

X международная конференция им. В.В. Воеводского

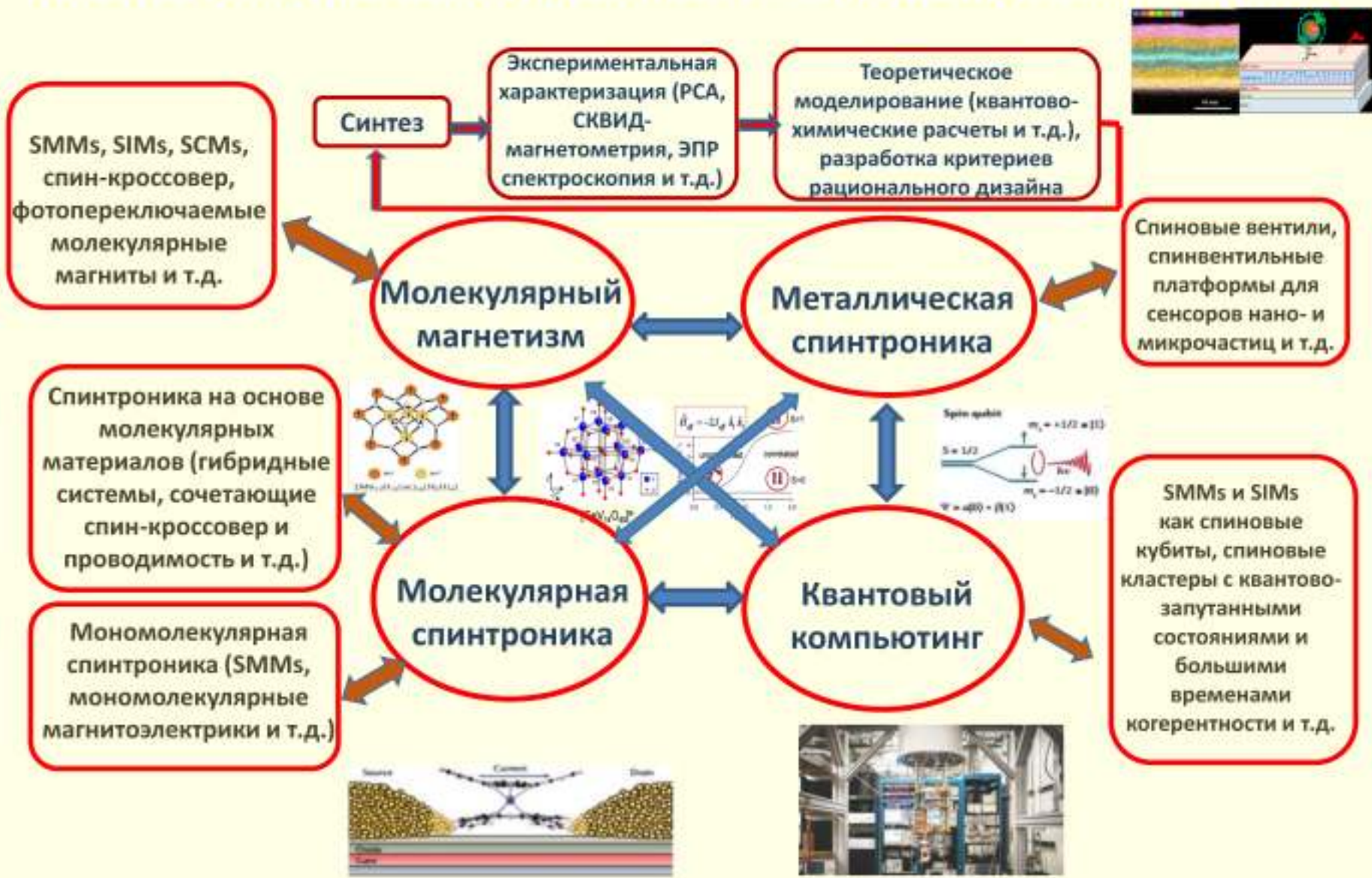
Targeted design of polyfunctional materials for spintronics and molecular electronics

академик РАН С.М. Алдошин

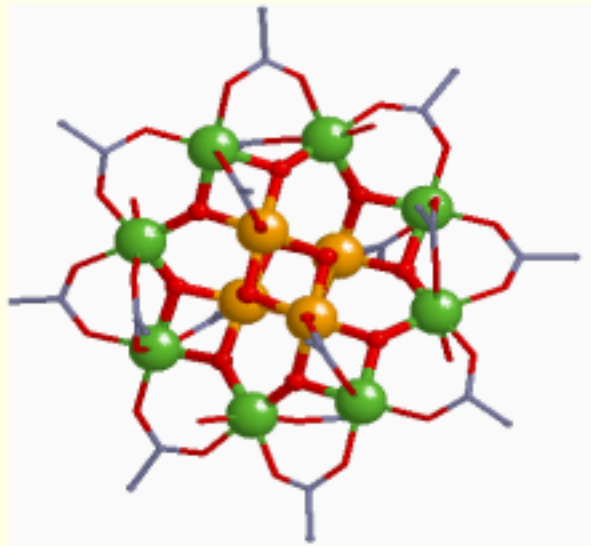
Институт проблем химической физики РАН, г.Черноголовка

05 - 09 сентября 2022 год

От молекулярного магнетизма и металлической спинтроники к молекулярной спинтронике и квантовому компьютеру

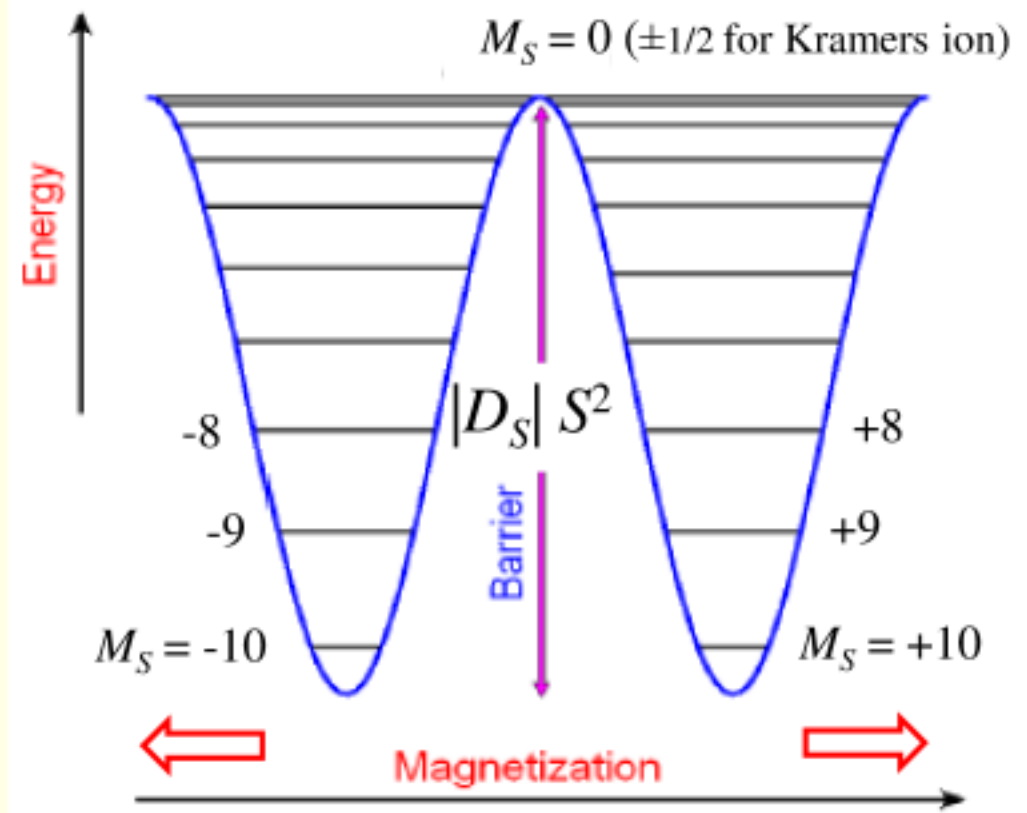


Single Molecule Magnets (SMM's): bistable molecular magnetic units



SMMs require applied field to invert their magnetization direction below blocking temperature

Bistability (SMM) stems from large *spin* [$S = 10$] and **negative magnetic anisotropy** corresponding to the “**easy axis**” of magnetization



Two preferable directions of the spin

The ground state is double degenerate

$$U_{\text{eff}} = |D_S| S^2 - \text{spin-reversal barrier}$$

$U_{\text{eff}} = |D_S| (S^2 - 1/4)$ for Kramers systems (half-integer spin)

$U_{\text{eff}} \neq$ ZFS magnitude

General spin Hamiltonian

$$\hat{H} = -2J \sum_{i < j} \hat{S}(i) \hat{S}(j) + \sum_i \hat{S}(i) D_i \hat{S}(i) + \mu_B \sum_i H g_i \hat{S}(i)$$



Exchange coupling operator
(stabilizes the state of cluster with the total spin S)



Zero field splitting (ZFS) operator
(single ion anisotropy)



Operator of Zeeman interaction



Effective spin Hamiltonian acting within the basis of the ground S - multiplet (ZFS)

$$\hat{H}_S = D_S \left[\hat{S}_Z^2 - \frac{1}{3} S(S+1) \right] + E_S \left(\hat{S}_X^2 - \hat{S}_Y^2 \right) + \mu_B H g_S \hat{S}$$



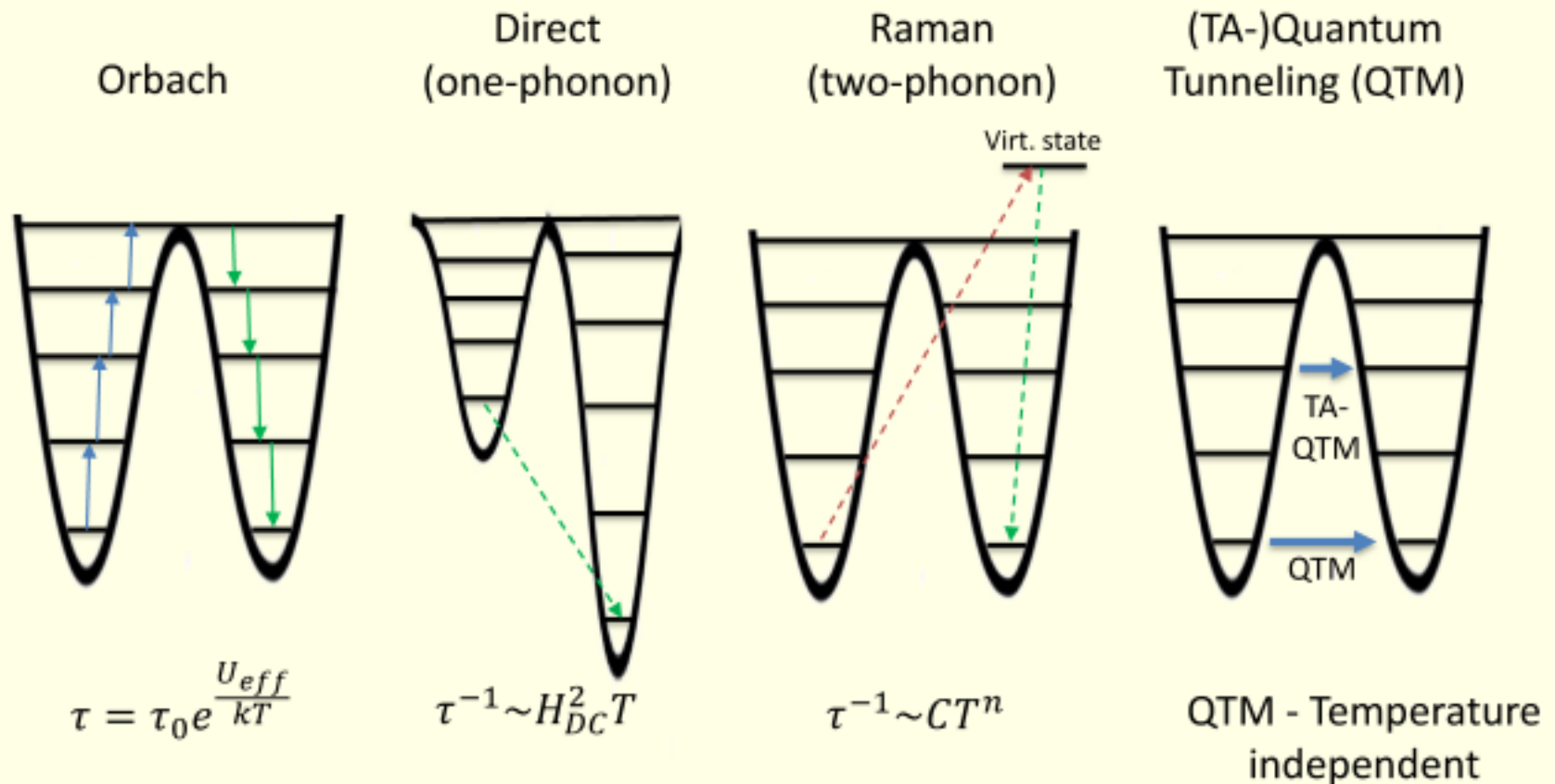
Axial anisotropy



Rhombic anisotropy

D_S, E_S are axial and transverse/rhombic ZFS parameters

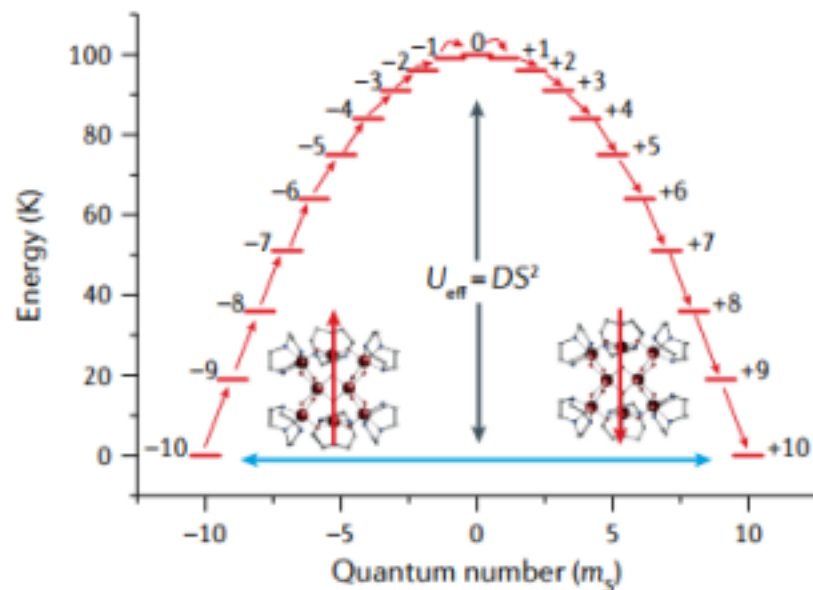
Magnetization relaxation mechanism



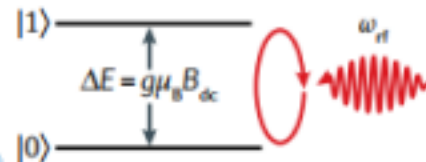
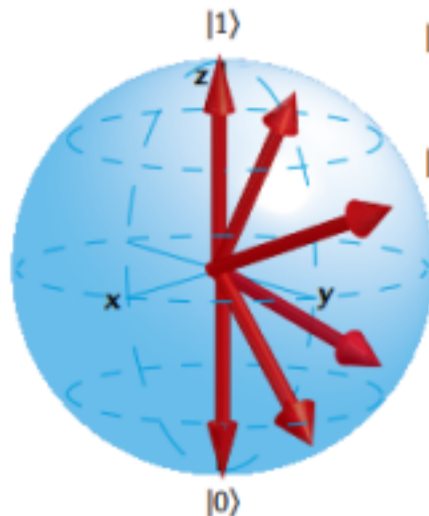
$$\tau^{-1} = \underbrace{\frac{B_1}{1 + B_2 H^2}}_{\text{QTM}} + \underbrace{A H^{n_1} T}_{\text{direct}} + \underbrace{C T^{n_2}}_{\text{Raman}} + \underbrace{\tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{\Delta_{CF}}{k_B T}\right)}_{\text{Orbach}}$$

SMMs for quantum sensing, simulation, computing and spintronics.

E. Moreno-Pineda, W. Wernsdorfer. Tech. Reviews, DOI: 10.1038/s42254-021-00340-3



Quantum bits



Superposition of states

$|0\rangle, |1\rangle$

and

$|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$

$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1$

Requirement for qubits

DiVincenzo criteria

- Scalable, well-defined quantum system
- Initialization of the qubit
- Long coherence time T_2
- Universal quantum gates
- Readout
- Interconversion between stationary and dynamic qubits
- Exact transmission of flying qubits

Techniques to study SMMs in bulk

Superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometry, electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy, inelastic neutron scattering (INS) and X-ray spectroscopies.

Nuclear magnetic resonance, muon spin (μ -SR) and Mössbauer spectroscopies.

Techniques that permit the detailed investigation of isolated SMMs:

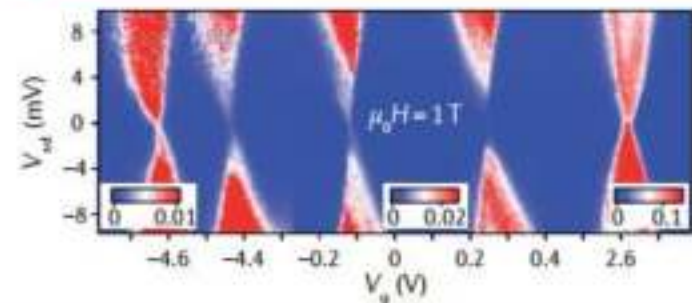
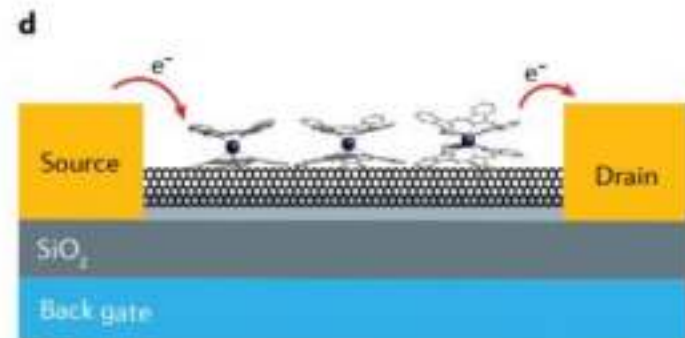
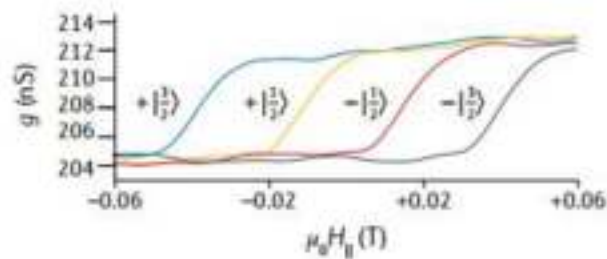
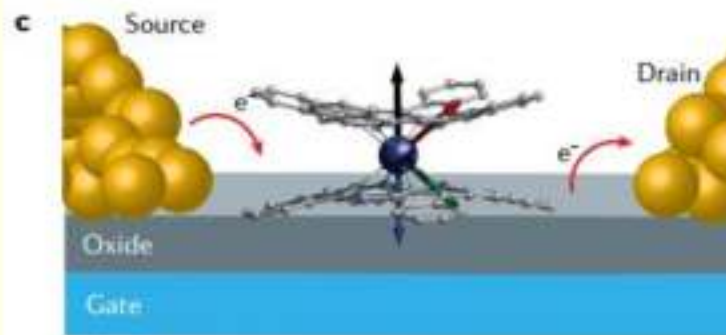
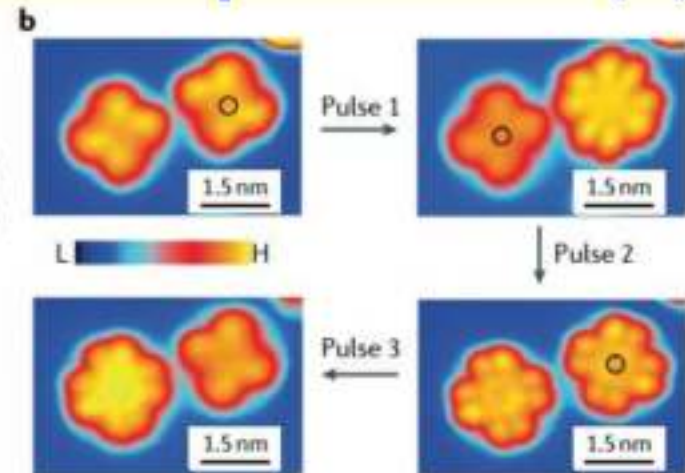
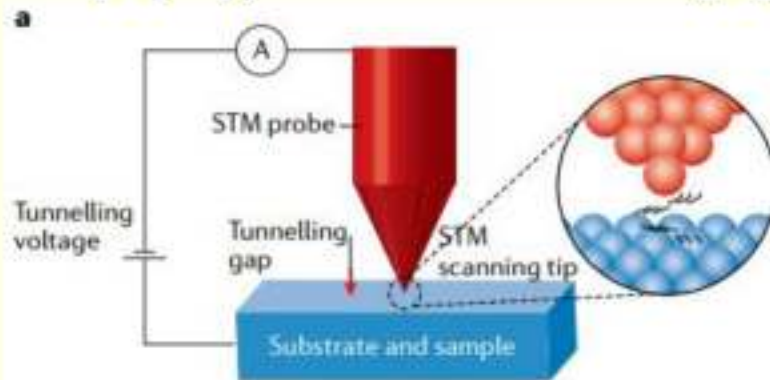
STM, transistors, optospintronics and spin valves devices.



Theoretical Background

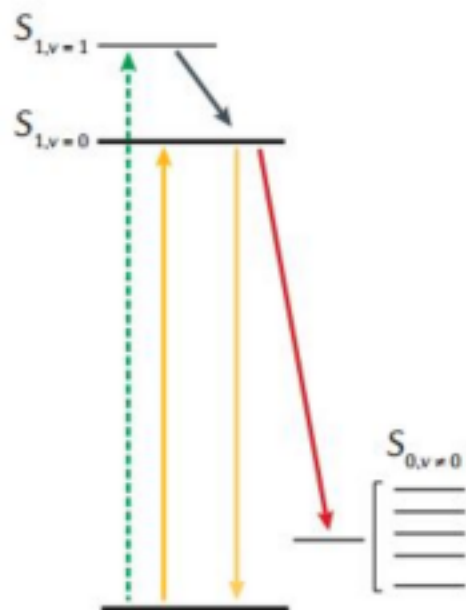
SA-CASSCF (state-averaged complete active space self-consistent field) methods post-Hartree–Fock multi-reference calculations such as CASSCF/NEVPT2 (N-electron valence perturbation theory second-order)/CASPT2 (complete active space second-order perturbation)/MRCI (multi-reference configuration interaction)/DMRG (density matrix renormalisation group)

STN (a,b), transistors (c) and spin-valves (d).

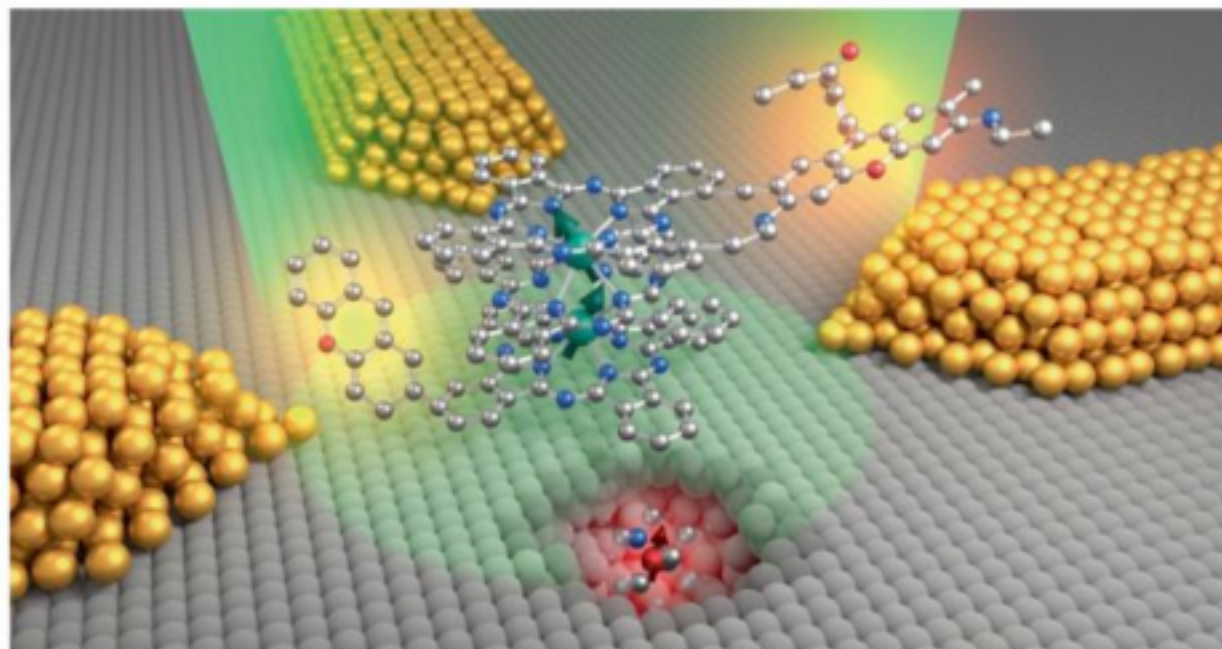


Optospintronics

a



b



Институт
физики
металлов УрО
РАН

Дальневосточный
Федеральный
университет

Center for Memory
and Recording
Research, США
California

The University of
Manchester (UK)

Institut Jean
Lamour, Université
de Lorraine, Nancy,
France

МФТИ +
Сколтех

Институт
физики
микроструктур РАН

**Фундаментальные основы
спиновых технологий и
направленного
конструирования «умных»
полифункциональных
материалов для спинтроники
и молекулярной электроники
(ИПХФ РАН, ИОНХ РАН,
МТЦ СО РАН, ИФХЭ РАН,
ЮФУ)**

Daegu
Gyeongbuk
Institute of
Science and
Technology
(DGIST)

Texas A&M
University (USA)

Institute of
Molecular Science
at University of
Valencia (Spain)

Beijing
National
Laboratory for
Molecular
Sciences

ИТМО

ИНЭОС РАН

Крокос
наноэлектроника

Ben-Gurion
University of the
Negev, Israel

Centre de
Recherche Paul
Pascal UMR
CNRS, FRANCE
(Клерак)

University of
Basel
(Switzerland)

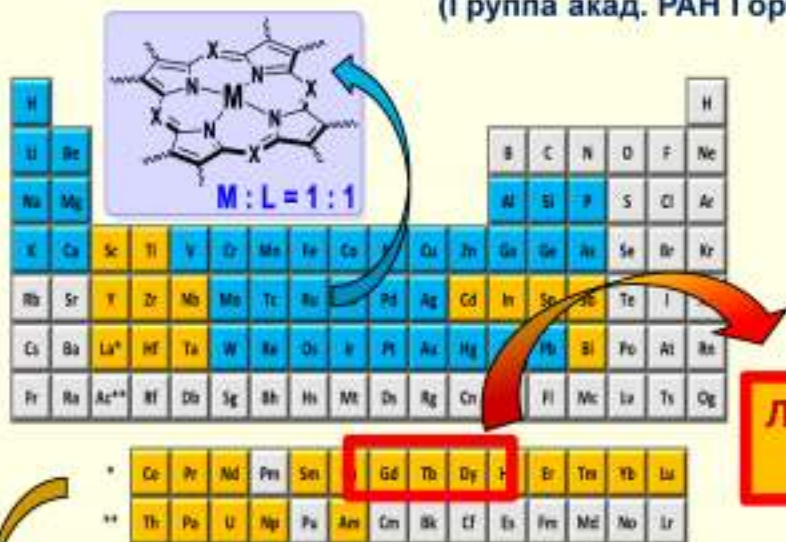
Karlsruher
Institut für
Technologie
(Germany)

State Key Laboratory of
Rare Earth Materials
Chemistry and
Applications, College of
Chemistry and Molecular
Engineering, Peking
University, Beijing



ВКЛАД НАПРАВЛЕНИЯ В РАБОТУ КОНСОРЦИУМА «Фундаментальные основы спиновых технологий и направленного конструирования «умных» полифункциональных материалов для спинтроники и молекулярной электроники»

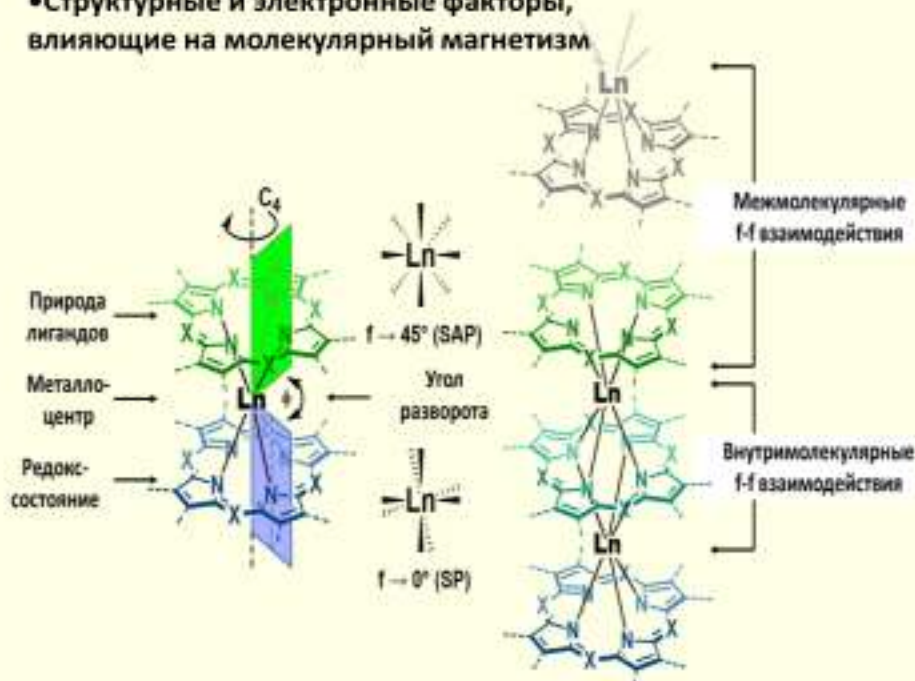
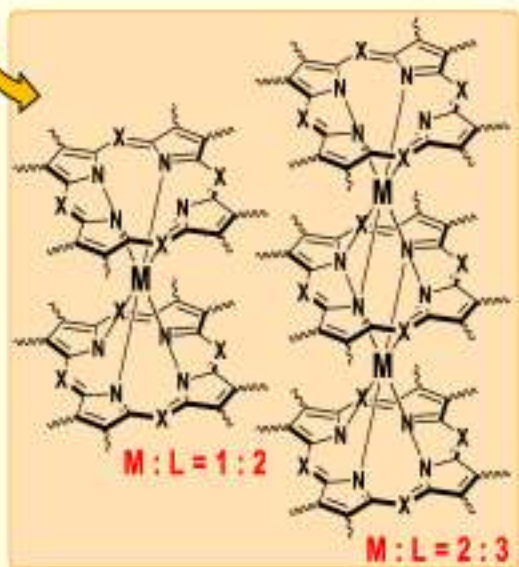
(Группа акад. РАН Горбуновой Ю.Г., ИФХЭ РАН и д.х.н. Конарева Д.В., ИПХФ РАН)



- Высокие барьеры релаксации намагниченности
- Относительно простой синтез
- Стабильность по отношению к окружающей среде (воздуху и влаге)
- Высокой растворимостью в органических растворителях
- Возможность получения гибридных материалов для спинтроники

Лантаниды, образующие сэндвичевые фталоцианинаты со свойствами молекулярных магнетиков

- Структурные и электронные факторы, влияющие на молекулярный магнетизм



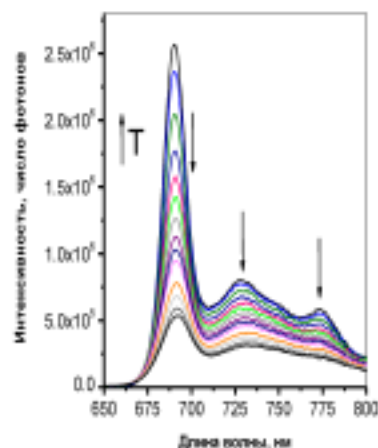
ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Фундаментальные основы спиновых технологий и направленного конструирования «умных» полифункциональных материалов для спинтроники и молекулярной электроники» ИФХЭ РАН (группа к.х.н. Чернядзева А.Ю. и д.ф-м.н. Тамеева А.Р.)

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

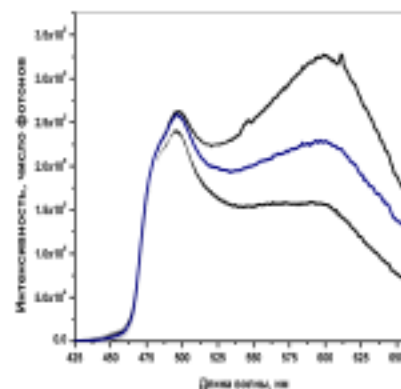
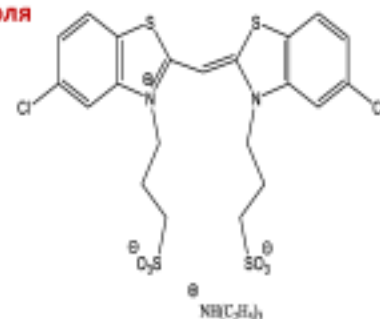
- 1. Получены новые флуорензамещенные мезопорфирилаты меди(II), проведен анализ люминесцентных свойств комплексов в пленках полистирола. Установлено, что комплексы обладают свойствами люминесцентных сенсоров температуры по изменению соотношения интенсивности переходов фосфоресценции при 695 нм и при 730 нм.
- 2. Установлено, что drop-casted пленка цианинового красителя обладает магнетосенсорными свойствами по изменению соотношения интенсивности переходов эмиссии при 497 нм и при 601 нм.

1. Люминесцентные сенсоры температуры на основе порфиринов меди ($T = 77\text{-}298\text{K}$), у которых изменяется соотношение интенсивности полос эмиссии при 695 нм и при 730 нм при изменении температуры



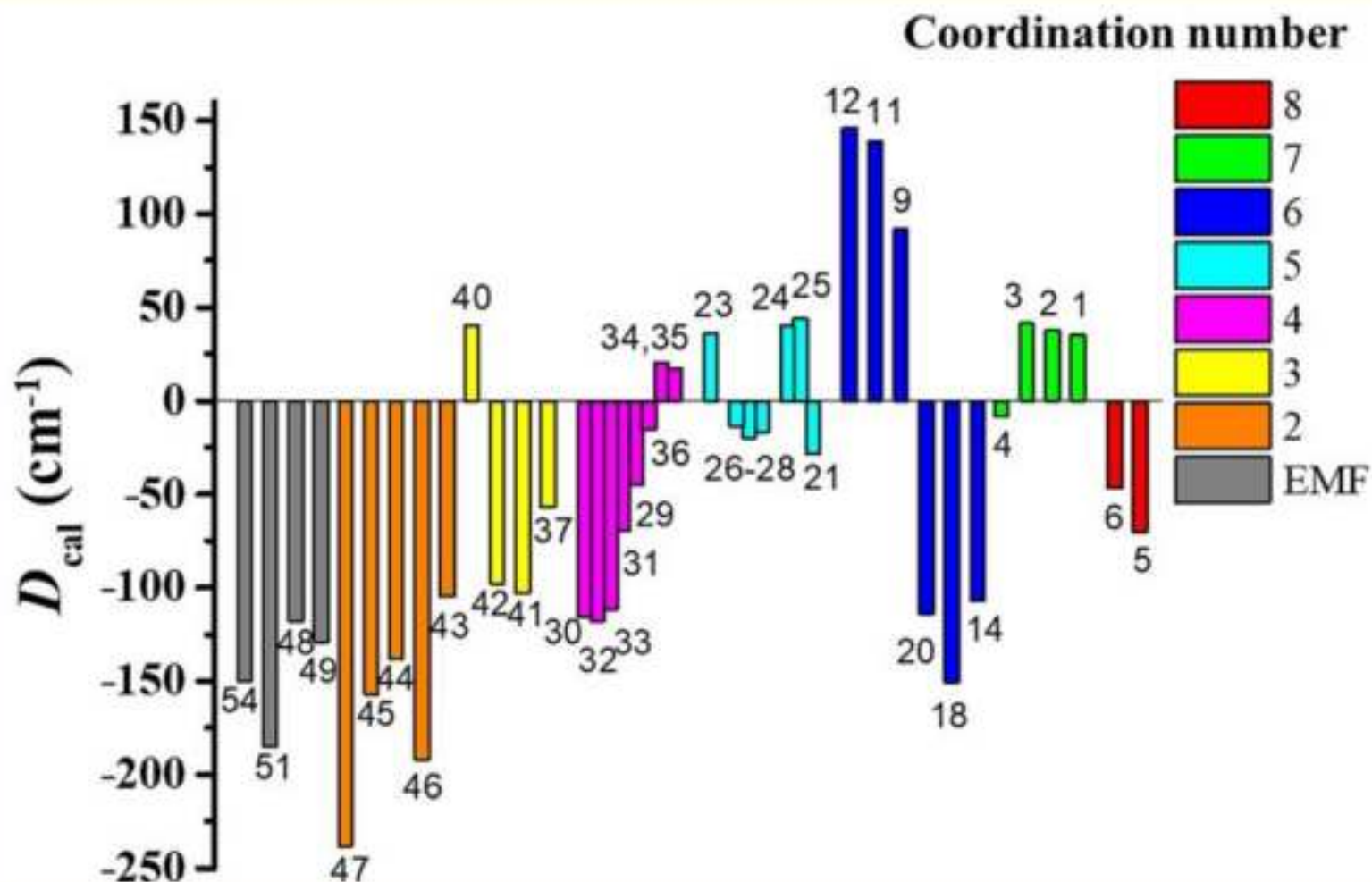
Изменение спектров люминесценции при варьировании температуры от 77 К (верхняя кривая) до 298К (нижняя кривая)

2. Пленка цианинового красителя, нанесенная на кварцевую подложку методом drop-casting, которая обратимо изменяет люминесцентные свойства(соотношение интенсивности переходов эмиссии при 497 нм и при 601 нм) при изменении напряженности внешнего магнитного поля

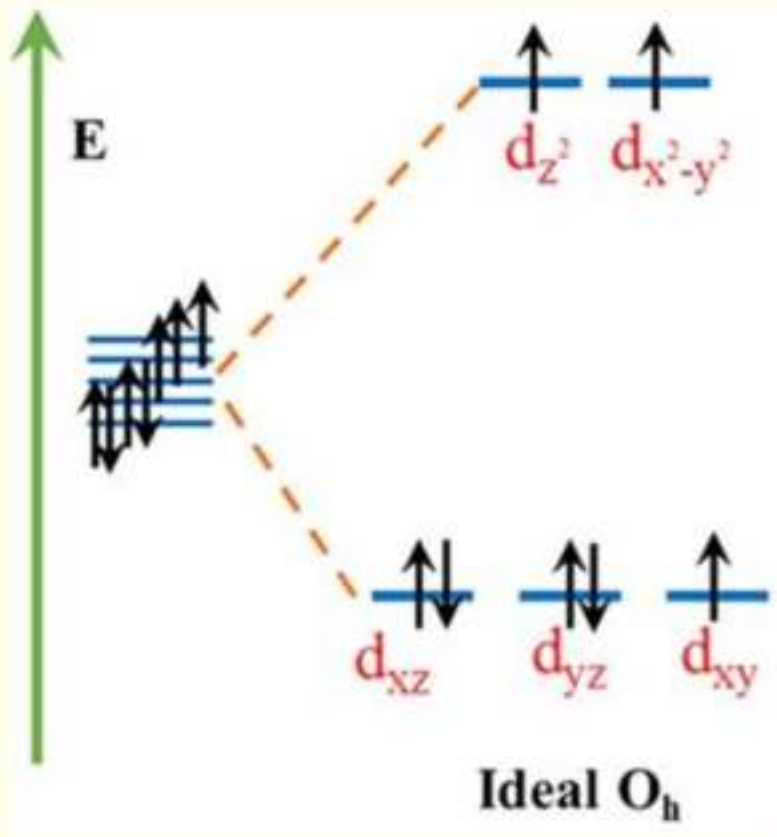


Изменение спектров люминесценции при варьировании напряженности магнитного поля от естественного поля Земли(верхняя кривая) до 0.3 Тл (нижняя кривая), 0.15 Тл [кривая синего цвета]

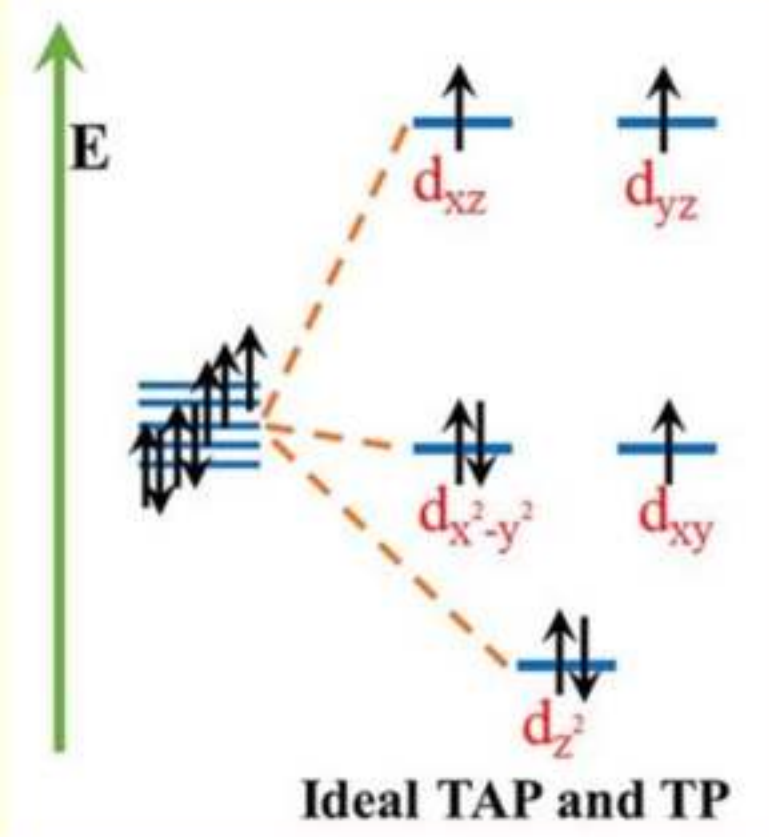
Role of Coordination Number and Geometry in Controlling the Magnetic Anisotropy in Coll Single-Ion Magnets



Six-coordinate Co(II) SIM



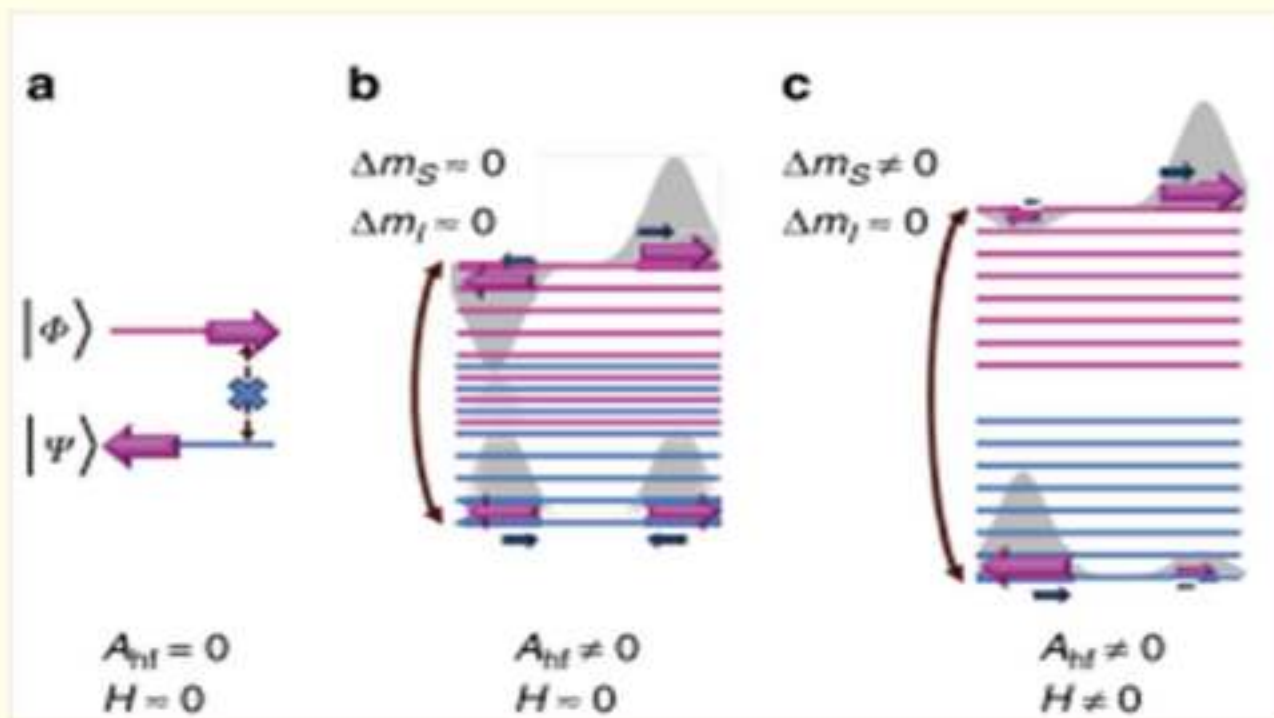
a)



b)

Influence of Kramers degeneracy on spin-phonon relaxation

Hyperfine interaction with $I=7/2$



Slow relaxation at applied DC field occurs independently of the sign of the magnetic anisotropy

Factors playing the important role in the relaxation:

- 1) *Kramers character of the Co(II) ion and hence Van-Vleck cancellation;*
- 2) *Hyperfine interaction*

Phonon-induced transitions between states of an electronic Kramers doublet.

- (a) Direct transitions induced by phonons are forbidden (van Vleck cancellation)
- (b) The hyperfine coupling to a nuclear spin breaks down Kramers degeneracy and allows some phonon-induced transitions
- (c) The Zeeman interaction splits further the levels, making transitions detectable by magnetic susceptibility measurements

S. Gomez-Coca, A. Urtizbera, E. Cremades, P. J. Alonso, A. Camon, E. Ruiz, F. Luis.
Nat. Commun. **5**, 4300 (2014).

Field-induced SIM behaviour of a Co(II) complex with a 1,1'-diacetylferrocene-derived ligand



X = Cl (**1**), Br (**2**), NO₃ (**3**), NCS (**4**)

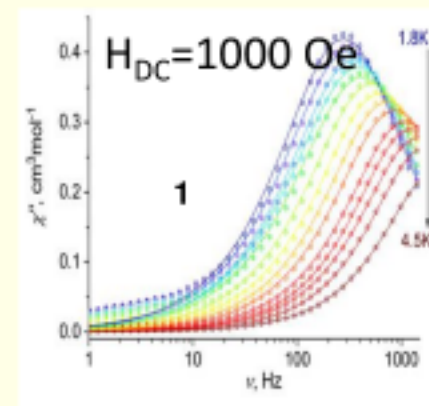
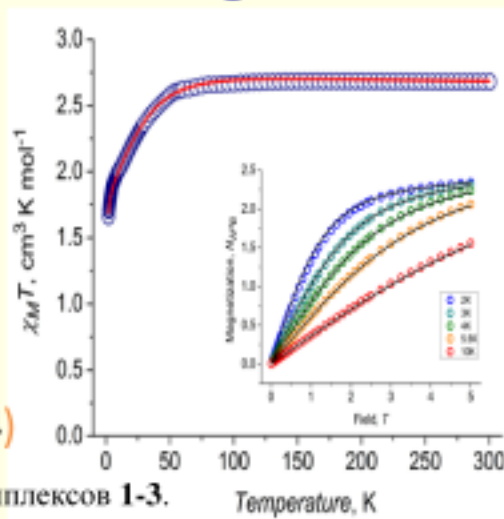
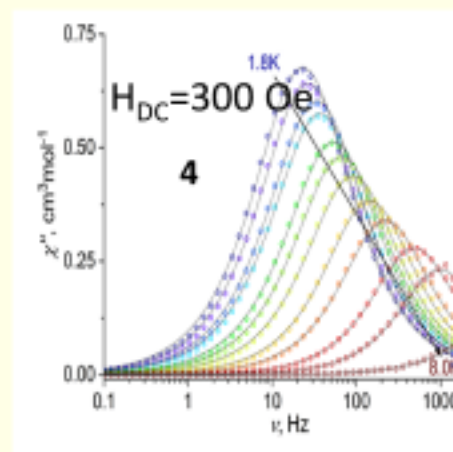
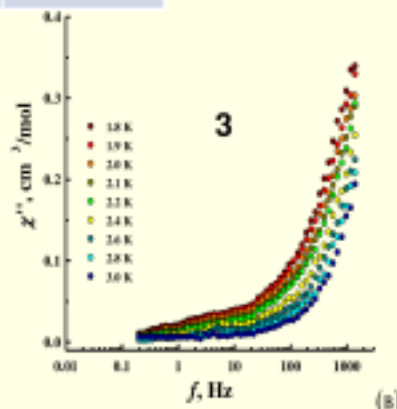
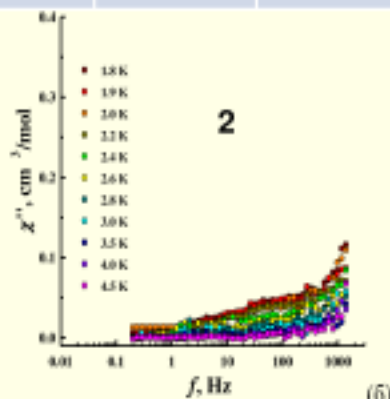


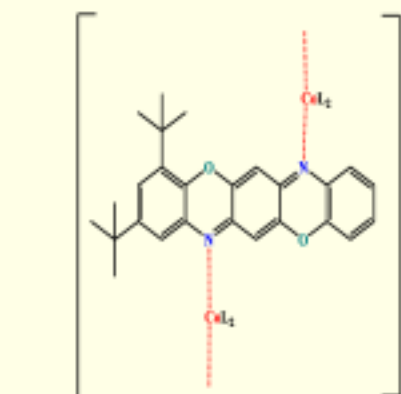
Таблица 1. Сравнение магнитных параметров комплексов 1-3.

	1	2	3	4
D, cm ⁻¹ ₁	+ 35.2	+ 32.5	+ 26.9	- 39.6

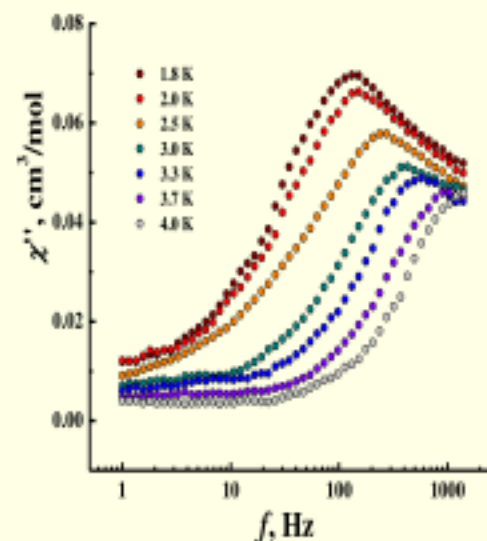
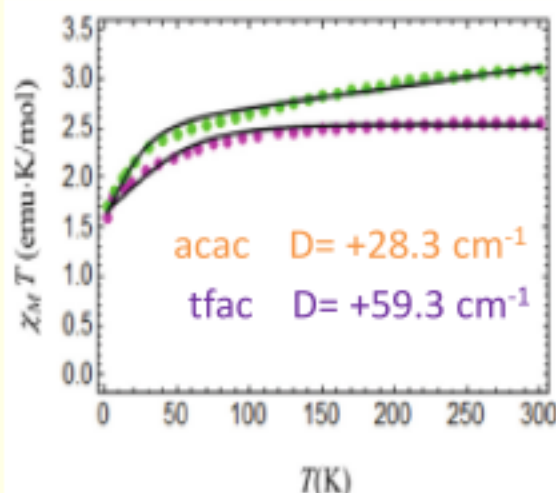
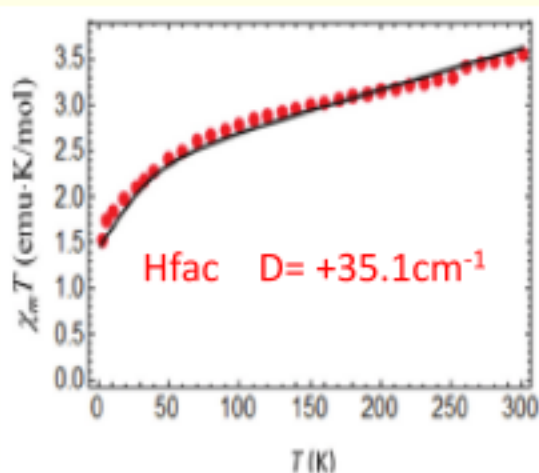
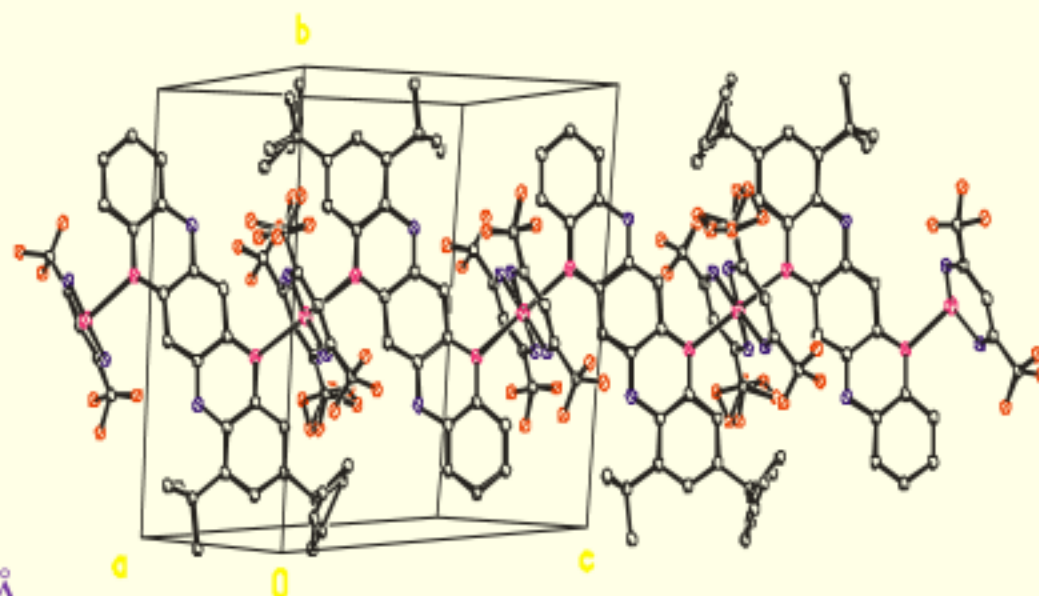
$$\hat{H} = D \left[\hat{S}_z^2 - \frac{1}{3} S(S+1) \right] + E \left(\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2 \right) + \mu_B \left(B_x g_x \hat{S}_x + B_y g_y \hat{S}_y + B_z g_z \hat{S}_z \right)$$



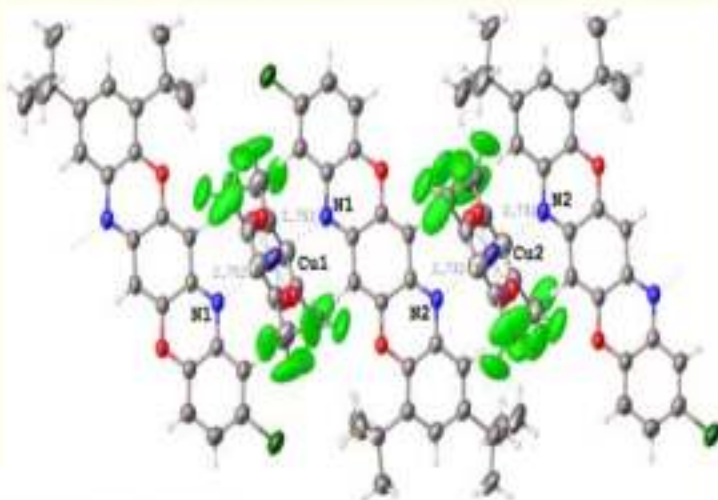
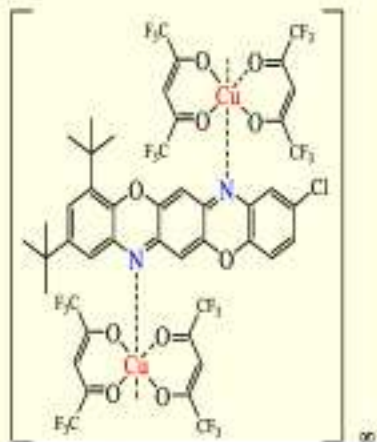
1D CPs based on a New Bridging (Triphenodioxazine) Ligand and Co(II) Diketonates



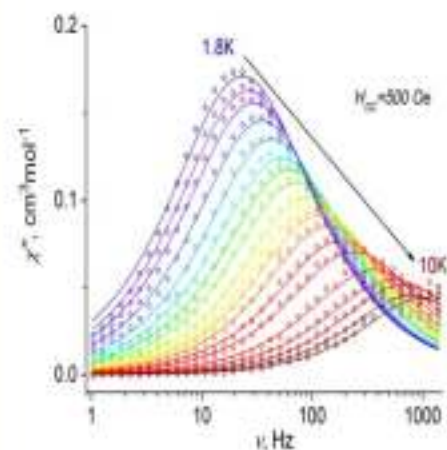
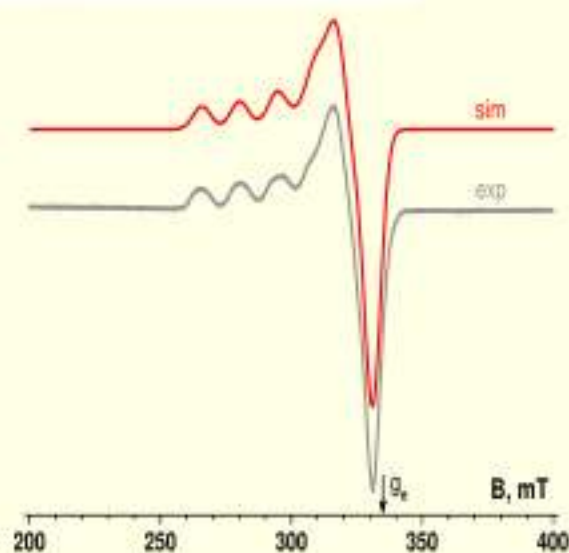
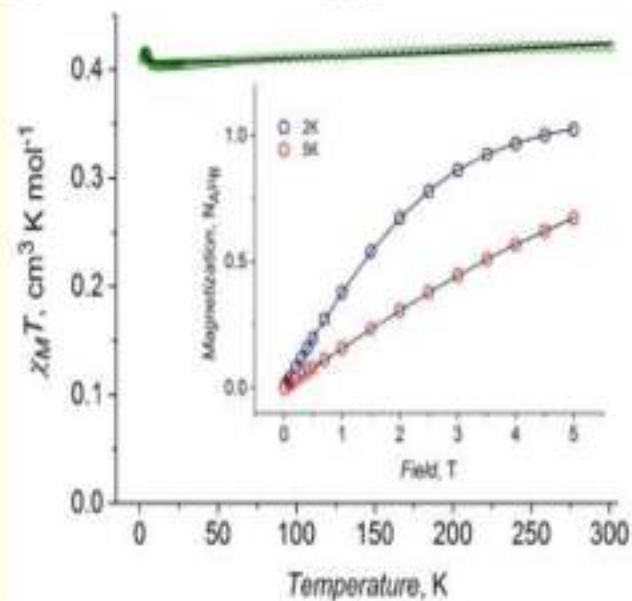
L=	Co-N
Acac	2.674(2) Å
Tfac	2.363(2)-2.387(2) Å
Hfac	2.357(2)-2.447(2) Å



Field supported slow magnetic relaxation in quasi-one-dimensional copper(II) complex with a pentaheterocyclic triphenodioxazine



Несмотря на отсутствие расщепления в нулевом магнитном поле комплекс демонстрирует медленную магнитную релаксацию в приложенном поле 500 Э



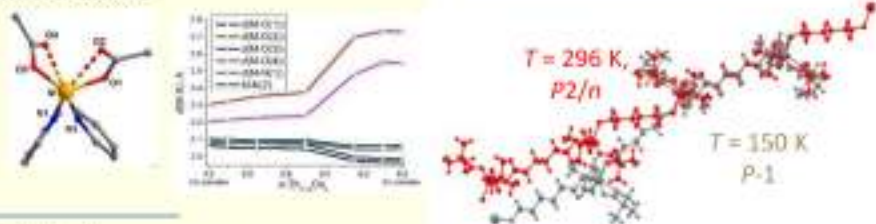
SIM на основе комплексов кобальта(II) и эффекты магнитного разбавления в кристаллических и аморфных матрицах

Либулатов Д.С., Николаевский С.А., Зорина-Тихонова Е., Матвеева А., Скоблицкий И., Швейков М., Корчагин Д., Бабешкин К., Ефимов Н., Нейкотт J., Валусе И.А., Кискин М.А., Богомолов А.С., Спурнина Е.А., Шевелев А.М., Овчаренко В.И., Haldack K., Heilmann C., Фодин М.В., Schnegg A., Вебер С.Л., Еремеев И.Л.

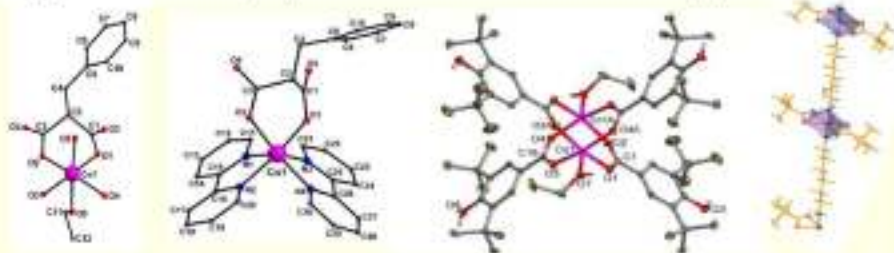
Институт общей и неорганической химии РАН
Миниуниверситет молекулярной химии СО РАН
Новосибирский Государственный Университет
Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, Universität Hamburg

Heinrich-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
Max-Planck-Institut für Chemische Energie Conversion
University of Washington
University of Bath

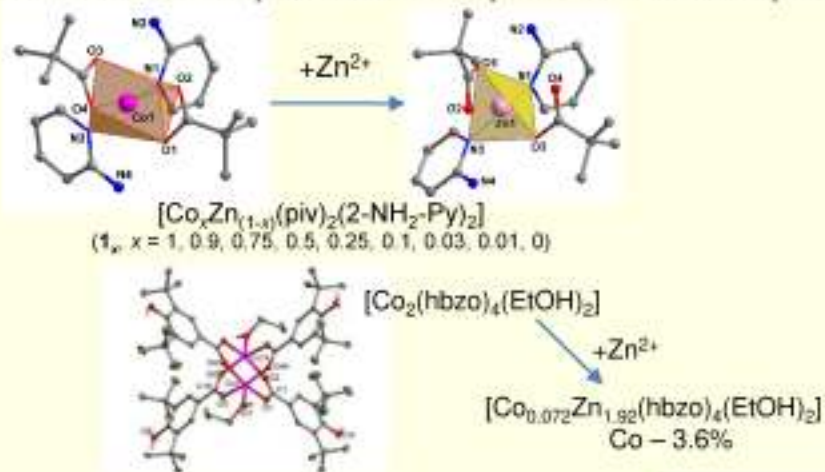
4. Исследование кристаллического строения и фазовых переходов. Изучение влияния состава на изменения кристаллической решетки и молекулярного строения комплексов.



1. Дизайн молекулярных комплексов кобальта(II)



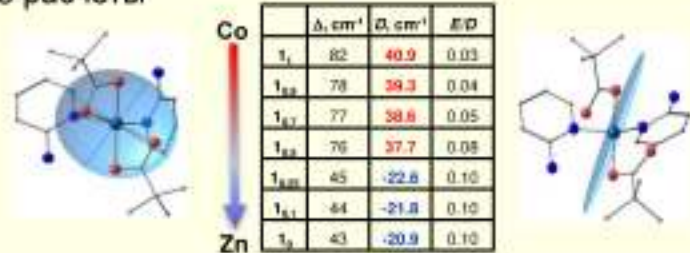
2. Синтез магнито-разбавленных кристаллических образцов



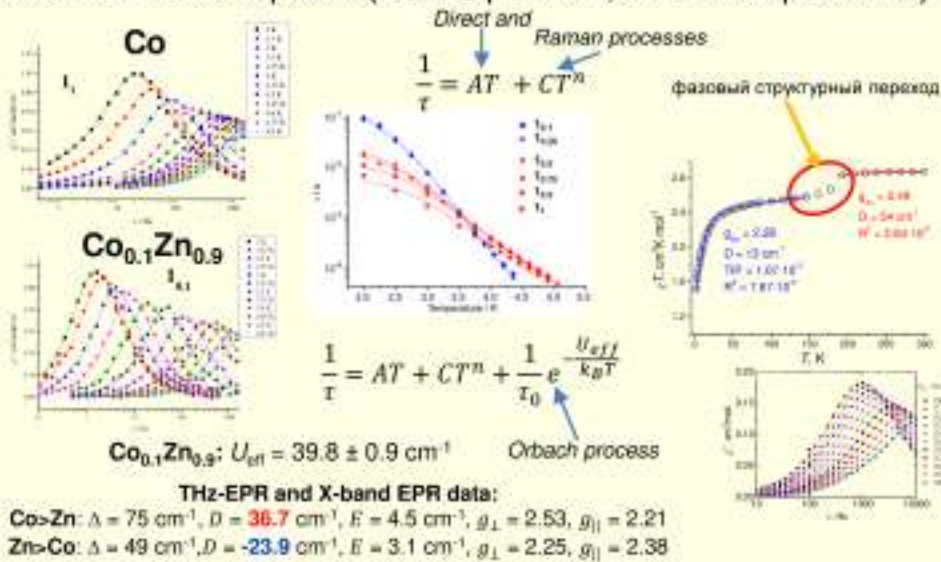
3. Получение лиганд-модифицированных аэрогелей с химически связанными ионами кобальта(II)



5. Ab initio расчеты

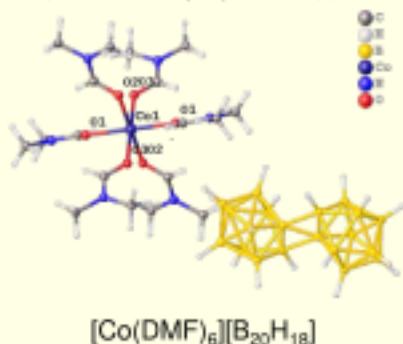


6. Магнитные измерения (AC/DC режимы, ЭПР-спектроскопия)

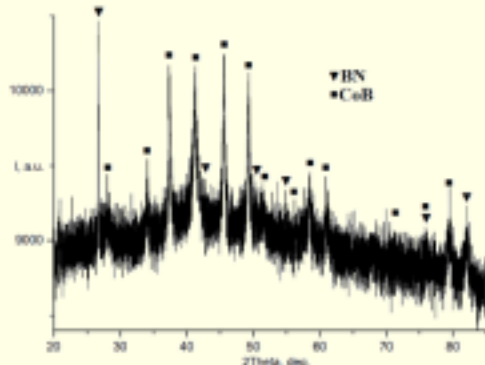


Наноразмерные бориды кобальта на подложках бор-оксидных или бор-нитридных матриц

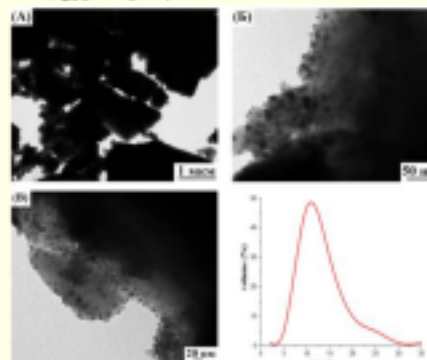
1. Синтез комплексов-прекурсоров с легко уходящими группами – координированными молекулами *N,N*-диметилформамида



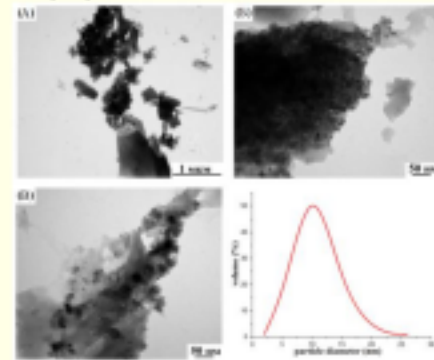
2. Отжиг образцов $[\text{Co}(\text{DMF})_6][\text{An}]$ при 700–900 °С в атмосфере Ar



Рентгенограмма продукта II⁹⁰⁰



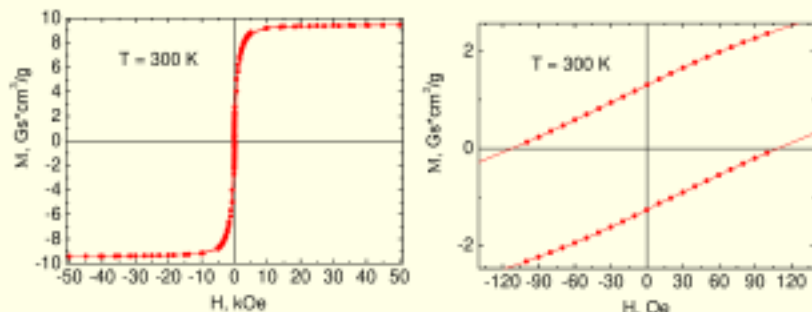
ПЭМ и кривая распределения по размерам частиц образца II⁹⁰⁰. Размеры изометрических частиц находятся в диапазоне 2–35 нм



ПЭМ и кривая распределения по размерам частиц образца III⁹⁰⁰

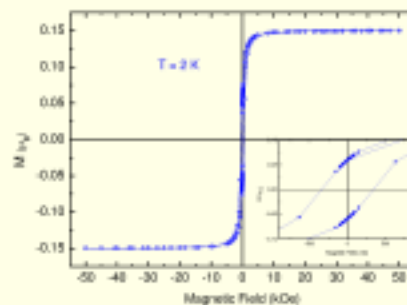
3. Магнетохимические исследования образцов

Борид-оксидная фаза $[\text{Co}(\text{DMF})_6][\text{B}_{10}\text{H}_{10}] - 700^\circ\text{C}$ (I⁷⁰⁰)



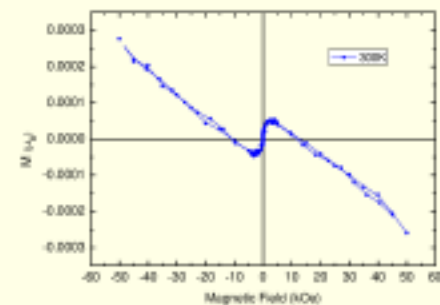
Ферри-/ферромагнитное состояние, намагниченность образца I⁷⁰⁰ достигает насыщения при $H \sim 10$ кЭ, наблюдается гистерезис намагниченности с величиной коэрцитивной силы $H_c = 110$ Э

Борид-нитридная фаза $[\text{Co}(\text{DMF})_6][\text{B}_{12}\text{H}_{12}] - 900^\circ\text{C}$ (II⁹⁰⁰)



Ферри-/ферромагнитное состояние, наблюдается дальний порядок магнитного упорядочения. $H_c = \sim 300$ Э, остаточная намагниченность $M_R = 0.06$ МВ.

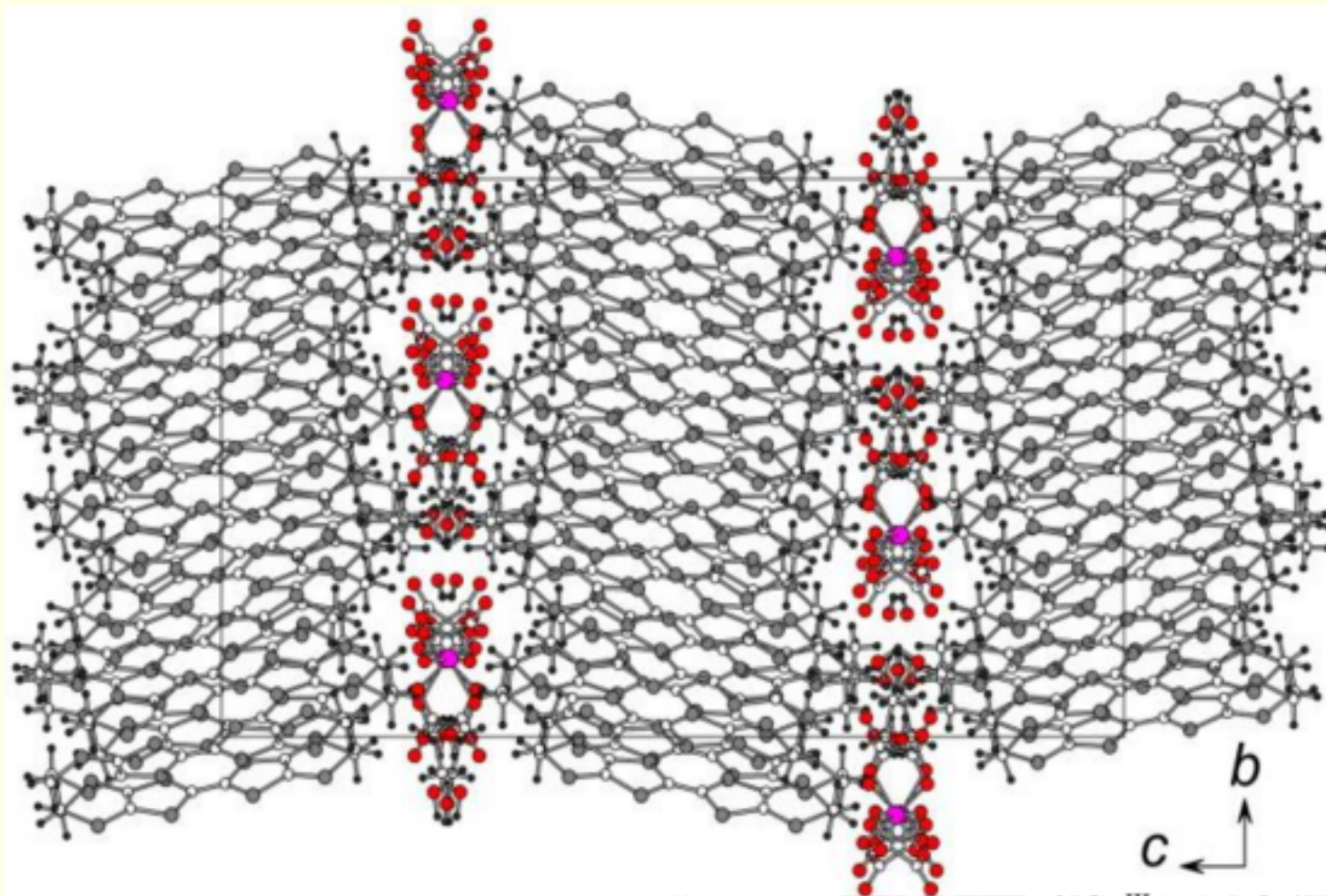
Борид-нитридная фаза $[\text{Co}(\text{DMF})_6][\text{B}_{20}\text{H}_{18}] - 900^\circ\text{C}$ (III⁹⁰⁰)



Диамагнетик с примесью ферри-/ферромагнитных фаз

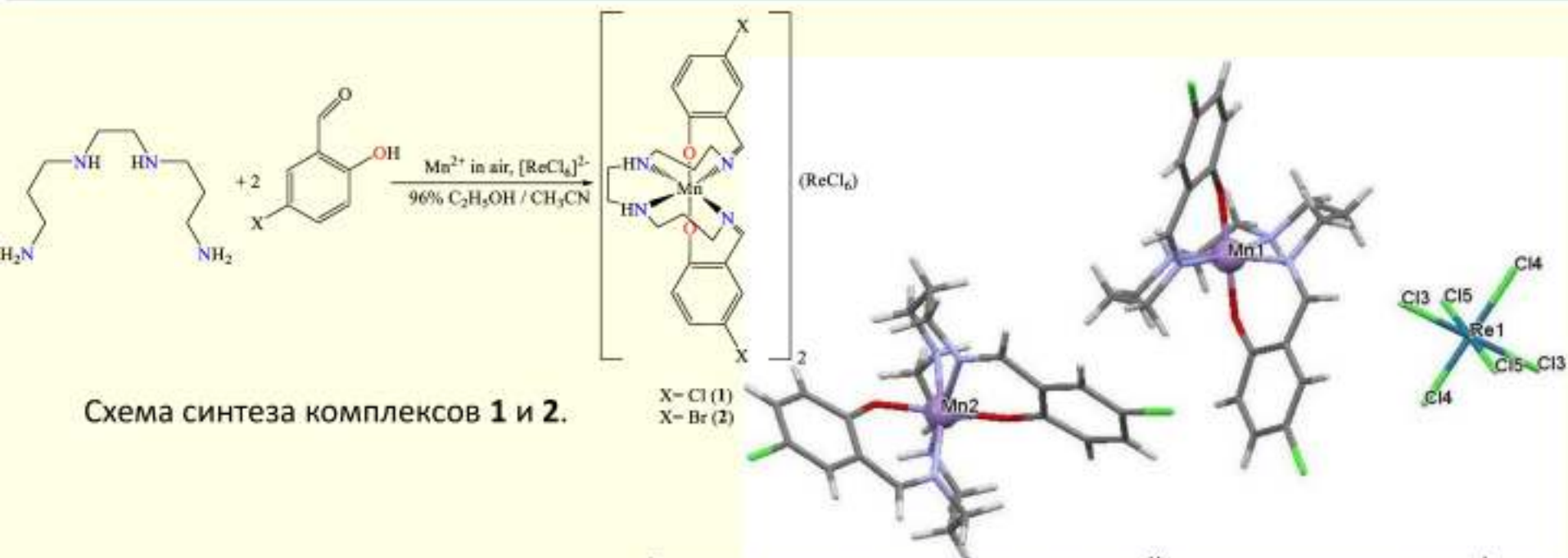
Полифункциональные магниты. Магнетизм и (сверх)проводимость.

ИПХФ РАН (Проф.Э.Б. Ягубский и сотр.)



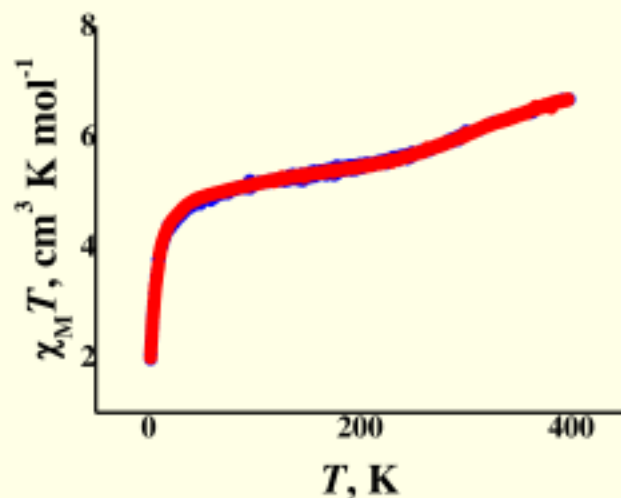
Кристаллическая структура катион-радикальной соли $(\text{BEDT-TTF})_5\{[\text{Ga}^{\text{III}}(\text{ox})_3]\cdot 3.4\text{H}_2\text{O}\cdot 0.6\text{EtOH}\}$. Катион-радикальные слои BEDT-TTF чередуются со слоями оксалатов металлов. T.G. Prokhorova et al., Crystals 2018, 8, 92.

[Mn^{III}(5-Hal-sal₂323)]₂[ReCl₆] (Hal = Cl, Br): первые комплексы марганца, демонстрирующие эффекты спинового кроссовера и моноионного магнита



Длины связей Mn-O, Mn-N_{im} и Mn-N_{am} в окружении Mn1 и Mn2 в структуре комплекса **1** от 100 до 423 К. В отличие от катиона Mn2, который находится в ВС состоянии, катион Mn1 находится в НС при 100К и переходит в ВС состояние при нагревании до 423К, переход сопровождается значительным удлинением связей Mn-N

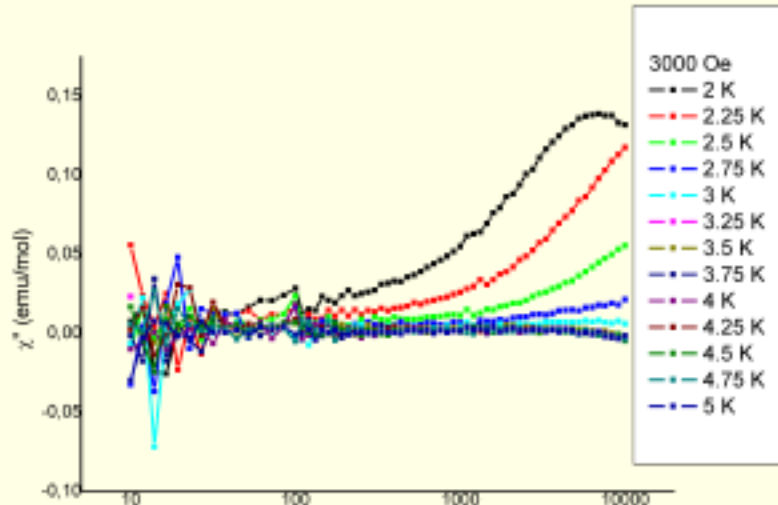
T, K	100		240		300		353		403		423	
Parameter	Mn1	Mn2	Mn1	Mn2	Mn1	Mn2	Mn1	Mn2	Mn1	Mn2	Mn1	Mn2
Mn-O	1.874(2)	1.866(2)	1.871(2)	1.866(2)	1.868(2)	1.865(2)	1.866(2)	1.864(2)	1.865(2)	1.860(2)	1.864(2)	1.860(2)
Mn-N _{im}	1.981(2)	2.091(2)	1.983(2)	2.098(2)	2.004(2)	2.101(2)	2.039(2)	2.099(2)	2.067(2)	2.097(3)	2.071(3)	2.098(3)
Mn-N _{am}	2.046(2)	2.201(2)	2.053(2)	2.219(2)	2.080(2)	2.223(2)	2.114(3)	2.225(3)	2.149(3)	2.233(3)	2.157(3)	2.235(3)



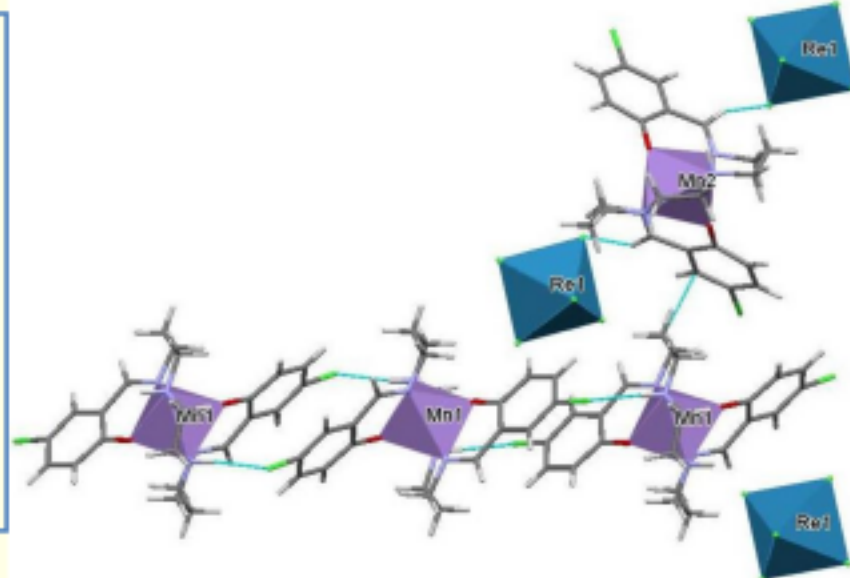
$\chi_m T$ от T для $[\text{Mn}(5\text{-Cl-sal}_2\text{323})_2][\text{ReCl}_6]$ (**1**) при охлаждении и нагревании. Комплекс **2** показал аналогичную зависимость

$\chi_m T = 5.12 \text{ cm}^3\text{K/mol}$ при 100 K, что близко к расч. значению (5.6) для суммы трех невзаим. спинов: одного Re с $S=3/2$, $g=1.8$ ($\chi_m T = 1.6$) и двух Mn ионов, одного (Mn2) в высокоспиновом (BC) состоянии с $S = 2$, $g = 2$ ($\chi_m T = 3.0$), а другого (Mn1) в низкоспиновом (HC) состоянии с $S = 1$, $g = 2$ ($\chi_m T = 1.0$).

При нагревании до 400 K $\chi_m T$ возрастает до $6.67 \text{ cm}^3\text{K/mol}$, что указывает на постепенный переход катионов Mn1 в BC состояние. Однако переход не полный. X-гау анализ при 423 K показал дальнейший рост длин связей Mn-N.



Частотная зависимость мнимой (χ'') компоненты восприимчивости в поле 3000 Oe при разных температурах для комплекса $[\text{Mn}(5\text{-Cl-sal}_2\text{323})_2][\text{ReCl}_6]$.

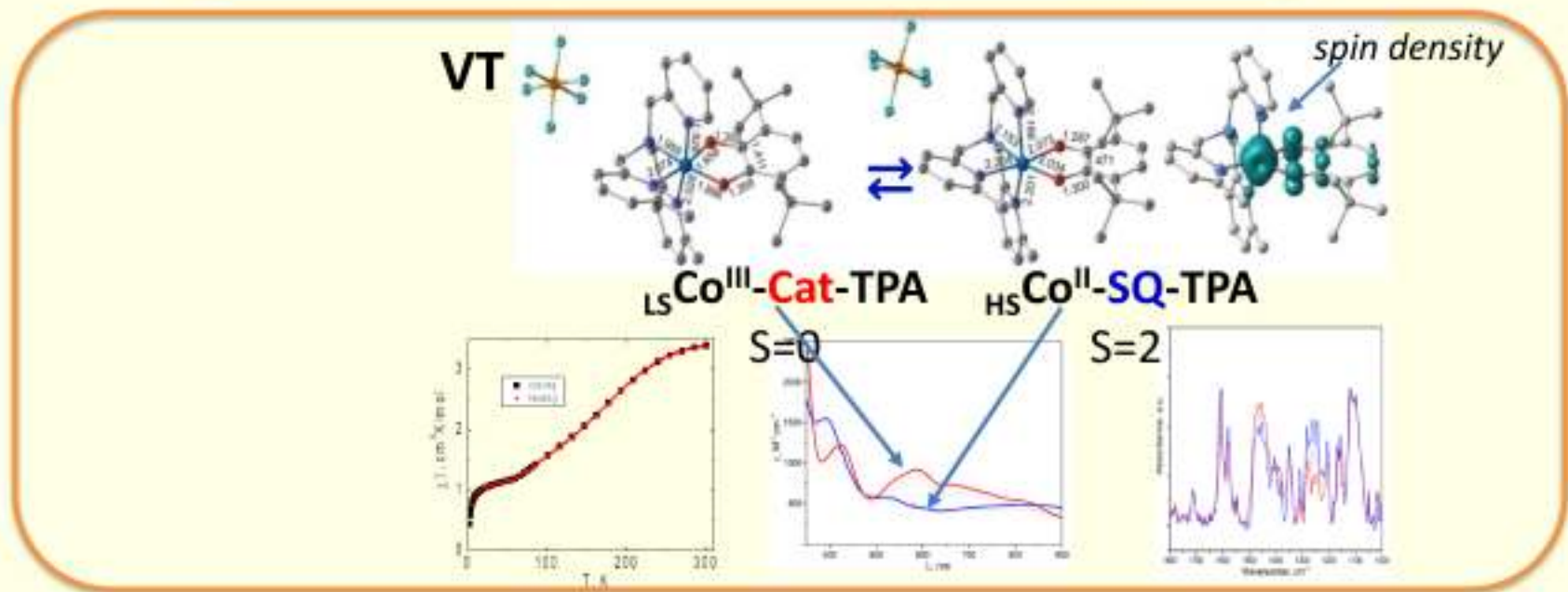
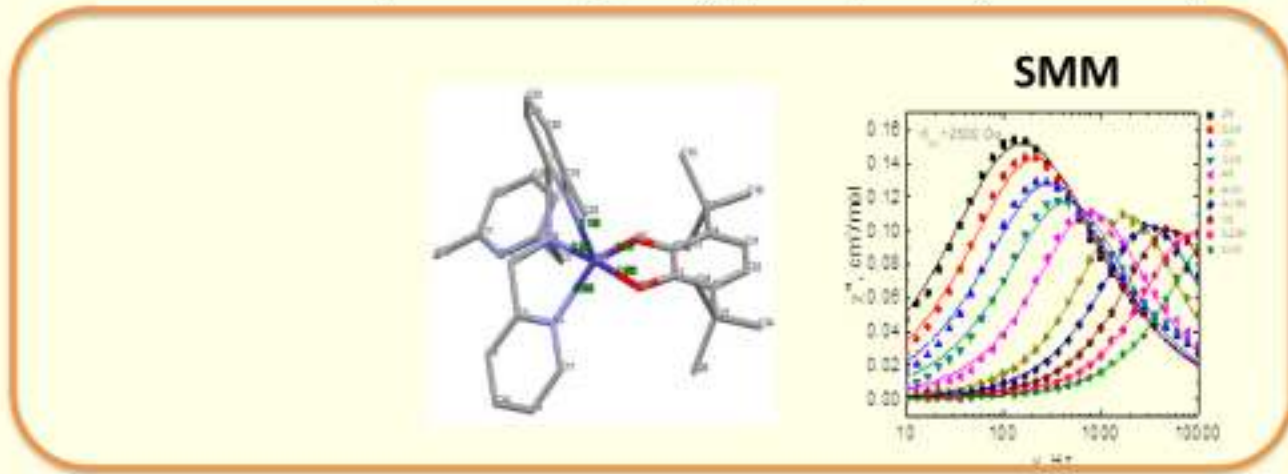


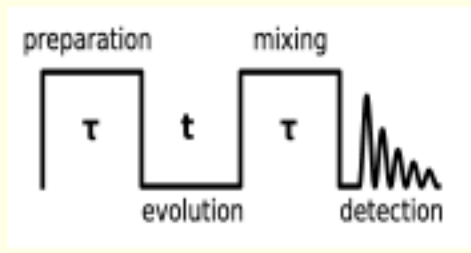
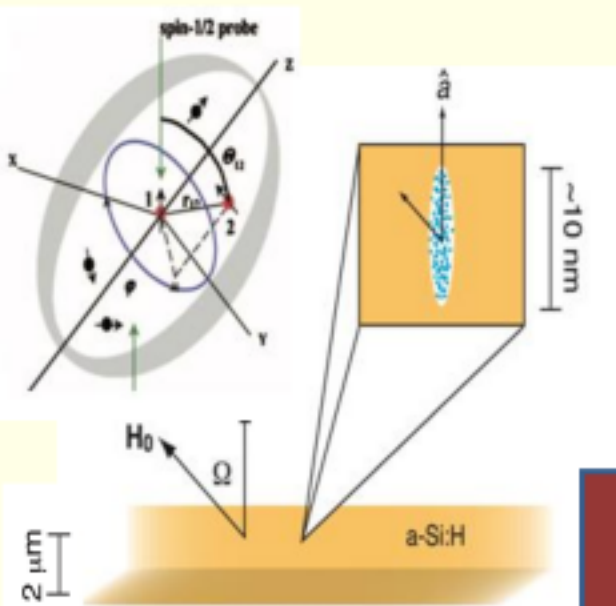
В отличие от комплексов Mn2, комплексы Mn1, которые претерпевают высокотемпературный спиновый переход в структурах $[\text{Mn}(5\text{-Hal-sal}_2\text{323})_2][\text{ReCl}_6]$ (Hal = Cl, Br), связываются в цепочки между собой за счет межмолекулярных водородных связей N-H...Cl (N...Cl 2.70 Å, N...Cl 3.41 Å, N-H...Cl 141.5°).

Магнитные свойства о-бензохиноновых комплексов кобальта с тетрадентатным N-донорным основанием

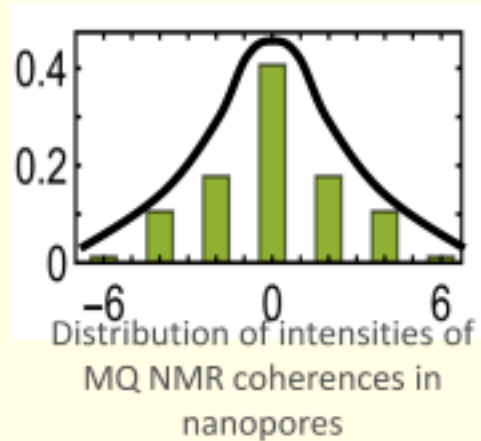
ЮФУ (ак. В.Н. Минкин, проф. А.Г. Стариков с сотр.)

ИПХФ РАН (ак. С.М. Алдошин, Д.В. Корчагин, Г.В. Шилов)





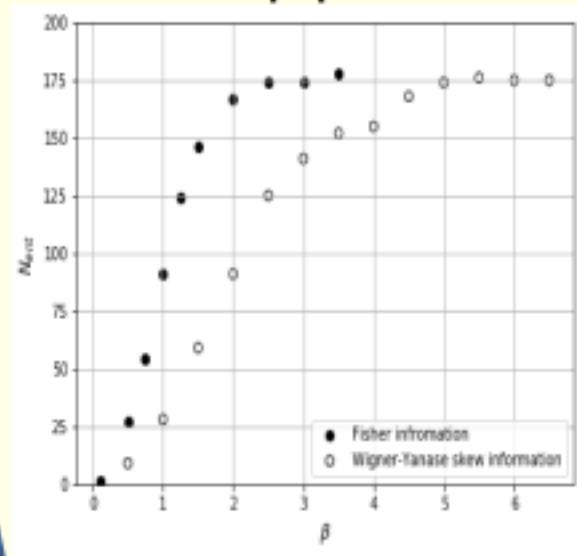
Scheme of MQ NMR experiment



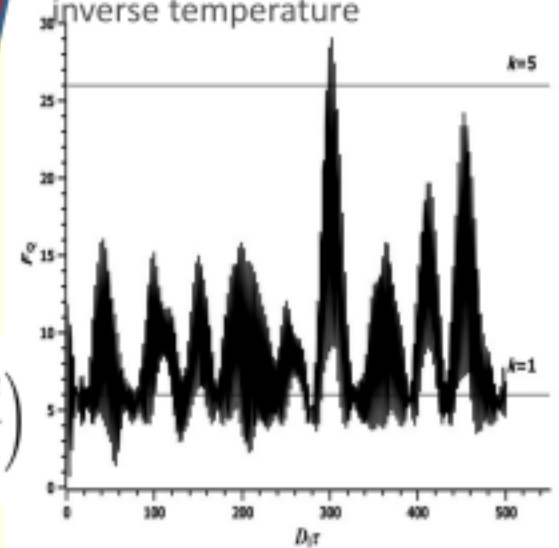
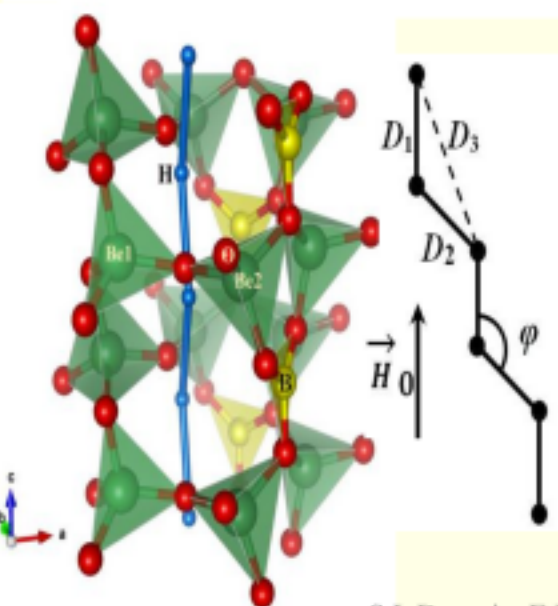
Distribution of intensities of MQ NMR coherences in nanopores

$$F_Q(\tau) \geq 2M_2(\tau)$$

$$I_{WY}(\rho(\tau, \beta), I_z) = 2 \sum_k k^2 J_k \left(\tau, \frac{\beta}{2} \right) = 2M_2 \left(\tau, \frac{\beta}{2} \right)$$



Dependence of number of entangled spins in nanopore with 201 spins on inverse temperature



Evolution of quantum Fisher information in six-spin zigzag chain at $2.4 \times 10^{-3} \text{K}$

Актуальная задача **молекулярной спинтроники** – изучить возможность контролируемым образом менять наряду с зарядовыми распределениями также спиновые состояния молекулярных ячеек квантовых клеточных автоматов

Квантовые клеточные автоматы (ККА)

⇒ молекулярная электроника

Спиновые переключатели (СП) в которых спин контролируется электрическим полем

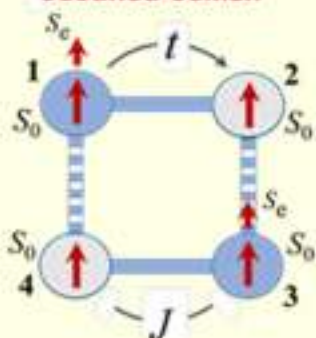
⇒ **молекулярная спинтроника**

Возможно ли скомбинировать функции ККА и СП в одном электронном устройстве?

Квадратная ячейка, составленная из двух димерных полуячеек $d^{n+1}-d^n$ -типа

Кулоновское поле управляющей ячейки подавляет ферромагнитный двойной обмен, но не влияет на антиферромагнитный гейзенберговский обмен ⇒ **предполагаемая возможность спинового переключения в димерной полуячейке**

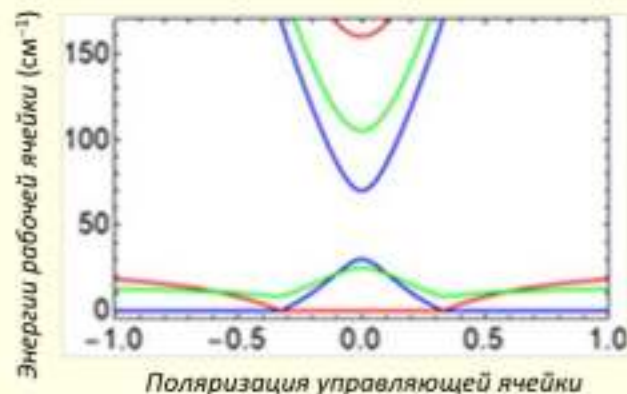
Перенос электрона между спиновыми остовами - ферромагнитный двойной обмен



Антиферромагнитный гейзенберговский обмен

Наряду с двойным обменом и гейзенберговским обменом ключевую роль играет также **вибронное взаимодействие**
усиливающее эффект кулоновского поля

Выполненные расчеты подтвердили эту гипотезу



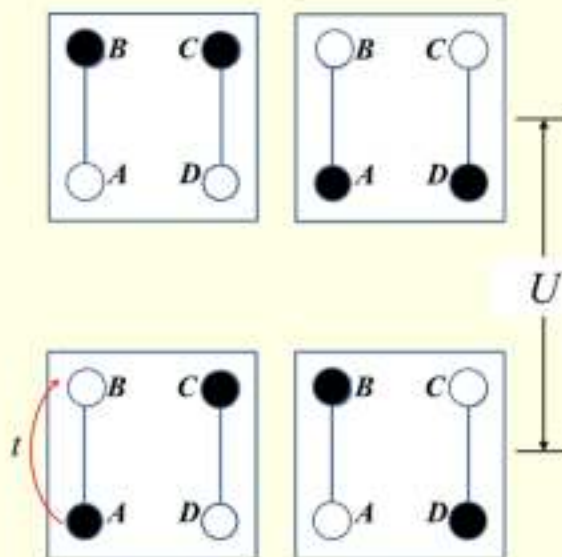
— максимальные значения спинов димерных полуячеек
 — минимальные значения спинов димерных полуячеек

Ранее рассматривались только ячейки содержащие бесспиновые остовы

Palii A., Clemente-Juan J. M., Aldoshin S., Korchagin D., Rybakov A., Zilberg S., Tsukerblat B. Mixed-Valence Magnetic Molecular Cell for Quantum Cellular Automata: Prospects of Designing Multifunctional Devices through Exploration of Double Exchange // The Journal of Physical Chemistry C 2020, Vol. 124, No. 46, P. 25602–25614.

Актуальная задача **молекулярной электроники** – расширить класс систем пригодных в качестве молекулярных ячеек квантовых клеточных автоматов

Бидимерные ячейки

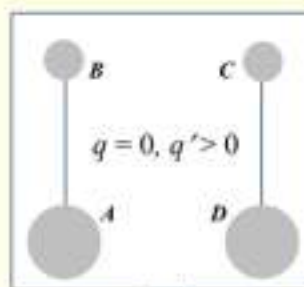
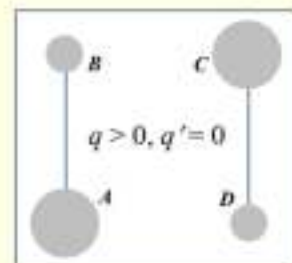


Рассмотрен общий случай когда неравенство $U \gg t$ не выполняется

Ранее предполагалось, что только системы с $U \gg t$ могут использоваться в качестве ячеек

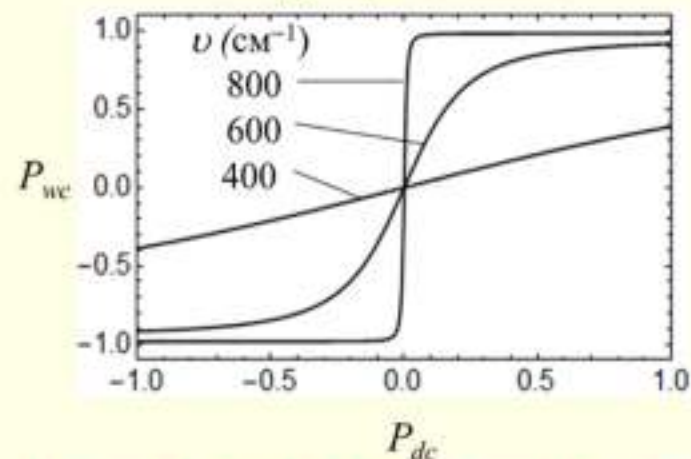
Мы показали, что это не так

Активные колебания



Двухмодовая
вибронная задача

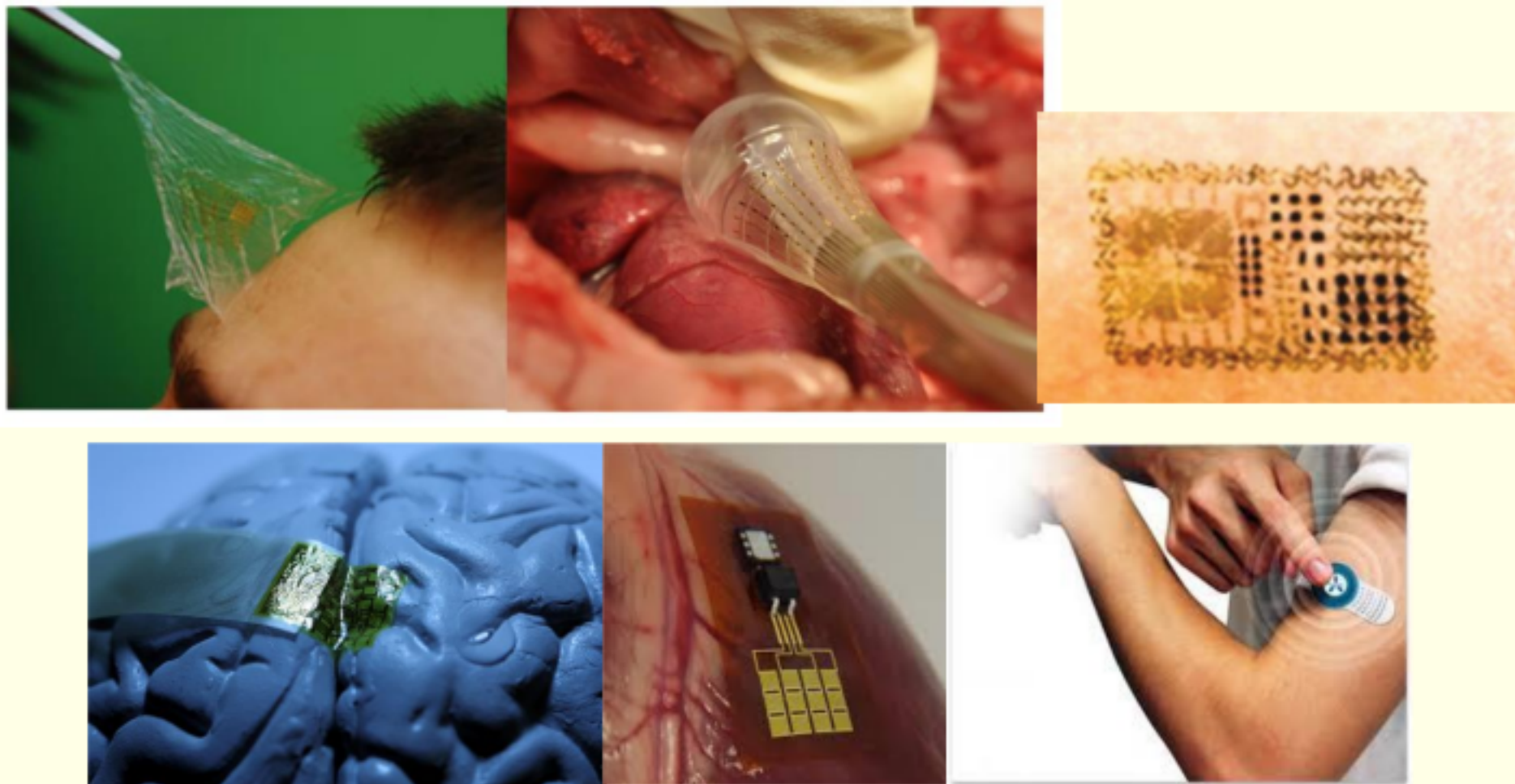
Влияние вибронного взаимодействия на функцию отклика



В случае сильной связи ячейки проявляют бистабильность и поляризуемость \Rightarrow возможность существенно расширить класс молекулярных ячеек за счет включения в него систем, в которых не реализуется случай сильного кулоновского взаимодействия, но зато имеет место сильная вибронная связь.

Palii, A.; Clemente-Juan, J. M.; Rybakov, A.; Aldoshin, S.; Tsukerblat, B. Toward multifunctional molecular cells for quantum cellular automata: exploitation of interconnected charge and spin degrees of freedom. // Physical Chemistry Chemical Physics. –2021. – Vol. 23, N.26. – P. 14511–14528.

Биосовместимая органическая и молекулярная электроника: носимая и имплантируемая

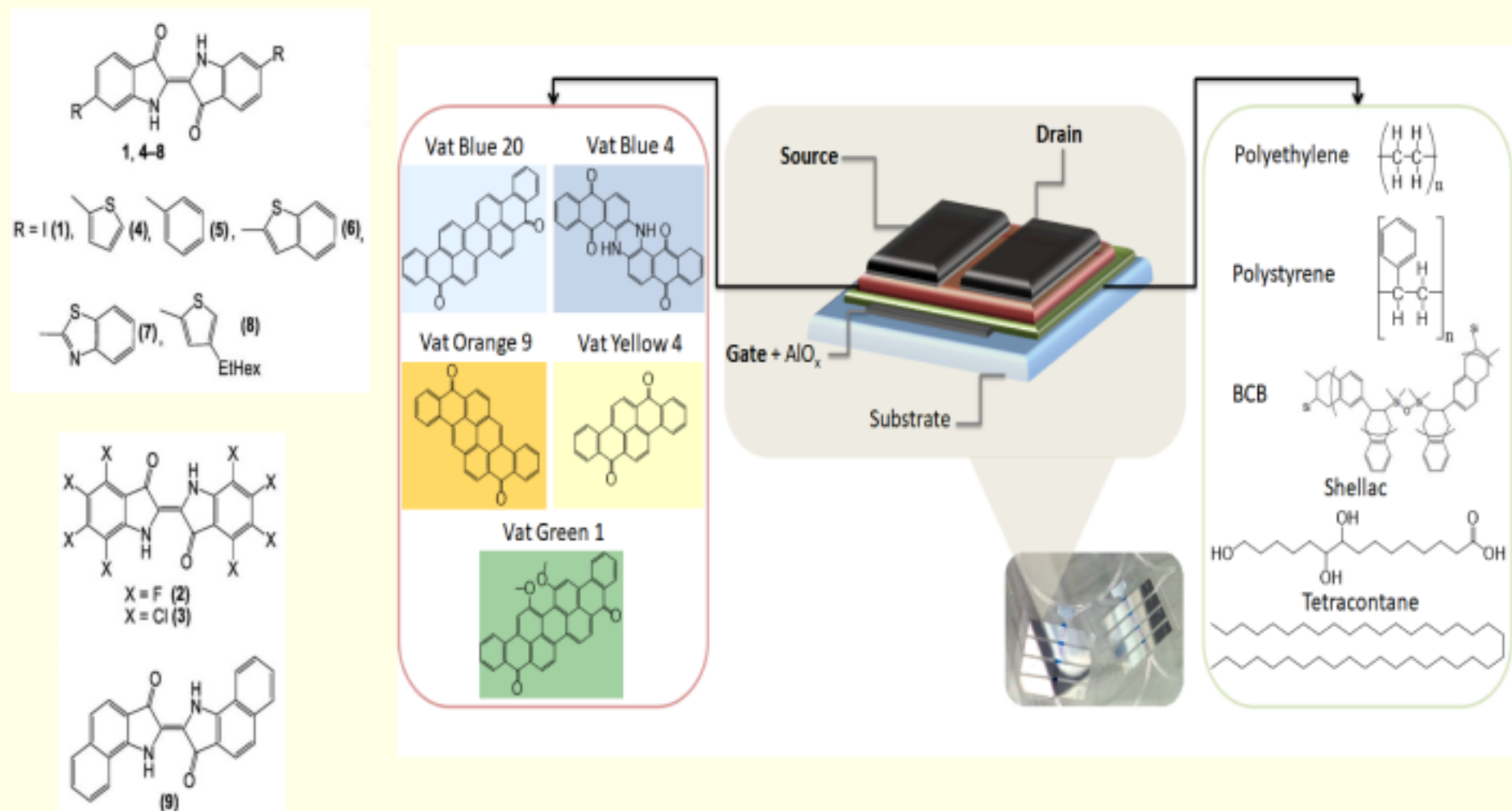


T. Sekitani, T. Someya, *Materials Today* 2011, 14, 398

M. Irimia-Vladu, *Chem. Soc. Rev.*, 2014, 43, 5881

M. L. Hammock, A. Chortos, B. C.-K. Tee, J. B.-H. Tok and Z. Bao, *Adv. Mater.*, 2013, 25, 5997.

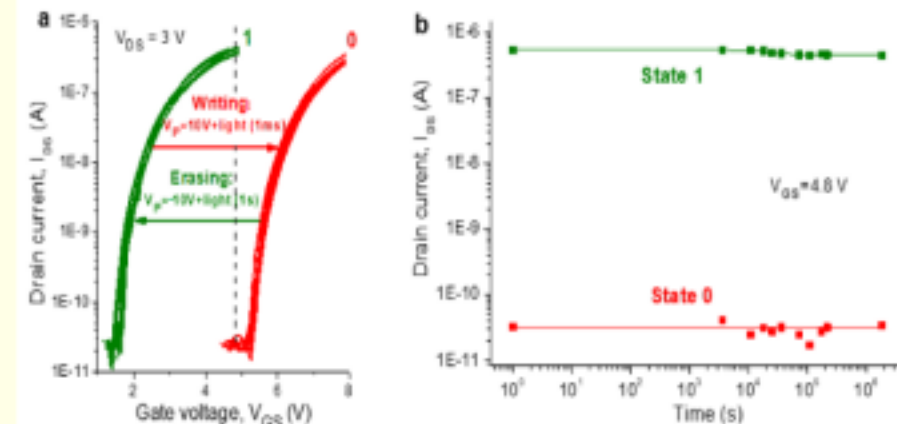
Разработаны устройства биосовместимой молекулярной электроники на основе производных индиго и бензантроновых красителей



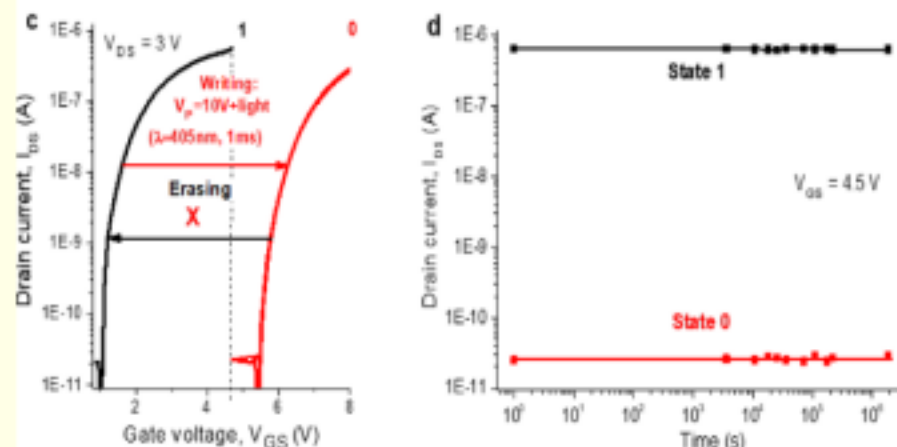
- I. V. Klimovich, A. V. Zhilenkov, L. I. Kuznetsova, L. A. Frolova, O. R. Yamilova, S. I. Troyanov, K. A. Lyssenko, P. A. Troshin. Novel functionalized indigo derivatives for organic electronics. *Dyes and Pigments*, 2021, 186, 108966
- M. R. Chetyrkina, F. S. Talalaev, L. V. Kameneva, S.V. Kostyuk, P. A. Troshin. Vat Dyes: Promising Biocompatible Organic Semiconductors for Wearable Electronics Applications. *J. Mater. Chem. C.*, 2022, 10, 3224

В сотрудничестве с университетом Бен-Гуриона разработаны устройства оптической памяти на основе молекулярных донорно-акцепторных диад порфирина-фуллерен

Устройства Flash-памяти на основе транзисторов с монослоем FP



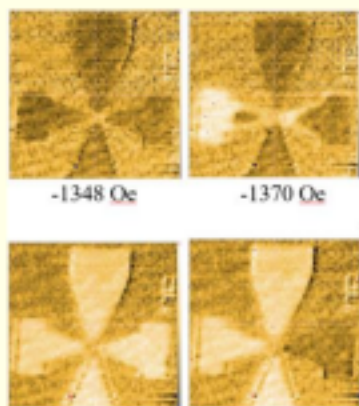
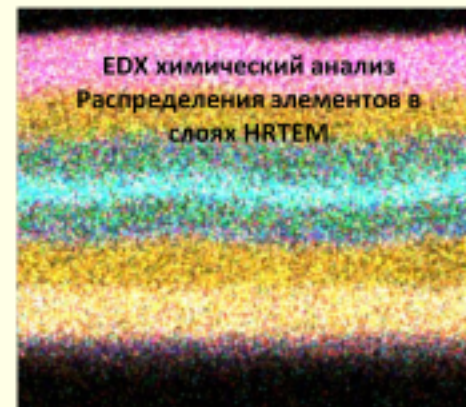
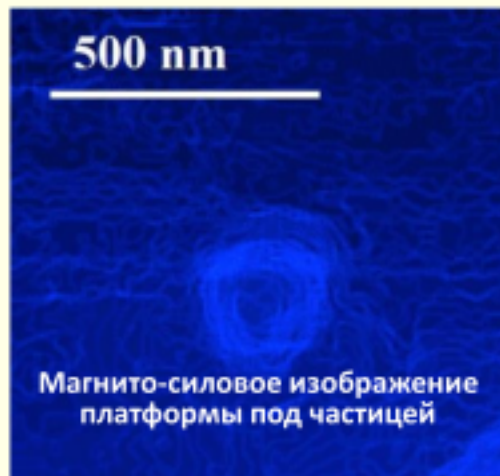
Устройства ROM-памяти на основе транзисторов с монослоем PF



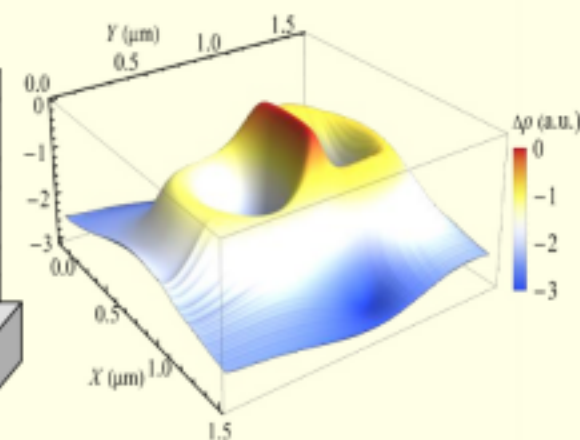
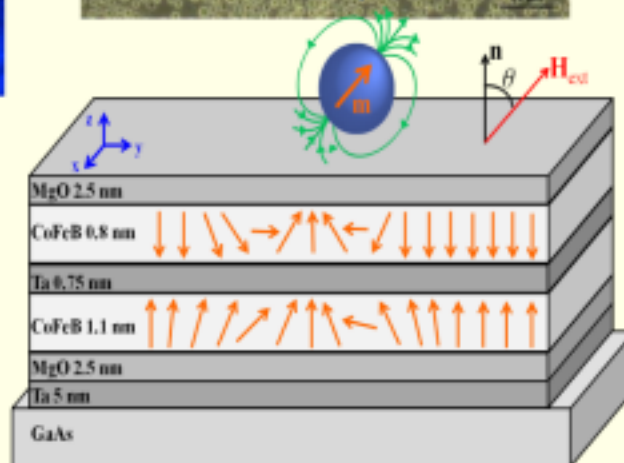
Устройства памяти на основе органических полевых транзисторов



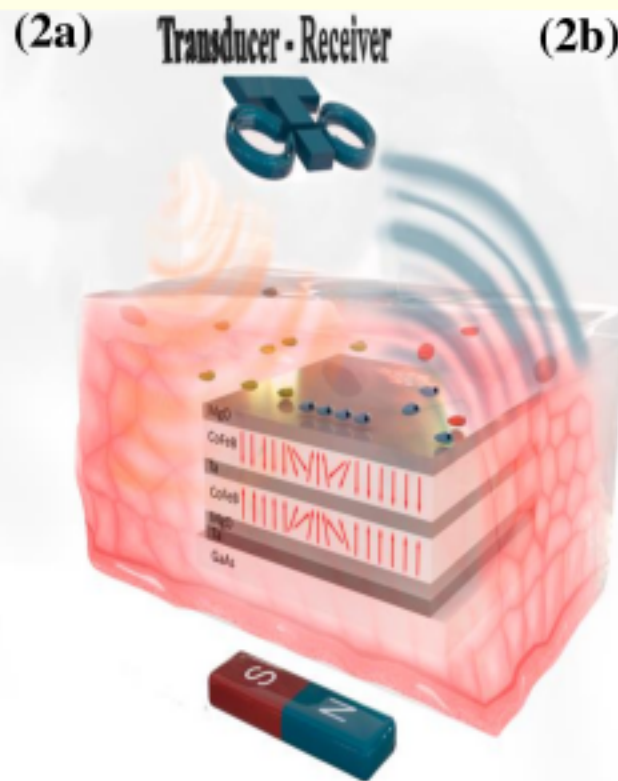
От молекулярного магнетизма к металлической спинтронике



Использование spin-torque для детектирования частиц



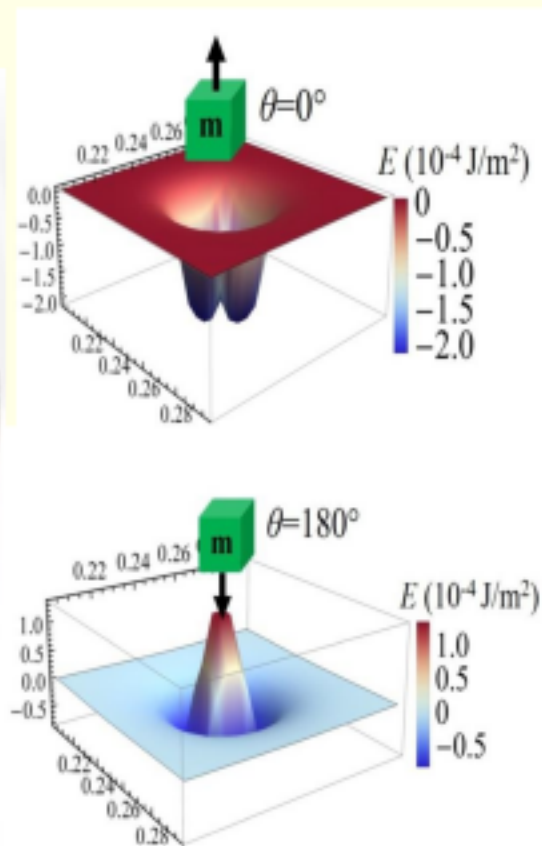
«Магнитные изображения» и микроволновое детектирование магнито-меченной клетки на поверхности спинового вентиля



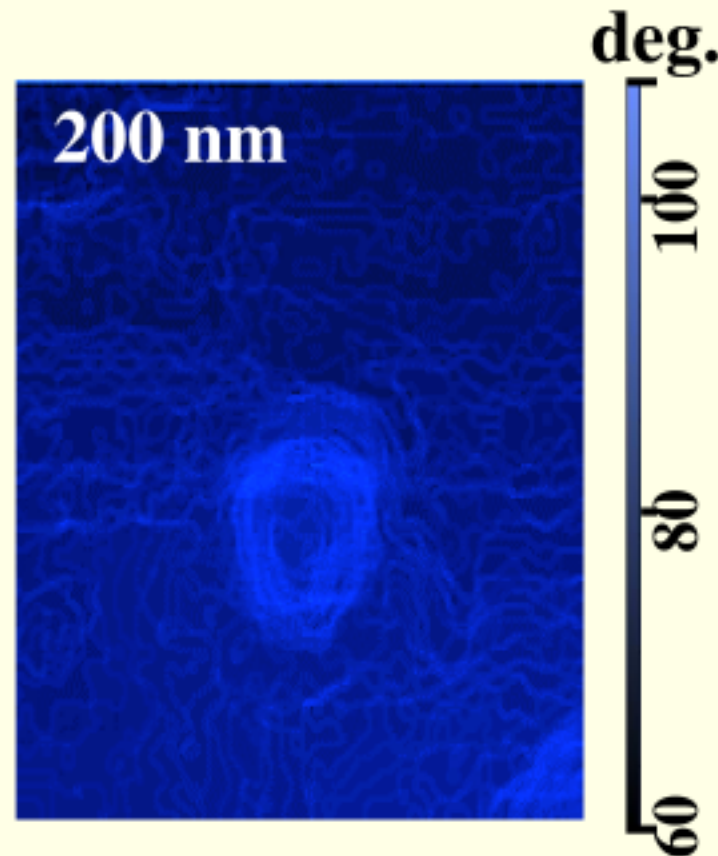
● Not labeled cells ● Labeled cells

Микроволновая регистрация состояний спин-вентильного сенсора, перемангиченного магнито-мечеными клетками на его поверхности *in-vivo*

(2b)



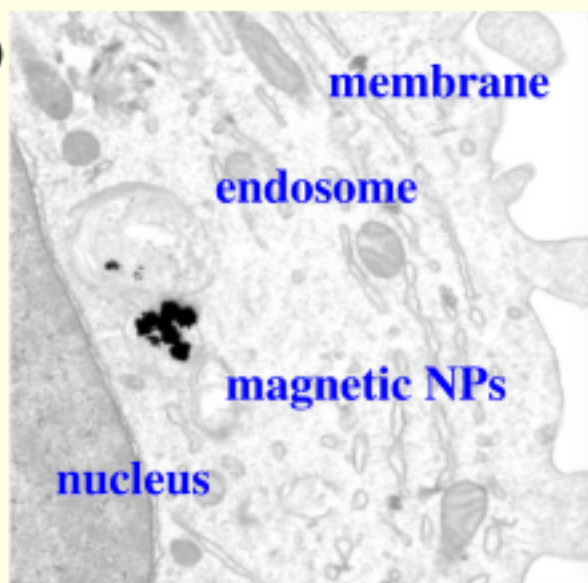
Распределение поверхностной плотности энергии платформы CoFeB/Ta/CoFeB, находящейся под действием поля рассеяния кубической наночастицы CoFe_2O_4 , для случая параллельного (а) и антипараллельного (б) направления поля наночастицы.



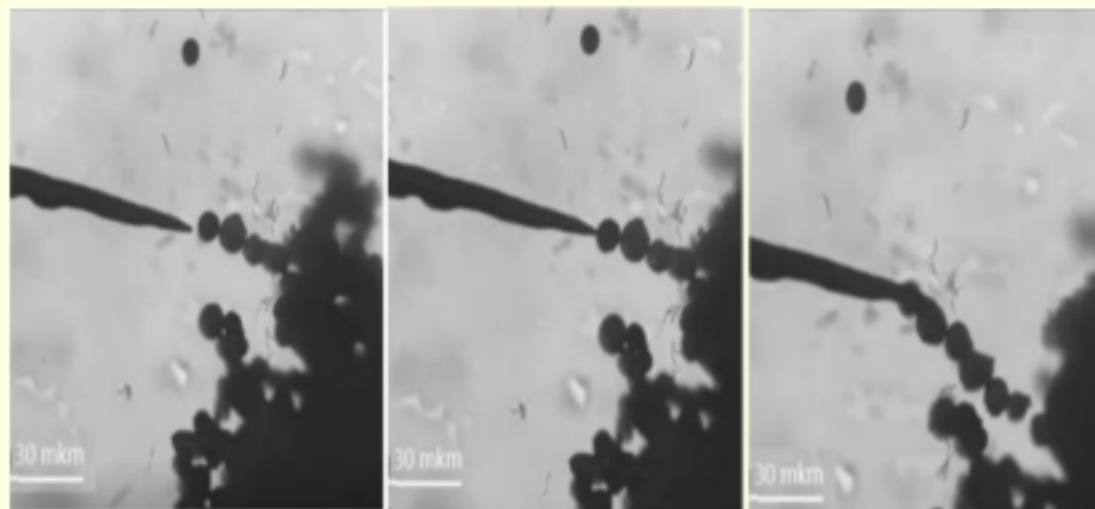
«Магнитная тень» - область намагниченности вокруг наночастицы на сенсоре, полученная вычитанием АФМ рельефа из магнитного контраста МФМ.

Магнитные микропинцеты для захвата магнито-меченных клеток

(3a)



(3b)

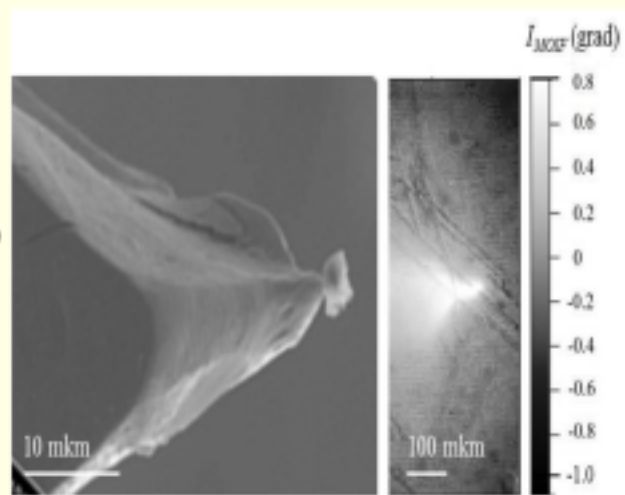


Захват микрочастиц магнитным пинцетом

Ферромагнитны наночастицы в живой клетке

Выводы

(3c)

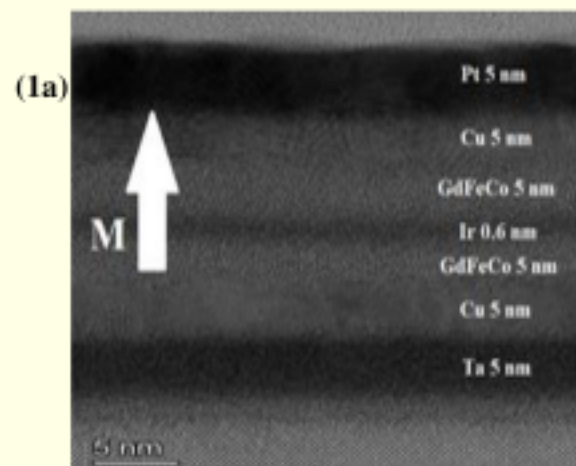


Слева ТЕМ наконечника пинцета.
Справа – его магнитное изображение

Мы разработали микропровода Fe/DyPrFeCoV для концентрации магнитного потока и увеличения силы магнитного притяжения. Мы обнаружили силу до 2000 пН, контролирующую микрочастицу того же материала размером 1 мкм на широкой области длиной ~ 5 мкм, достаточную для биологических и медицинских приложений. Большой градиент магнитного поля до $\sim 0,8 \cdot 10^6$ Тл/м, обнаруженный вблизи одиночного наконечника микропровода, очень близок к самым высоким градиентам, достигаемым в медицинских инструментах. Этого значения градиента достаточно даже для воздействия на биологические процессы внутри клеток без магнитных маркеров. Наличие ферромагнитного ядра $\alpha\text{-Fe}$ и ферромагнитной аморфной оболочки DyPrFeCoV позволяет использовать четыре магнитных состояния, переключаемых во внешнем однородном магнитном поле, для присоединения-отсоединения микрочастиц.

Медленная релаксация spin-torque при переключении направления магнитного поля в синтетических ферримагнетиках GdFeCo/Ir/GdFeCo

Моргунов Р.Б., Бахметьев М.В., Колпак О.В.



ТЕМ поперечное изображение образца GdFeCo/Ir/GdFeCo.

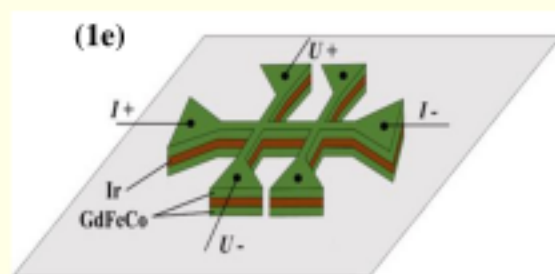
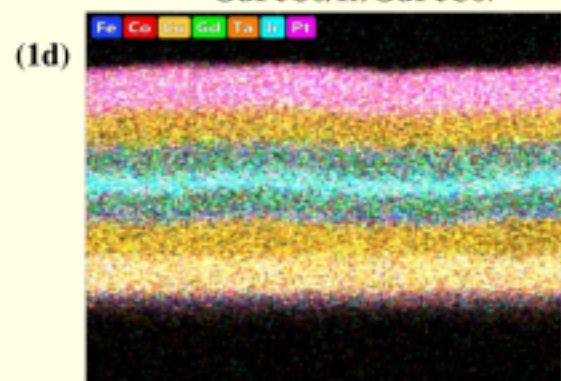
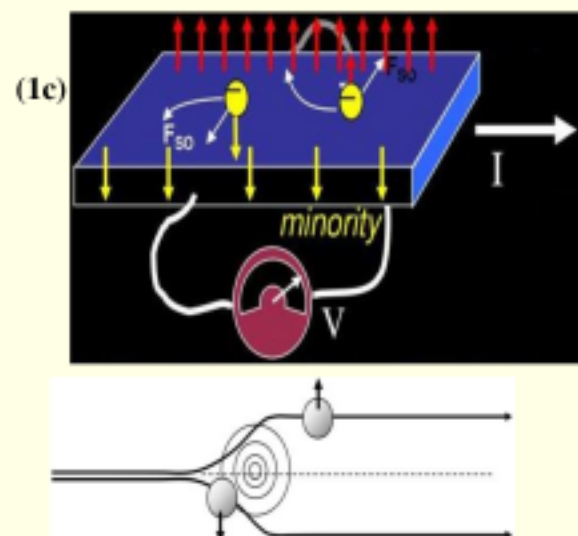
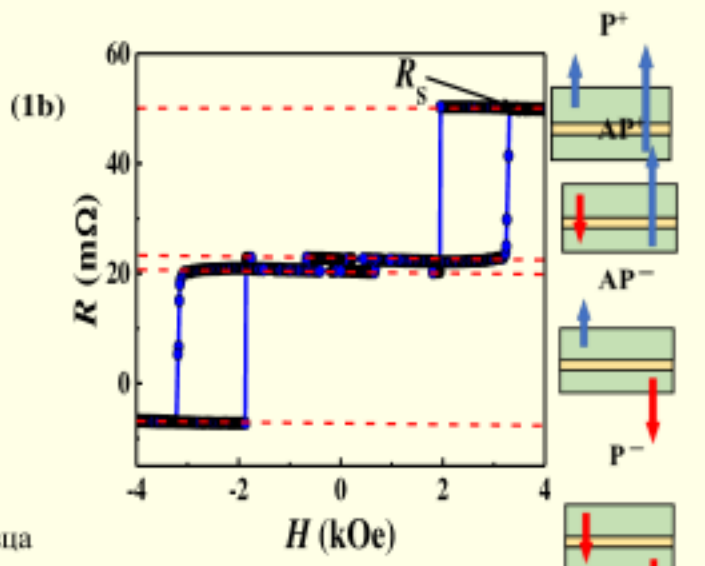
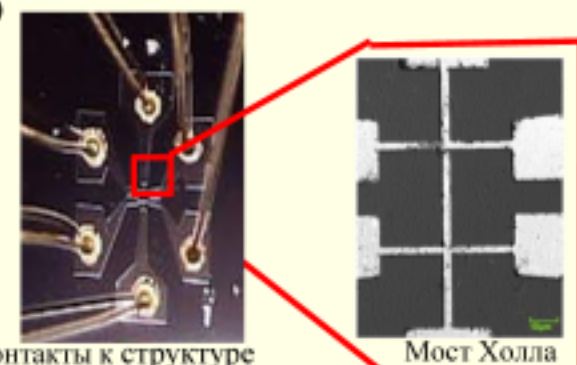


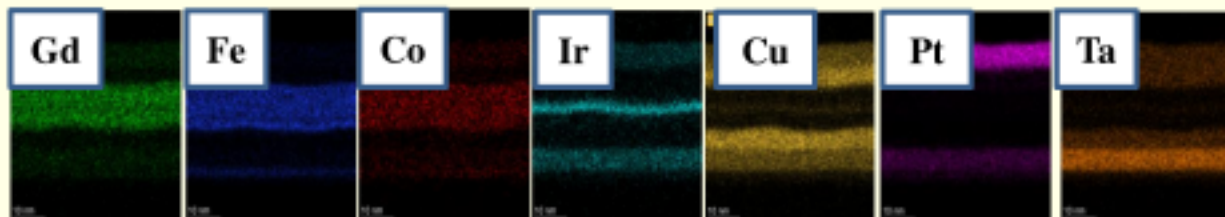
Схема для снятия поперечного напряжения



Контакты к структуре

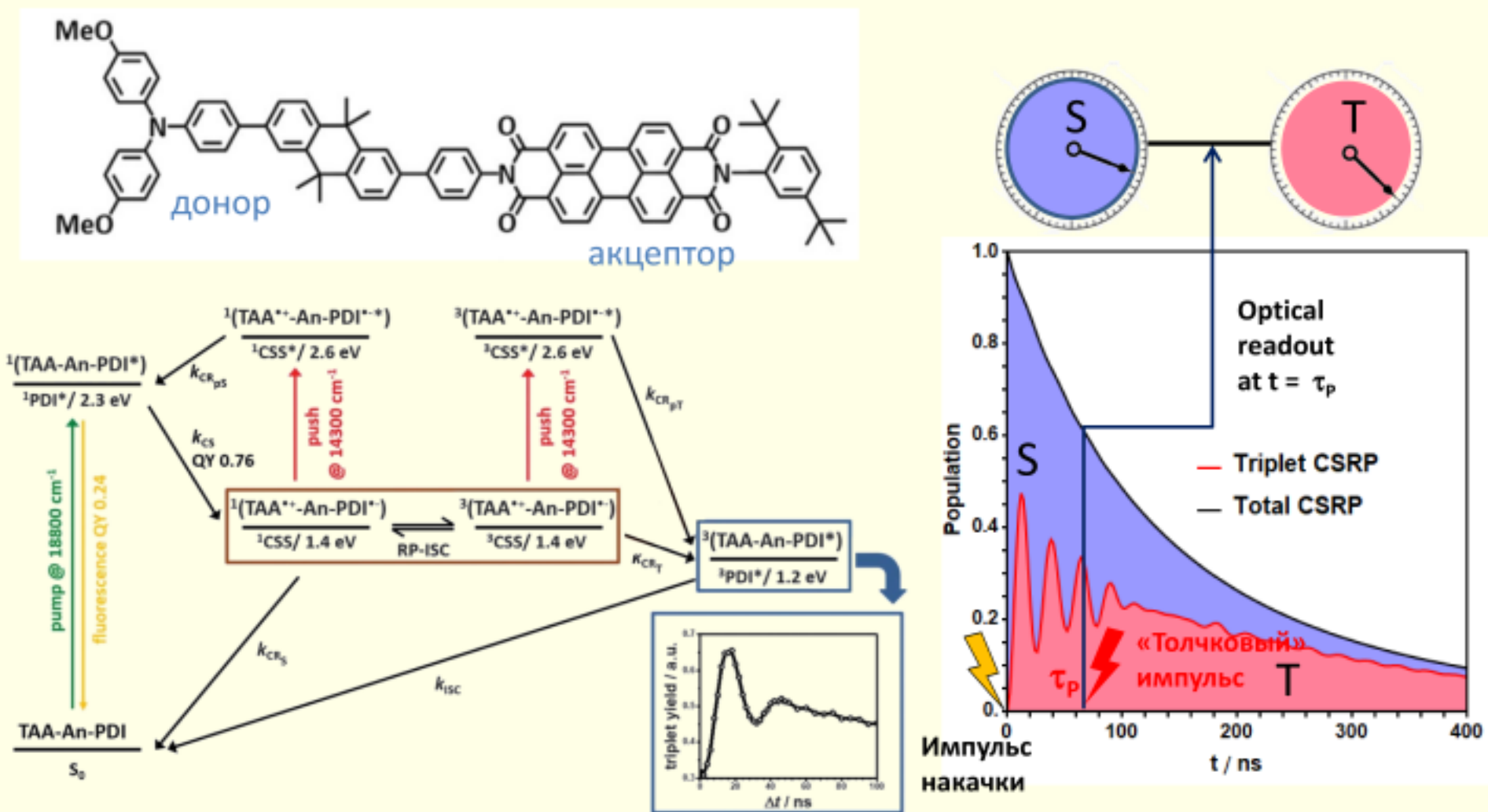
Мост Холла

Двуслойная структура проявляет спин-орбитальный вращательный момент, прямо пропорциональный намагниченности слоев. Резистивная петля гистерезиса следует повторять петлю гистерезиса намагниченности.



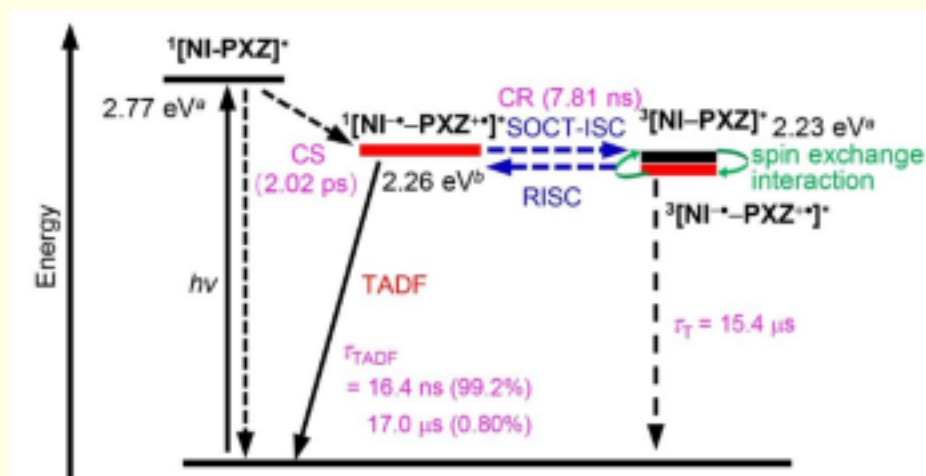
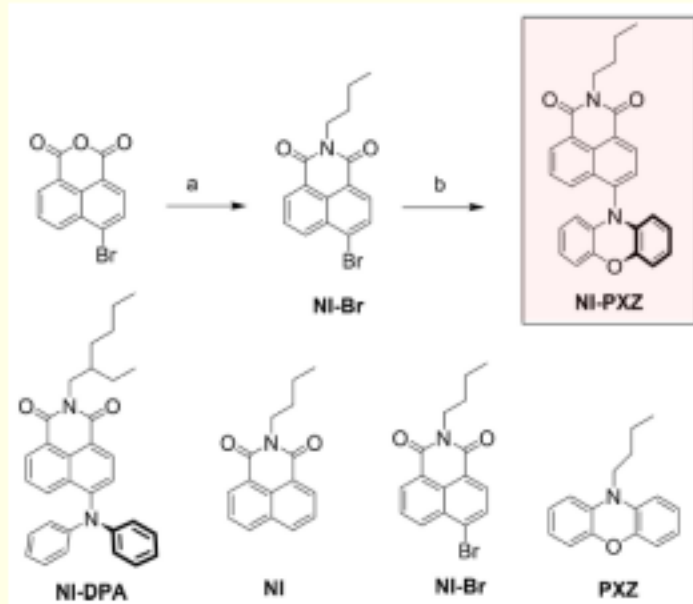
EDX изображения химического состава образца GdFeCo/Ir/GdFeCo и его профили

Разработан метод исследования ранее неразличимых спиновых состояний

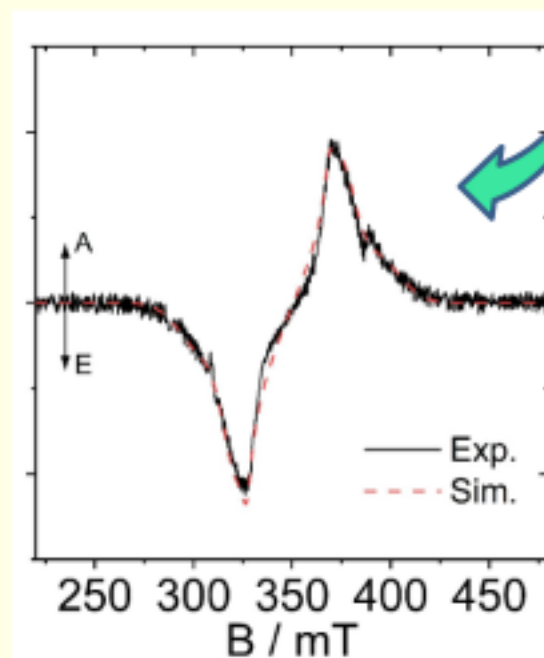
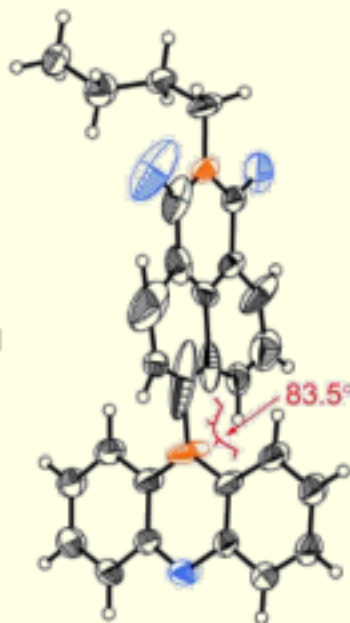


Readout of spin quantum beats in a charge-separated radical pair by pump-push spectroscopy David Mims, Jonathan Herpich, Nikita N. Lukzen, Ulrich E. Steiner, Christoph Lambert Science • 16 Dec 2021 • Vol 374, Issue 6574 • pp. 1470-1474 • DOI: 10.1126/science.abl4254

Термически активированная замедленная флуоресценция (TADF) в спиновой диаде



- Изучены особенности TADF в спиновой диаде Ni-PXZ методами оптической и ВР ЭПР спектроскопии
- Долгоживущее состояние с разделенными зарядами (15.4 мкс)
- Спиновый обмен с триплетным состоянием по данным ВР ЭПР



Red Light-Emitting TADF of Naphthalimide-Phenoxazine Electron Donor-Acceptor Dyad...X. Zhang, ..., J. Zhao, M. V. Fedin. Chem. Eur. J. 28 (2022) e202200510.

Благодарю за внимание

**Выражаю благодарность авторам
работ за предоставленные
материалы**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-779).



INTERNATIONAL TOMOGRAPHY CENTER OF THE SIBERIAN BRANCH RAS



Sergey Veber
Anatoly Melnikov
professor
Matvey Fedin
Artem Bogomyakov
academician Victor
Ovcharenko



Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

Yaroslav Getmanov
Oleg Shevchenko



Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS

Mikhail Kiskin



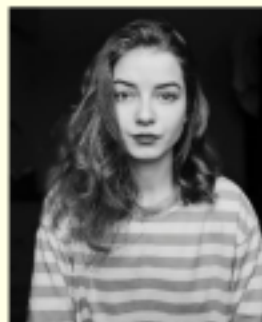
**Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук**



**академик РАН
И.Л. Еременко**



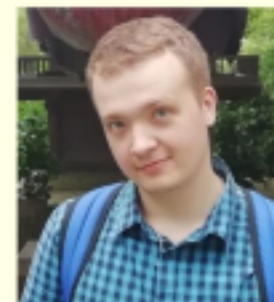
**к.х.н.
Е.Н. Зорина-
Тихонова**



**аспирант
А.К. Матюхина**



**к.х.н.
Н.В. Гоголева**



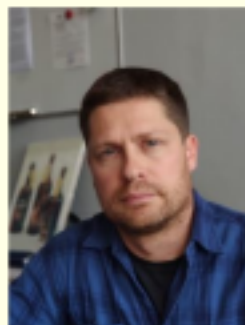
**аспирант
К.А. Бабешкин**



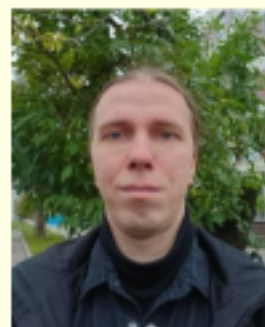
**д.х.н.
А.А. Сидоров**



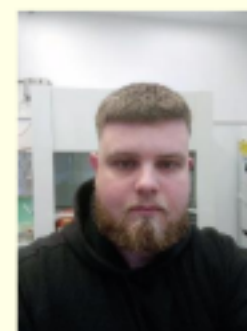
**к.х.н.
Н.Н. Ефимов**



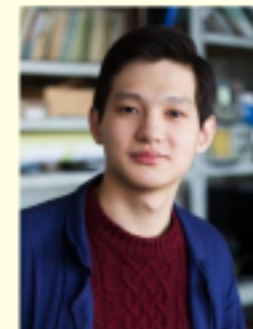
**д.х.н.
М.А. Кискин**



**к.х.н.
И.В. Скабицкий**



**к.х.н.
М.А. Шмелев**



**аспирант
П.Н. Васильев**



Южный федеральный университет



академик РАН
В.И. Минкин



Д.Х.Н.
А.В. Метелица



Д.Х.Н.
Е.П. Ивахненко



Д.Х.Н.
А.Г. Стариков



К.Х.Н.
П.А. Князев



К.Х.Н.
Н.И. Омеличкин



Д.Х.Н.
А.А. Старикова



К.Х.Н.
М.Г. Черепев



Институт физической химии и электрохимии РАН им. А.Н. Фрумкина



академик РАН
А.Ю. Цивадзе



д.х.н.
А.Г. Мартынов



чл.-корр. РАН
Ю.Г. Горбунова

**Ben-Gurion University of the Negev,
Beer-Sheva, Israel**



Boris Tsukerblat

**Institute of Molecular Sciences,
University of Valencia, Valencia, Spain**



Eugenio Coronado



Modesto Clemente-Juan



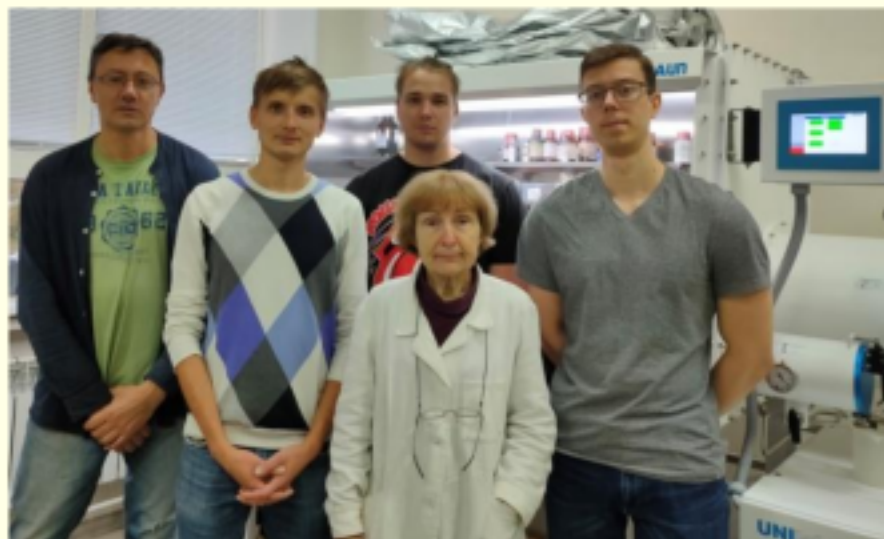
к.х.н. А.В. Казакова, к.х.н. Н.Д. Куц, , к.х.н. И.Е.Кареев,
к.х.н. Н.Г. Спицина, д.х.н. Э.Б. Ягубский, к.т.н. В.П. Бубнов



д.ф.-м.н., профессор
Э.Б.Фельдман



д.ф.-м.н.
О.В. Коплак



**д.х.н. Д.В. Конарев, к.х.н. Е.И. Жилева,
Н.Р. Романенко, к.х.н. М.А. Фараонов,
М.В. Михайленко**



**д.ф.-м. н., профессор Р.Б. Моргунов,
Р.С. Аллаяров, к.ф.-м.н. Е.И. Куницына,
к.ф.-м. н. А.И. Безверхний, М.В. Бахметьев
к.ф.-м.н. А.Д. Таланцев**



к.ф.-м.н. В.В. Ткачев, академик РАН С.М. Алдошин, д.х.н., профессор Н.А. Санина, к.х.н. Н.В. Емельянова, phd Л.Г. Гуцев, д.ф.-м.н. А.В. Палий, к.ф.-м.н. Г.В. Шилов, к.х.н. Д.В. Корчагин, к.х.н. Е.А. Юрьева