций экстремумов зоны проводимости и валентной зоны в твердом растворе показало, что увеличение выхода сцинтилляций и уменьшение медленных компонент свечения связано с рассеянием горячих электронов и дырок на флуктуациях потенциала и возможным образованием кластеров одноименных ионов.

(A.Belsky, A.Gektin, A.N.Vasil'ev, *Physica Status Solidi (B): Basic Research* 257 (2020), 1900535).

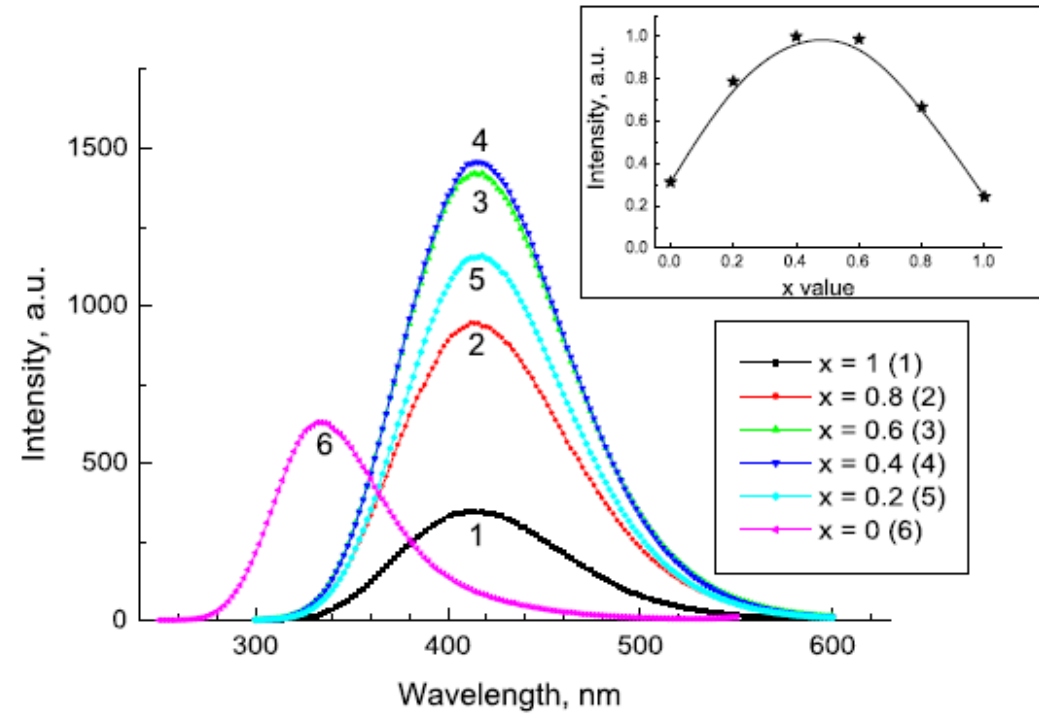
Экспериментально показано, что в твердом растворе $Y_xSc_{1-x}PO_4:Eu^{3+}$, при изменении концентрации компонент x меняется соотношение каналов переноса энергии на примесные и собственные центры свечения. Это связано с существенным отличием положений зон YPO_4 и $ScPO_4$ и возникновением пространственных флуктуаций потенциала в твердом растворе.

(D.A. Spassky et al, *Symmetry* 12 (2020) 946; N.R. Krutyak, D.A. Spassky et al, *Crystallography Reports*, 65 (2020) 857).



Разупорядочение структуры в смешанных кристаллах $Y(Nb_xTa_{1-x})O_4$ приводит к увеличению световыхода до 300% по отношению к $YNbO_4$ и $YTaO_4$ за счет ограничения длины термализации в смешанных твердых растворах.

D. Spassky, A. Vasil'ev, et al, *Optical Materials*, 80:247–252, 2018



Люминесцентная спектроскопия перспективных пленочных сцинтилляторов



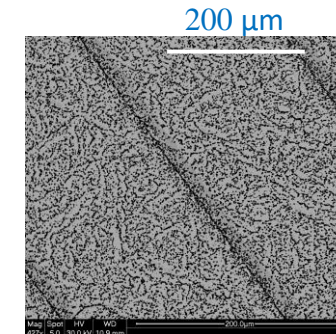
- **Мотивация.** $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ - новый сцинтилляционный кристалл с отличными свойствами - световой выход 46000 фот/МэВ, время затухания свечения 88 нс, энергетическое разрешение 4.6%.
- **Проблема.** Высокая температура роста кристаллов приводит к неизбежному появлению дефектов кристаллической структуры, что негативно влияет на сцинтилляционные свойства.
- **Решение.** Пленки гранатов лишены этого недостатка из-за низкой температуры роста при сохранении (и возможном улучшении) сцинтилляционных свойств.



Результаты:

1. Методом жидкофазной эпитаксии выращены пленки $\text{Gd}_3(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$.

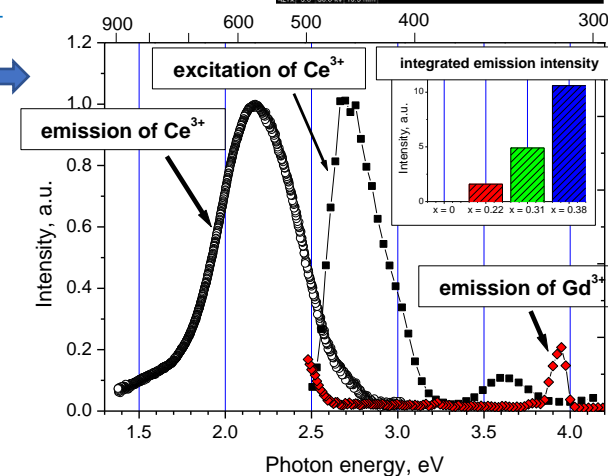
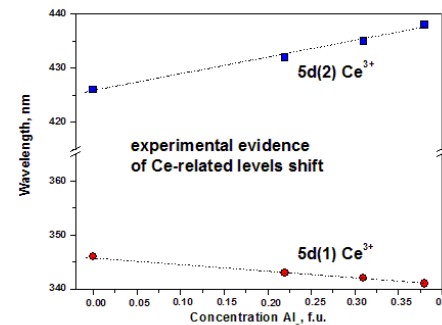
фото пленок:



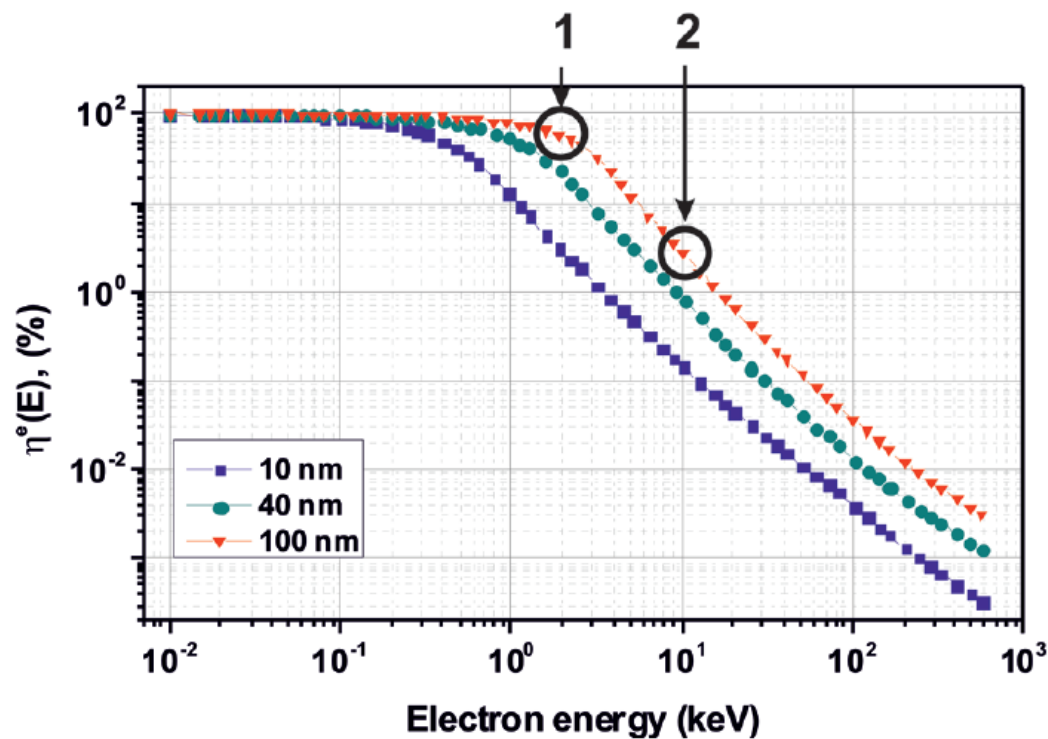
2. Показано значительное усиление интенсивности свечения Ce^{3+} при замещении Ga на Al в гранате.



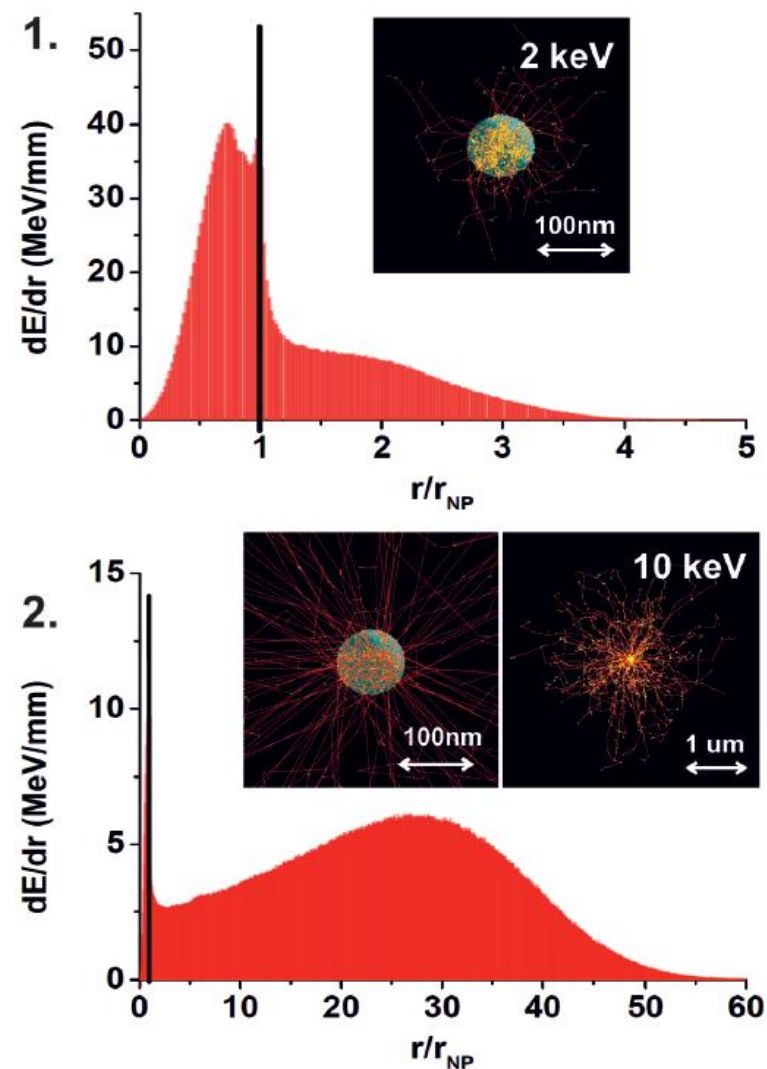
3. Эффект связан с постепенным смещением 5d уровней Ce^{3+} в запрещенную зону граната при введении в гранат Al^{3+} .



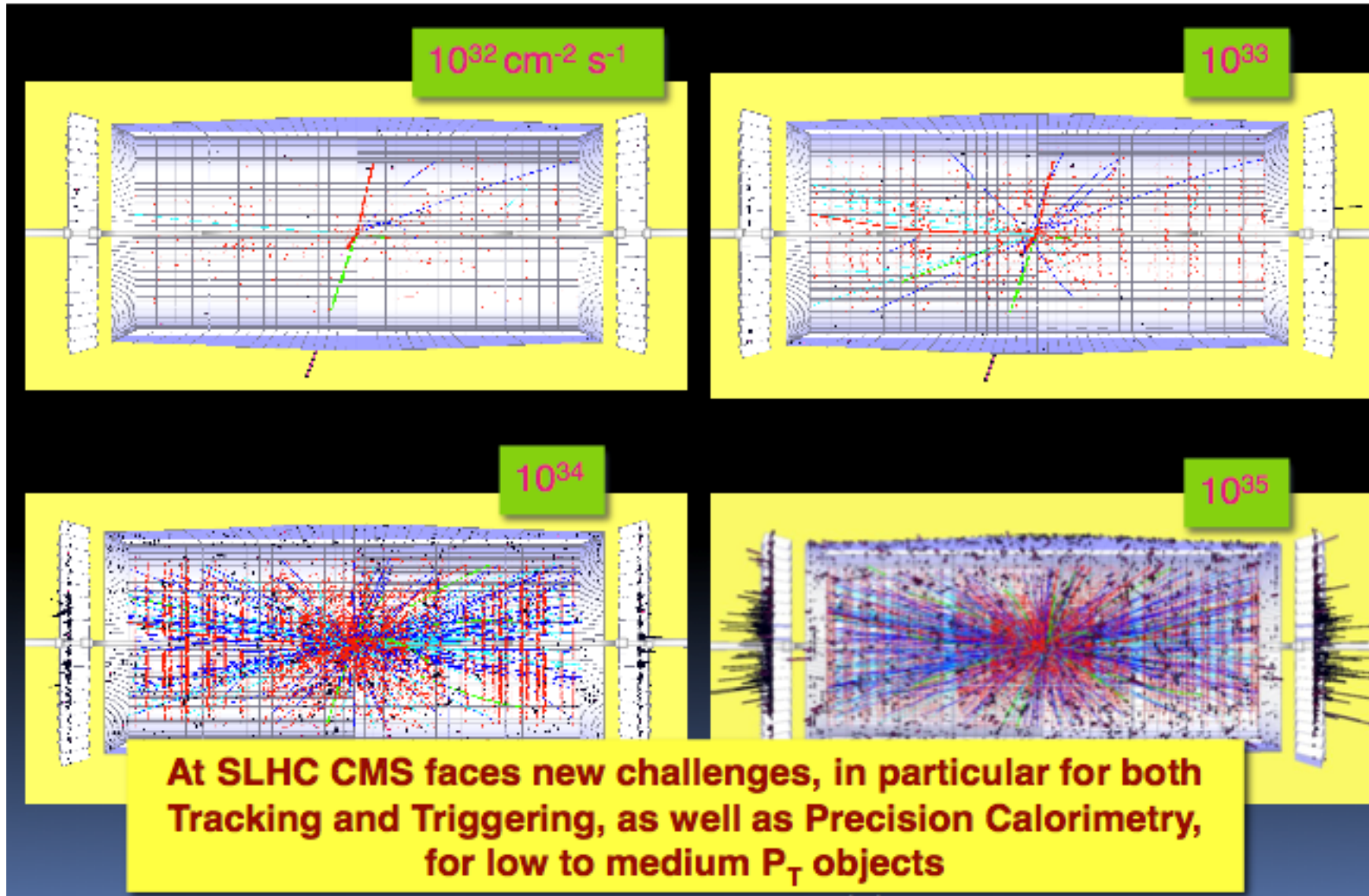
Использование сцинтилляционных наночастиц в радиационной медицине



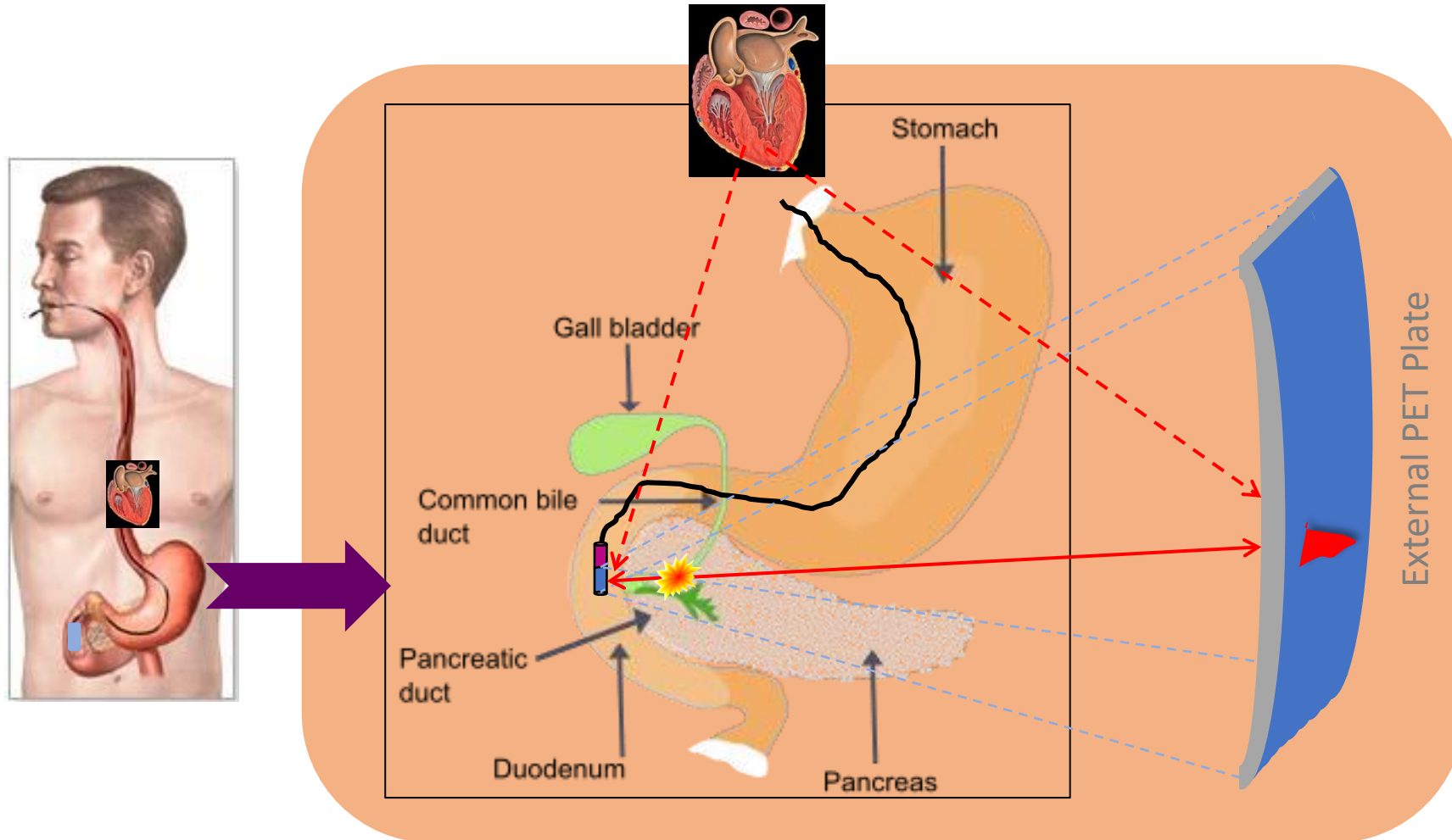
Доля энергии γ -кванта, которая остается внутри наночастицы Gd_2O_3



Перекрывание событий при высокой СВЕТИМОСТИ

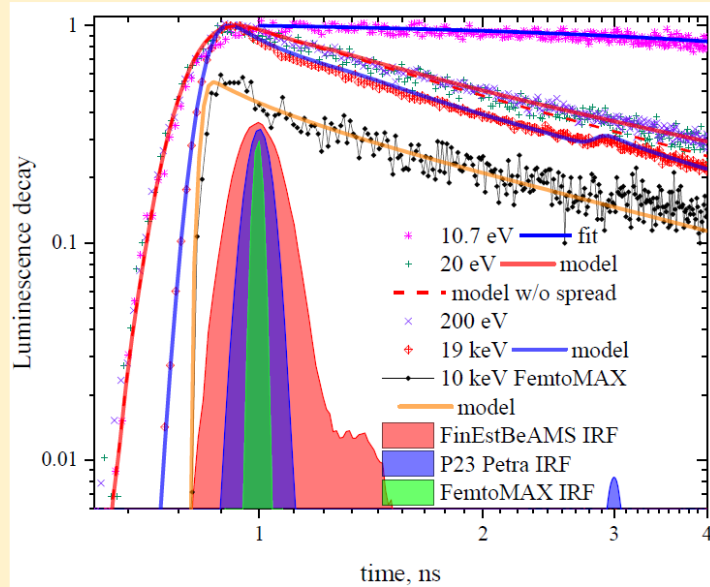


EndoTOFPET-US: Принцип работы время-пролетного ПЭТ



ОФПКЭ участвует в разработке детекторов ионизирующего излучения со сверхвысоким временным разрешением (порядка 10 пикосекунд) для будущих поколений суперколлайдеров и для время-пролетной позитрон-эмиссионной томографии

По результатам экспериментов на источниках синхротронного излучения MaxLab, DESY и центра фемтосекундных лазеров CELIA показано, что сцинтилляторы с церием в составе кристалла (например, CeF_3 , который был одним из кандидатов для использования в электромагнитном калориметре CMS в CERN) имеют фронт нарастания свечения менее 10 пикосекунд, что объясняется ударным возбуждением церия горячими электронами. В первые 10 пикосекунд после попадания гамма-кванта испускается примерно 10 фотонов, что позволяет рассматривать CeF_3 в качестве одного из кристаллов для сверхбыстрой регистрации частиц (I. Kamenskikh et al, *Symmetry* 12 (2020), 914).



Кинетики люминесценции CeF_3 , измеренные при возбуждении фотонами с различными энергиями, и результат моделирования для времен разгорания 1 пс. Сплошной заливкой показаны инструментальные функции различных установок.

Было экспериментально и теоретически показано, что содопирование кальцием ортосиликата $\text{Lu}_x\text{Y}_{1-x}\text{Si}_2\text{O}_5:\text{Ce}$ приводит к существенному ускорению быстрой компоненты в нарастании свечения за счет перевода части Ce^{3+} в Ce^{4+} и ускоренному захвату электронов Ce^{4+} (G. Tamulaitis et al, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 139 (2020), 109356)

Сигнал наведенного поглощения, показывающий ускорение передачи возбуждений на церий с ростом концентрации кальция.

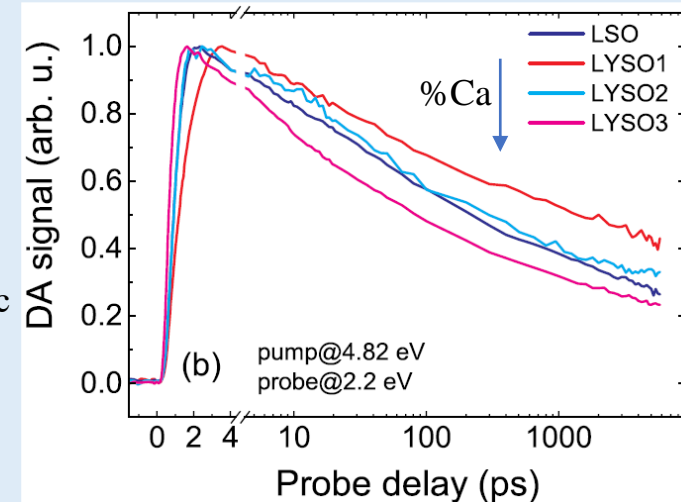
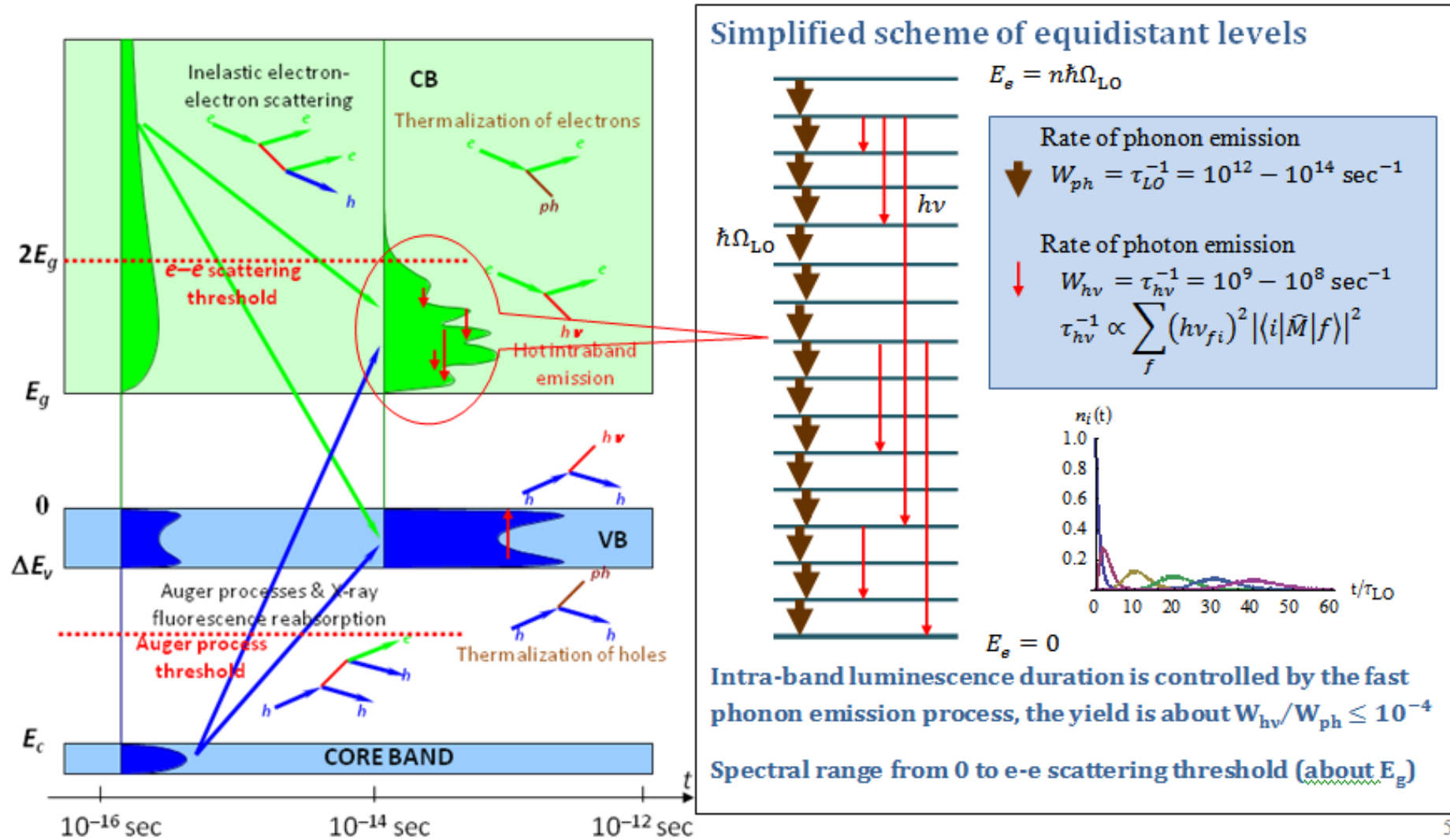
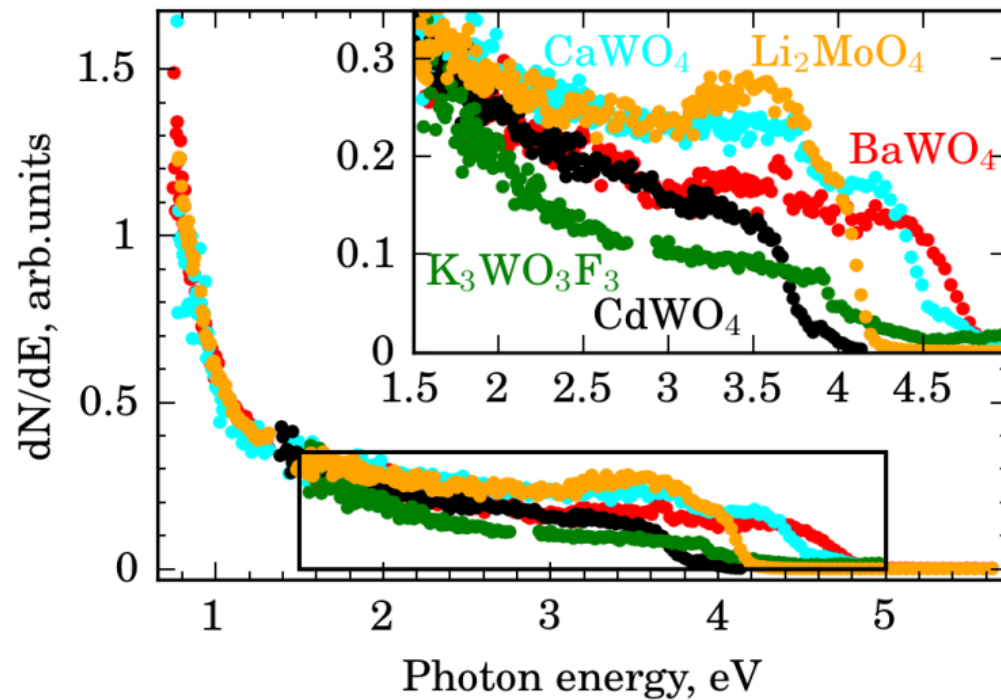


Схема внутризонной люминесценции, которая дает разрешение до единиц пикосекунд



Экспериментальное исследование внутризонной люминесценции



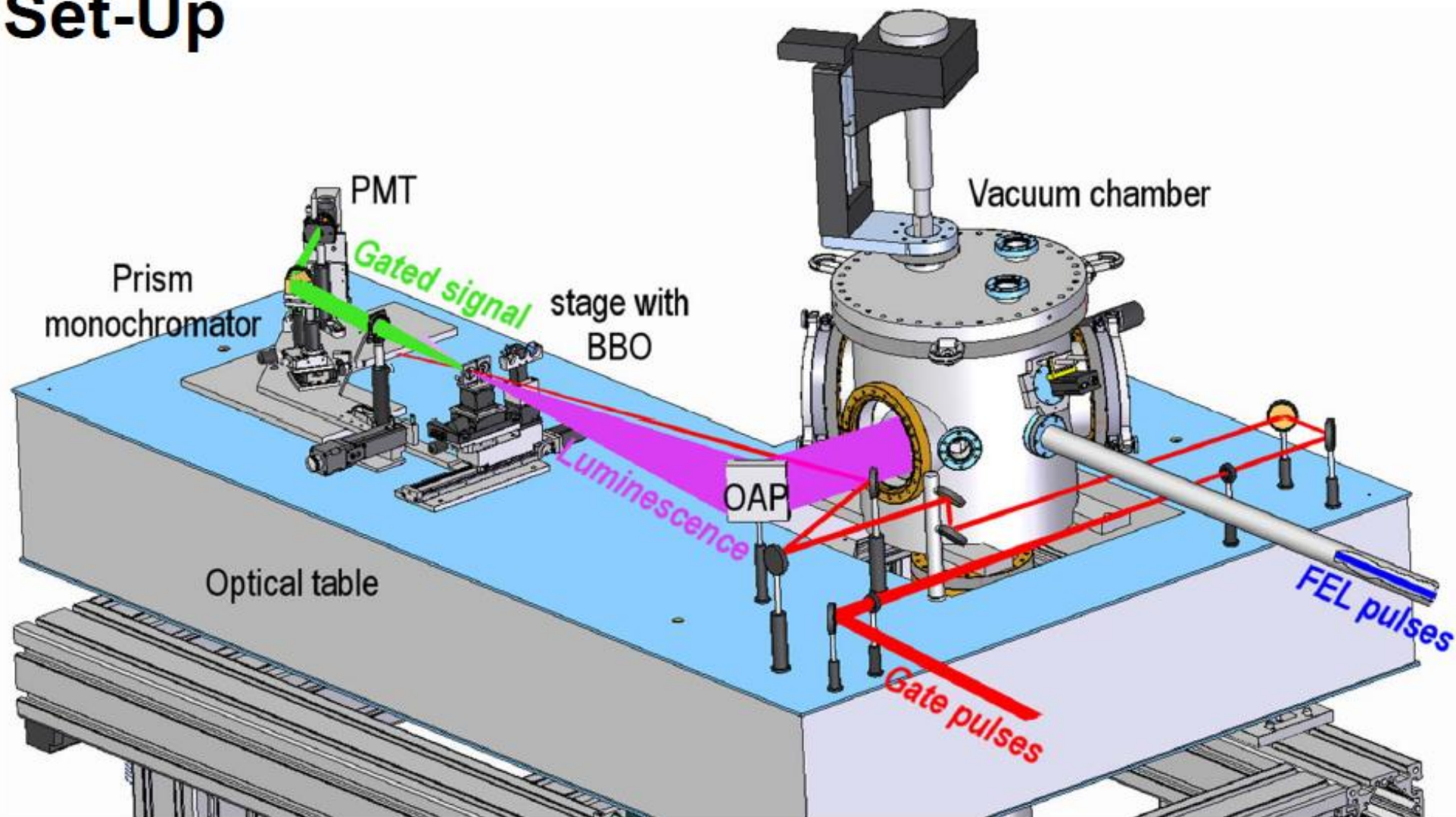
Спектры внутризонной люминесценции при возбуждении субнаносекундным электронным пучком.

Выход:

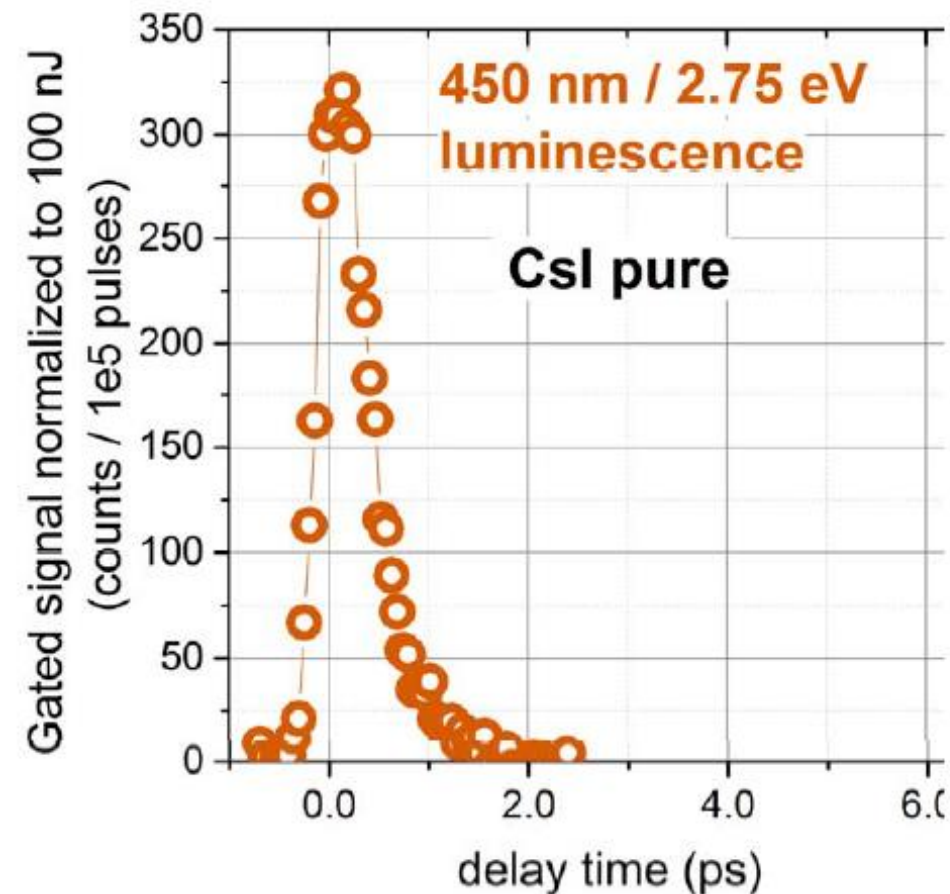
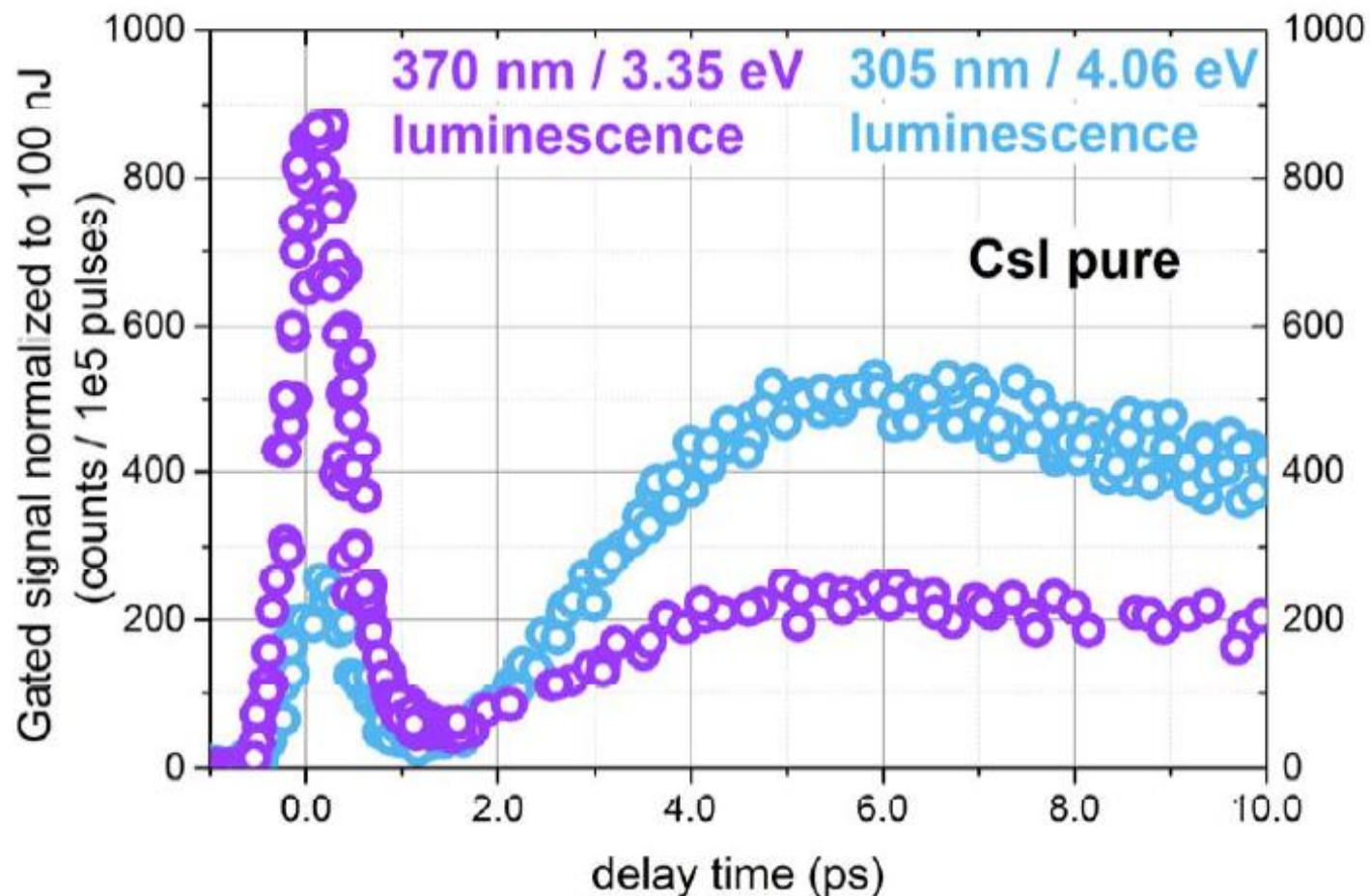
50 фотонов/МэВ для CeF_3 ,
30 фотонов/МэВ для CsI и
110 фотонов/МэВ для YAG:Ce

Omelkov S.I., Nagirnyi V., Vasil'ev A.N., Kirm M.,
New features of hot intraband luminescence for
fast timing. Journal of Luminescence (176), 309-
317, 2016 (28 cit.)

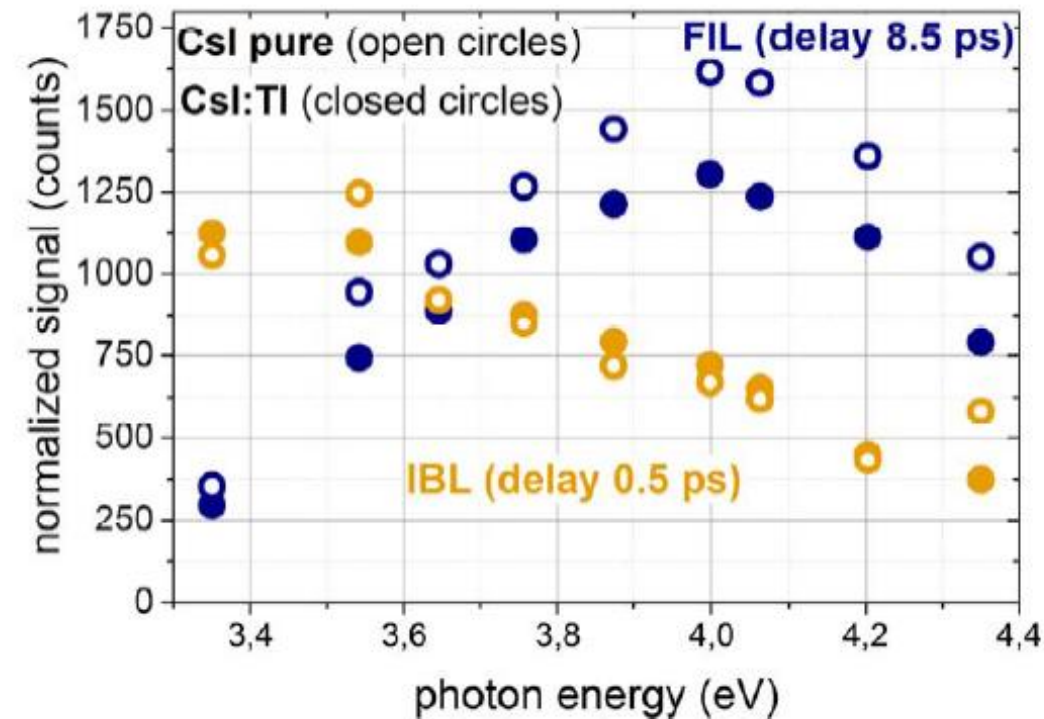
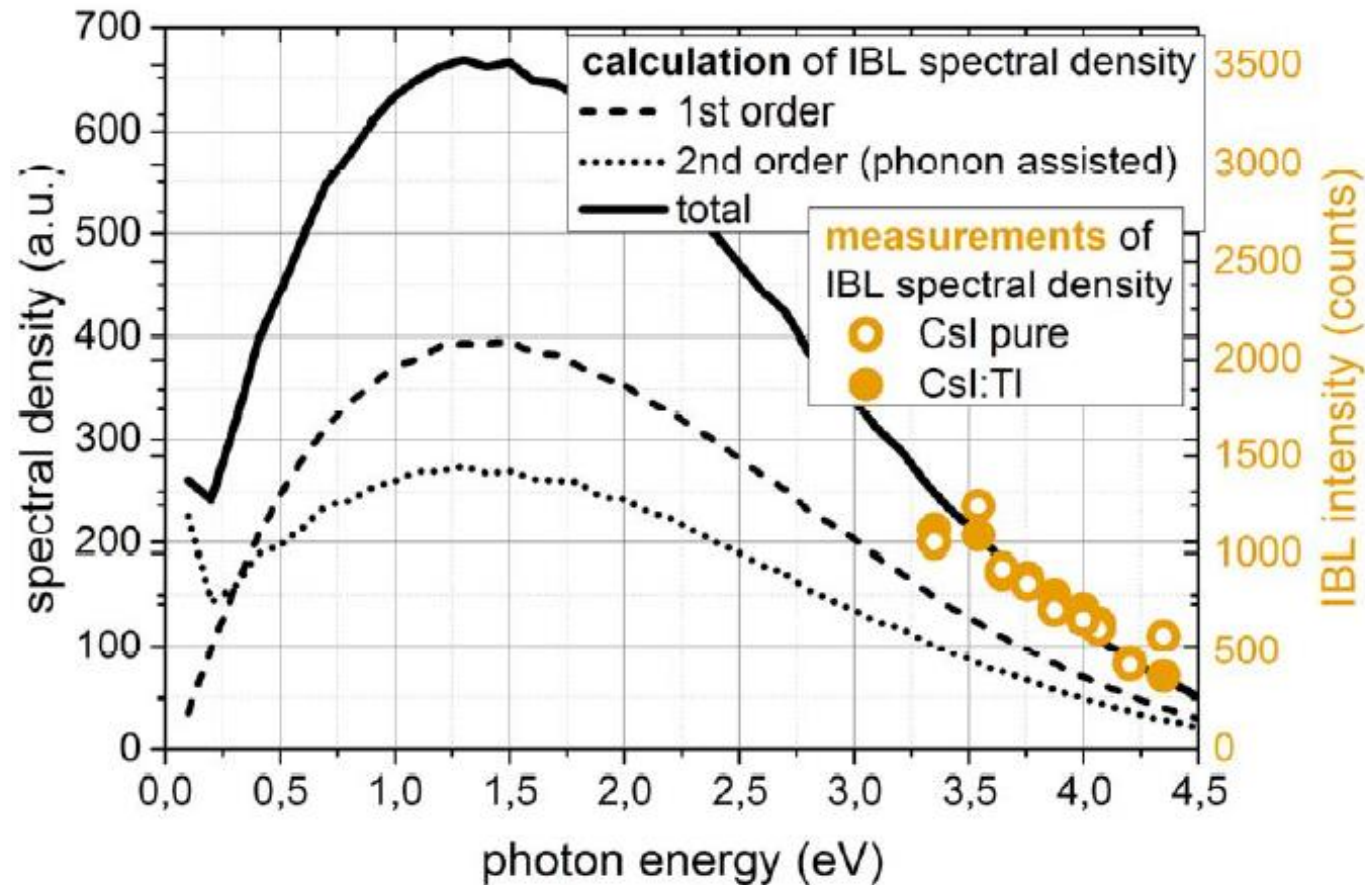
Set-Up



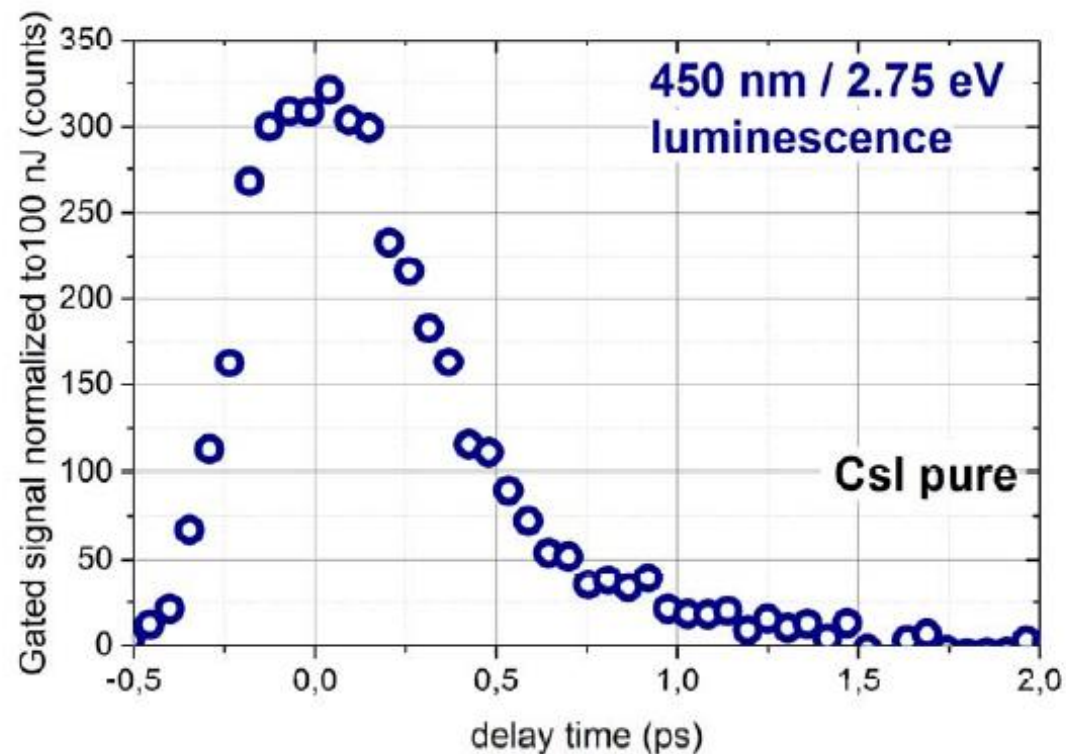
Measurements



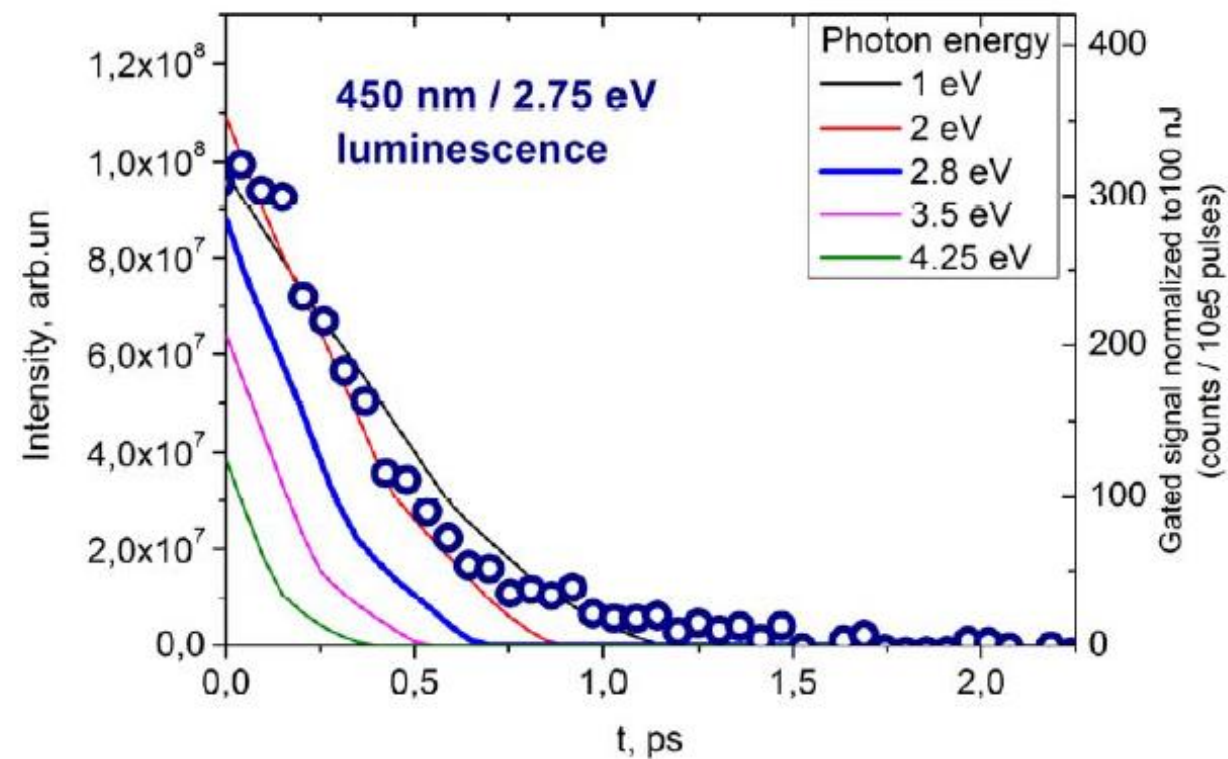
Spectral dependence of IBL theory & measurements

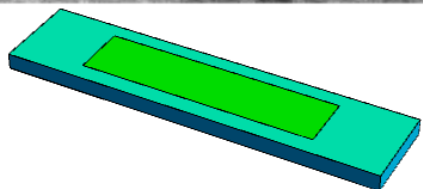
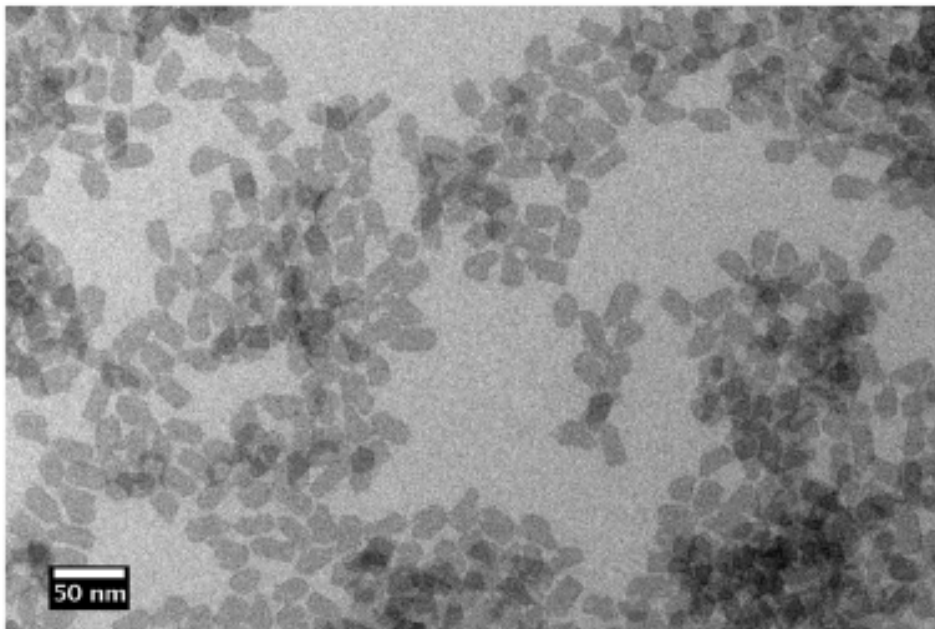


IBL kinetics: Measurements & theory



Time dependence of emission of photons





В нанокompозитных материалах на основе наночастиц CdSe/CdS перенос энергии от матрицы YAG к наночастицам позволяет достичь времени нарастания сцинтилляционного отклика в 80 пс.

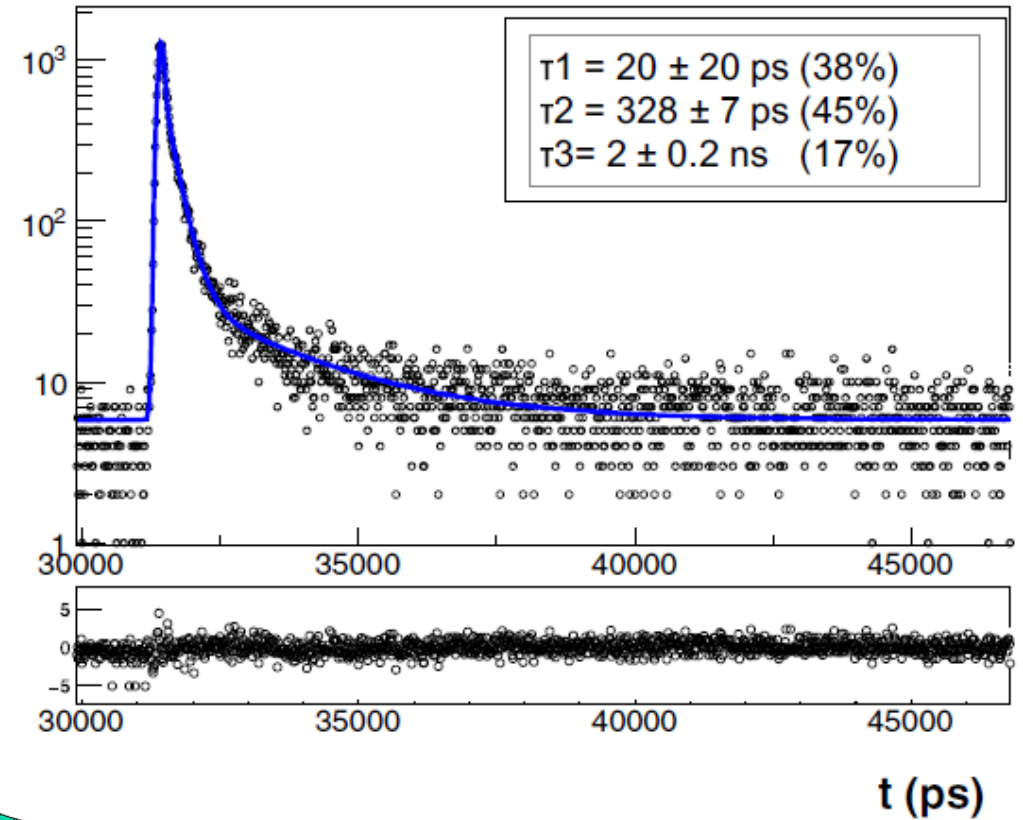
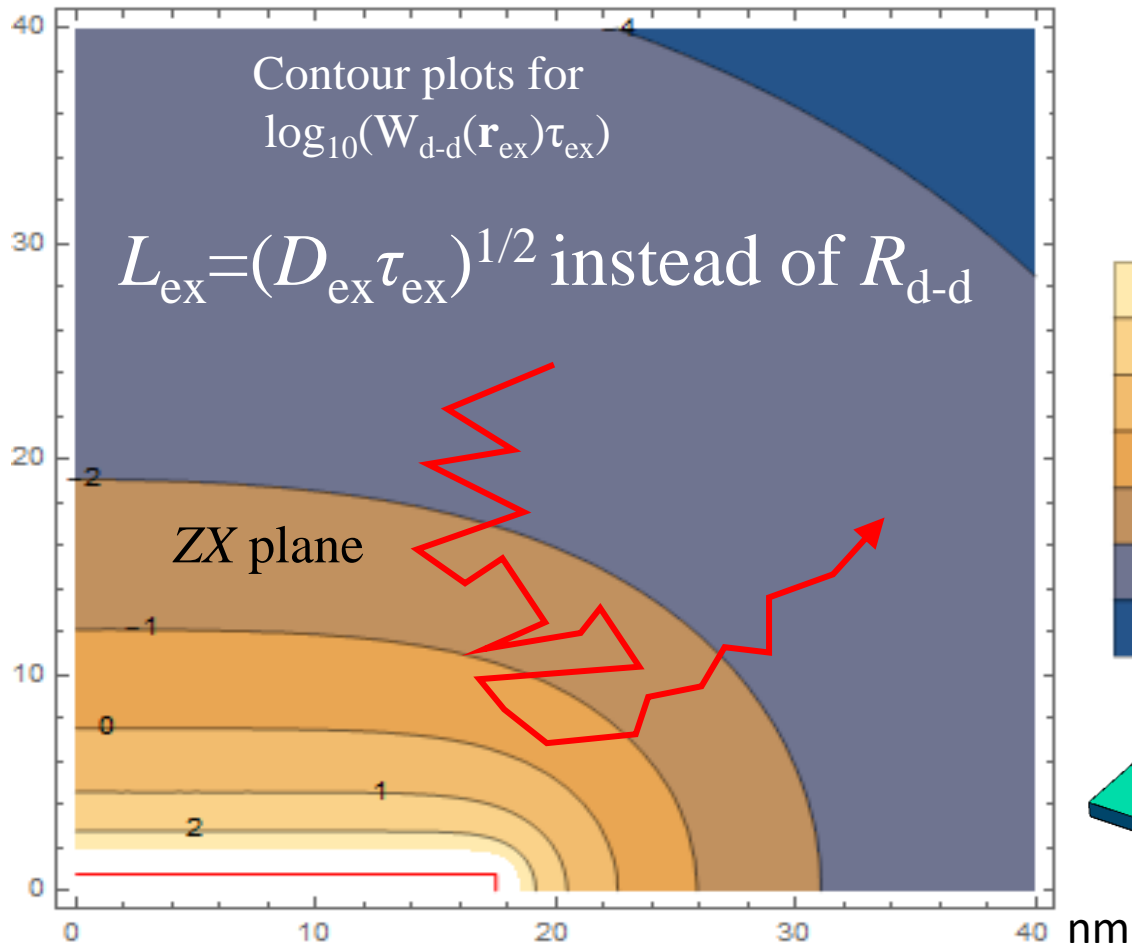
Полупроводниковые наночастицы на основе CdSe могут быть объединены со стандартной технологией сцинтиллятора для достижения временного разрешения 80 пс на композитном функциональном пикселе. При этом энергия кванта 511 кэВ распределяется между объемным сцинтиллятором с высоким Z и высокой тормозной способностью и нано-сцинтиллятором с временами излучательной рекомбинации менее 1 нс, чем достигается значительное улучшение суммарного энергетического и временного разрешения. Такой подход открывает путь к разработке и исследованию композитных сцинтилляторов большего размера с использованием тонких нанокompозитных слоев, имеющих высокое временное разрешение для регистрации ионизирующих квантов в детекторах нового поколения

Почему нанопластины CdSe/CdS $1.5 \times 8.5 \times 35 \text{ nm}^3$?

- 1) Энергия плазмонов 12 эВ \rightarrow электроны создают несколько электронно-дырочных пар в НП
- 2) Форма НП уменьшает Оже-эффекты $E_x + E_x \rightarrow E_x$
- 3) За счет этого высвечиваются биэкситоны с более коротким временем свечения

Turtos R.M., Gundacker S., Omelkov S., Mahler B., Khan A.H., Saaring J., Meng Z., Vasil'ev Andrey N., Dujardin C., Kirm M., et.al., On the use of CdSe scintillating nanoplatelets as time taggers for high-energy gamma detection. npj 2D Materials and Applications (3), 37, 2019

Диполь-дипольный перенос от подвижных экситонов в полистироле на нанопластинки CdSe с “короной” из CdS



Turtos R.M., Gundacker S., Omelkov S., Mahler B., Khan A.H., Saaring J., Meng Z., Vasil'ev Andrey N., Dujardin C., Kirm M., et.al., On the use of CdSe scintillating nanoplatelets as time taggers for high-energy gamma detection. npj 2D Materials and Applications (3), 37, 2019

Проект R&D в рамках Crystal Clear Collaboration по разработке
КОМПОЗИТНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ с временным разрешением до 10 пс

Схема взаимодействия γ -кванта с полимерным композитом с наночастицами

