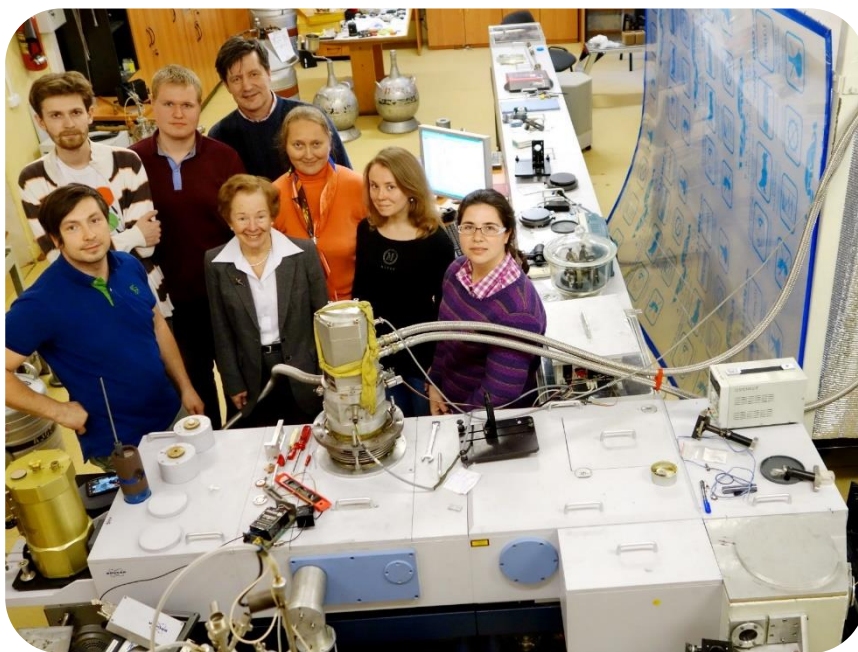




НАУЧНЫЙ СЕМИНАР НУГ ВШЭ PUPPIES (#2)



Болдырев
Кирилл Николаевич

**«Фурье-спектроскопия в
исследовании оптических
квантовых эффектов»**

*Отдел спектроскопии конденсированных сред
Лаборатория Фурье-спектроскопии ИСАН

Москва, Троицк 2021



**Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)**



1968-2018
50th anniversary of ISAN

EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY – EPS HISTORIC SITE

THE INSTITUTE OF SPECTROSCOPY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES,
TROITSK, MOSCOW, RUSSIA

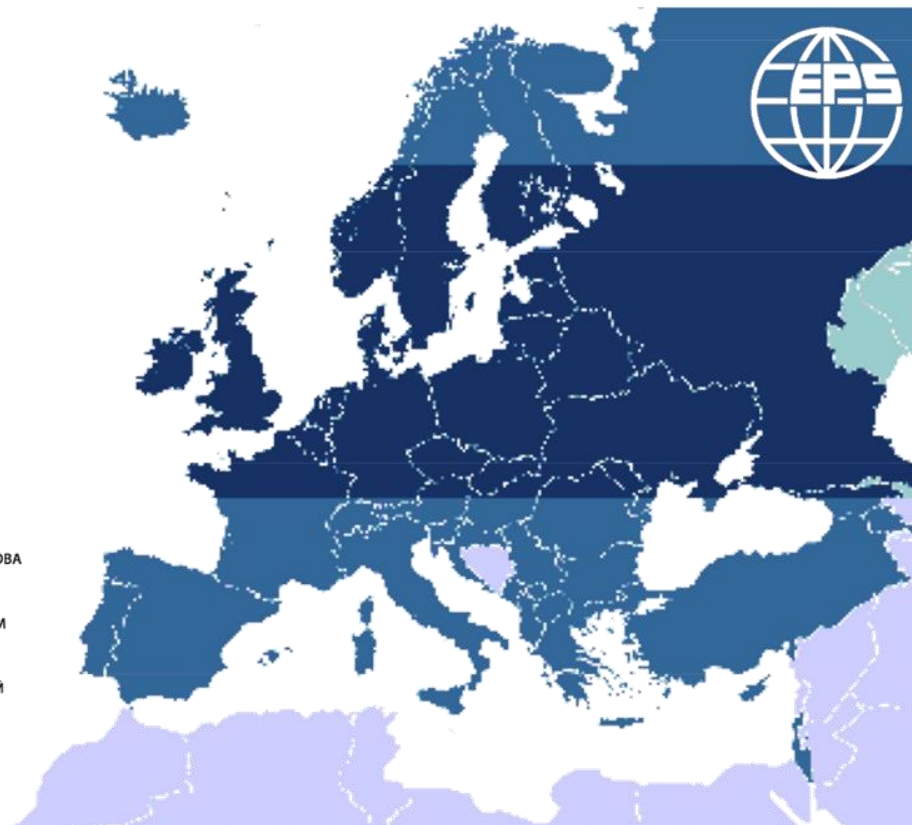
THIS INSTITUTE, THANKS TO THE APPLICATION OF ADVANCED OPTICAL AND LASER METHODS, INCLUDING THE SPECTROSCOPIC ONES, HAS BECOME AN INTERNATIONALLY RECOGNIZED LANDMARK OF RUSSIAN SCIENCE FOR RESEARCH ACROSS MANY FIELDS OF PHYSICS AND ASTROPHYSICS, CHEMISTRY, MATERIAL SCIENCES AND LIFE SCIENCES. GLORY AND WORLDWIDE FAME WERE BROUGHT TO THE INSTITUTE BY SERGEY MANDELSTAM (THEORY OF SPECTRA OF HIGHLY IONIZED ATOMS, ANALYTICAL SPECTROSCOPY), ROMAN PERSONOV (LASER FLUORESCENCE LINE NARROWING AND HOLE BURNING IN SPECTRA OF MOLECULES), VLADIMIR AGRANOVICH (THEORY OF EXCITONS, POLARITONS, AND OF RESONANT ORGANIC-INORGANIC NANOSTRUCTURES), AND OTHERS. THIS IS ALSO THE PLACE WHERE IN A CREATIVE ENVIRONMENT A TEAM OF TALENTED YOUNG RESEARCHERS INSPIRED BY VLADILEN LETOKHOV MADE PIONEERING EXPERIMENTS ON LASER TRAPPING AND COOLING OF ATOMS, WHICH PAVED THE WAY TO A WHOLE BUNCH OF NEW DIRECTIONS IN PHYSICS, AS WELL AS ON LASER ISOTOPE SEPARATION USING SELECTED LASER EXCITATION OF ATOMS AND MOLECULES, WHICH FINALLY LED TO THE DEVELOPMENT OF A NEW FIELD OF LASER CHEMISTRY.

Европейское Физическое Общество – Историческое место

Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),
Троицк, Москва, Россия

Институт спектроскопии РАН благодаря своим работам по применению оптических и лазерных методов, включая спектроскопические, получил всемирную известность за результаты исследований во многих областях физики и астрофизики, химии, материаловедения и науках о жизни. Признание ему принесли работы Сергея Мандельштама (теория спектров высокоионизованных атомов, аналитическая спектроскопия), Романа Персонова (метод селективного лазерного возбуждения тонкоструктурных спектров и выжигание провалов в спектрах молекул), Владимира Аграновича (теория экситонов, поляритонов и резонансных наноструктур типа органика-полупроводник) и др. Здесь в творческой атмосфере группа молодых исследователей, возглавляемая Владиленом Летоховым, выполнила первые в мире эксперименты по лазерному захвату и охлаждению атомов, что привело к созданию новых направлений в физике, а также пионерские эксперименты по лазерному разделению изотопов с использованием методов селективного лазерного возбуждения атомов и молекул, что привело к созданию новой области лазерной химии.

TROITSK, MOSCOW, RUSSIA, 2018
Троицк, Москва, Россия, 2018



Институт был награжден за выдающиеся работы таких ученых, как Роман Персонов, Владлен Летохов, Владимир Агранович, Сергей Мандельштам и другие.

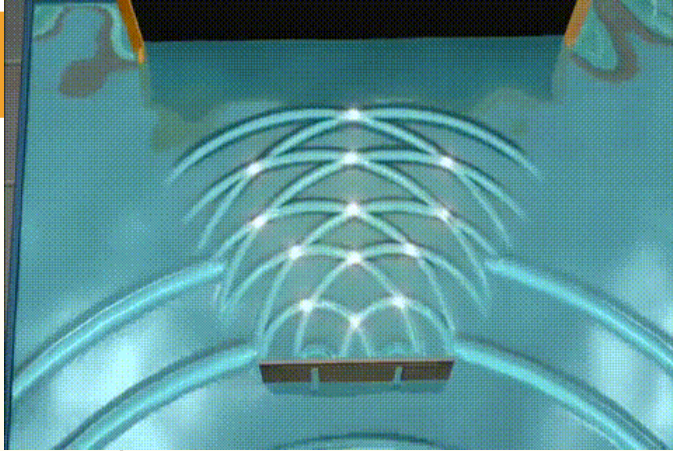


Директор ИСАН
Виктор Задков

Президент EPS
Рюдигер Восс

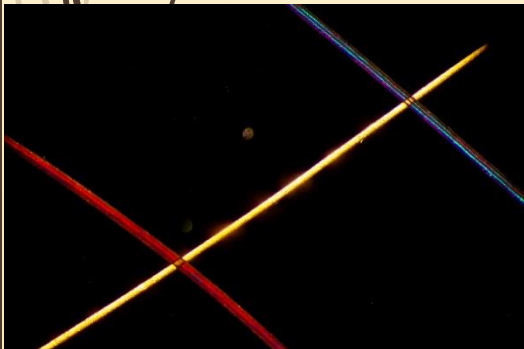
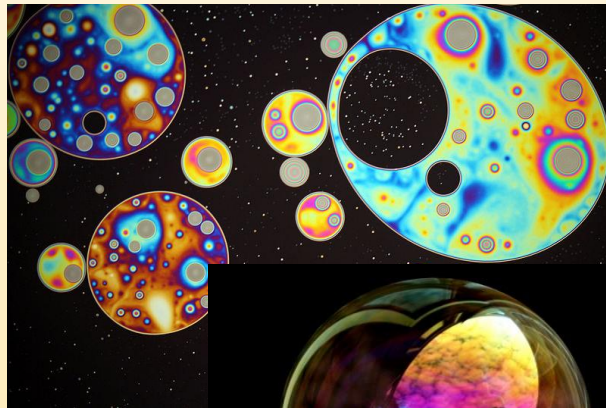
... Кто бы мог подумать, что свет
слагаясь со светом, может вызвать
мрак...

Франсуа Араго

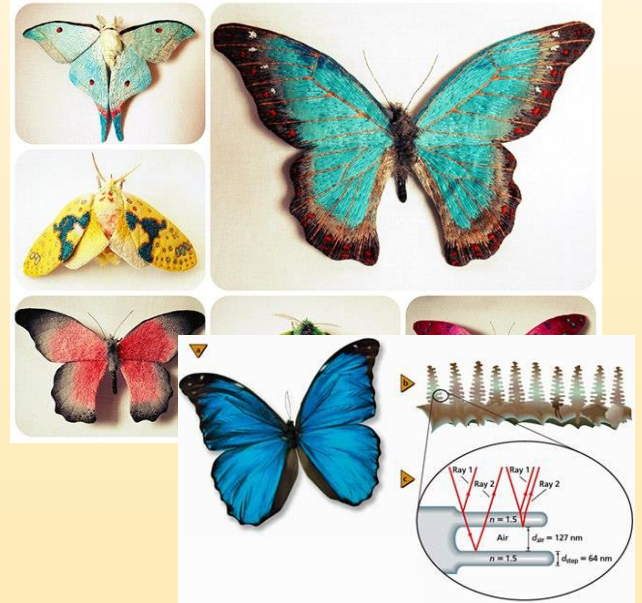


Интерференция тонких пленок
(открыта Робертом Гуком в 1665г.)

Цвет волос в
поляризационном
микроскопе

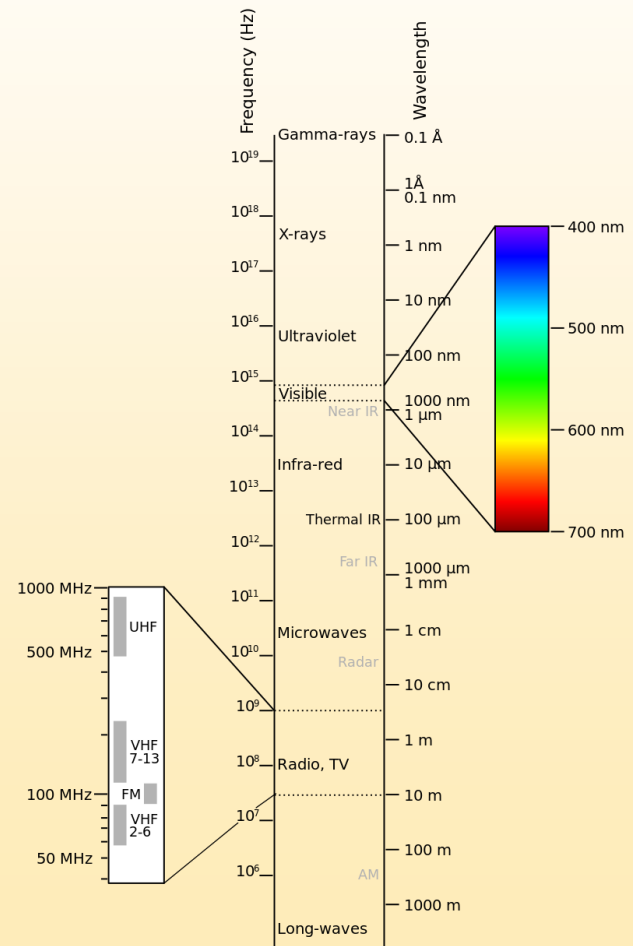
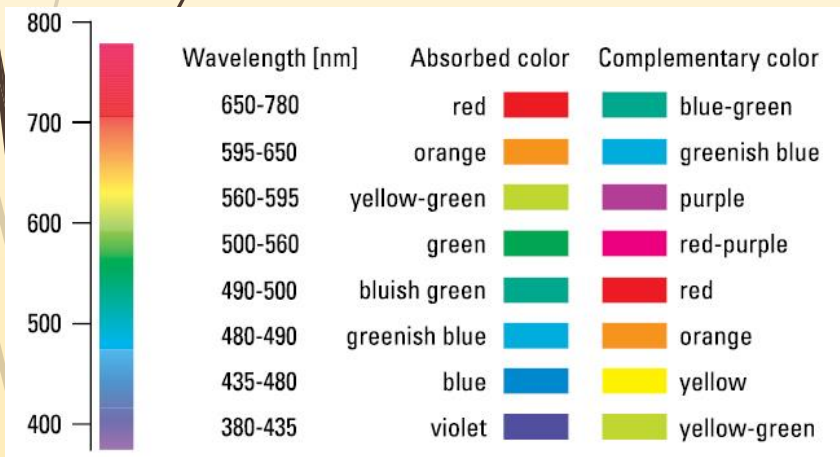
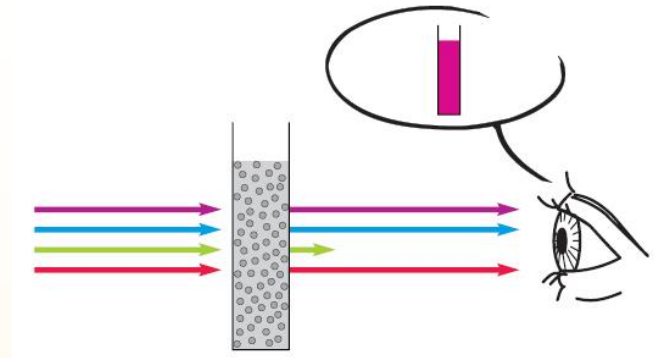


Окрас крыльев бабочки
(фотонные кристаллы)


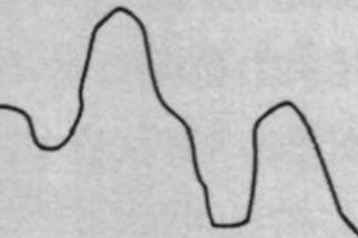
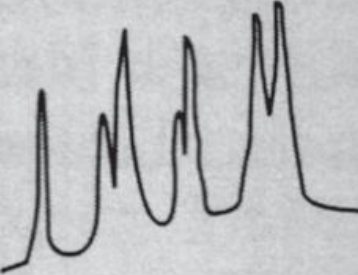
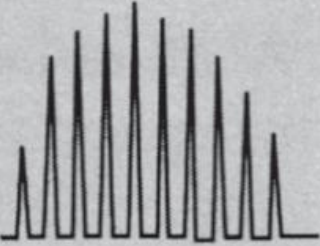


Понятие спектроскопии: общие положения

Цвет является важным свойством вещества. Цвет вещества связан с его поглощающими или отражающими свойствами. Человеческий глаз видит цвет, дополнительный к поглощенному.



Понятие спектроскопии: общие положения

| Атомы | Молекулы | | |
|---|--|---|---|
| Линейчатый спектр | Полосатый спектр | Полосатый спектр | Линейчатый спектр |
|  |  |  |  |
| Электронное возбуждение | Колебание | Вращение | |
| УФ- и видимая области спектра | ИК-область спектра | Микроволны | |

Фотон (квант света, энергия) переводит вещество из одного (энергетического) состояния в другое.

Свет поглощается порциями (квантами) на резонансной частоте (длине волны), соответствующей энергии перехода.

Понятие спектроскопии: общие положения

Объединение атомов в молекулы создает уникальные энергетические состояния и, как следствие, уникальные спектры переходов между состояниями.

Молекулярные спектры могут быть связаны с различными:

- Спиновыми состояниями электронов
- Вращательными состояниями молекул
- Колебательными состояниями молекул
- Электронными состояниями

Молекулярная спектроскопия

| | Применение |
|---------------------------------------|---|
| Спектроскопия в УФ- и видимой области | Изучает взаимодействия между веществом и энергией электромагнитного излучения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем ИК-диапазоне |
| ИК-спектроскопия | Изучает взаимодействия между веществом и энергией электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне |
| Люминесцентная спектроскопия | Изучает излучение электромагнитной энергии после взаимодействия между веществом и энергией электромагнитного излучения, как правило, в ультрафиолетовом и видимом диапазоне |

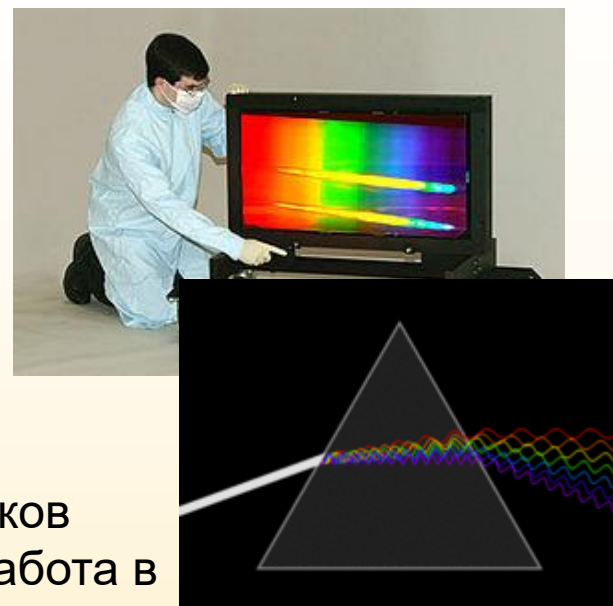
Спектр вещества – «отпечаток пальца»

Спектроскопия есть наука о взаимодействии между светом и материей.

Современные приборы для исследования спектров в УФ, видимой и инфракрасной областях спектра

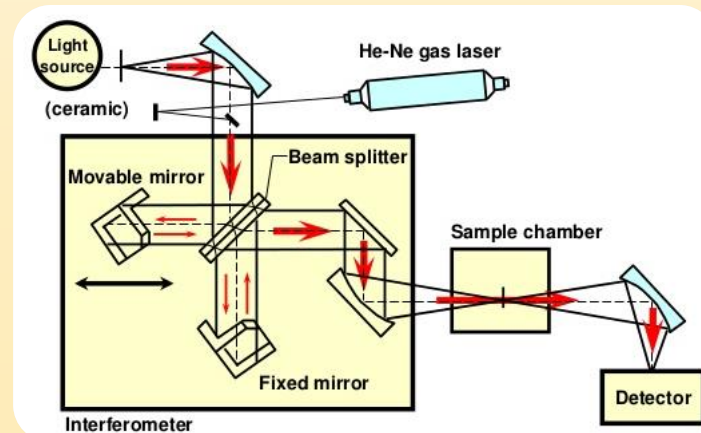
1. Дисперсионные спектрометры.

Используется физическое явление дисперсии, т.е. зависимость фазовой скорости от длины волны. Типичные примеры дисперсионных элементов – призма и дифракционная решетка. Основные преимущества – простота изготовления таких приборов. Однако существует множество недостатков дисперсионных спектрометров, такие как плохая работа в области длинных волн, низкое спектральное разрешение и др.



2. Интерференционные приборы. Фурье-спектрометры.

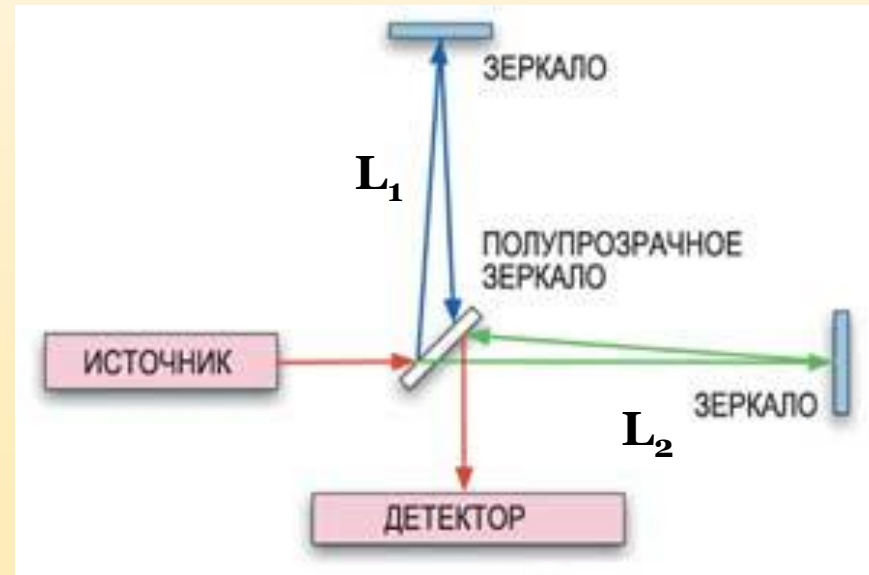
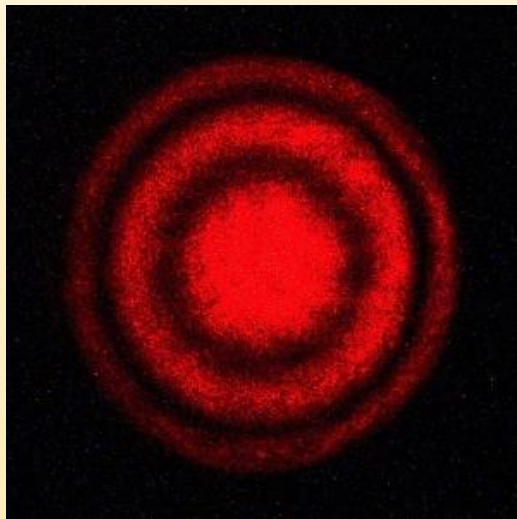
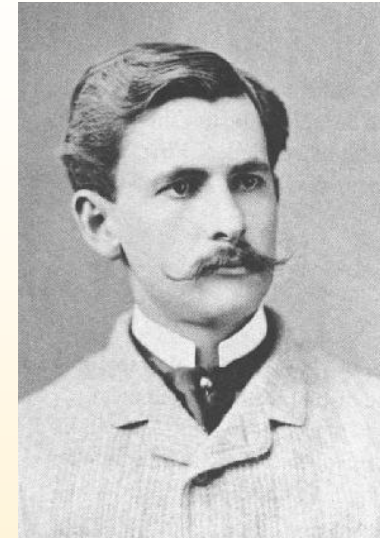
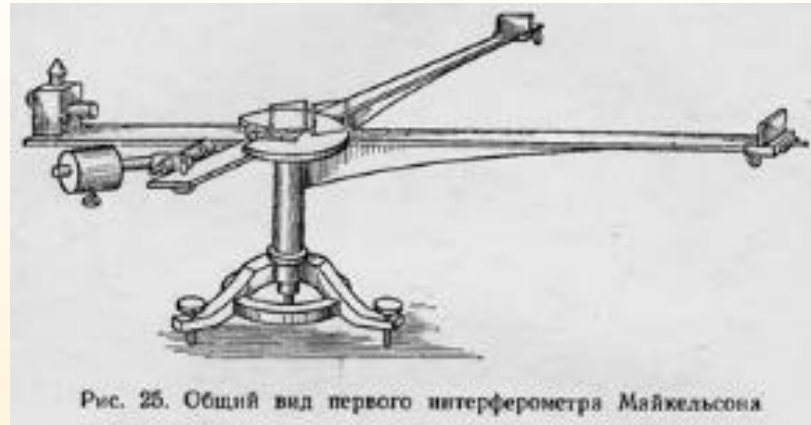
«Сердцем» фурье-спектрометра является интерферометр Майкельсона. Несмотря на более сложное устройство, дороговизну таких приборов, они используются практически повсеместно: в фармакологии, биологии, в химическом производстве, в аналитических и научных лабораториях.



Майкельсон. Экскурс в историю.

1881 год, опыт Майкельсона.

Интерферометр
для определения
разницы
скорости света
по- и против
направления
вращения
планеты Земля



Майкельсон. Экскурс в историю.

Майкельсон замечает, что его прибор может быть пригоден для спектроскопических исследований

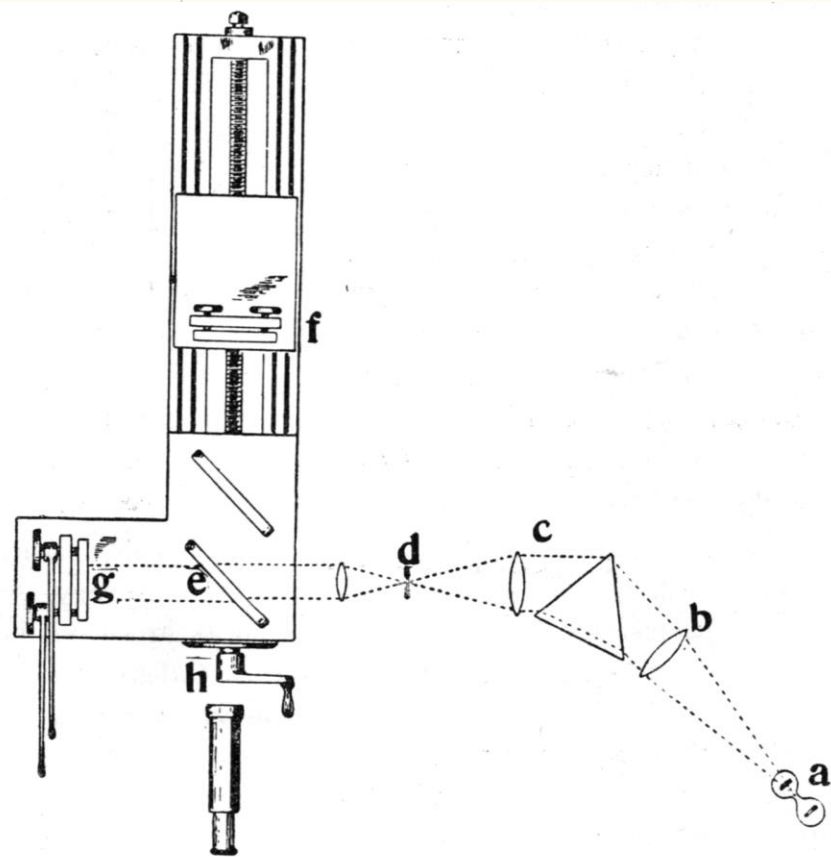
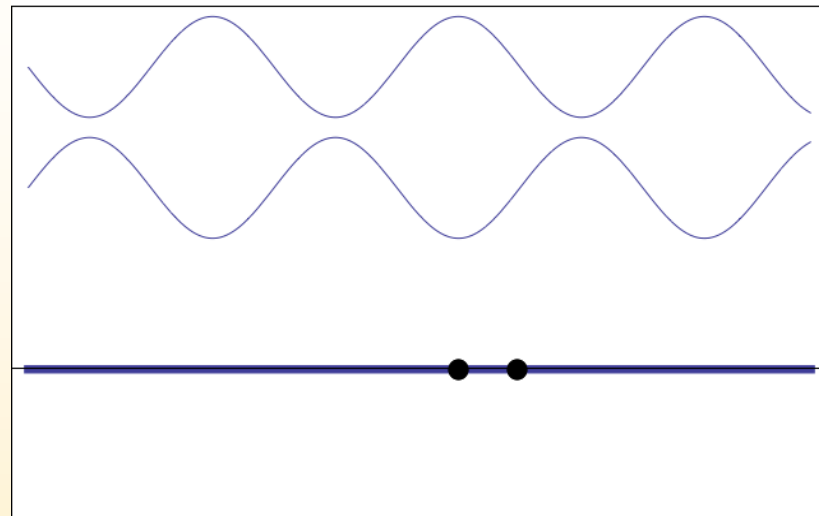


Рис. 61.

Интерференция двух волн:



Интерферограмма:



Майкельсон. Экскурс в историю.

Майкельсон замечает, что его прибор может быть пригоден для спектроскопических исследований

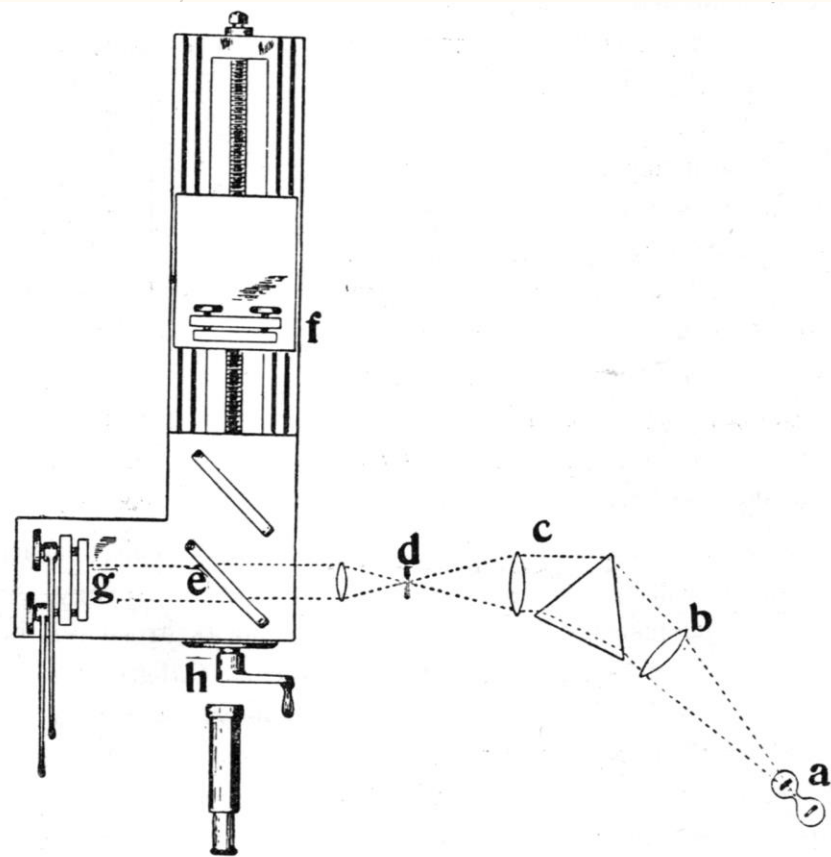


Рис. 61.

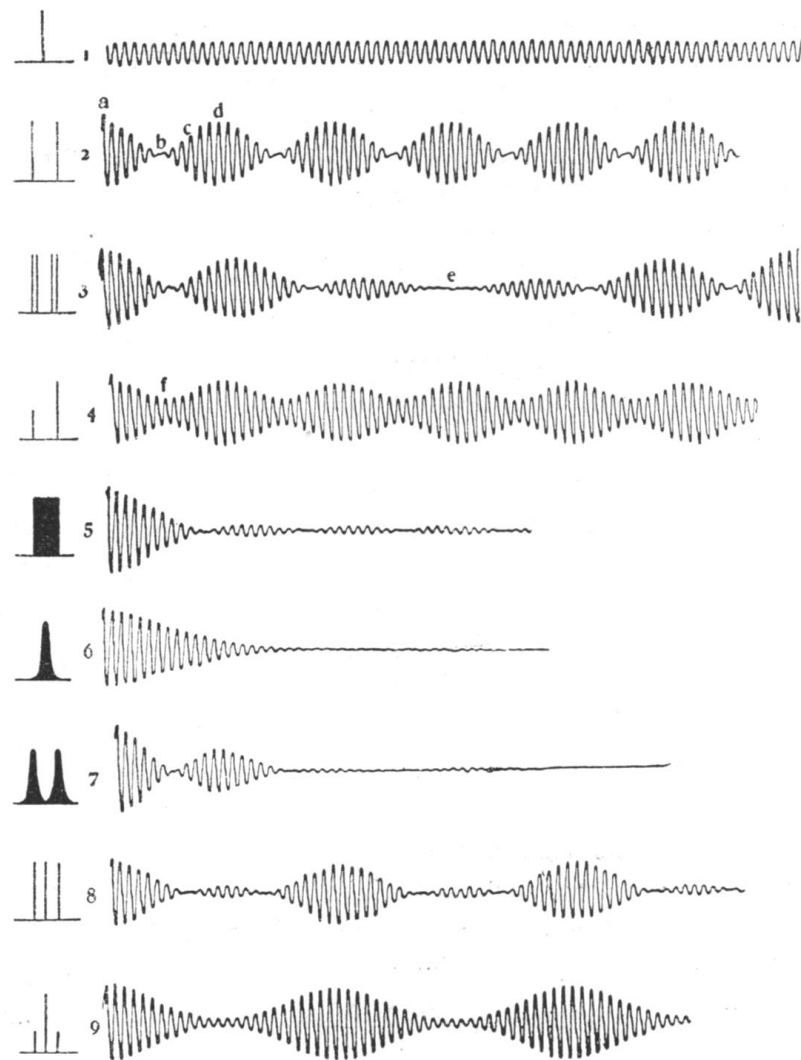
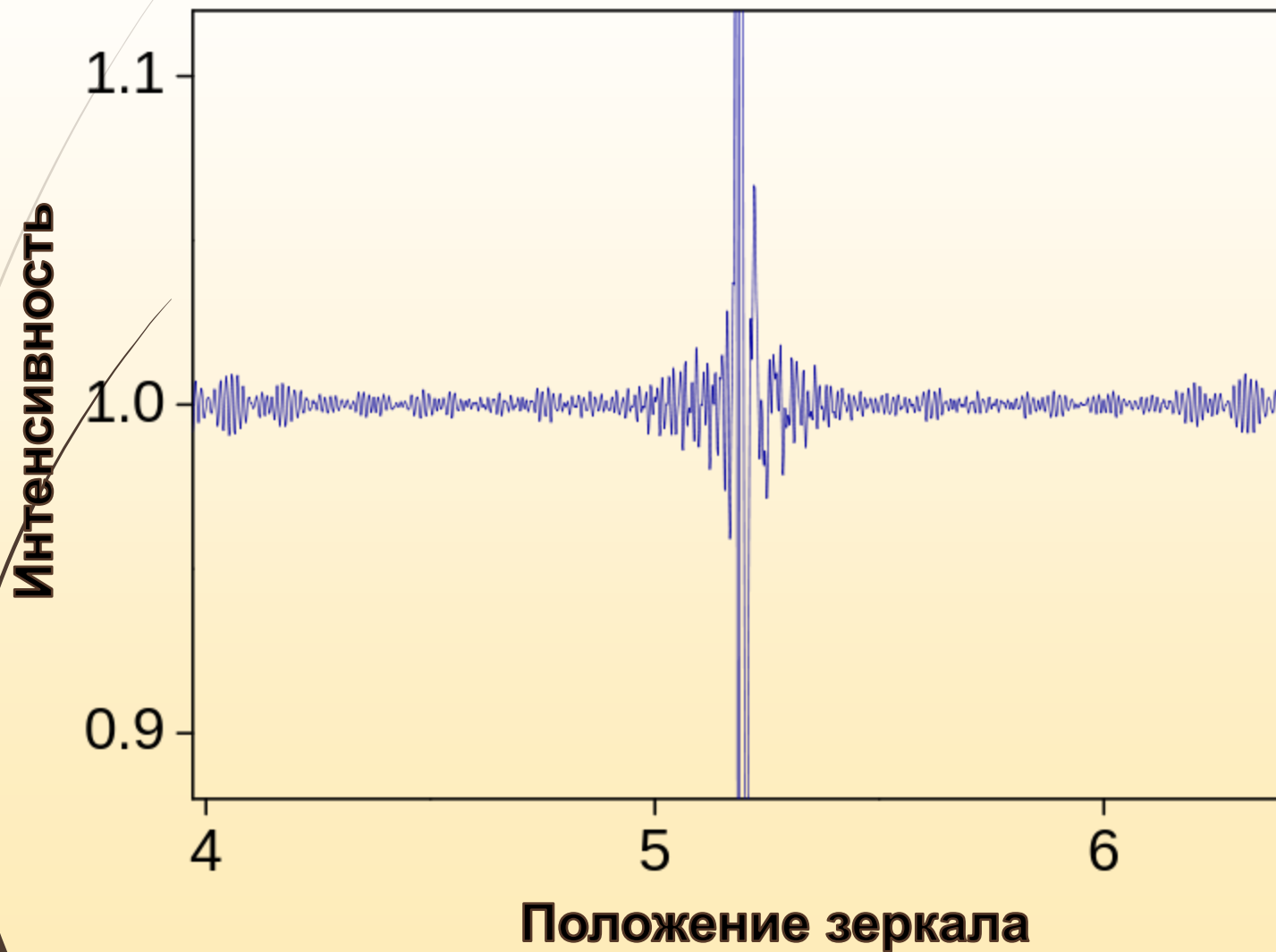


Рис. 58.

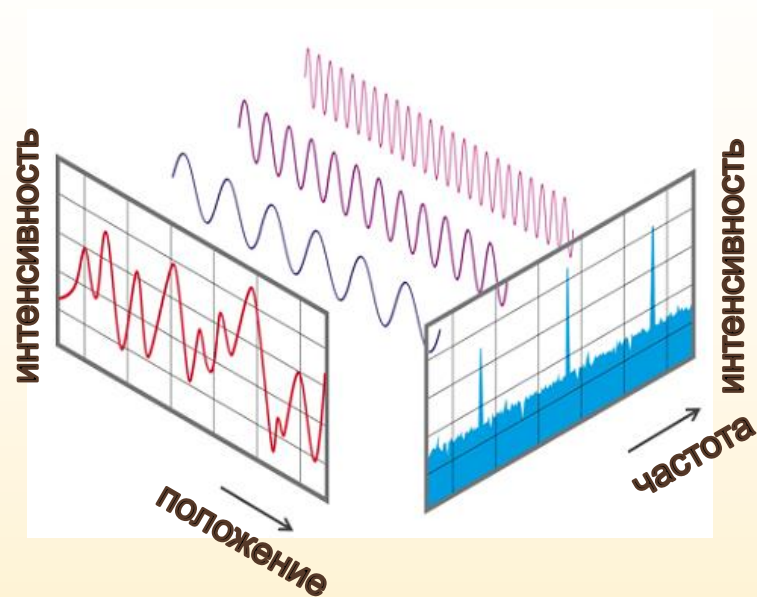
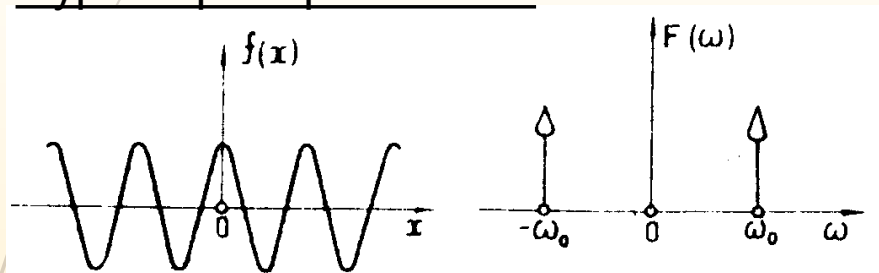
Интерферограмма сложного спектра



Фурье-преобразование

$$g(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) e^{-i\omega x} dx$$

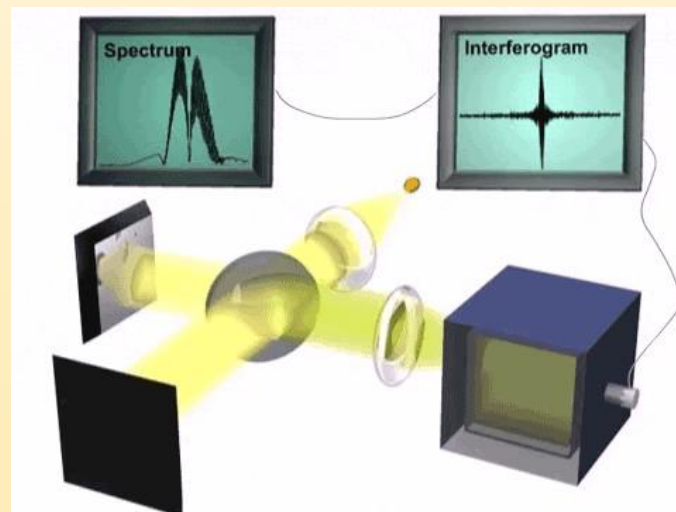
Фурье-преобразование



Примеры использования ФП:

- MP3 
- JPG  
- AVI 

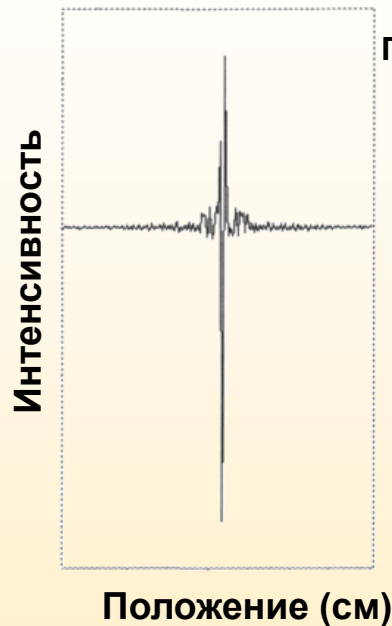
Требует больших компьютерных мощностей



Фурье-спектрометр

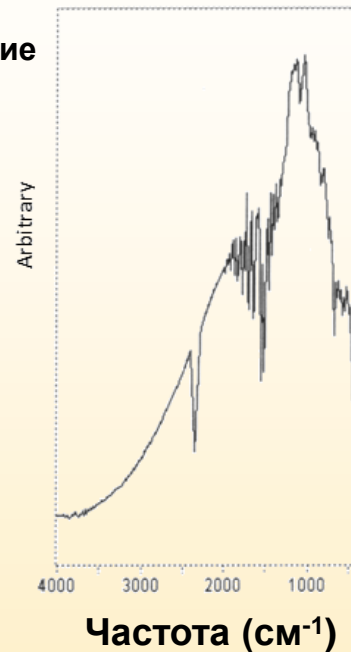


Интерферограмма



Преобразование
Fourier transform
Фурье

Спектр



Спектральное разрешение = $1/2L$

$L = 0.5 \text{ см} \Rightarrow \Delta\nu = 1 \text{ см}^{-1}$ и $\Delta\lambda = 1 \text{ \AA}$ (при длине волны 1 мкм)

$L = 500 \text{ см} \Rightarrow \Delta\nu = 0.001 \text{ см}^{-1}$ и $\Delta\lambda = 0.001 \text{ \AA}$ (при длине волны 1 мкм)

Преимущества фурье-спектрометров

перед дисперсионными приборами

- **Скорость** - выигрыш Фелжета (т.к. все частоты регистрируются одновременно, то аналогичный спектр фурье-спектрометром может быть зарегистрирован с гораздо большей скоростью);
- **Светосила** - выигрыш Жакино, определяется отсутствием в приборе щелей (задерживающих в дисперсионных спектрометрах до 99,9% излучения), что дает значительный выигрыш в светосиле (~ в 100-200 раз). Позволяет уменьшить время регистрации спектров и отношение сигнал/шум, повысить разрешение и уменьшить габариты прибора.
- **Механическая простота** (движущееся зеркало интерферометра – единственная подвижная часть в приборе);
- **Внутренняя калибровка** (в фурье-спектрометре для калибровки точности длины волны используется HeNe-лазер. Такие приборы никогда не требуют пользовательской калибровки);
- Также фурье-спектрометры могут работать в широком диапазоне длин волн с очень высоким спектральным разрешением.

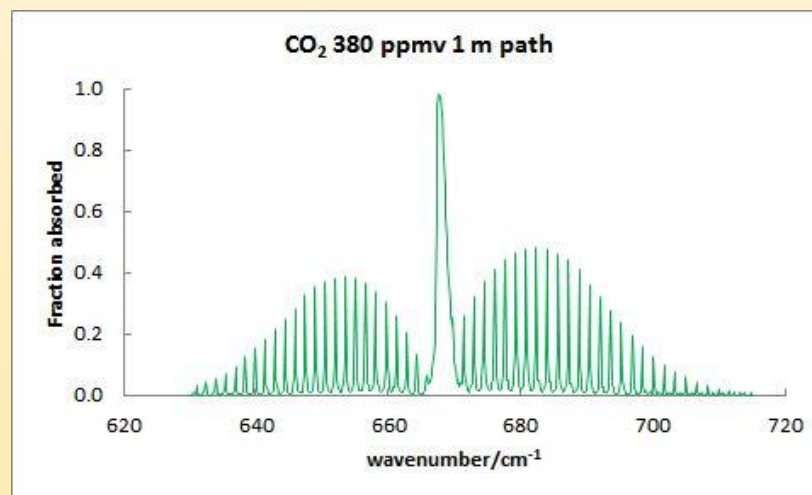
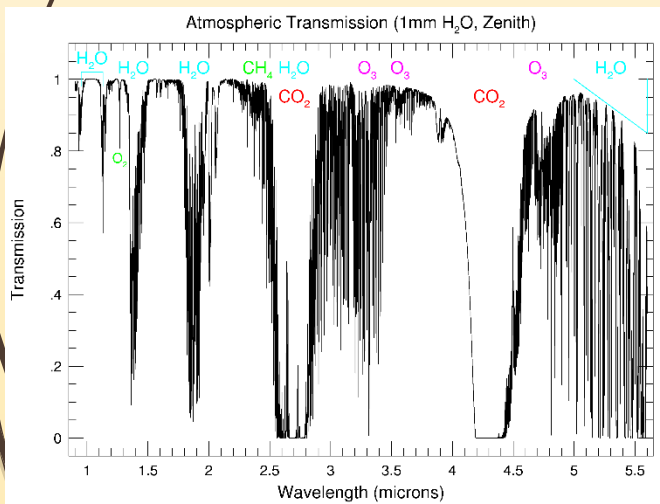
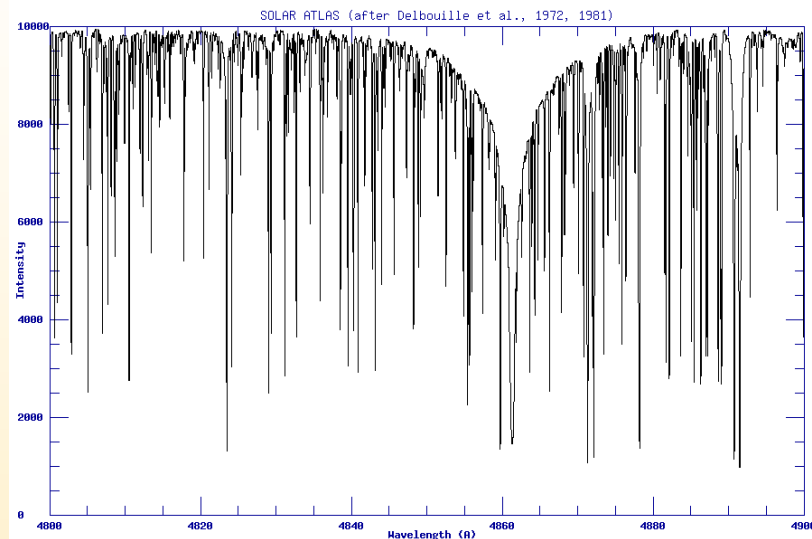
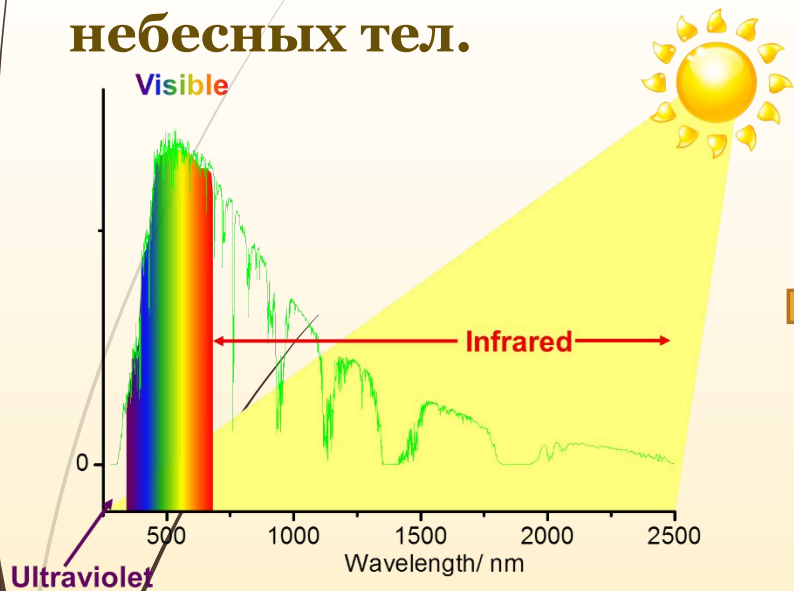
Спектрометр Bruker IFS 125 HR



- Вакуумный всеволновой Фурье-спектрометр высокого разрешения
- Спектральная область: $5 - 40000 \text{ см}^{-1}$ (от радиочастотного излучения до УФ)
- Спектральное разрешение: до 0.001 см^{-1} (перемещение зеркала на 5 метров)

Где используется спектроскопия высокого разрешения?

➤ В первую очередь, это задачи исследования газов и небесных тел.



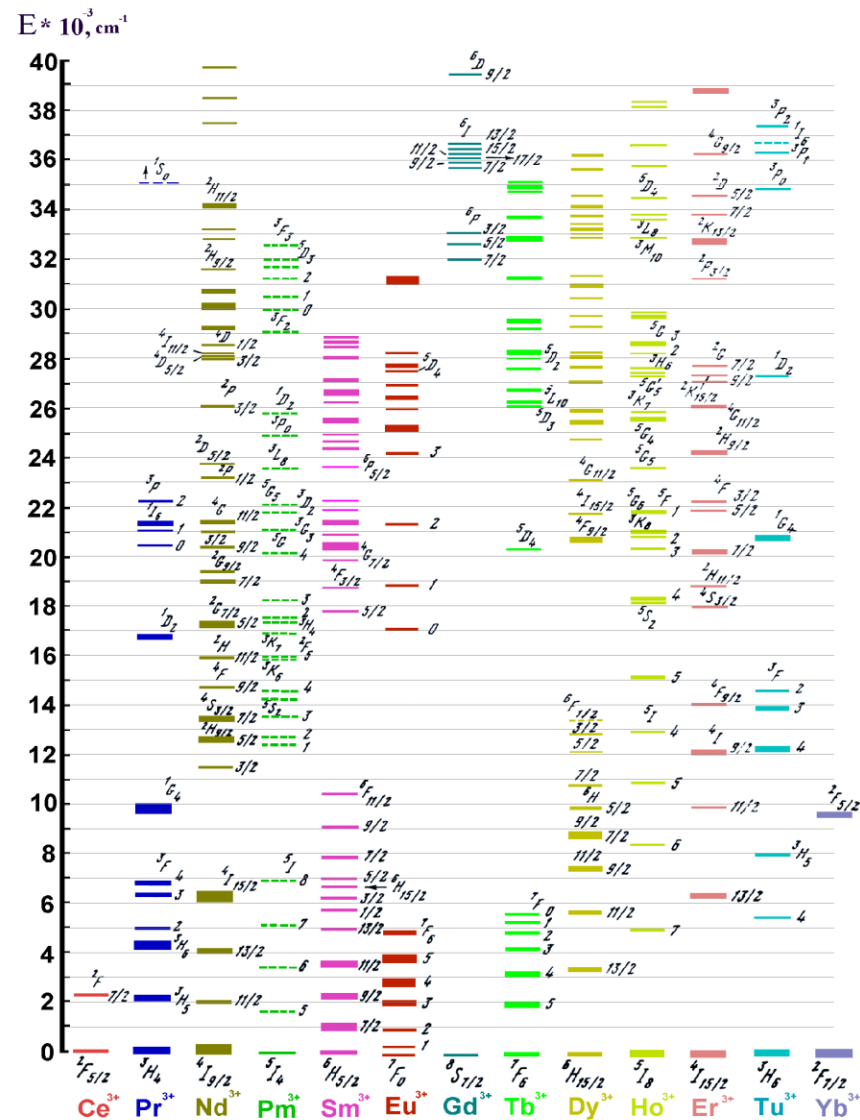
Высокое спектральное разрешение и твердое тело – возможно ли?

Обычными объектами спектроскопии высокого разрешения являются газы и астрономические объекты (такие, как солнце, звезды, туманности и др.).

Наша лаборатория специализируется, в первую очередь, на твердых телах, содержащих редкоземельные элементы: лазерные кристаллы, кристаллы для квантовой памяти, мультиферроики.

В редкоземельных элементах наблюдаются f-f переходы, запрещенные в свободном атоме, но частично разрешенные в кристаллах. Большое время жизни (Δt) энергетических состояний в таких элементах приводит к очень узким спектральным линиям ($\Delta E - \Delta E_0$) благодаря соотношению Гейзенберга:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$



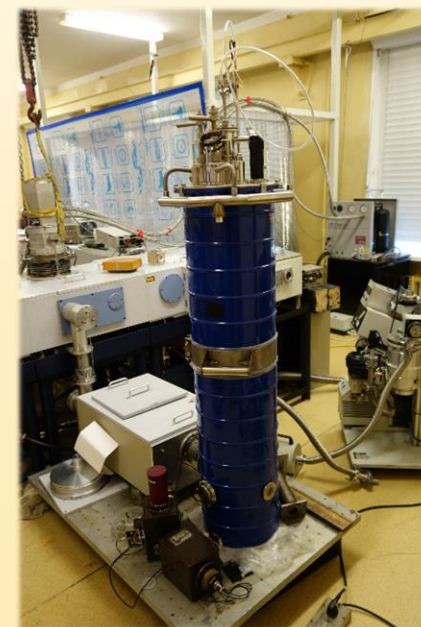
Криогенная техника

Гелиевый шахтный криостат
Температурный диапазон – 1.2 - 300 К
Температурная стабилизация – ± 0.1 К

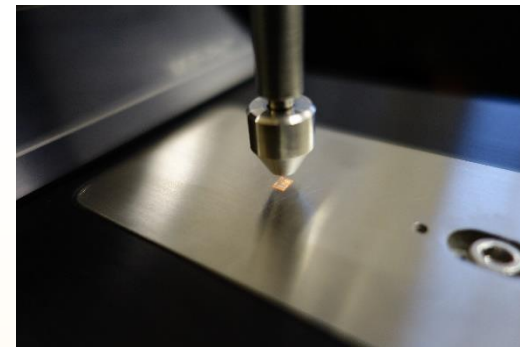


Криорефрижератор CryoMech ST403
Температурный диапазон – 3.2 - 300 К
Температурная стабилизация – ± 0.05 К
Магнитное поле – до 1 Т

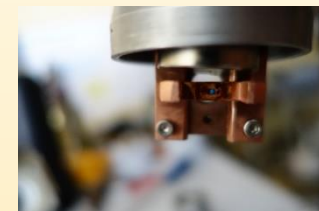
Оптический гелиевый криостат со сверхпроводящими магнитными катушками
Температурный диапазон – 1.6 - 300 К
Температурная стабилизация – ± 0.1 К
Магнитное поле – до 6 Т



Методы исследования



- **Исследование спектров пропускания высокого разрешения в широком спектральном и температурном диапазонах**
- **Спектроскопия комбинационного рассеяния света**
- **Низкотемпературная спектроскопия отражения**
- **Терагерцовая спектроскопия**
- **Поляриметрия**
- **Спектроскопия материалов, помещенных в сильные магнитные поля**
- **Люминесцентная спектроскопия высокого разрешения с лазерным возбуждением**



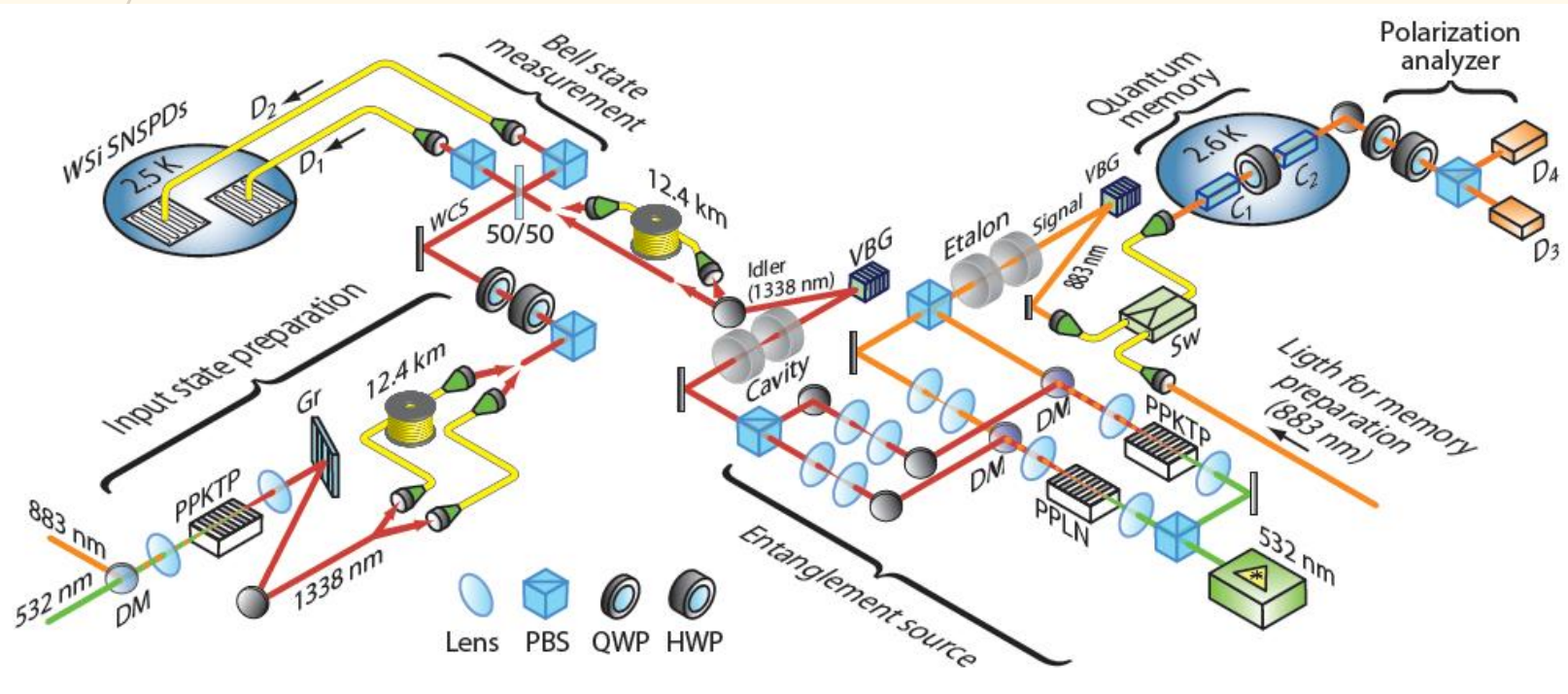
Квантовая информация

Теория квантовой информации

Квантовые вычисления → Квантовый компьютер

Квантовая криптография → Квантовая связь

Квантовый Интернет

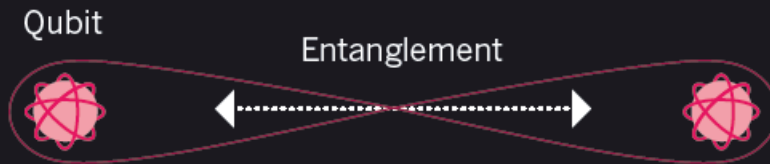


The quantum internet has arrived (and it hasn't)

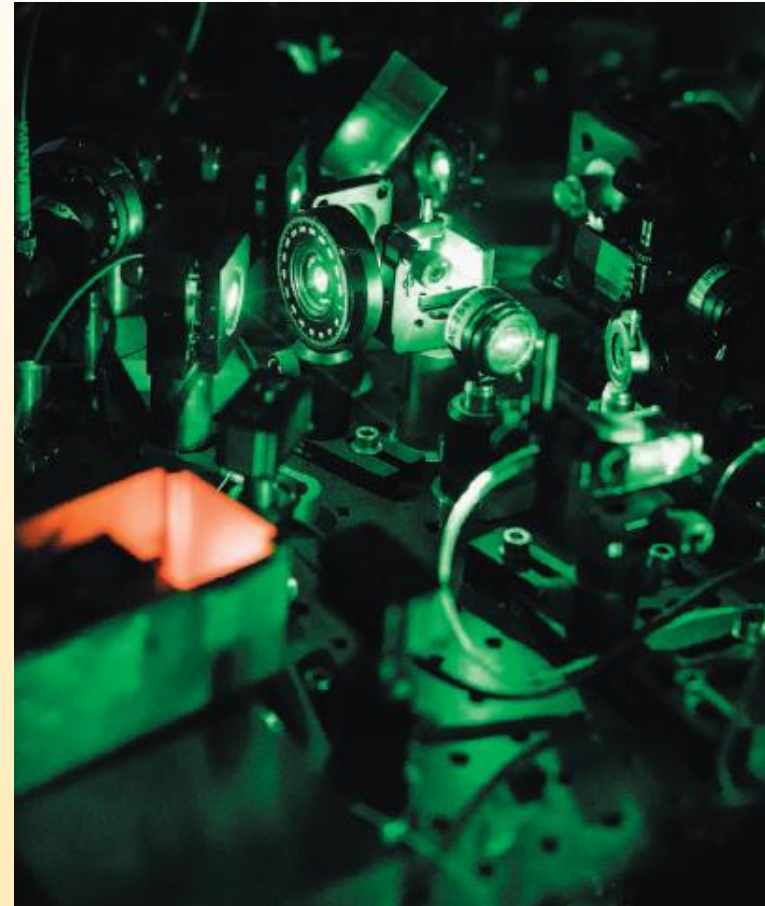
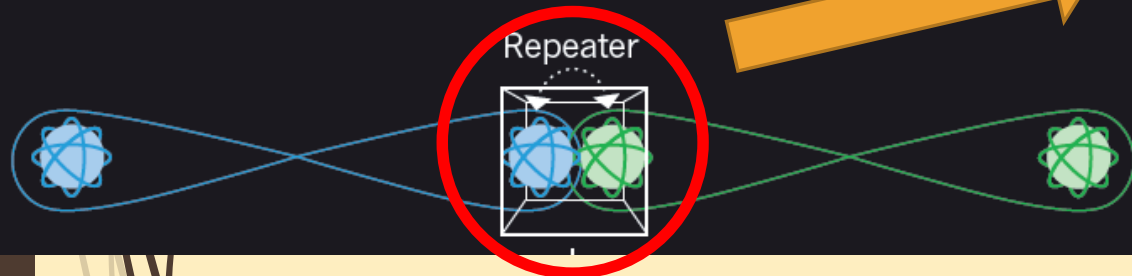
CREATING A QUANTUM INTERNET

Researchers expect that a fully quantum network will need to establish entangled links between any two users. Quantum information will then be teleported from one to the other, transferring the information without transmitting it over the network.

ESTABLISHING ENTANGLEMENT

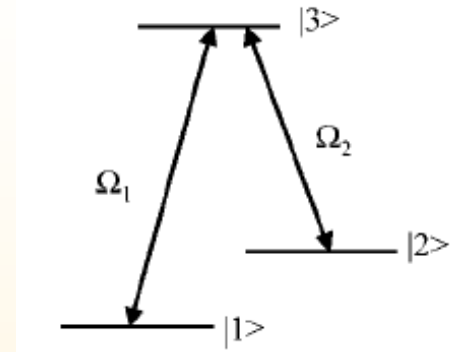
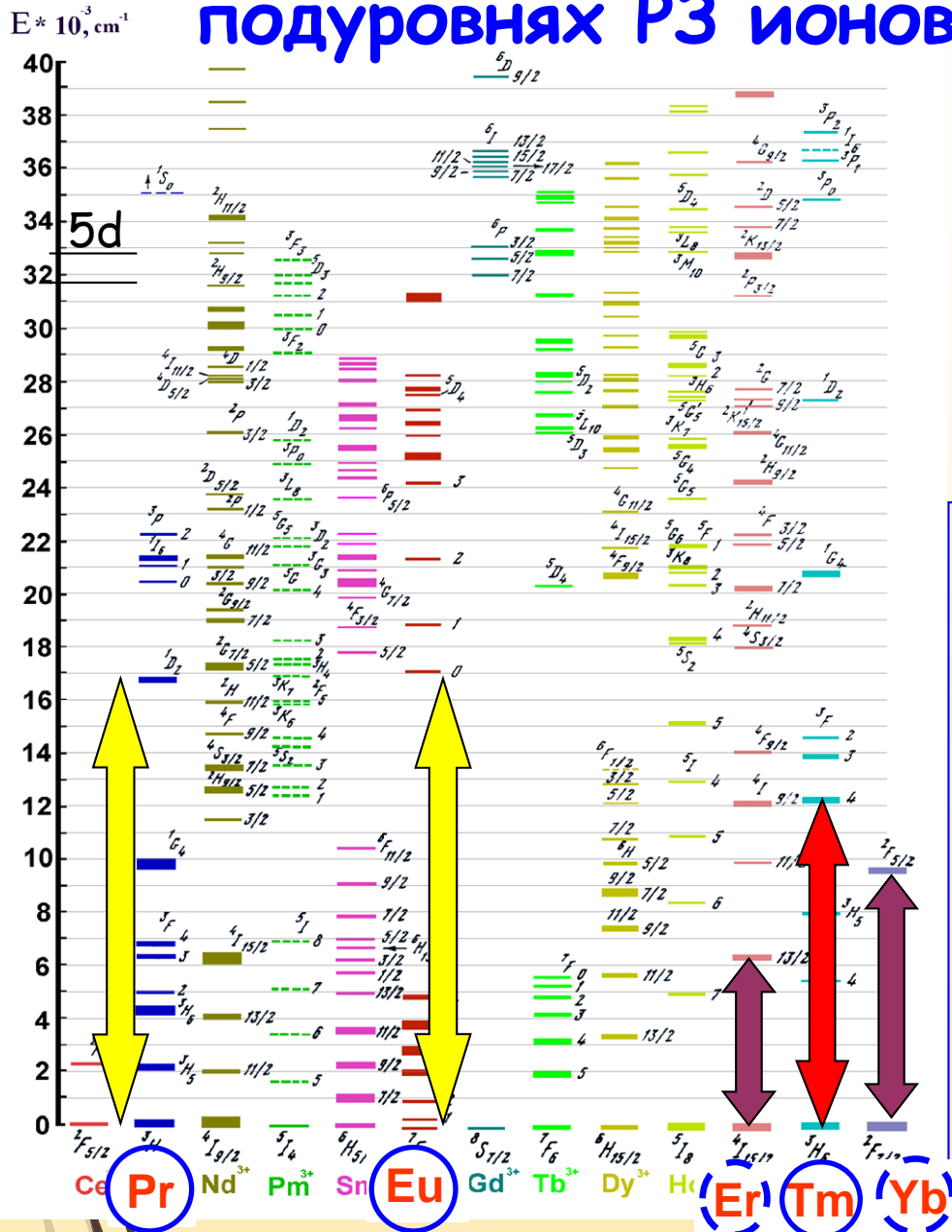


LONG-DISTANCE LINKS



Квантовый повторитель
Квантовая память !

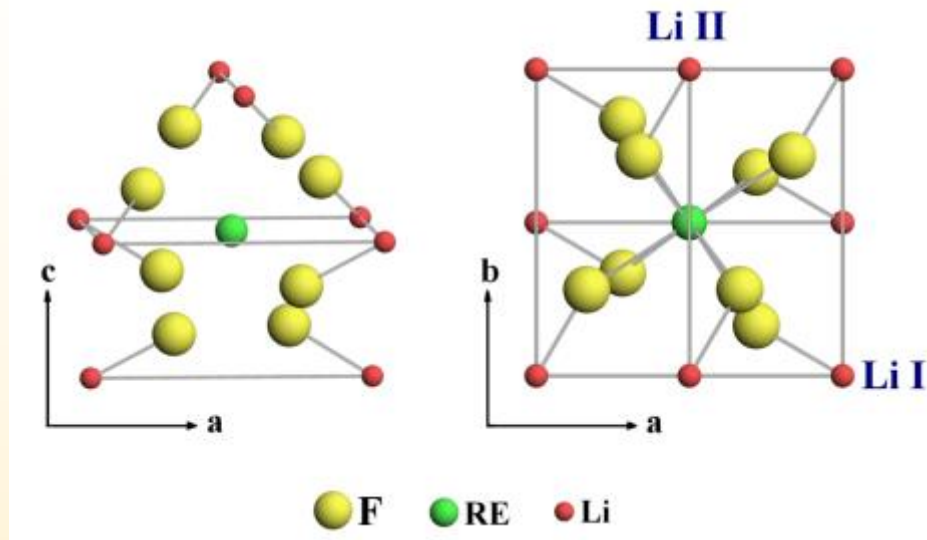
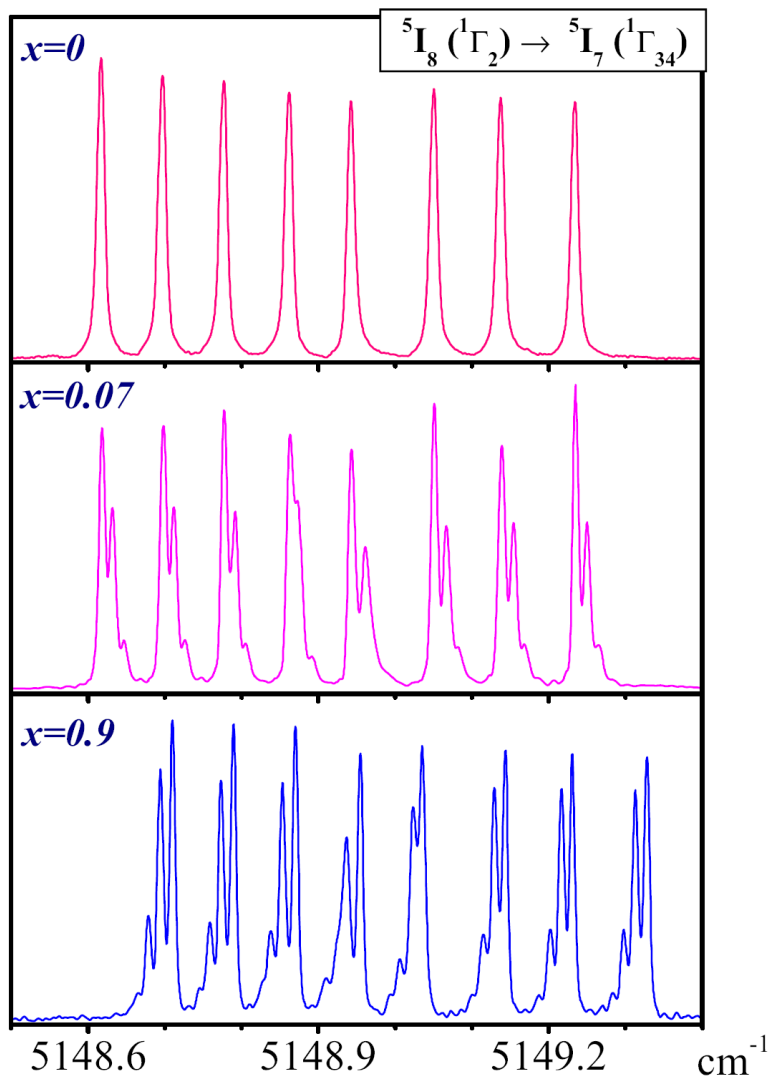
Трехуровневая Λ -схема на сверхтонких подуровнях РЗ ионов в кристаллах



- 1) Метастабильный уровень $|3\rangle$
- 2) Долгоживущие сверхтонкие состояния
- 5) Переходы должны быть доступны для высокостабилизированных лазеров
- 6) Сила осциллятора $10^{-6} - 10^{-9}$
- 4) СТС основного состояния ?
- 3) Коэффициенты ветвления ?

Изотопическая структура спектра

$^{165}\text{Ho}^{3+}$ в LiYF_4



$$P_N(n) = C_N^n x^n (1-x)^{N-n}$$

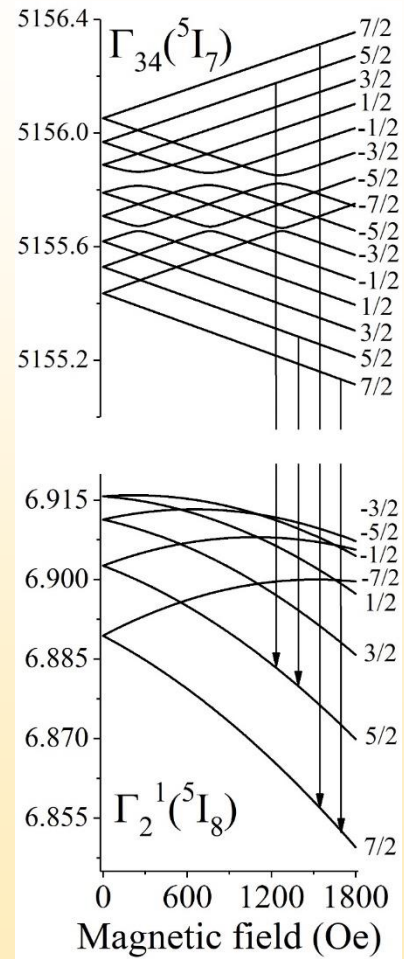
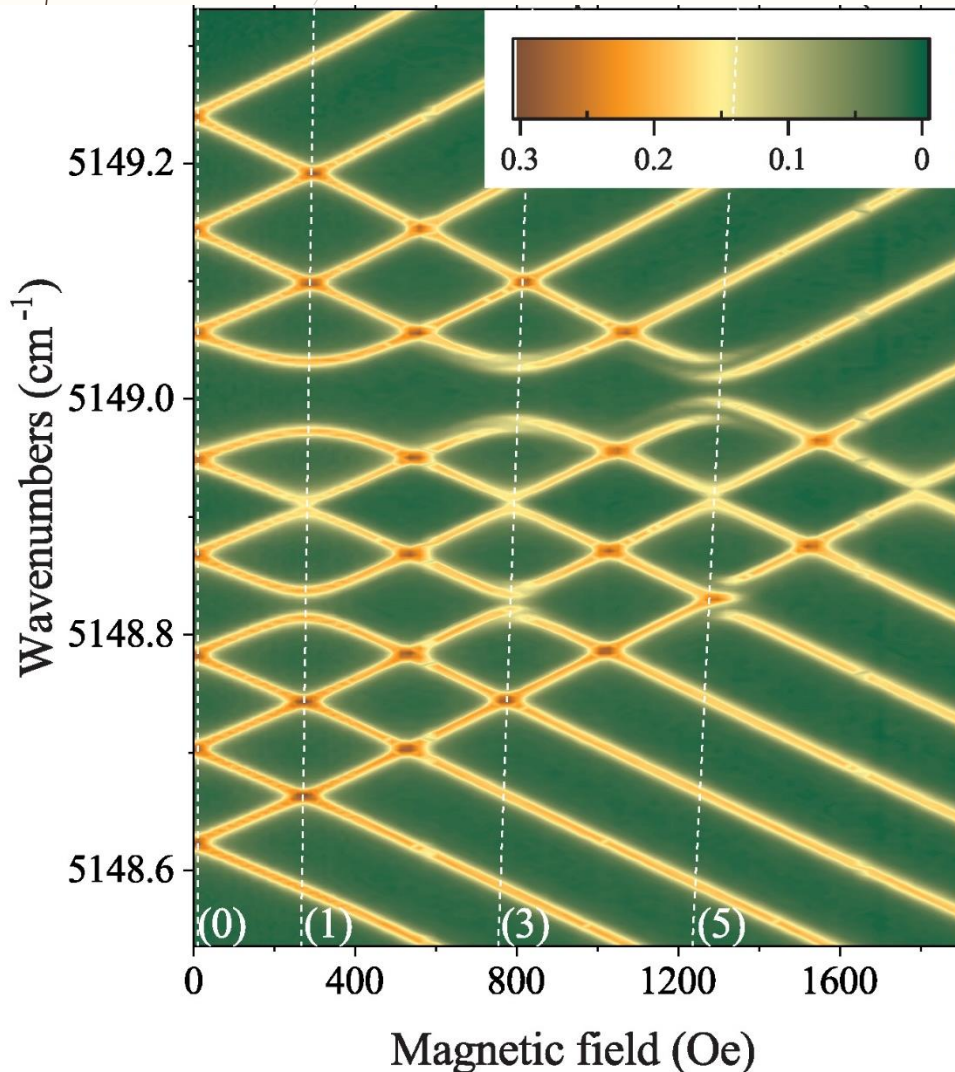
$$|\Delta R| \sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$$

[N.I. Agladze, M.N. Popova et al., SSSComm 1985]

[N.I. Agladze, M.N. Popova et al., PRL 1991]

Сверхтонкая структура в магнитном поле - антипересечения

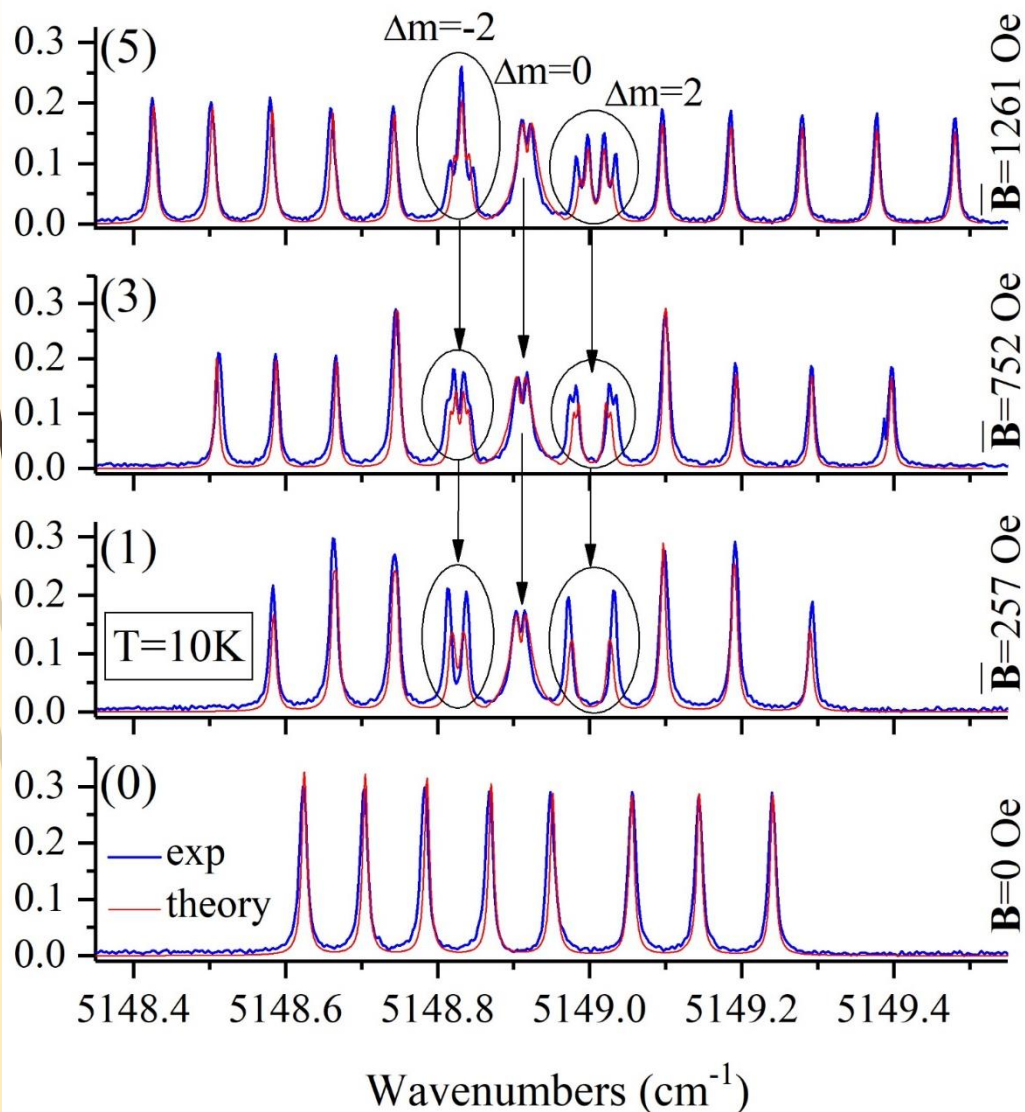
Зеемановское взаимодействие $\pm g_{\parallel} \mu_B B / 2$



Коррекции второго порядка в магнитном СТВ имеют ненулевые значения в случае $|\Delta m| = 2$:

$$\Delta E_m^{m+2} = (A_J^2 / 2) \left| \sum_k \langle \Gamma_{34}^+, m | J_+ I_- | \Gamma_2^k, m+1 \rangle \times [E(\Gamma_2^k) - E(\Gamma_{34})]^{-1} \langle \Gamma_2^k, m+1 | J_+ I_- | \Gamma_{34}^-, m+2 \rangle \right|$$

Теоретический расчет



Б.З. Малкин

Гамильтониан:

$$H = H_{\text{FI}} + H_{\text{CF}} + H_{\text{HF}} + H_Q + H_Z + H_{ed}$$

H_{FI} – гамильтониан свободного иона

H_{CF} – кристаллическое поле симм. S_4

H_{HF} – магнитодипольное и

H_Q – квадрупольное СТВ

H_Z – Зеемановское взаимодействие

H_{ed} – электрон-деформационное вз-е.

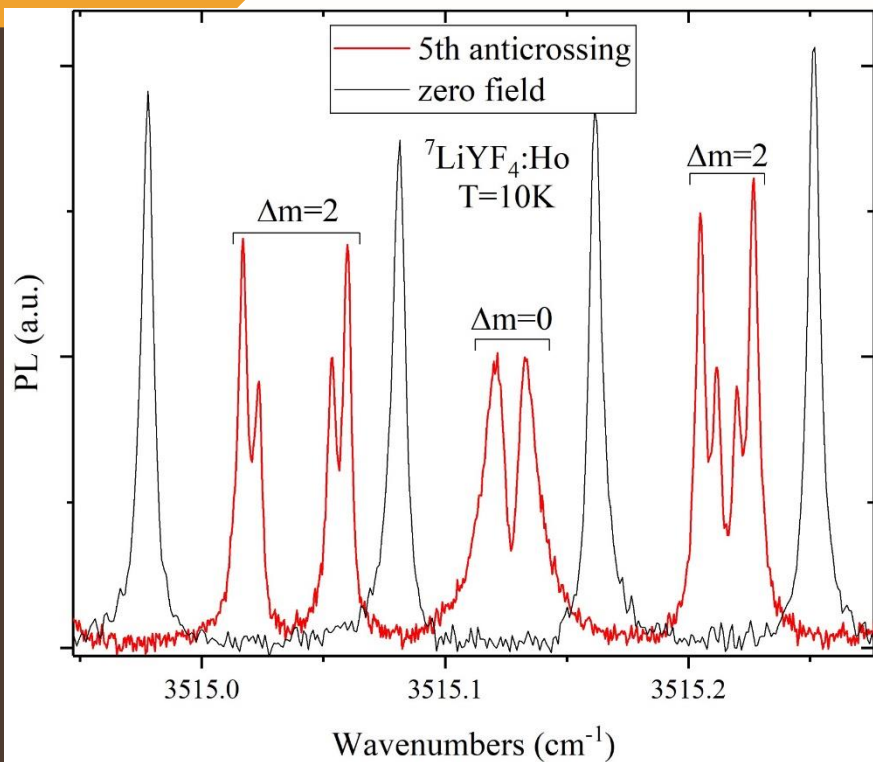
Функция распределения деформаций

$$\xi = C_d |\Omega| / 48\pi = 1.5 \cdot 10^{-6}$$

(здесь Ω – сила дефекта и C_d – концентрация дефектов на единицу объема).

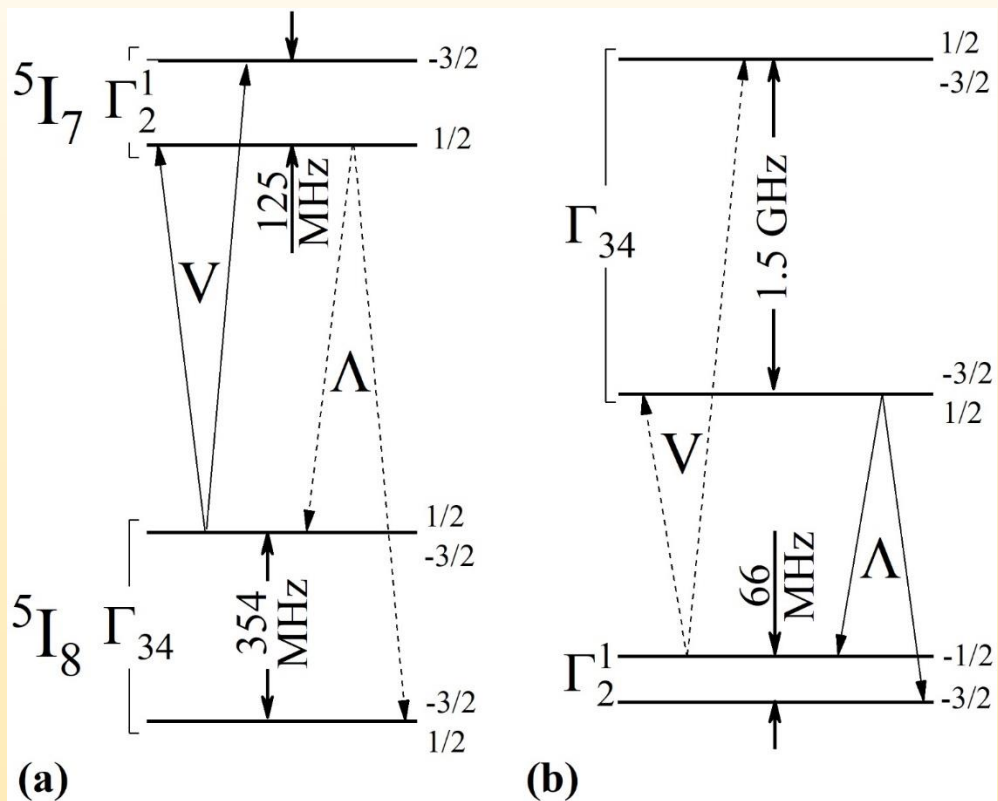
[K.N. Boldyrev et al., PRB RC 2019]

Применение наблюдаемых эффектов



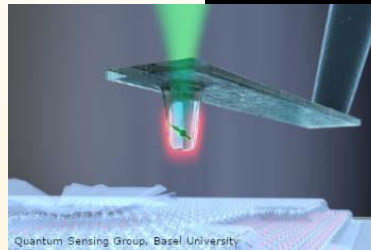
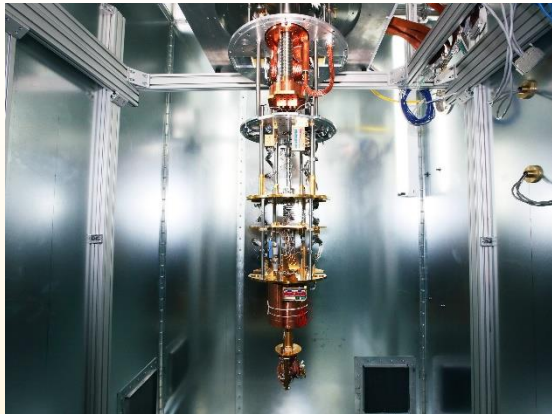
При антипересечении $\Delta m=0$ наблюдается расщепление, связанное с очень малыми случайными деформациями в кристалле. Возможно использовать для сверхчувствительного анализа качества кристаллов.

Антипересечение высоких порядков с $\Delta m=2$, кроме расталкивания дает дополнительное расщепление сверхтонкой структуры на эквидистантные подуровни. Использование для оптической квантовой памяти.



Квантовая сенсорика

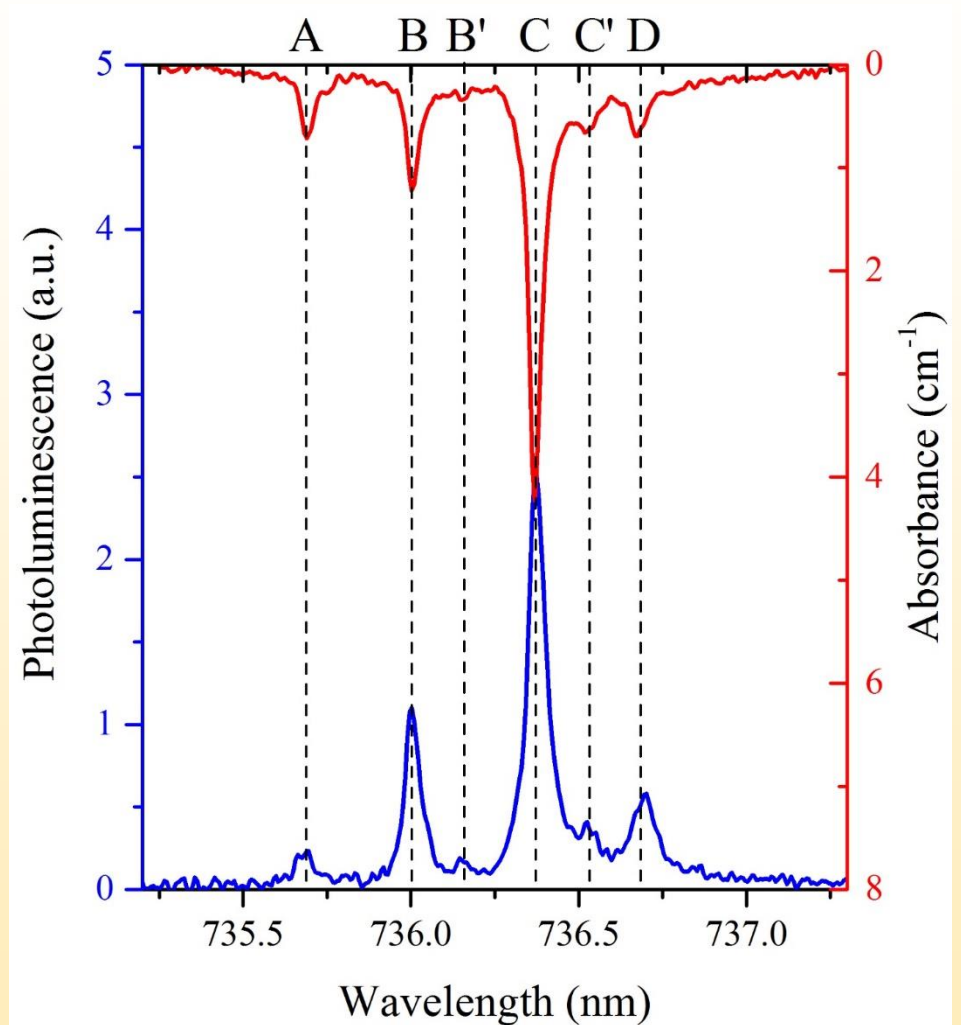
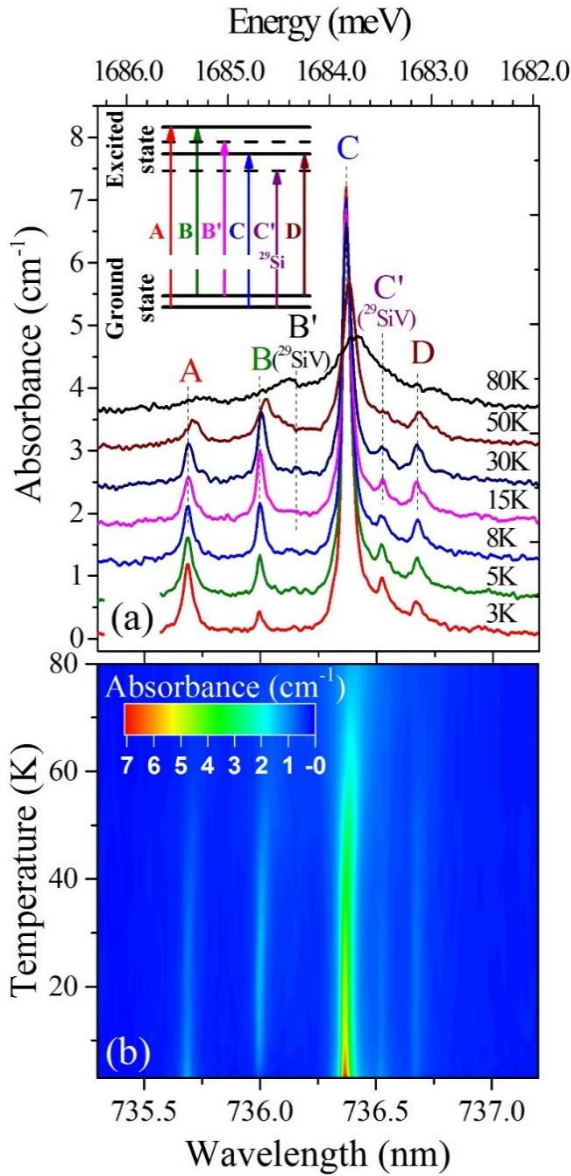
Квантовые системы чрезвычайно чувствительны к возмущению внешней среды.



Наиболее изученным материалом для квантового сенсора является алмаз. На NV-центрах в алмазе продемонстрированы высокочувствительные квантовые сенсоры магнитного и электрического полей, напряжений, температуры и давления. Однако сейчас рассматриваются другие центры окраски, такие как SiV, GeV, SnV, а также центры окраски в материалах, близких к алмазу, например, в карбиде кремния. Все эти центры имеют множество преимуществ, в частности:

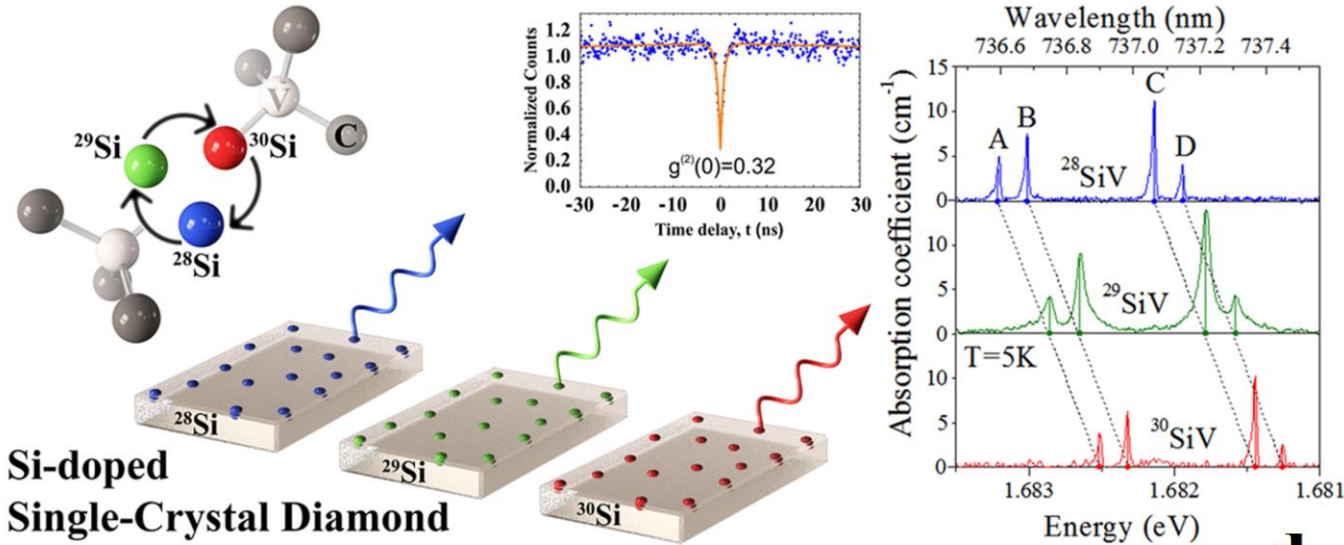
- длительное время когерентности даже при комнатной температуре;
- фотолюминесценция центров окраски наблюдается в от среднего ИК-диапазона до УФ;

Спектры поглощения и люминесценции центров SiV⁻ в изотопно-чистом алмазе ¹³C



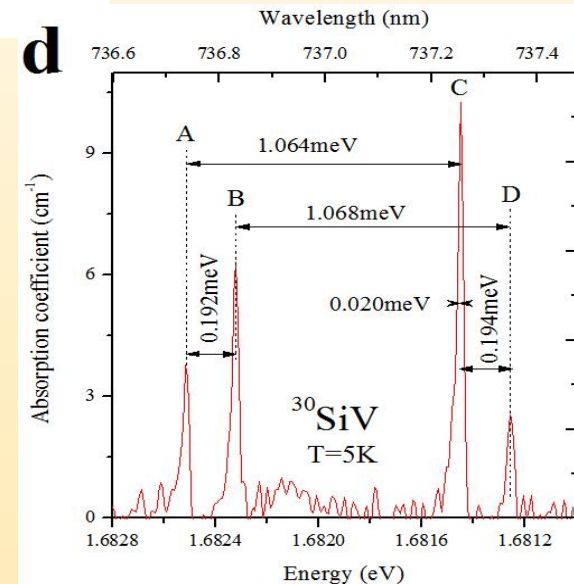
[V. Sedov, K. Boldyrev et al., PSSA 2017]

Спектры поглощения и люминесценции центров SiV^- , моноизотопных по кремнию

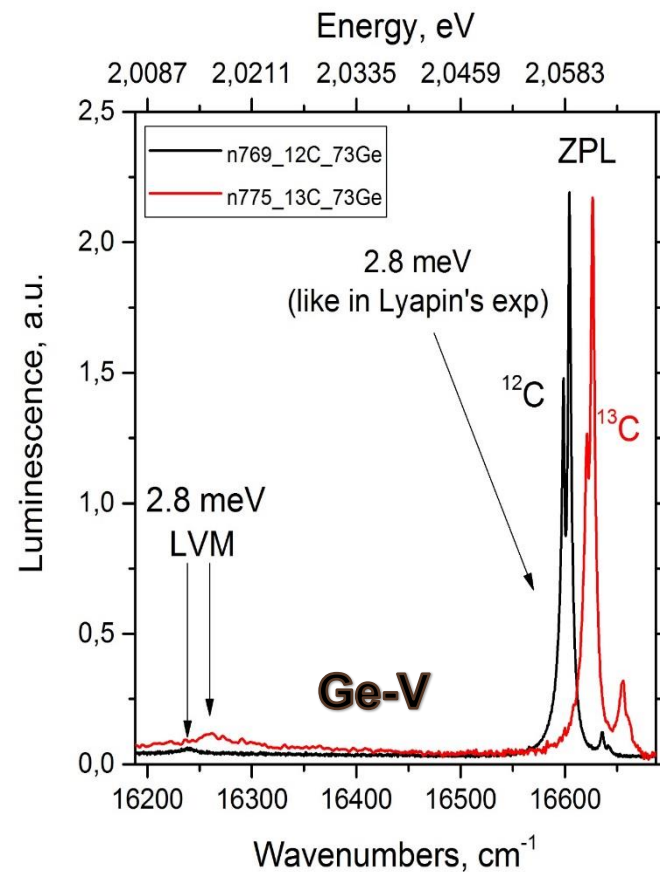
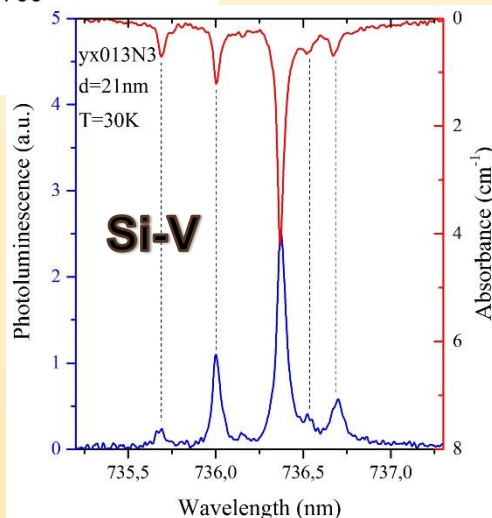
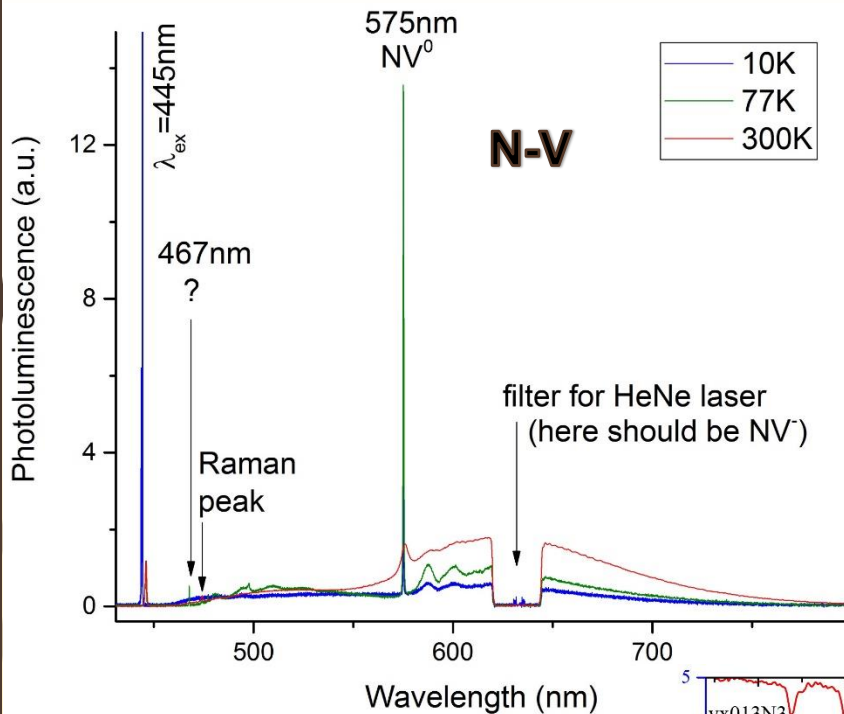


Si-doped
Single-Crystal Diamond

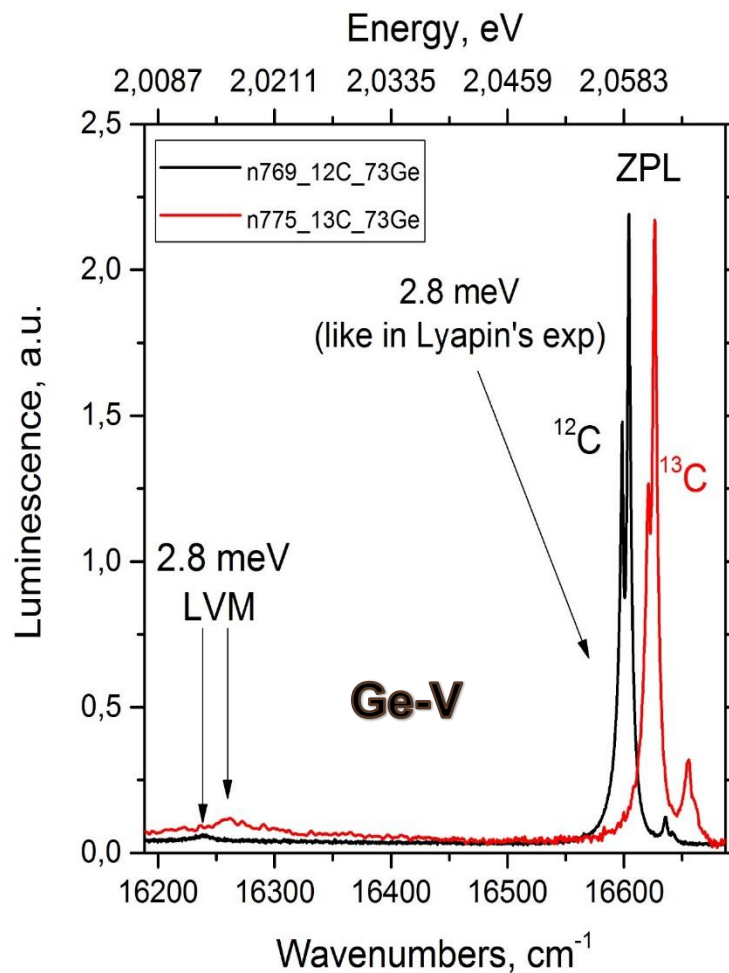
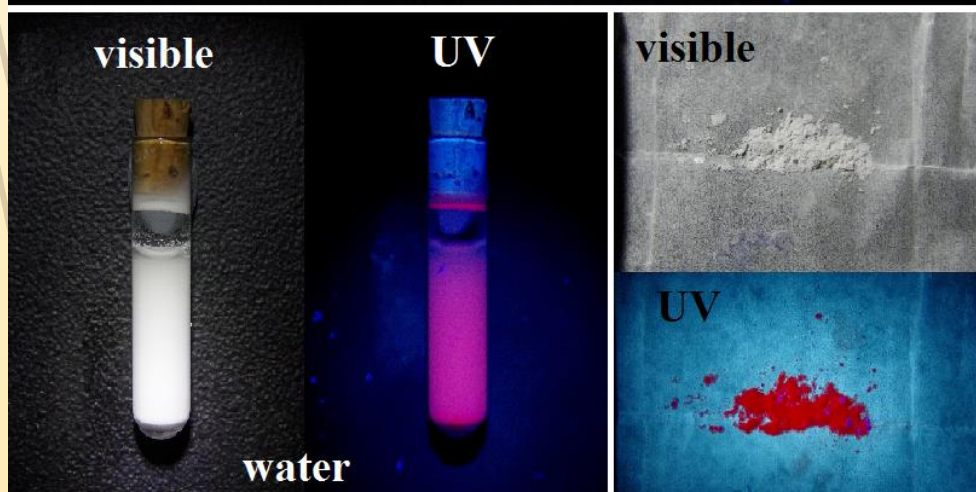
Наиболее узкие линии люминесценции и поглощения от ансамбля центров SiV^-



Спектры люминесценции различных центров в алмазе

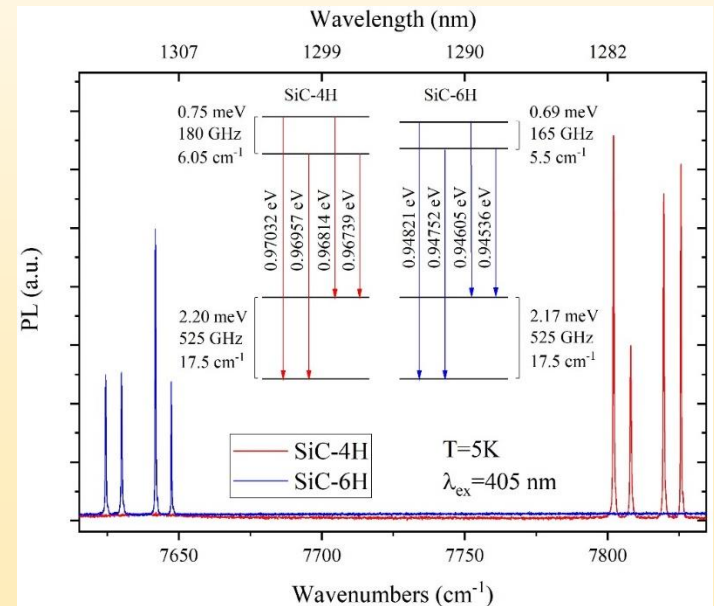
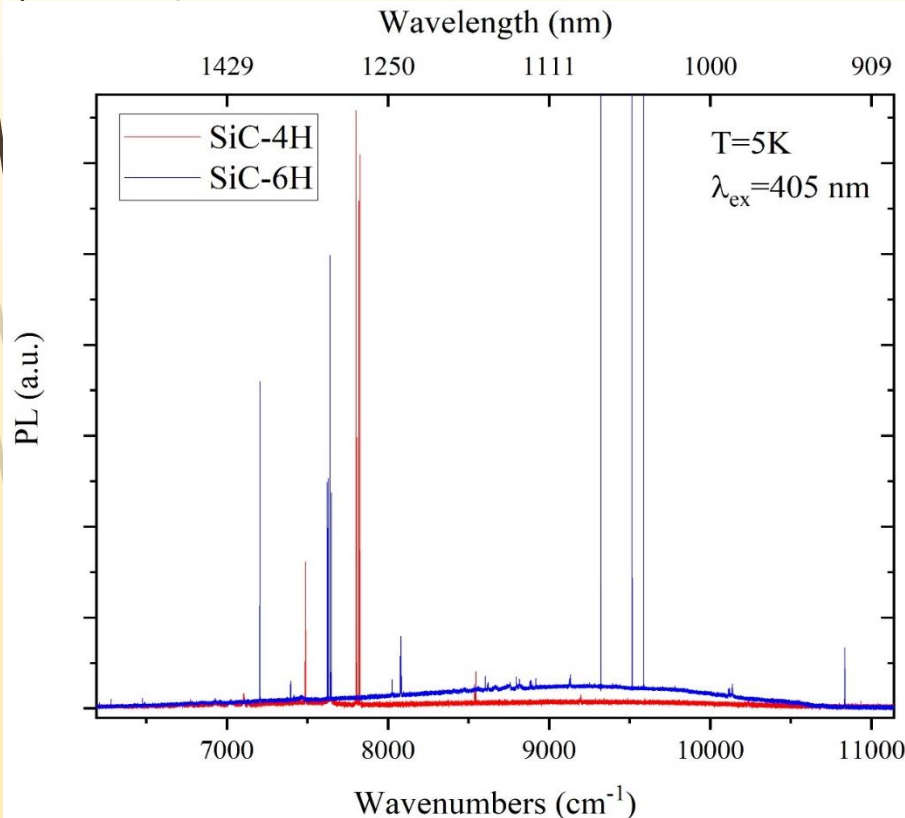
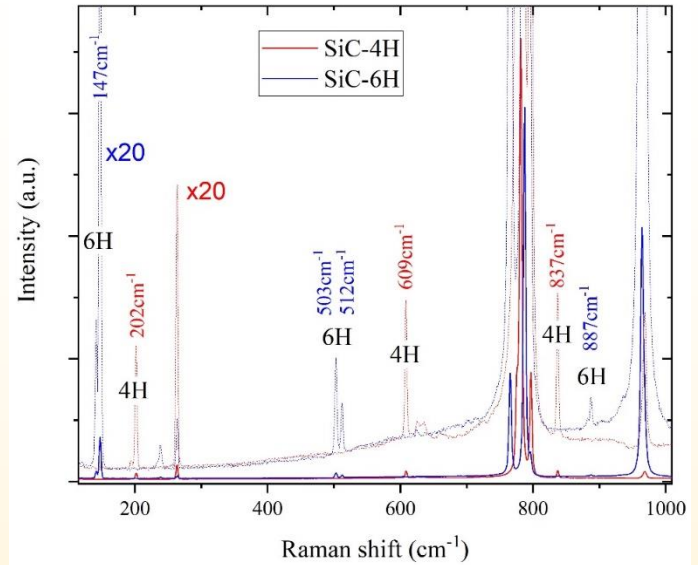
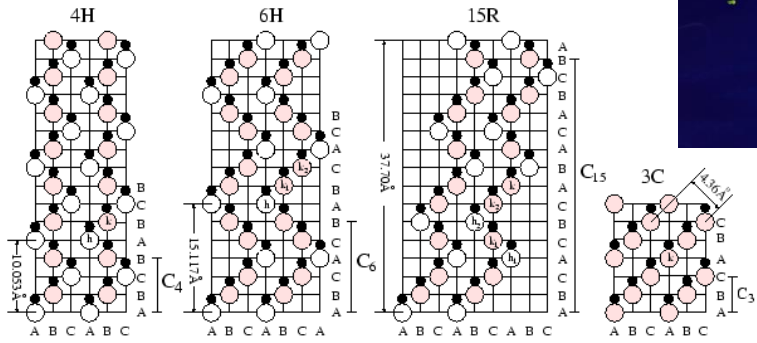


Спектры люминесценции различных центров в алмазе



[K.N. Boldyrev et al. JLum 2018]

Центры окраски в карбиде кремния

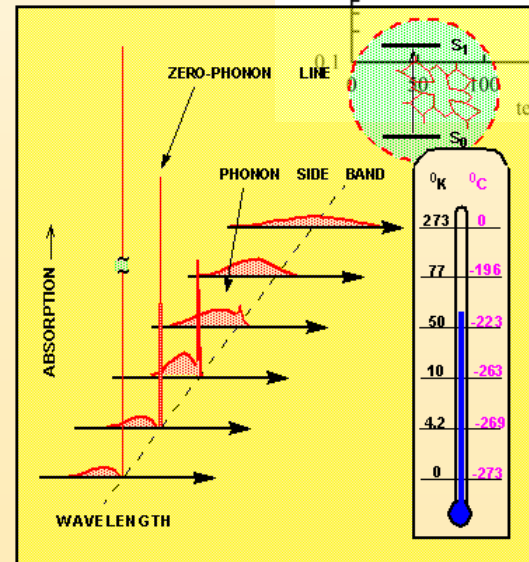
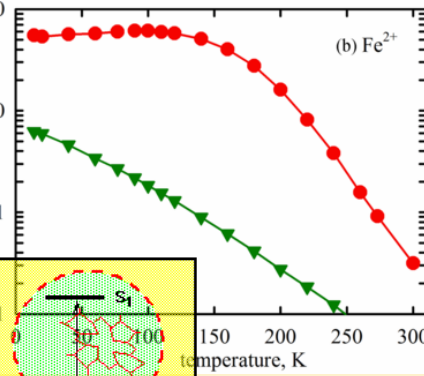
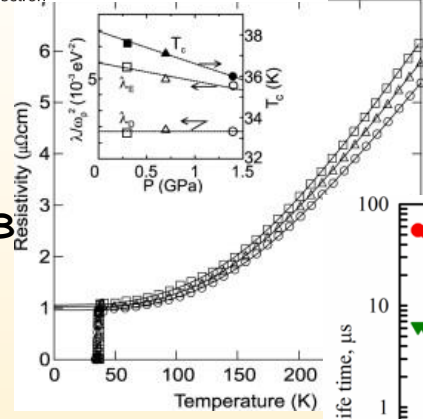
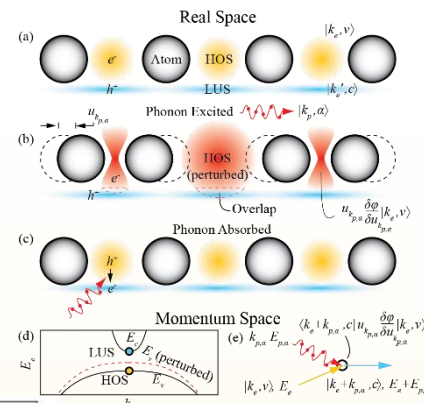
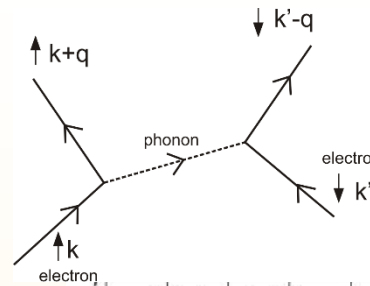


[K.N. Boldyrev et al. OptSpec 2021]

Электрон-фононное взаимодействие

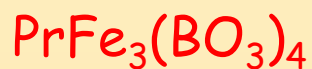
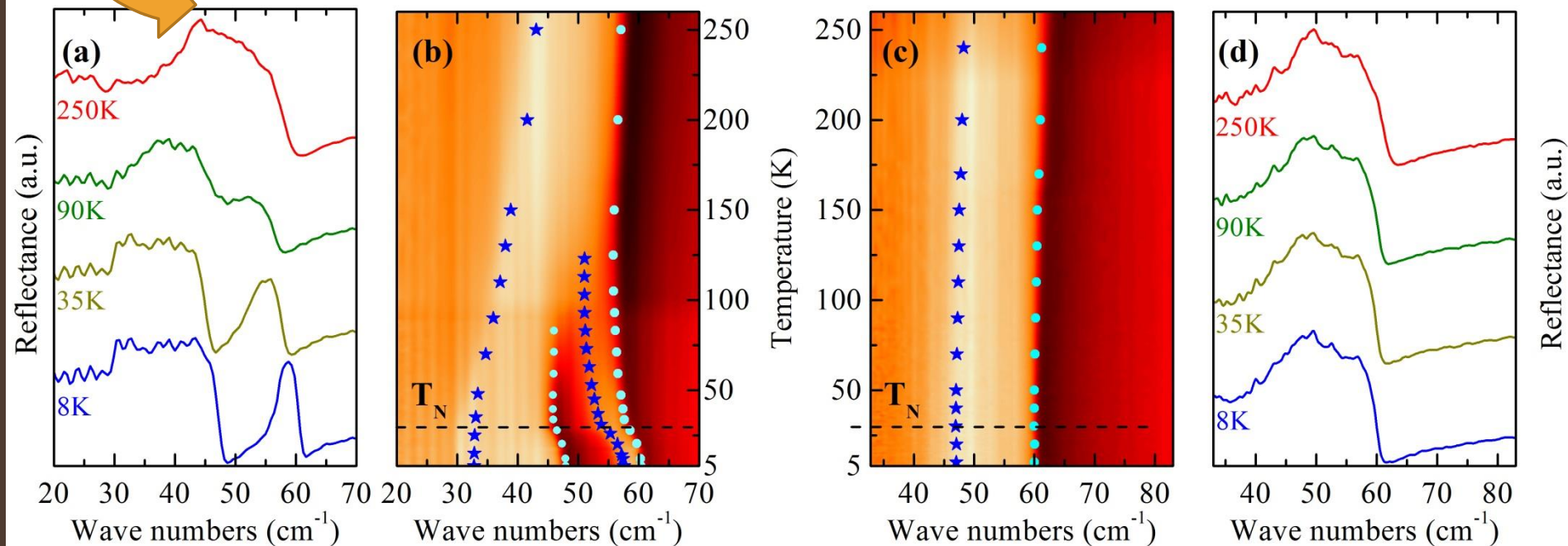
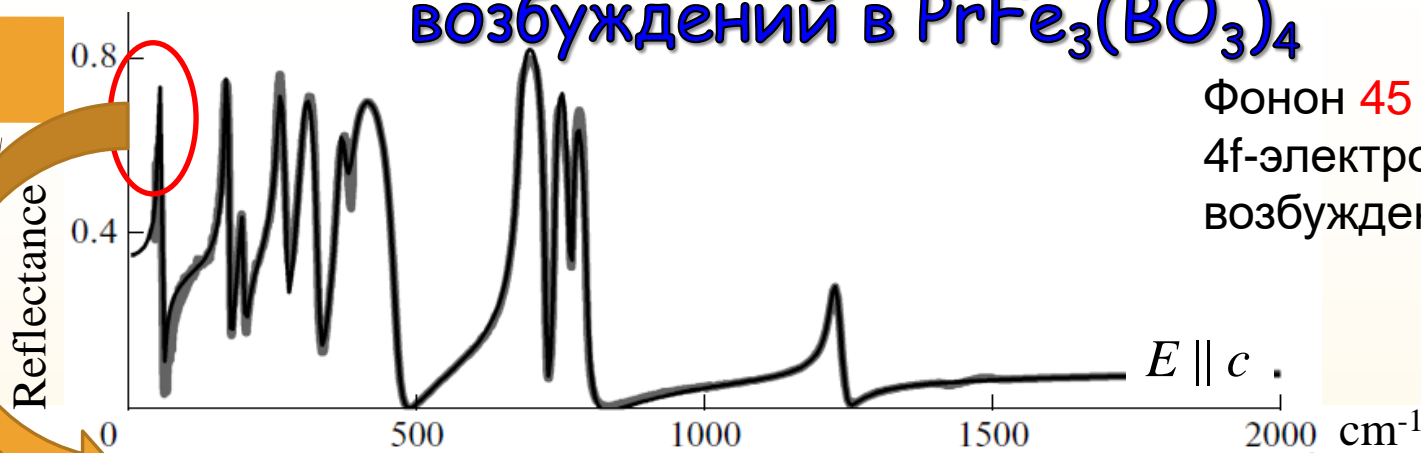
обуславливает ряд фундаментальных эффектов в твердых телах:

- классическая сверхпроводимость (образование Куперовских пар);
- приводит к различным типам эффекта Яна-Теллера;
- может являться причиной делокализации электронных состояний в области энергий оптических фононов;
- индуцирует сегнетоэлектричество во многих сегнетоэлектриках;
- играет важную роль в тепловой и электронной проводимости материалов;
- приводит к уширению и сдвигу узких бесфононных линий с повышением температуры;
- отвечает за релаксацию уровней примесных ионов в кристалле и, следовательно, за времена жизни и др.

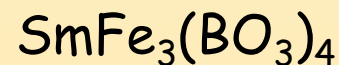


Взаимодействие фононов и 4f электронных возбуждений в $\text{PrFe}_3(\text{BO}_3)_4$

Фонон 45 cm^{-1}
 4f-электронное
 возбуждение 49 cm^{-1}



$T_N = 32 \pm 1 \text{ K}$



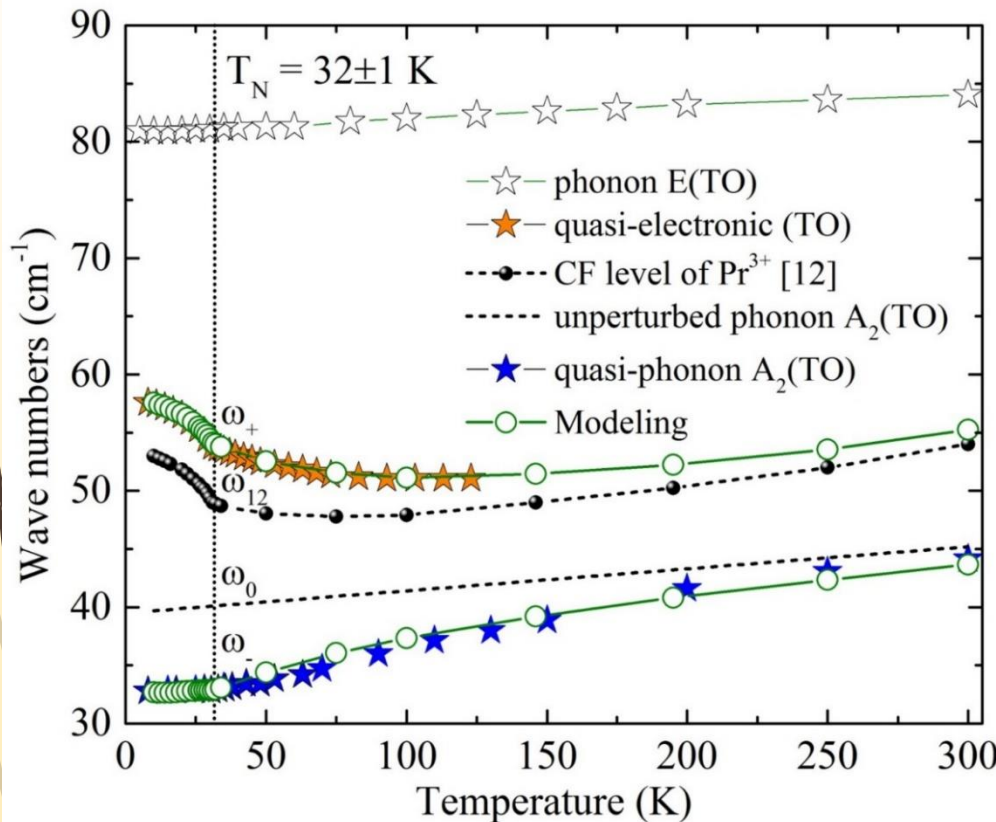
Модель электрон-фононного взаимодействия

[Б.З. Малкин и др. ФТТ 1982]

Гамильтониан $H = H_{ph} + H_{el} + H_{el-ph}$

$$H_{el-ph} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_f W(f)(a_f + a_f^\dagger) \quad W(f) = \sum_{nm} B_n^{m'}(f) C_n^m$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 + \frac{2\omega_0\omega_{12}(n_1 - n_2)|W|^2}{\omega^2 - \omega_{12}^2} = 0$$



ω_0 и ω_{12} – частоты фононного и электронного состояний до взаимодействия;
 n_1 и n_2 – относительная заселенность возбужденного $|\Gamma_1\rangle$ и основного $|\Gamma_2\rangle$ штарковского уровня Pr^{3+} ;
 W – константа электрон-фононного взаимодействия.

$$n_1 - n_2 = th \frac{\omega_{12}(T)}{2kT}$$

$$W_0 = 14.8 \text{ cm}^{-1}$$

$$\omega_0 = 45.5 \text{ cm}^{-1}$$

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{\omega_0^2 + \omega_{12}^2}{2} \pm \sqrt{\frac{(\omega_{12}^2 - \omega_0^2)^2}{4} + 2\omega_0\omega_{12}(n_2 - n_1)|W|^2}$$

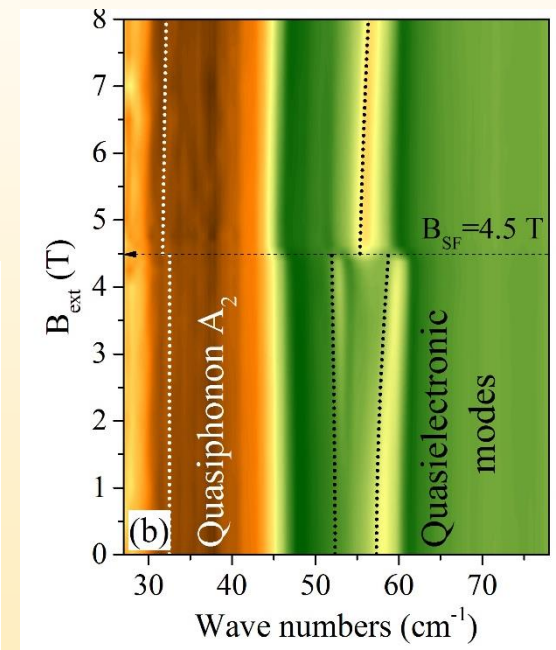
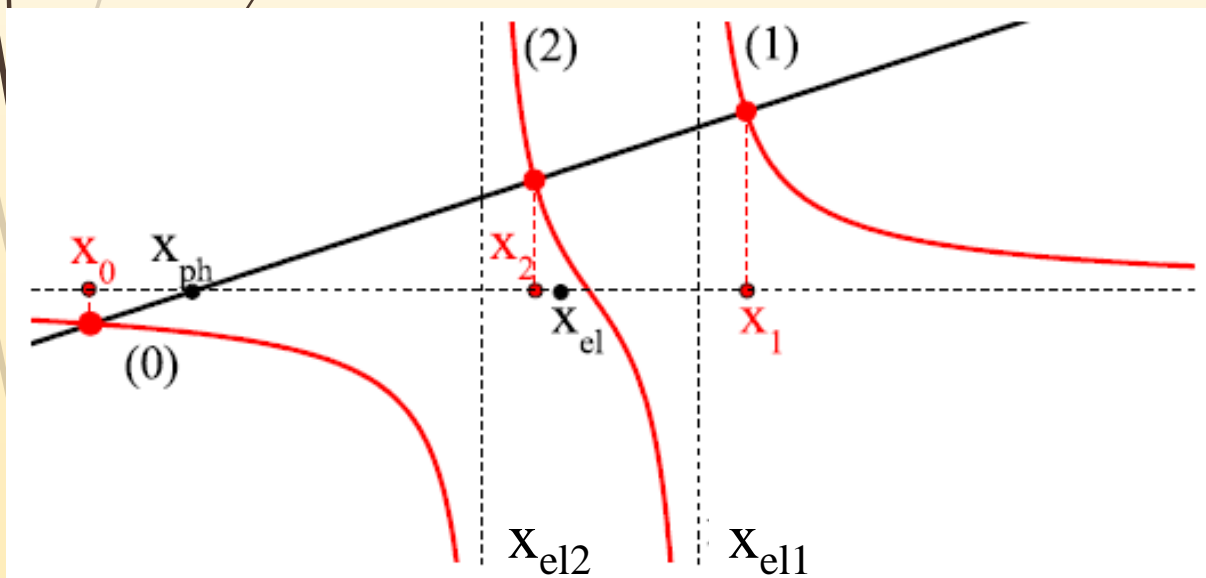
[K.N. Boldyrev et al. PRB RC 2014]

Электрон-фононная мода $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$ в магнитном поле. Бифуркации

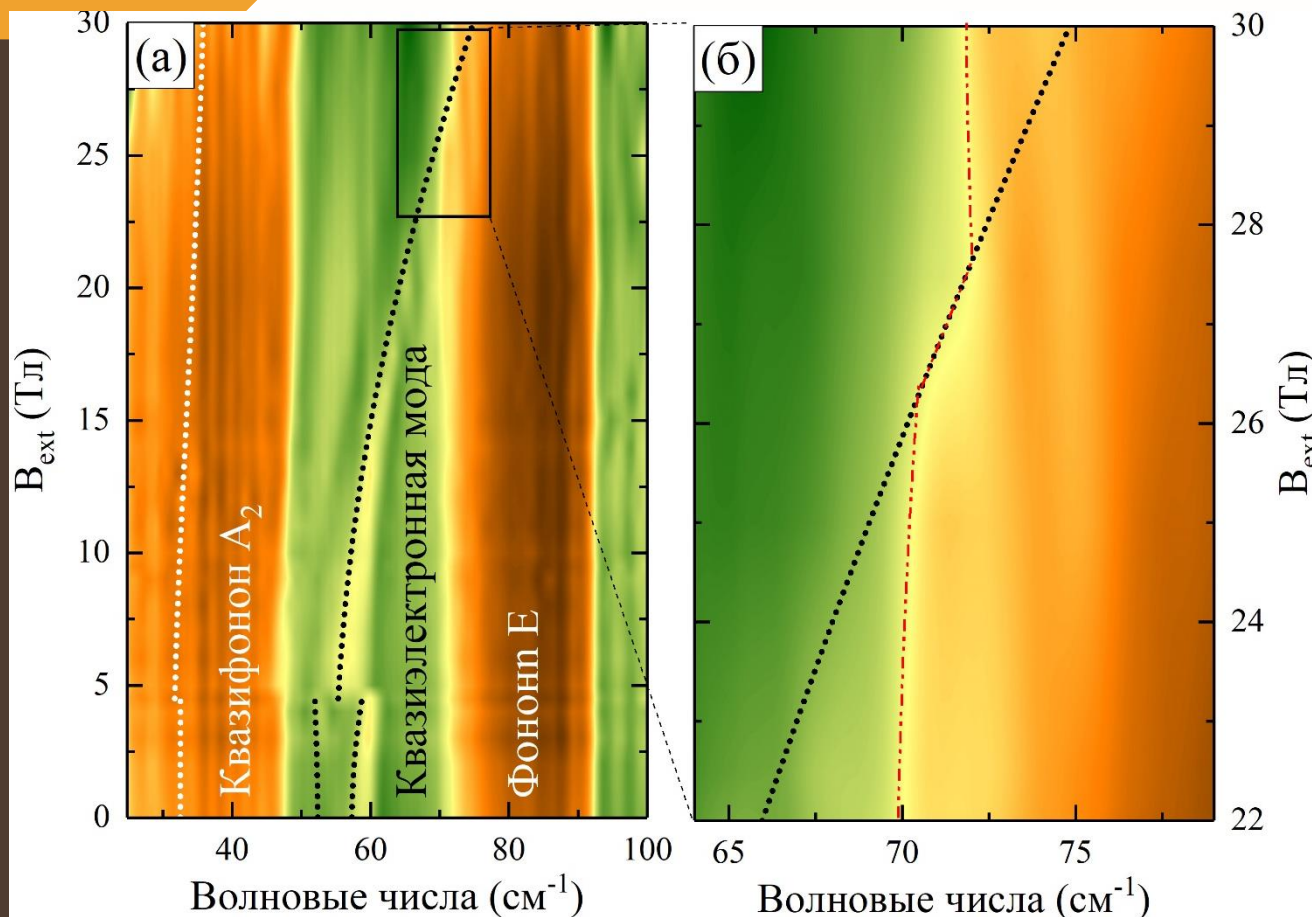
$$T = 1.5 \text{ K}: n_1 \approx n_2 \approx 0 \quad n_{01} \approx n_{02} \approx 1/2$$

$$x_{\text{ph}} \equiv \omega_{\text{ph}}^2, \quad x_{\text{el},i} \equiv \omega_{\text{el},i}^2$$

$$(x - x_{\text{ph}}) = \sqrt{x_{\text{ph}}} |W|^2 \left(\frac{\sqrt{x_{\text{el},1}}}{x - x_{\text{el},1}} + \frac{\sqrt{x_{\text{el},2}}}{x - x_{\text{el},2}} \right)$$



Электрон-фононная мода $\text{PrFe}_3(\text{VO}_3)_4$ в сильных магнитных полях до 30 Т



A_2 фонон

E фонон

1) Магнитная структура не меняется

$30\text{T} < H_{\text{ex}}(\text{Fe-Fe}) \approx 100\text{T}$

$$2) g_0 |\langle \Gamma_1 | J_z | \Gamma_2 \rangle| = 1.9$$

3) Слабое взаимодействие с E фононом из-за примешивания волновых функций уровня Γ_3 192 cm^{-1}

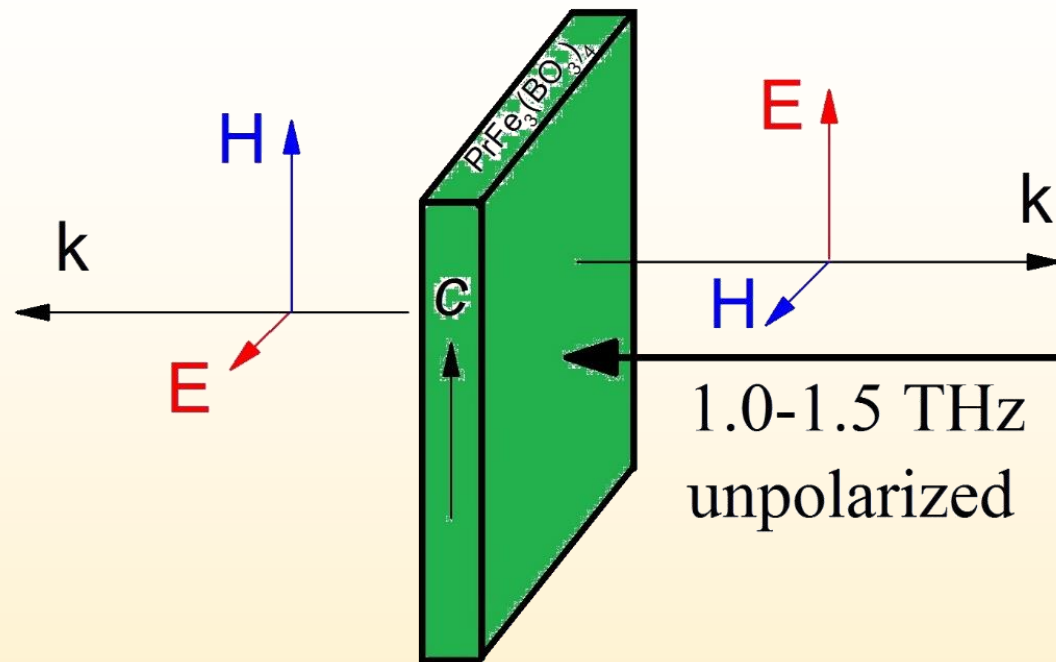
$$|\langle \Gamma_{1,2} | J_{x,y} | \Gamma_3 \rangle|$$

[K.N. Boldyrev et al. PRL 2017]

[M.N. Popova, K.N. Boldyrev UFN 2019]



Возможные применения



Селективный поляризатор/зеркало на область 1.0-1.5 ТГц с возможностью перестройки параметров с температурой.

[A.A. Melnikov, K.N. Boldyrev, Yu.G. Selivanov, V.P. Martovitskii, S.V. Chekalin, E.A. Ryabov, Phys. Rev. B 97, 214304 (2018)]

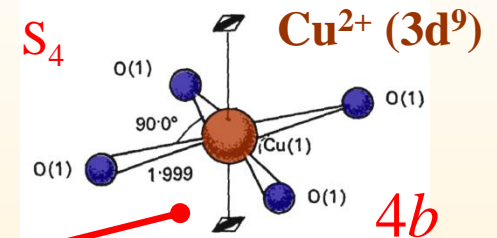
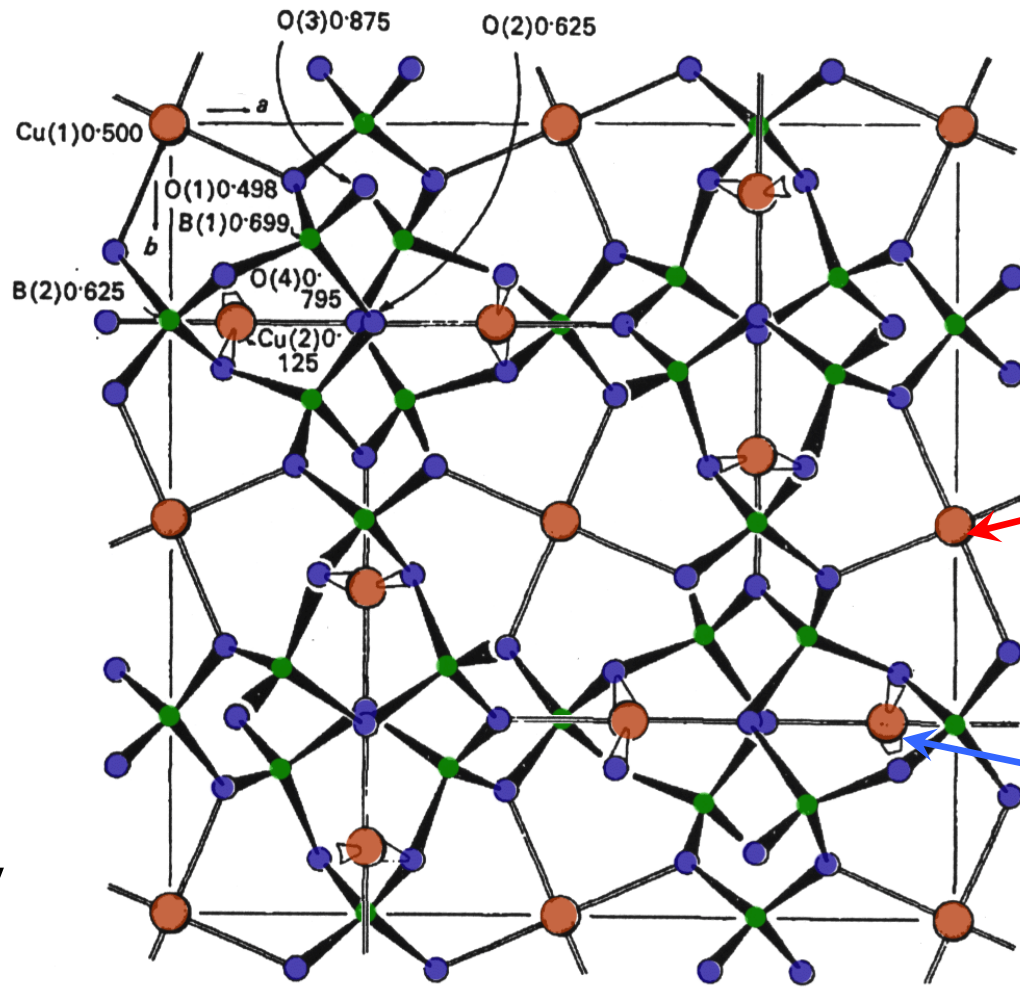
Кристаллическая структура CuV_2O_4

Нецентросимметричная тетрагональная структура

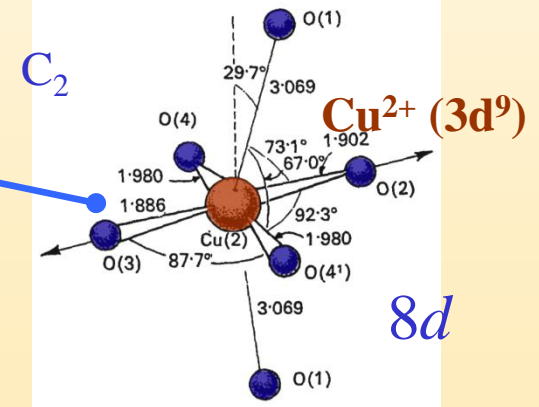
Пространственная группа:

$I4_2d$, $Z=12$

(42 атома на примитивную ячейку)



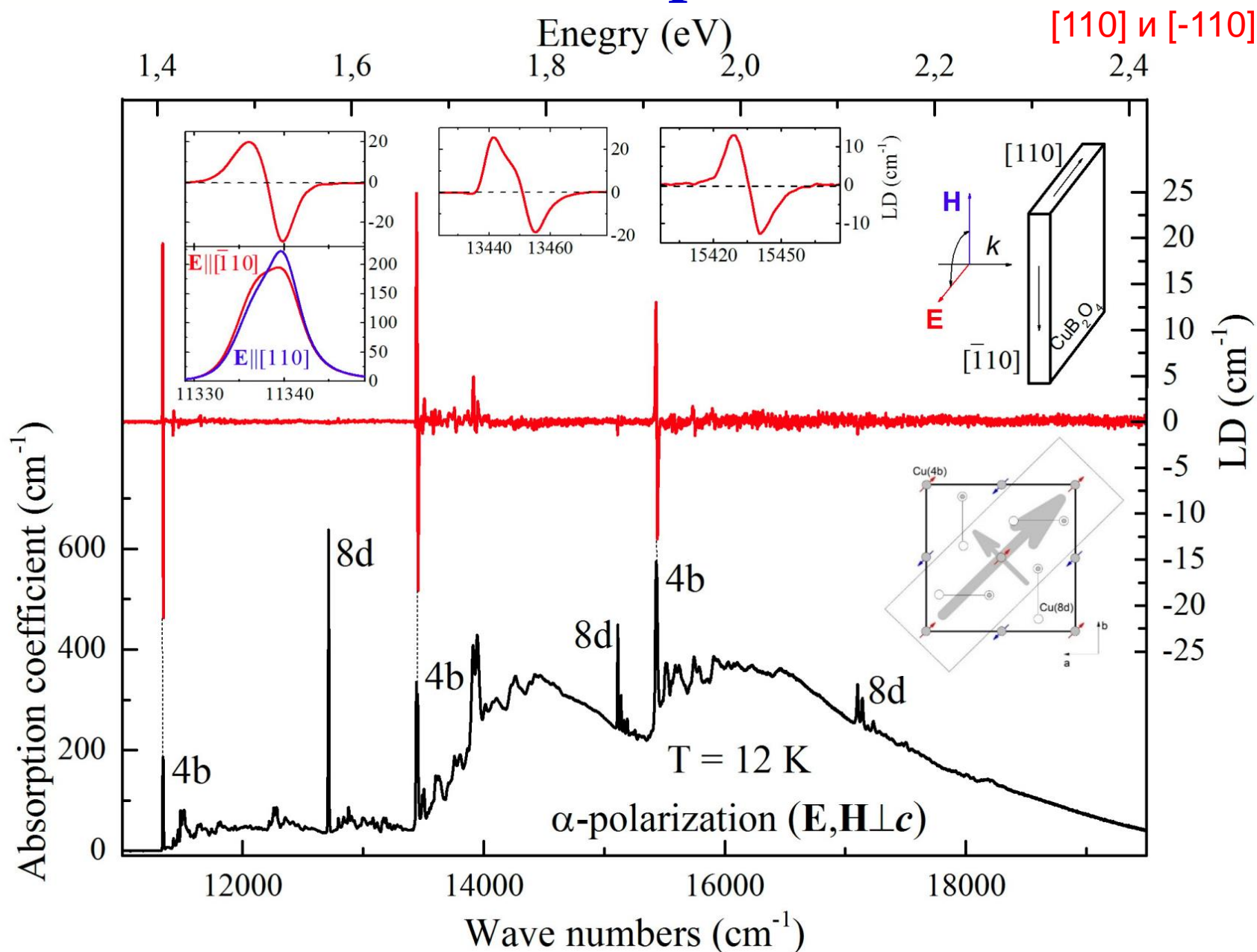
Две позиции 4b



Четыре позиции 8d

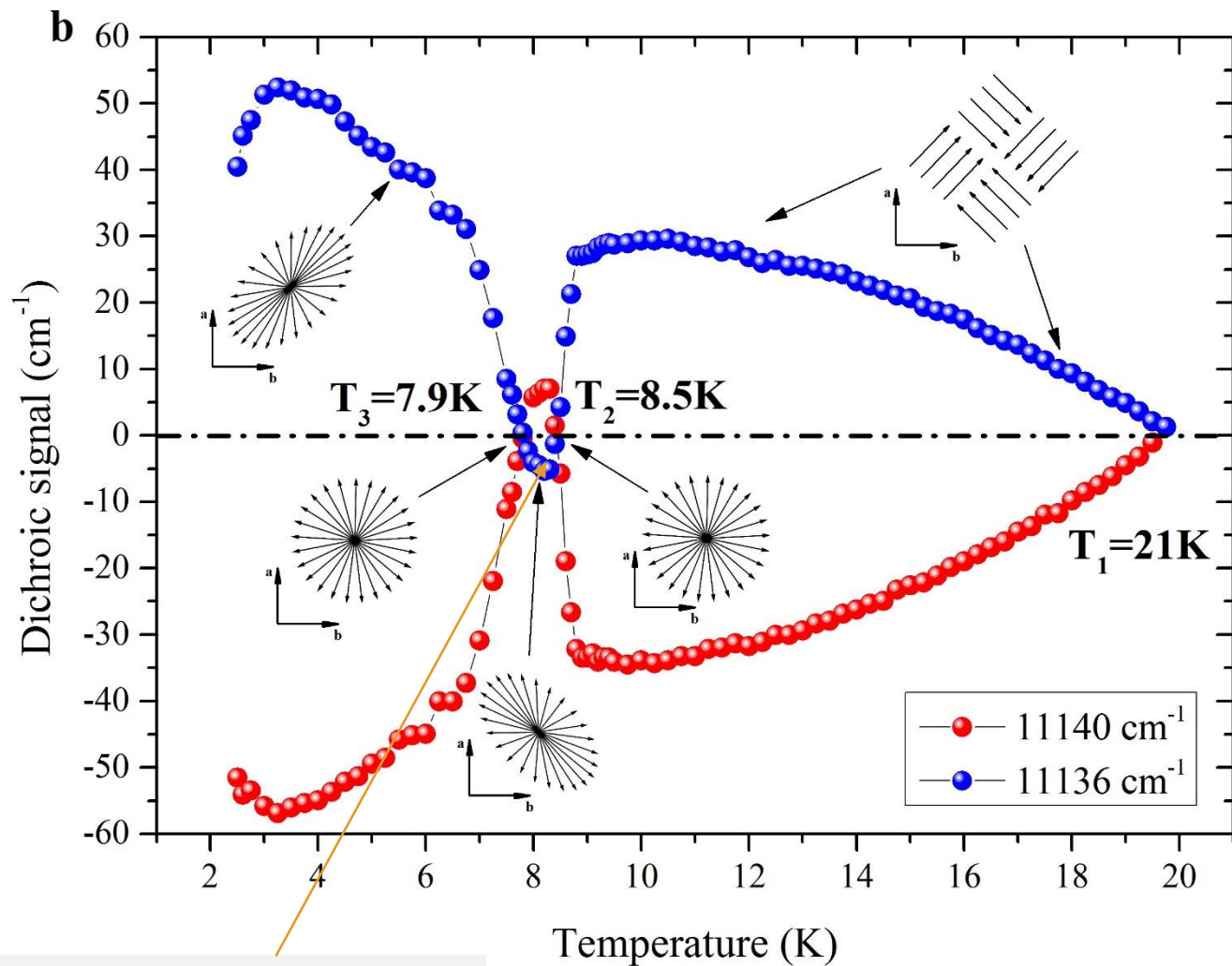
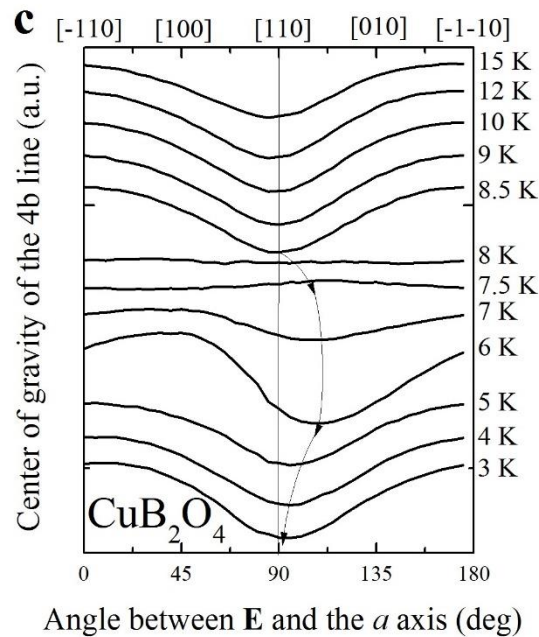
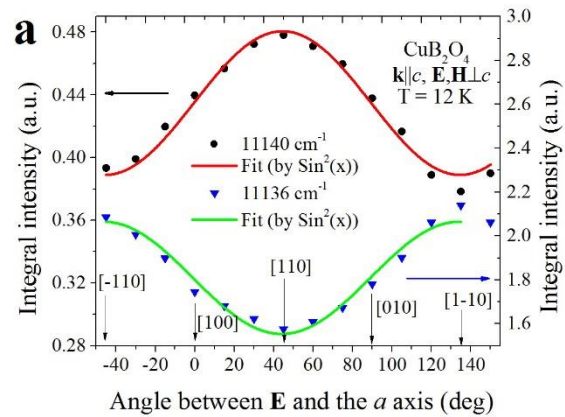
[R.V. Pisarev, K.N. Boldyrev et al. PRB 2013]

Линейный магнитный дихроизм в (ab)-плоскости



Дихроизм наблюдается только на линиях $\text{Cu}^{2+}(4b)$

Линейный магнитный дихроизм и магнитные фазовые переходы



Расщепление
магнитного фазового
перехода при T^*

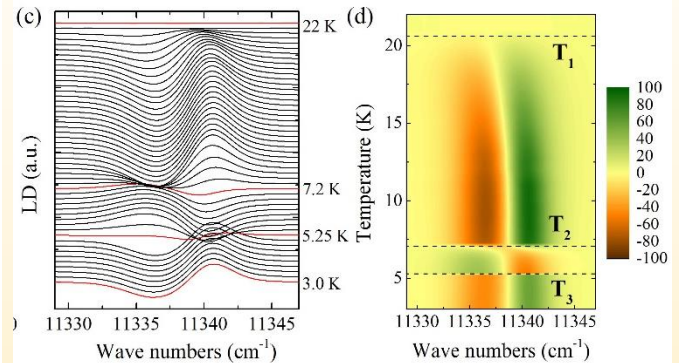
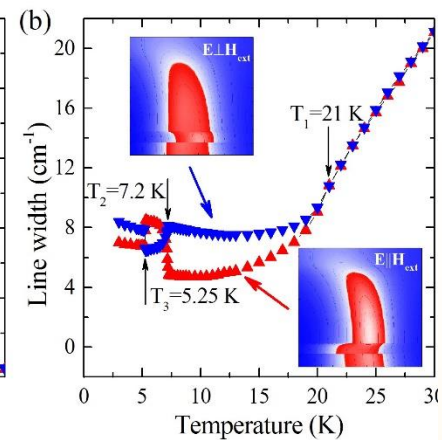
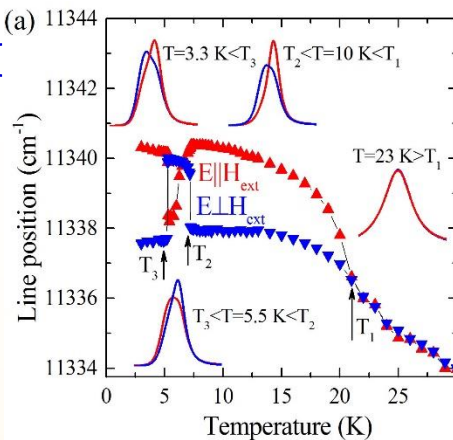
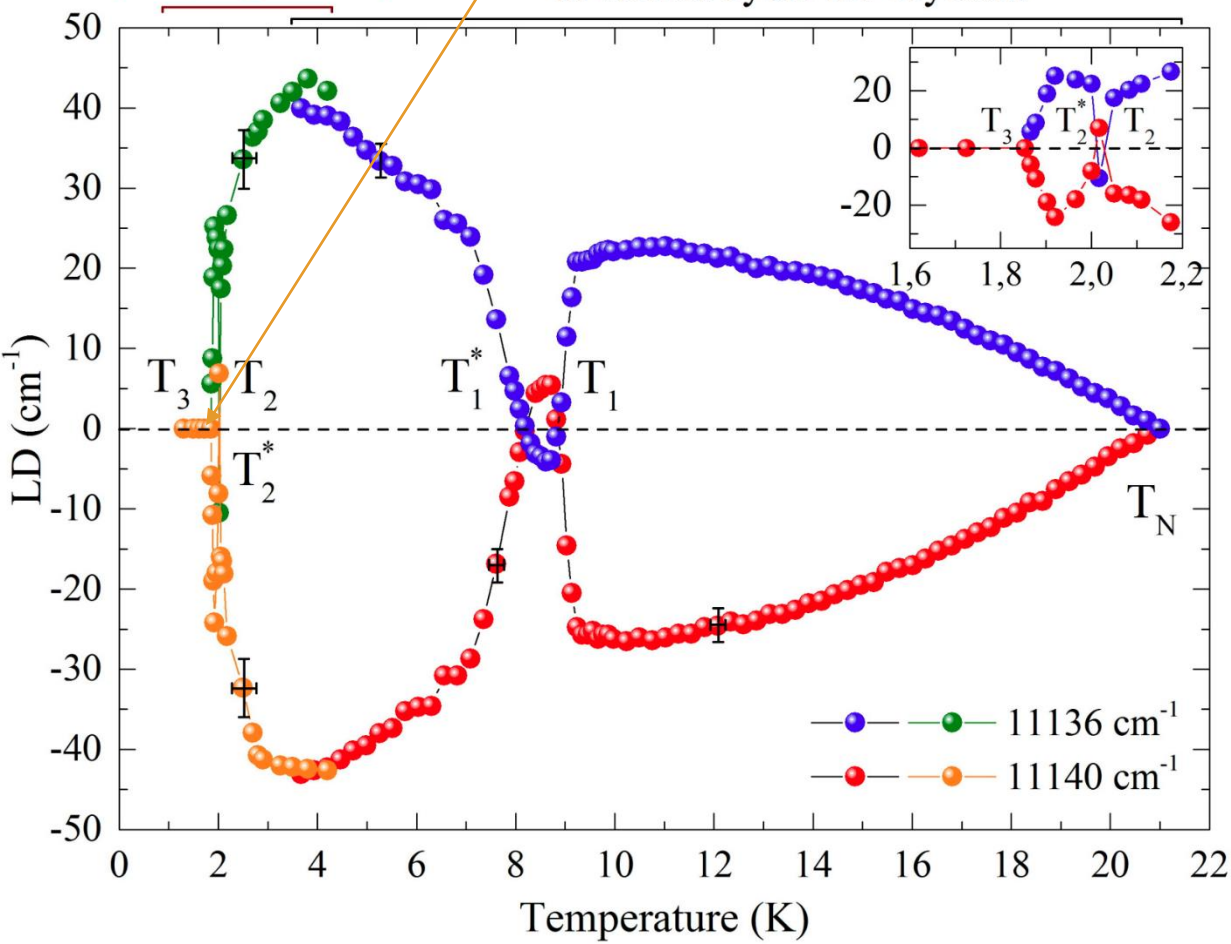
[K.N. Boldyrev et al. PRL 2015]

Новые фазовые переходы

$$T_2 = 2\text{K}, T_3 = 1.9\text{K}$$

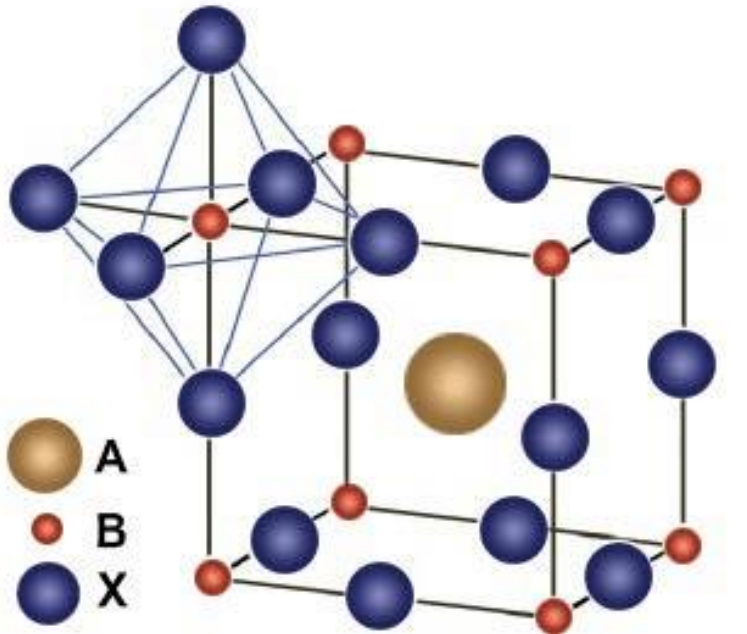
with pumping He vapor

in closed-cycle He-cryostat



[K.N. Boldyrev et al. PRL 2015]

Гибридные металл-органические перовскиты



- Общая формула ABX_3 :
- A – катион метиламмония ($CH_3NH_3^+$) / формамидиния ($CN_2H_4^+$),
- B – класс металлов (свинец / олово),
- X – анион галогена (хлор / бром / йод).

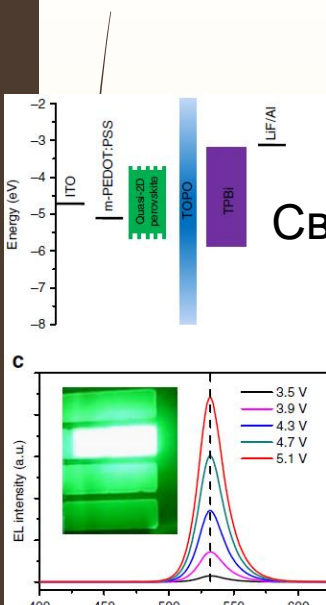


- оптимальная ширина запрещенной зоны ($E_g = 1,5$ эВ для $MAPbI_3$);
- высокий коэффициент поглощения солнечного спектра (10^5 cm^{-1});
- низкая энергия образования экситонов (16 мэВ);
- большая длина диффузии носителей заряда (около 175 мкм в монокристаллах).



Применения

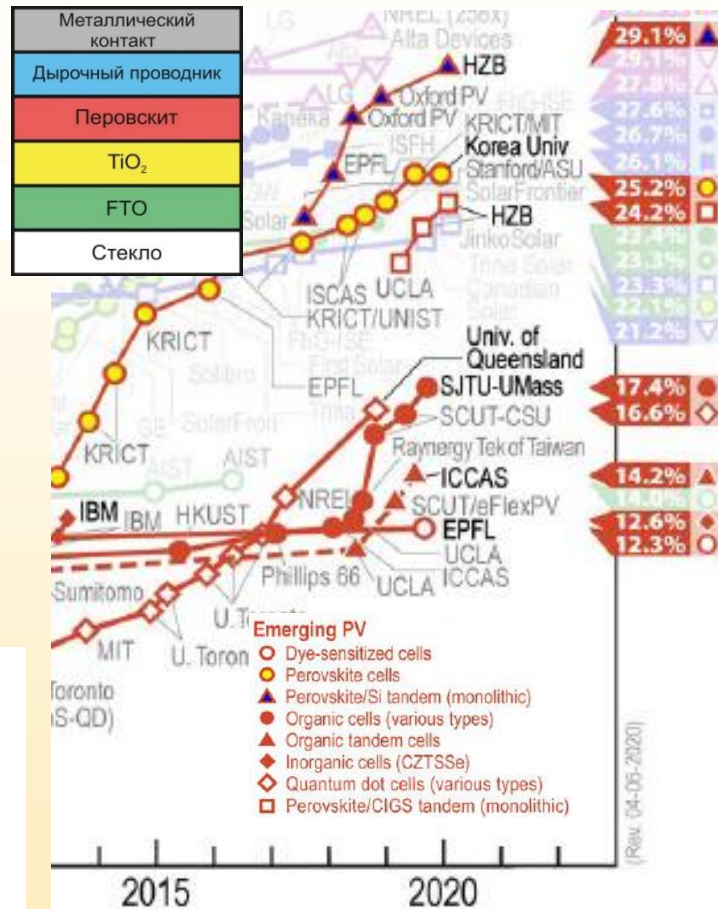
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>



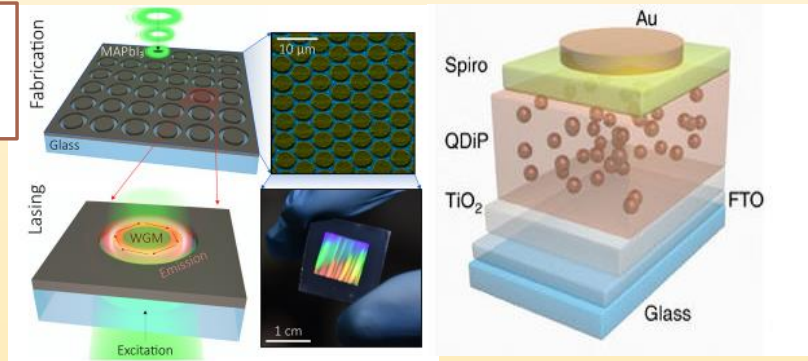
Светодиоды

Солнечные элементы

Лазеры



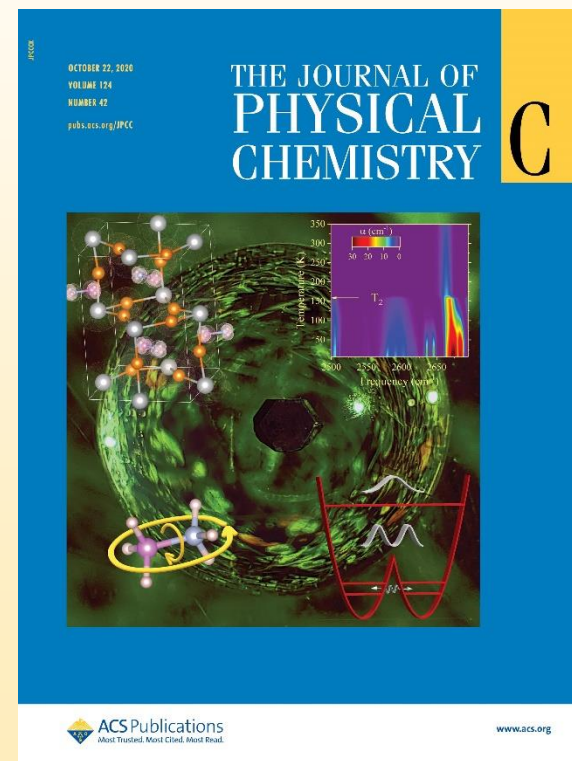
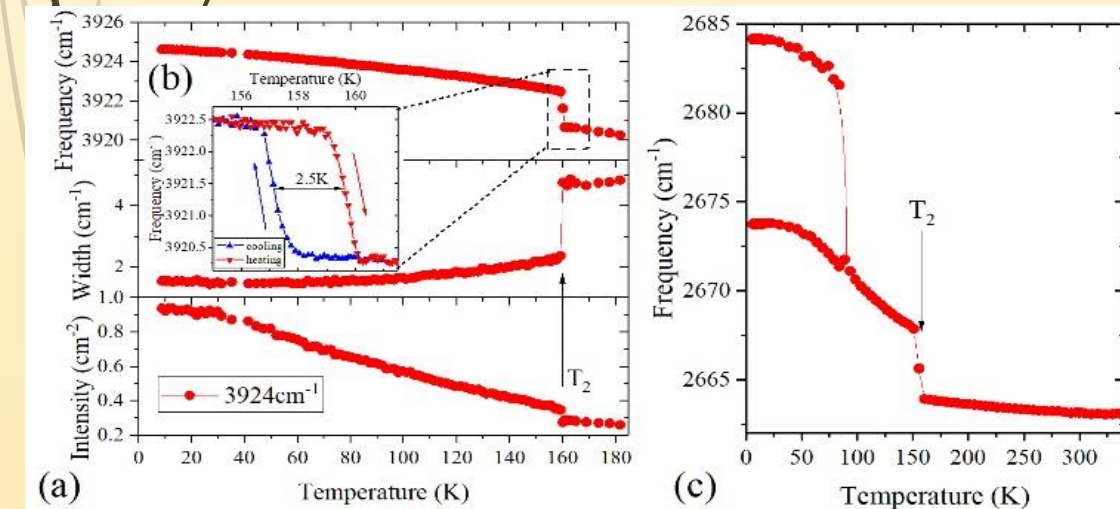
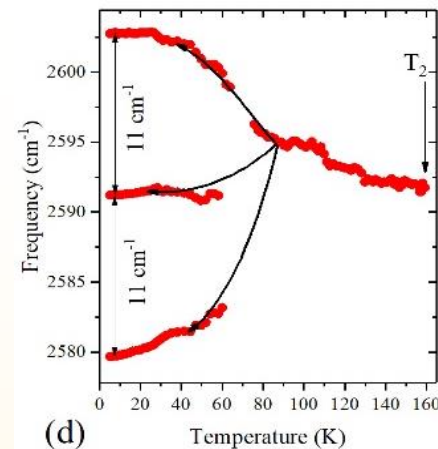
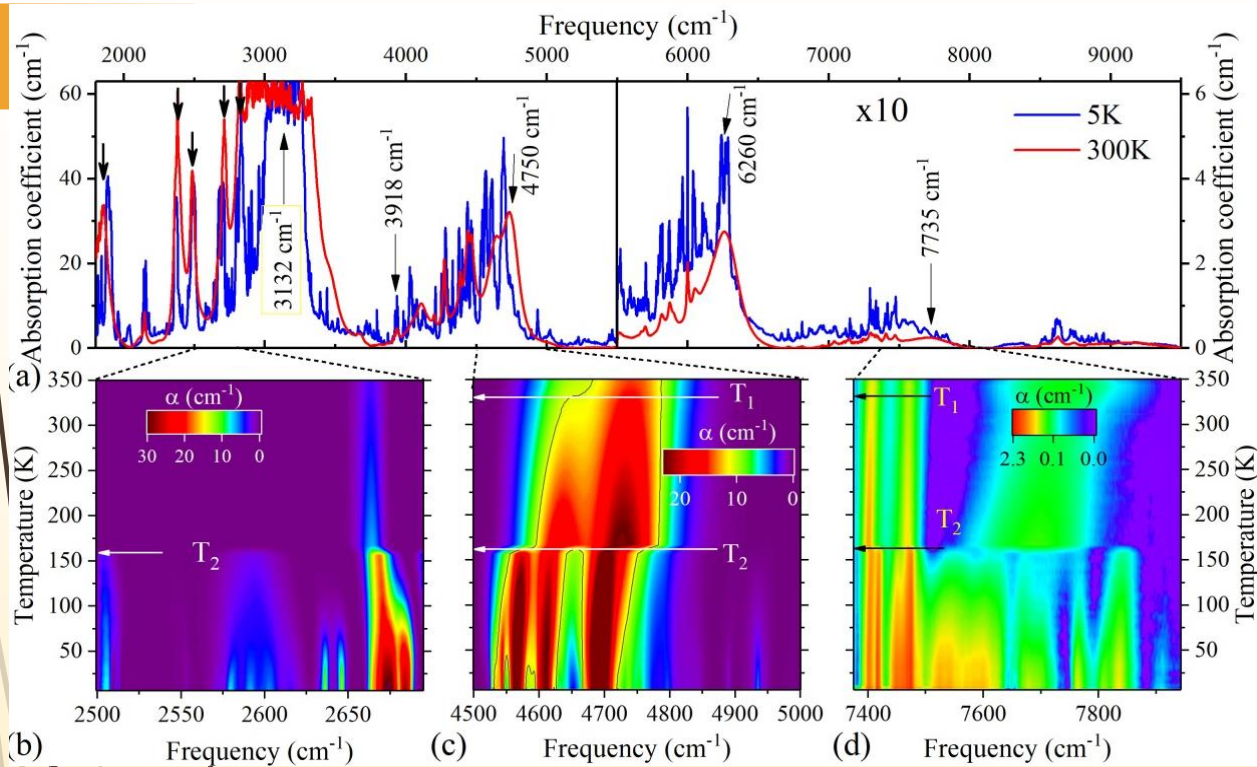
Nat. Comm.
2018, 9, 570



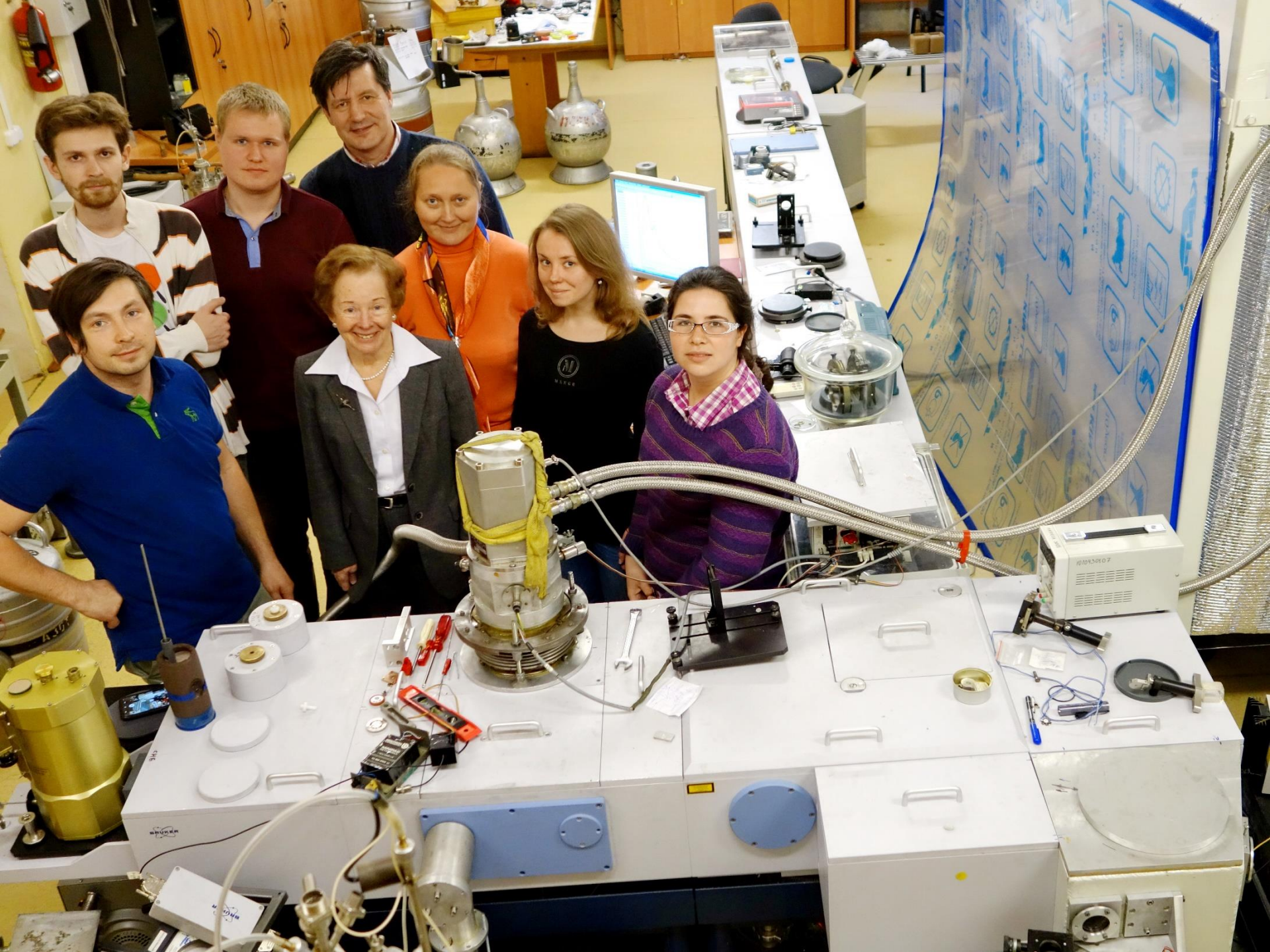
ACS Nano
2019, 13, 4140

Nat. Mater.
2014, 13, 476

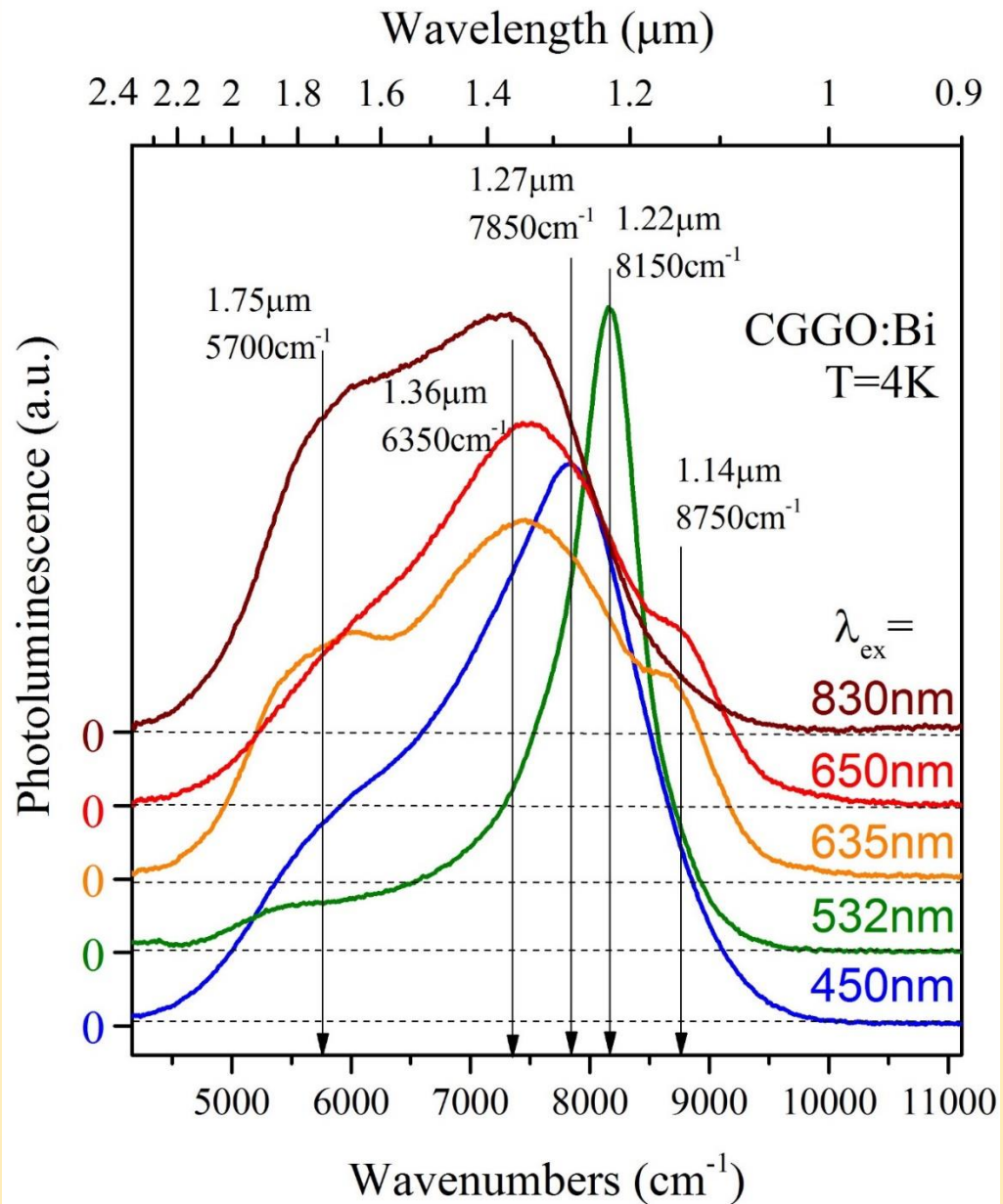
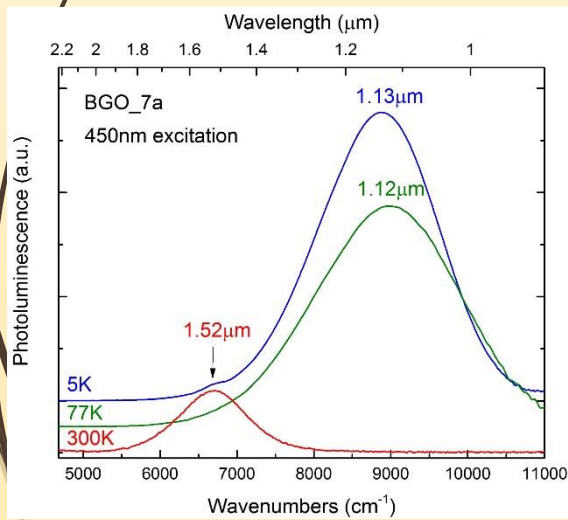
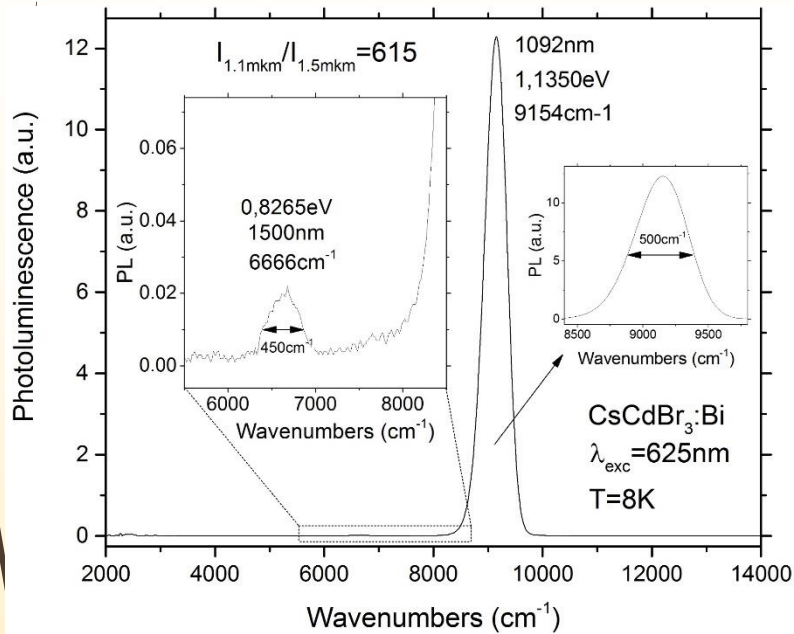
Молекулярная динамика



[K.N. Boldyrev, V.E. Anikeeva et al.
JPCC 2020]



Люминесценция Bi^{3+}



Люминесценция U^{4+} в $ThCl_3$

