

XLI INTERNATIONAL WINTER SCHOOL
IN THEORETICAL PHYSICS

Kauhar'ka

FEBRUARY 1-6, 2026

BOOK OF ABSTRACT



Оглавление

INVITED	8
Nickelates: A New Class of High-Temperature Superconductors, <i>I.V. Leonov</i>	9
Hydrodynamic regime of excitons transport in van der Waals heterostructures, <i>V.N. Mantsevich, M.M. Glazov</i>	10
Interplay of superconductivity and ferroelectricity: tuning superconductivity by the electric field, <i>A.S. Mel'nikov, A.A. Kopasov, D.S. Annenkov</i>	11
Altermagnetic and Noncentrosymmetric ordering in metals, <i>V.P. Mineev</i>	12
Single particle and two particle excitations in the two-dimensional Hubbard model on square and triangular lattices, <i>S.G. Ovchinnikov</i>	13
Ferromagnetism in antiferromagnetic quasi-2D crystals, <i>V.M. Pudalov, A.Yu. Levakhova, A.V. Sadakov, K.S. Pervakov, V.A. Vlasenko, A.L. Vasiliev, A.V. Ovcharov, V.I. Bondarenko, P.D. Grigorev, N.S. Pavlov, I.A. Nekrasov, I.I. Gimazov, D.E. Zheleznyakova, R.B. Zaripov, Yu.I. Talanov</i>	14
Brave new altermagnetism, <i>S.V. Streltsov</i>	15
Magnon spin currents in collinear antiferromagnets, <i>V.A. Zyuzin</i>	16
KEYNOTE	17
Main triple point of substances on the phase diagram: the secret becomes clear, <i>V.V. Brazhkin</i>	18
A non-magnetic mechanism of backscattering in helical edge states, <i>P.A. Ниязов, И.В. Крайнов, Д.Н. Аристов, В.Ю. Качоровский</i>	19
Full-replica-symmetry-breaking spin glass in the random Blume-Capel model, <i>A.C. Овчинников, А.Д. Ляхов, Вл.Е. Сеницын, И.Г. Бострем</i>	21
Quantum molecular dynamics of an exciton in a MoS ₂ monolayer, <i>B.B. Стегайлов, Н.А. Фоминых</i>	22
ORAL	23
The influence of electronic correlations on the Fermi surfaces and electronic structure of topological semimetal WTe ₂ , <i>C.T. Байдак, А.В. Лукоянов</i>	24



Magnon thermal Hall effect in skyrmion crystal, <i>Ю.В. Барамыгина, Д.Н. Арустов</i>	25
Non-Fermi-liquid behavior and Fermi-surface expansion induced by van Hove–driven ferromagnetic fluctuations: the D-TRILEX analysis, <i>I.S. Dedov, E.A. Stepanov, A.A. Katanin</i>	26
Entangling two polariton Bose–Einstein condensates: challenges and insights, <i>A.A. Elistratov, A.N. Asriyan, A.V. Kavokin</i>	27
Polaron transport and trimeron ordering in the high-temperature phase of magnetite, <i>В.В. Стегайлов, Н.А. Фоминых</i>	29
The effect of strong magnetic fluctuations in the single-band Hubbard model near half filling, <i>I.A. Goremykin, A.A. Katanin</i>	30
Density wave phase diagram of Creutz lattice: effect of correlation and spin- orbit coupling, <i>K.K. Kesharpu</i>	31
Magnetic flux vortices in moving high-temperature superconductors for mag- netic levitation, <i>В.В. Коледов, С.В. Фонгратовски, М.В. Матюнина, И.В. Бычков, Д.А. Кузьмин</i>	32
Neural network approximation of classical correlations in quantum systems, <i>D.A. Konyshchev, V.V. Mazurenko</i>	33
Programmable soliton dynamics in All-Josephson-junction logic cells and networks, <i>A.A. Maksimovskaya, V.I. Ruzhickiy, N.V. Klenov, A.E. Schegolev, S.V. Bakurskiy, I.I. Soloviev</i>	34
Nonlinear exciton dynamics in 2D semiconductors modeled for pump-probe experiments, <i>М.А. Малахов, М. Quintela, М. Sa, G. Cistaro, A. Picon</i>	35
Low dimensional magnetism. Spherically symmetric approaches, <i>А.Ф. Барабанов, В.Э. Валиулин, А.В. Михеенков, П.С. Савченков</i>	36
Violation of the Luttinger’s theorem in fractional Chern insulators, <i>А.М. Никушин, А.А. Марков, L.P. Gavensky, N. Goldman</i>	37
Solitary superconductivity in ferromagnet-superconductor trilayers (new aspects), <i>Ю.Н. Прошин, Д.А. Арбузов, В.А. Туманов, А.А. Камашев, Н.Н. Га- рифьянов, И.А. Гарифуллин</i>	38
Vortex structure and intervortex interaction in superconducting structures with intrinsic diode effect, <i>А.В. Путилов, Д.В. Захаров, А. Кудлис, А.С. Мел’ников, А.И. Бuzdin</i>	39
Quantum properties of nonequilibrium kinetics of TWPA, <i>С.В. Ремизов, А.С. Плышеchnik, А.А. Elistratov, А.В. Lebedev</i>	40
Evaluation the tendencies to superconducting pairing of epsilon-iron and iron-based superconductors from DFT+DMFT calculations, <i>С.Л. Skornyakov, А.С. Belozеров, А.А. Katanin, V.I. Anisimov</i>	41



Cluster quantum-chemical approach to the study local electronic properties and exchange spin interactions in complex transition metal oxides, <i>L.A. Siurakshina</i>	42
Magnetoelastic dynamics of the spin Jahn-Teller transition in CoTi_2O_5 , <i>K. Guratinder, R.D. Johnson, D. Prabhakaran, R.A. Taylor, F. Lang, S.J. Blundell, L.S. Taran, S.V. Streltsov, T.J. Williams, S.R. Giblin, T. Fennell, K. Schmalzl, C. Stock</i>	43
Magnon edge states of skyrmion crystal in non-uniform magnetic field, <i>V.E. Timofeev, D.N. Aristov</i>	44
Critical dynamics of spin boson model, <i>М.Г. Васин, А.А. Елистратов, С.В. Ремизов</i>	45
Non-equilibrium dynamics in low-dimensional models of quantum magnetism, <i>V. Yushankhai</i>	46
POSTER	47
Exactly solvable model of electron-phonon interaction with forward-focused scattering, <i>R.G. Babaian, E.Z. Kuchinskii</i>	48
Quantum error mitigation with combined data, <i>Д.В. Бабухин, В.В. Погосов</i>	49
Anderson transition of a quantum particle with long-range hopping amplitudes in one dimension, <i>М.С. Баховадинов, Г.В. Шляпников, Б.Л. Альтшулер, Ф.Н. Джалолов</i>	50
Topological transition in Co_2MnAl during substitution of cobalt for copper, <i>Е.Д. Чернов, А.В. Лукоянов</i>	51
Sub-Bragg and small angle scattering of the Rayleigh wave as a topological intersection of meta-Rayleigh spectroscopy and the Laue-Bragg-Wulff meta-spectroscopy, <i>В.Н. Чуков</i>	52
Collective modes in correlated π -conjugated system, <i>G.S. Dedov, A.N. Rubtsov</i>	53
Polaronic effects in the exchange interaction of correlated systems: the role of competition between Holstein and Peierls contributions, <i>A.V. Dudarev, S.V. Nikolaev, E.I. Shneyder</i>	54
Circuit-QED simulator of the Bose-Hubbard model for quantum spin dynamics, <i>I.V. Dudinets, J. Kim, T. Ramos, A.K. Fedorov, V.I. Man'ko, J. Huh</i>	55
All-to-all connectivity of Rydberg-atom-based quantum processors with messenger qubits, <i>I.V. Dudinets, S.S. Straupe, A.K. Fedorov, O.V. Lychkovskiy</i>	56
Modeling the dynamics of circuit elements for neural network computing based on overdamped Josephson junctions, <i>A.A. Elistratova, G.I. Gubochkin, A.G. Shishkin, S.V. Bakursky, N.V. Kleonov, V.S. Stolyarov</i>	57
Scrambling horizon for a local quench: the emergent boundary beyond which information becomes delocalized, <i>G.A. Ershov, N.S. Arefyeva, E.A. Polyakov</i>	58



Symmetry-induced enhancement of transmission through a disordered system, <i>A.O. Флегонтов, Д.Б. Рогозкин</i>	59
Observation of the Kondo effect in magnetically-doped tungsten ditelluride single crystal, <i>B.M. Fominykh, A.N. Perevalova, A. Stepanov, S.V. Naumov, E.B. Marchenkova, V.V. Marchenkov</i>	60
Exactly solvable model of electron-phonon interaction with forward-focused scattering, <i>Л.Э. Гончарь</i>	61
Quantum Selection of ground states in low dimensional magnets, <i>K.K. Kesharpu, P.A. Maksimov</i>	62
Tensor networks in condensed matter physics: from DMRG to Feynman Diagrams, <i>P.M. Хашаев</i>	63
Beyond PBE: High-fidelity machine learning potentials for Ti–Al alloys via foundation Model-based transfer learning, <i>Е.О. Хазиева, Р.Е. Рыльцев</i>	64
Role of charge imbalance potential relaxation in high-frequency dynamics of Abrikosov vortices in superconductors, <i>R.I. Kinzibaev, A.S. Mel'nikov</i>	65
Formation of inhomogeneous magnetic states triggered by electromagnetic proximity effect in planar superconductor/ferromagnet hybrids, <i>A.A. Kopasov, S.V. Mironov, A.S. Mel'nikov</i>	66
Channel spectrum benchmarking of the Toffoli gate, <i>D.K. Korliakov, B.I. Bantysh, A.S. Borisenko, I.V. Zalivako, and E.O. Kiktenko</i>	67
Inverse Faraday effect in mesoscopic superconducting disks and films with columnar defects, <i>М.В. Коваленко, А.С. Мельников</i>	68
Extended Hubbard model on the kagome lattice, <i>P.P. Kovaleva, A.I. Poteryaev, S.V. Streltsov</i>	70
Crystal structure, electronic and magnetic properties of Sr_2NbO_4 , <i>L.S. Taran, A.E. Lebedeva, and S.V. Streltsov</i>	71
Fluctuation-driven spin and charge order in geometrically frustrated electron systems, <i>Ya.S. Lyakhova</i>	72
Electronic structure, magnetic state and orbital-selective physics in the nickelate superconductor $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ at ambient pressure, <i>P.O. Makarova, I.V. Leonov</i>	73
Studying quantum phase transitions with quantum kernel methods, <i>A. Mardanova, J.A. López-Saldivar, S. Semenov, E. Kiktenko</i>	74
Heat capacity and magnetic phase transitions of Mn_5Si_3 compound, <i>A.B. Маширов, А.С. Кузнецов, К.Р. Ерагер, В.В. Соколовский</i>	75
Semiconductor-metal transition of gold nanotubes, <i>И.А. Матвеев, Г.И. Миронов</i>	76



Особенности спектра экситонных поляритонов в скрещенных магнитном и электрическом полях, <i>Т.В. Максимов, И.Л. Курбаков, Н.С. Воронова</i>	77
Creation of large-scale photonic weighted graph states with linear-optical fusion operations, <i>A.A. Melkozerov, S.S. Straupe, M.Yu. Saygin</i>	78
Analysis of the excitation spectrum in magnetic skyrmion structures, <i>A.A. Михеева, Д.Н. Арустов</i>	79
Controlling Properties of Non-Gaussian Light States via Measurements on a Squeezed Ancillary Mode, <i>E.I. Mingazhitdinov, O.V. Tikhonova</i>	80
Flat bands in “pyrocubic” lattice, <i>Д.А. Мякотников, С.В. Стрельцов</i>	81
A spin model test for a generative quantum eigensolver, <i>V.S. Okatev, O.M. Sotnikov, V.V. Mazurenko</i>	82
Theoretical approach for treating quantum fluctuations of the order parameter in correlated fermionic systems, <i>S.S. Onuchin, Ya.S. Lyakhova, A.N. Rubtsov</i>	83
From discrete to continuous variables systems via Jordan–Schwinger tomographic transformation, <i>В.А. Орлов</i>	84
Exact solution of one-dimensional spin models with Markov property, <i>Y.D. Rapov</i>	85
Impact of vibrational entropy on ordering and phase stability in α -Ti–Al, <i>М.В. Петрик, А.Ю. Строев, И.К. Разумов, И.А. Насчётникова</i>	86
Non-equilibrium quantum dynamics in inhomogeneous Josephson traveling-wave parametric amplifiers, <i>А.С. Пляшечник, А.С. Ремизов, А.А. Елистратов, А.В. Лебедев</i>	87
Ferroelectric and antiferroelectric instabilities in Bi monolayer, <i>Д.В. Понкратова, И.В. Загороднев, В.В. Еналдиев</i>	88
Strongly correlated electronic state in the ferrimagnetic quadruple perovskite $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Re}_2\text{O}_{12}$, <i>A. Poteryaev, Z. Pchelkina, S. Streltsov, V. Irkhin</i>	89
Theoretical interpretation of experiments on magnetic moments determination, <i>С.Д. Просняк, Л.В. Скрипников</i>	90
Electronic and magnetic properties of $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$) Heusler alloys: from topological semimetal Co_2MnAl to spin gapless semiconductor Mn_2CoAl , <i>А.А. Семянникова, Е.Д. Чернов, А.В. Лукоянов, В.Ю. Ирхин, Е.И. Шредер, А.А. Маркин, В.Н. Неверов, Е.Б. Марченкова, В.В. Марченков</i>	91
Analysis of fluctuation statistics via the fluctuating local field method, <i>L.D. Silakov, Ya.S. Lyakhova, A.N. Rubtsov</i>	92
Exploring magnetic properties of single molecular magnets: general ab initio quantum-chemical approach and its applications, <i>A. Syurakshin</i>	93

Boson sampling with self-generation of squeezing via interaction of photons and atoms, <i>S.V. Tarasov, V.I. Kocharovskiy</i>	94
Rattling effect in quadruple perovskites and its possible pseudo Jahn–Teller origin, <i>F.V. Temnikov, S.V. Streltsov</i>	95
Coulomb correlations and the coherent–incoherent electronic crossover in vanadium oxychalcogenides, <i>I.O. Trifonov, S.L. Skornyakov</i>	96
Edge states of periodically deformed topological insulator and their forbidden zones oscillating under magnetic field, <i>A.B. Цветкова, Я.М. Родионов, П.Д. Григорьев</i>	97
Neural network for predicting parameters of a model cuprate superconductor, <i>B.A. Улитко, Д.Н. Ясинская, А.А. Кошелев, Ю.Д. Панов</i>	98
Spin-orbit effects induced by current in magnetic tunnel junctions, <i>Н.Х. Усеинов</i>	99
On classical rewriting of CSS-preserving stabilizer circuits, <i>V.I. Yashin, E.O. Kiktenko, V.V. Yatsulevich, A.K. Fedorov</i>	100
Predicting Hamiltonian parameters from phase diagrams using machine learning, <i>D.N. Yasinskaya, V.A. Ulitko, A.A. Koshelev, Y.D. Panov</i>	101
Electronic structure and optical absorption spectra of Au ₇₂ gold fullerene, <i>Миронов Г.И., Юмаков Д.В.</i>	102
Superconducting photocurrents induced by structured electromagnetic radiation, <i>О.Б. Зуев, М.В. Коваленко, А.С. Мельников</i>	103
AUTHOR INDEX	104

INVITED



NICKELATES: A NEW CLASS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

I.V. Leonov

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: ivan.v.leonov@yandex.ru

INVITED

The theoretical understanding of the electronic, magnetic, and structural phase transitions of materials with strongly correlated electrons has been among the main research topics of materials science and condensed matter physics over the last several decades. In such systems the complex interplay between electronic correlations and the spin, charge, orbital, and lattice degrees of freedom leads to a wealth of ordering phenomena, emergent quantum phases and high-temperature superconductivity (SC), which makes these materials attractive for possible technological applications and in fundamental research. In this regard, the recent discovery of unconventional superconductivity in hole-doped infinite-layer nickelate thin films $R\text{NiO}_2$ ($R = \text{Sr}, \text{Ca}, \text{REE}$) with a nominal low-valence Ni^{2+} state below $T_c \sim 14$ K has stimulated much experimental and theoretical efforts to explain the unusual properties of this novel class of SC materials [1,2]. More recently, it has been demonstrated that under pressure bulk single- and polycrystalline phases of $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ (LNO) with $n = 2$ (bilayer, $\text{Ni}^{2.5+}$) and $n = 3$ (trilayer, $\text{Ni}^{2.67+}$) exhibit SC with a high transition temperature, comparable to that in cuprates, ~ 80 K (for $n = 2$) and $20\text{--}40$ K ($n = 3$), opening up a new route to design high-temperature SC [3,4].

In this talk, I will review experimental and theoretical data on this topic. I will discuss the effects of electron corrections, chemical doping, and pressure on the normal state electronic structure, orbital-dependent quasiparticle renormalizations, Fermi surface, and magnetic properties in this novel class of high- T_c SC [5]. It was shown that electron-electron correlations and, in particular, spin fluctuations, are critically important to describe the properties of the normal phase and superconducting state of nickelates. It was proposed that unconventional superconductivity in nickelates is associated with suppression of spin and charge density wave stripe ordering, e.g., under pressure, which leads to a sharp increase of spin fluctuations.

This work was supported by the Russian Science Foundation under grant № 25-12-00416.

1. Li D., Lee K., Wang B. Y., Osada M., Crossley S. et al., *Nature (London)* **572**, 624 (2019).
2. Osada M., Wang B. Y., Goodge B. H., Harvey S. P., Lee K et al., *Adv. Mater.* **33**, 2104083 (2021).
3. Sun H., Huo M., Hu X., Li J., Liu Z et al., *Nature* **621**, 493 (2023).
4. Zhu. Y, Peng D., Zhang E., Pan B., Chen X., Chen L. et al., *Nature* **631**, 531 (2024).
5. Leonov I., Skorniyakov S. L., Savrasov S. Y., *Phys. Rev. B* **101**, 241108(R) (2020); Slobodchikov K. G., Leonov I. V., *Phys. Rev. B* **106**, 165110 (2022); Shilenko D. A., Leonov I. V., *Phys. Rev. B* **108**, 125105 (2023); Leonov I. V., *Phys. Rev. B* **109**, 235123 (2024).



HYDRODYNAMIC REGIME OF EXCITONS TRANSPORT IN VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES

V.N. Mantsevich^{1}, M.M. Glazov²*

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: vmantsev@gmail.com

A combination of fundamental physics and potential applications makes 2D exciton transport a highly topical field of research nowadays [1]. Experimental studies of exciton transport in 2D materials revealed diffusive propagation across hundreds of nanometers at ambient conditions. While diffusive propagation of excitons remains the most studied and widespread transport regime in 2D semiconductors [1] other scenarios are, generally, possible and deserve detailed study. Particularly interesting propagation regimes are realized where excitons behave collectively. The most prominent example is the superfluid propagation of excitons discussed in the literature [2]. Hence, at low temperatures and relatively high densities the excitons should behave as inviscid fluid. Recently signatures of an inviscid propagations have been reported for a MoS₂ monolayer [3]. The experimental results are consistent with the nonviscous fluid scenario, however, the ultrahigh speed of exciton propagation, being several percents of speed of light call for further discussion [4]. All this motivates further studies of nondiffusive exciton propagation in atomically thin semiconductors.

Here we theoretically demonstrate the possibility to reach the viscous hydrodynamic-liquidlike-regime of exciton propagation in two-dimensional materials, focusing on the mono- and bilayers of transition-metal dichalcogenides [5]. This regime can be realized where the exciton-exciton collisions dominate over exciton-phonon and disorder scattering. We have derived the hydrodynamic like set of equations describing viscous flow of interacting excitons based on the Boltzmann kinetic equation for the exciton distribution function. We obtained an expression for viscous coefficient and performed a comparison of various exciton propagation regimes including diffusive, viscous hydrodynamic, and superfluid regime is presented. Conditions that allow one to observe the hydrodynamic regime of exciton transport and the role of material are discussed. It was shown that mono and bi-layer of transition metal dichalcogenides are an excellent structures for observation of hydrodynamic regime of excitons transport.

This work was supported by Russian Science Foundation Grant No. 24-12-00020.

1. A. Chernikov and M.M. Glazov, Exciton diffusion in 2D van der Waals semiconductors in 2D Excitonic Materials and Devices, edited by Parag B. Deotare and Zetian Mi (Elsevier, Amsterdam, 2023).
2. M.M. Fogler, L.V. Butov, and K.S. Novoselov, Nat. Commun. **5**, 4555 (2014).
3. A.G. del Aguila, Y.R. Wong, I. Wadgaonkar, A. Fieramosca, X. Liu, K. Vaklinova, S. Dal Forno, T. Thu Ha Do, H.Y. Wei, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. S. Novoselov, M. Koperski, M. Battiato, and Q. Xiong, Nat. Nanotechnol. **18**, 1012 (2023).
4. M.M. Glazov and R.A. Suris, Zh. Exp. Teor. Fiz. **166**, 20 (2024).
5. V.N. Mantsevich, M.M. Glazov, Phys. Rev. B **110**, 165305 (2024).



INTERPLAY OF SUPERCONDUCTIVITY AND FERROELECTRICITY: TUNING SUPERCONDUCTIVITY BY THE ELECTRIC FIELD

A.S. Mel'nikov^{1,}, A.A. Kopasov^{2,3}, D.S. Annenkov^{1,4}*

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Moscow Region, Russia

²National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

³Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

⁴L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

*E-mail: melnikov@ipmras.ru

Starting from a brief historical overview of previous research works on the electric field effect in superconducting systems we proceed with the discussion of recent experiments providing evidence for the interplay between superconductivity and sliding ferroelectricity in van der Waals heterostructures. We analyze different theoretical ideas suggesting the explanations for the puzzling stimulation of superconductivity by ferroelectric domain structure and then focus on the scenario based on the assumption of the dominating interlayer electronic attraction. The latter can trigger the formation of Cooper pairs consisting of electrons localized in neighboring layers even in the absence of direct quasiparticle transfer between the layers and has been previously analyzed for a number of layered and multiband superconducting materials including high-T_c cuprates.

We revisit the problem of nonlocal interlayer pairing focusing on its effect on the properties of different types of superconducting hybrid structures. The difference between the electronic spectra in neighboring layers can produce the effect similar to the effect of the momentum dependent exchange field on Cooper pairing. We investigate the manifestations of such nonlocal pairing and resulting unconventional induced superconductivity in several exemplary layered systems in the presence of the energy band offset. The band offset is shown to induce the odd-frequency superconducting correlations, affect the phase diagram and the magnetic response of the system.

This model of interlayer superconductivity tuned by the energy band offset is applied to explain the distinctive features of the interplay between the interlayer superconductivity and ferroelectricity in van der Waals heterostructures. Corresponding analysis is carried out within the framework of the quasiclassical Eilenberger equations for a tunnel coupled bilayer with inhomogeneous relative shift of the conduction bands between the layers, which describes the net charge transfer in sliding ferroelectrics. It is shown that the critical temperature of the interlayer superconductivity can be significantly enhanced for superconducting nuclei localized in the vicinity of ferroelectric domain walls. We demonstrate that the increase in the tunneling amplitude leads to the decrease (increase) in the difference between the critical temperatures for localized and homogeneous superconducting states for the spin-singlet (spin-triplet) interlayer superconductivity. We also perform an extensive analysis of the effects of the in-plane magnetic field on the interlayer superconductivity. It is shown that the orbital effect can result in the suppression of the spin-singlet interlayer superconductivity and to the enhancement of the spin-triplet one. We find that possible manifestations of the paramagnetic effect include the suppression of the interlayer superconductivity by rather weak Zeeman fields, the two-fold anisotropy of the critical magnetic field for the spin-triplet states as well as the appearance of the reentrant superconducting phases. It is shown that the joint influence of the orbital and paramagnetic mechanisms on the spin-triplet interlayer superconductivity can even lead to a nonmonotonic behavior of the superconducting critical temperature as a function of the external magnetic field.

Experimental evidence for the above nonlocal interface pairing would provide new perspectives in engineering the unconventional superconducting correlations in heterostructures including topologically nontrivial superconducting states.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 25-12-00042).



ALTERMAGNETIC AND NONCENTROSYMMETRIC ORDERING IN METALS

V.P. Mineev

L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

Altermagnets are metals with a momentum-dependent spin splitting of electron bands originating from their specific crystal structure, which is invariant under time reversal only in combination with rotations and reflections. The developed phenomenological approach allows us to obtain the spectrum of electron bands in altermagnets by comparing them with antiferromagnets with the same symmetry, including spectrums of altermagnet analogs with weak ferromagnetic and ferrimagnetic states.

A similar splitting of electron bands also occurs in metals whose symmetry does not have a spatial inversion operation. This allows us to consider both types of materials within the same mathematical framework, which, however, does not imply the coincidence of their physical properties. For both types of materials, there will be considered: spin susceptibility, the kinetic equation, the magnetoelectric effect, the anomalous Hall effect, and the piezomagnetic effect. A significant difference is characteristic of the description of superconducting pairing. In non-centrosymmetric metals it occurs between electrons occupying states in the same band, whereas in altermagnets we deal with interband pairing.



SINGLE PARTICLE AND TWO PARTICLE EXCITATIONS IN THE TWO-DIMENSIONAL HUBBARD MODEL ON SQUARE AND TRIANGULAR LATTICES

S.G. Ovchinnikov

Kirensky Institute of physics, Krasnoyarsk research center of Siberian branch of Russian Academy of Science

В докладе рассматриваются свойства одночастичных и двухчастичных спиновых и зарядовых возбуждений в двумерных сильно коррелированных системах с квадратной и треугольной решетками в рамках модели Хаббарда и ее обобщений. Реализацией модели на квадратной решетке являются ВТСП купраты, а на треугольной решетке — слоистые дихалькогениды $4d$ и $5d$ переходных металлов с изинговской сверхпроводимостью. Основные результаты получены в рамках кластерной теории возмущений, использующей периодическое покрытие исходной решетки более крупными кластерами, внутри которых все взаимодействия учитываются точно. В результате точной диагонализации внутри кластера строятся операторы Хаббарда в базисе внутрикластерных многочастичных состояний, и взаимодействия между кластерами учитываются по теории возмущений в приближении Хаббарда 1.

Для купратов такой подход позволил описать концентрационную и температурную эволюцию электронных свойств с формированием двух типов псевдощелевых состояний, сильной и слабой псевдощели. В недопированных антиферромагнитных купратах выше температуры Нееля T_N формируется псевдощелевое состояние, которое плавно переходит в ферми-жидкостное нормальное состояние при $T > 2T_N$. С ростом концентрации дырок x характерные температуры формирования состояний слабой псевдощели $T^*(x)$ и сильной псевдощели $T^{**}(x)$ сближаются и стремятся к нулю при переходе в состояние нормальной Ферми-жидкости при $x > 0.24$. Также рассчитываются и двухчастичные спектры зарядовых и спиновых флуктуаций, зависящие от температуры и допирования.

Для треугольных решеток слоистых дихалькогенидов переходных металлов дополнительно к кулоновским взаимодействиям необходимо учитывать спин-орбитальные взаимодействия, приводящие к анизотропии Изинга или Рашбы. Для них в рамках такой же кластерной теории возмущений рассчитаны эволюции электронной структуры и спектров спиновых и зарядовых флуктуаций с ростом концентрации носителей тока. Прослеживается корреляция их изменений, а также статических спиновых корреляторов, определяющих ближний магнитный порядок, с ростом параметров модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 24-12-00044.



FERROMAGNETISM IN ANTIFERROMAGNETIC QUASI-2D CRYSTALS

V.M. Pudalov¹, A.Yu. Levakhova^{1}, A.V. Sadakov¹, K.S. Pervakov¹, V.A. Vlasenko¹,
A.L. Vasiliev², A.V. Ovcharov², V.I. Bondarenko², P.D. Grigorev³, N.S. Pavlov⁴, I.A. Nekrasov⁴,
I.I. Gimazov⁵, D.E. Zheleznyakova⁵, R.B. Zaripov⁵, Yu.I. Talanov⁵*

¹V.L. Ginzburg Research Center, P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow

²National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Chernogolovka

⁴Institute for Electrophysics, RAS, Ekaterinburg

⁵E.K. Zavoiskii Kazan Physical-Technical Institute, RAS, Kazan

* E-mail: levakhovaayu@lebedev.ru

In pure semi-metallic quasi two-dimensional antiferromagnets (MnBi₂Te₄, EuRbFe₄As₄, EuIn₂As₂, EuCd₂As₂, EuSn₂As₂, EuFe₂As₂, EuSn₂P₂ etc.) delocalized electrons (or Cooper pairs) propagate in a spatially changing magnetic field of a magnetically ordered lattice.

The talk will present a number of effects that are more characteristic of the FM- than the AFM-state, the origin of which has remained a mystery until now [1,2]. In particular, in the AFM state, the DC magnetization exhibits weak nonlinearity and even hysteresis at low magnetic fields; the AC susceptibility diverges with decreasing temperature [3]. The electron spin resonance (ESR) of EuSn₂As₂ exhibits an additional line that is atypical for the AFM-state [1]. To explain the origin of these effects, we studied the microstructure of EuSn₂As₂ single crystals using a transmission electron microscope and revealed planar defects with a thickness of a monolayer [3]. These defects have a local composition EuSnAs₂ with tin valence Sn(4+) and the absence of one monolayer of Sn atoms. The supercell of the defective transition layer has the formula Eu₇Sn₁₂As₁₄, contains an odd number of Eu atoms and has a non-zero magnetic moment [3]. DFT calculations of the band structure and magnetization confirm the FM-ordering of the defect layer. The corresponding two-phase model of the meta-material, in which FM defects are embedded in an AFM lattice [3] describes all the above-mentioned features, including the dependences of the ESR on temperature and magnetic field [2].

1. I.A. Golovchanskiy et al., Magnetic resonances in EuSn₂As₂ single crystal, J Magn Magnetic Materials **562**, 169713 (2022).
2. I. I. Gimazov et al., Ferromagnetic resonance in an antiferromagnetic crystal EuSn₂As₂, tbp
3. A.Yu. Levakhova, et al., Emergence of ferromagnetism from planar defects in EuSn₂As₂ antiferromagnet, arXiv:2511.03582.



BRAVE NEW ALTERMAGNETISM

S.V. Streltsov

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: streltsov@imp.uran.ru

INVITED

The combination of a centrosymmetric crystallographic structure with local structural alternations and collinear antiferromagnetism can lead to broken PT (Parity x Time-reversal) symmetry, resulting in non-relativistic spin-split bands [1,2]. Such magnetic systems were called altermagnets [3]. Later, notion of altermagnetism of extended also on materials with non-collinear spin structures. These materials now attract a lot of attention from both theoretical and experimental communities. In this short talk we will briefly discuss main ideas lying behind altermagnetism, some particular altermagnets having structure of 6H perovskites and various physical effects related to altermagnetism.

Support by RSF 23-12-00159 is acknowledged.

1. Hayami S. et al., J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019).
2. Yuan L.-D. et al., Phys. Rev. B **102**, 014422 (2020).
3. Smejkal L. et al., Phys. Rev. X **12**, 040501 (2022).
4. Streltsov S., Cheong S.-W. NPJ Quantum Materials **10**, 102 (2025).



MAGNON SPIN CURRENTS IN COLLINEAR ANTIFERROMAGNETS

V.A. Zyuzin

L. D. Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Russia

We will be discussing Néel ordered antiferromagnet on a bipartite lattice. In Néel ordered antiferromagnets there are excitations about the order called magnons. In a bipartite lattice there are two types of magnon modes defined by their spin. We will be discussing recent progress in transport properties of these magnons. For example, magnon spin Nernst effect will be discussed. This is a situation when applied to the system temperature gradient creates transverse to the gradient magnon spin currents, such that opposite spins flow in opposite directions. We will then discuss a possibility of these magnons to result in a finite thermal Hall effect in the absence of the applied magnetic field. This is a situation when in addition to the spin currents, the magnon modes carry heat current in the transverse direction to the applied temperature gradient.

Presence of finite thermal Hall effect in a physical system is a consequence of finite magnetic moment in the system. A finite magnetic moment in compensated collinear Néel ordered antiferromagnets is allowed provided some crystal symmetries are broken in the system. Such Néel ordered antiferromagnets are called Dzyaloshinskii's weak ferromagnets and ferrimagnets. In the absence of canting of the Néel order in these systems, the magnetic moment will be carried by the magnons.

Finally, we will discuss another possibility of generation of the magnon spin currents in Dzyaloshinskii's weak ferromagnets originating from the magnon spin degeneracy breaking due to the local non-magnetic environment of the Néel order.

1. V.A. Zyuzin and A.A. Kovalev, Phys. Rev. Lett. **117**, 217203 (2016). *Magnon spin Nernst effect in antiferromagnets.*
2. M. Naka, S. Hayami, H. Kusunose, Y. Yanagi, Y. Motome, and H. Seo, Nature Communications **110**, 4305 (2019). *Spin current generation in organic antiferromagnets.*
3. V.A. Zyuzin, arXiv:2505.22317 (2025). *Magnon thermal Hall effect in collinear ferrimagnets.*

KEYNOTE



MAIN TRIPLE POINT OF SUBSTANCES ON THE PHASE DIAGRAM: THE SECRET BECOMES CLEAR

V.V. Brazhkin

L.F. Vereshchagin Institute of High Pressure Physics, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

This paper analyzes the positions of the triple points of various elementary substances and simple compounds on the P,T phase diagram. The pressures at the triple points vary greatly – by many orders of magnitude for most substances! This enormous spread is due to the very strong, nearly exponential, dependence of the saturated vapor pressure on the reciprocal temperature near the sublimation and boiling lines. The physical meaning of the pre-exponential factor for vapor pressure is discussed. A good correlation is established between the pressure at the triple point of a substance and the ratio of the temperature at the critical point to the temperature at the triple point. The relationship between the phase diagrams of substances and the position of the triple and critical points on them with the effective potential of interparticle interactions is examined. The evaporation of solid objects in space conditions is discussed.



A NON-MAGNETIC MECHANISM OF BACKSCATTERING IN HELICAL EDGE STATES

Р.А. Ниязов^{1,2,}, И.В. Крайнов², Д.Н. Аристов^{1,2}, В.Ю. Качоровский²*

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: niyazov_ra@pnpi.nrcki.ru

Вдоль границы двумерного топологического изолятора (ТИ) существуют проводящие одномерные электронные каналы (геликоидальные краевые состояния). В них электроны с противоположными направлениями движения имеют противоположные спины. Теоретически, такая топологическая защита должна подавлять рассеяние на немагнитных примесях. Однако в экспериментах наблюдается сильное рассеяние в образцах длиннее 3 мкм, интенсивность которого слабо меняется с температурой [1].

Мы объясняем этот эффект механизмом обратного рассеяния на заряженных островках, расположенных вблизи края ТИ [2]. Эти островки могут захватывать электроны из краевых каналов за счет туннелирования. В отличие от предыдущих моделей [3], ключевая особенность нашего механизма заключается в том, что в островке не происходят неупругие процессы. Это объясняет, почему темп обратного рассеяния почти не зависит от температуры.

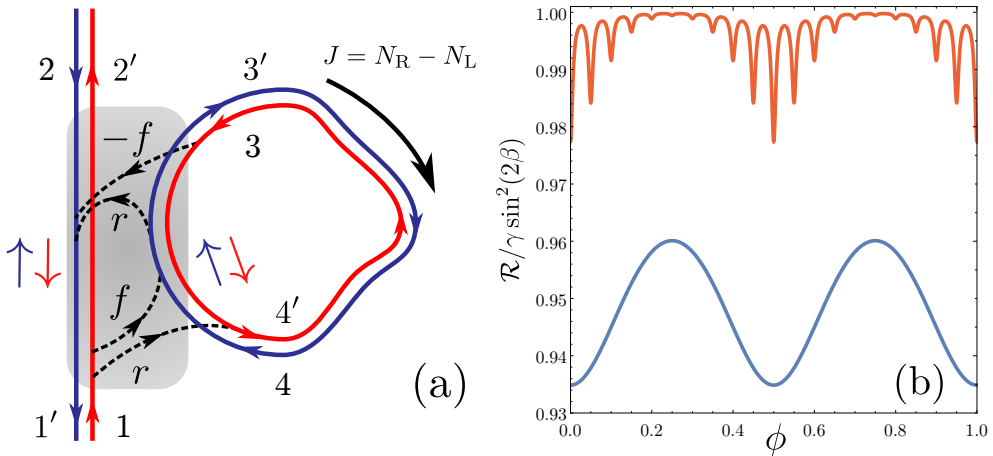


Рис. 1. (а) Островок вблизи края 2D ТИ. (б) Зависимость рассеяния назад от магнитного потока при разной силе туннелирования в островок.

Рассмотрим идеализированную модель островка в виде отверстия в топологическом изоляторе (см. Рис. 1 (а)). Без учета электронных взаимодействий амплитуды рассеяния для путей обхода по и против часовой стрелки компенсируют друг друга, и обратное рассеяние отсутствует. Однако при учете взаимодействий возникает флуктуирующий круговой ток в кольце J , который зависит от разницы между числами правых



и левых электронов. Этот ток создает различную фазу для электронов, обходящих островов в разных направлениях, что снимает компенсацию и приводит к конечному обратному рассеянию. Его вероятность пропорциональна среднему значению $\langle (\sin J)^2 \rangle$, которое практически не зависит от температуры, но слабо меняется с магнитным потоком через островок (см. Рис. 1 (b)).

Также мы расширили этот результат для реалистичной модели диффузионного островка со множеством случайных траекторий. Показано, что вклады от классических (диффузон) и квантово-интерференционных (куперон) процессов компенсируются при отсутствии взаимодействия. Однако при включении взаимодействия они начинают усиливать обратное рассеяние. Его вероятность становится пропорциональной $\ln(\tau_\phi t)$, где τ_ϕ – время декогеренции. Эта логарифмическая зависимость приводит к очень медленному изменению рассеяния с температурой, что и наблюдается в экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 25-12-00212).

1. E. Olshanetsky, Z. Kvon, G. Gusev, N. Mikhailov, Physica E **147**, 115605 (2023).
2. I.V. Krainov, R.A. Niyazov, D.N. Aristov, V.Yu. Kachorovskii, JETP Lett. **122**, 495 (2025).
3. J.I. Väyrynen, M. Goldstein, L.I. Glazman, Phys. Rev. Lett. **110**, 216402 (2013).



FULL-REPLICA-SYMMETRY-BREAKING SPIN GLASS IN THE RANDOM BLUME-CAPEL MODEL

А.С. Овчинников^{1,2}, А.Д. Ляхов², Вл.Е. Синицын², И.Г. Бострем²*

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: alexander.ovchinnikov@urfu.ru

На основе модели Блюма-Капеля мы предлагаем объяснение того, почему некоторые поли типы слоистых соединений семейства дихалькогенидов переходных металлов $\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$ интеркалированных железом, проявляют спин-стекольное поведение, в то время как другие поли типы этого семейства демонстрируют низкотемпературное парамагнитное состояние [1]. Наша теория учитывает тот факт, что в этих соединениях, добавленные Fe атомы либо замещают атомы тантала с переходом в синглетное состояние, теряя свои магнитные моменты, либо располагаются между слоями $\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$, сохраняя высокоспиновое магнитное состояние. Модель Блюма-Капеля позволяет ввести химический потенциал управляющий балансом интеркалированных Fe атомов обоих типов. Теория Гатака-Шеррингтона спин-стекольного поведения для этой модели предсказывает существование трикритической точки, означающей в нашем случае наличие пороговой концентрации ионов Fe, сохраняющих свои магнитные моменты; только при её превышении возникает спин-стекольная фаза. Ниже этого порога ионы Fe ведут себя как независимые парамагнитные центры. В рамках модели Шеррингтона-Киркпатрика мы построили температурные зависимости магнитной восприимчивости и зависимости намагниченности от приложенного магнитного поля, чтобы подчеркнуть особенности модели, связанные с изменением содержания ионов Fe в высокоспиновом состоянии.

Кроме того, реализуя схему Паризи полностью нарушенной репличной симметрии, мы анализируем низкотемпературные термодинамические свойства — энтропию и теплоёмкость — вблизи трикритической точки перехода в синглетное парамагнитное состояние и исследуем влияние эффектов нестехиометрии на эти величины [2]. Предложены способы усиления этих эффектов в реальных соединениях для экспериментальной проверки теории.

Мы также отмечаем, что структура слоистых дихалькогенидов переходных металлов дает возможность увеличить концентрацию ионов с ненулевыми магнитными моментами за счет совместного интеркалирования атомов железа с некрамеровскими $3d$ -ионами в ван-дер-ваальсовские щели. Этот процесс может инициировать появление спин-стекольного порядка в изначально парамагнитных поли типах $\text{Fe}_x\text{TaS}_2(\text{Se}_2)$.

1. Ovchinnikov A.S., Bostrem I.G., Sinitsyn V.I., Nosova N.M., and Baranov N.V., Phys. Rev. B **109**, 054403 (2024).

2. Lyakhov A.D., Sinitsyn V.I., Bostrem I.G., Fomenko V.E., Ovchinnikov A.S., Phys. Rev. B **112**, 174415 (2025)



QUANTUM MOLECULAR DYNAMICS IN A MoS_2 MONOLAYER

В.В. Стегайлов^{1,2}, Н.А. Фоминых^{1,2}*

¹Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: stegailov@jiht.ru

Атомарно тонкие пленки дихалькогенидов переходных металлов представляют значительный интерес в качестве двумерных полупроводников с регулируемыми электронными свойствами и сильными оптическими эффектами, связанными с экситонами. Именно поэтому свойства экситонов в данных материалах являются интереснейшими объектами современных исследований и вызовом для современной физики конденсированного состояния, экспериментальных техник и методов атомистического моделирования.

Для описания возбужденного состояния экситона в рамках квантовой молекулярной динамики в данной работе используется подход ROKS [1], который благодаря своей вычислительной эффективности представляет уникальные возможности для непосредственного изучения электронной системы с явным учетом конечно-температурных колебаний решётки. В рамках этого подхода ранее были описаны диссоциация экситона в плотном флюиде водорода [2] и полимеризация в плотном молекулярном азоте [3].

Развивая подход описания экситонов в рамках квантовой молекулярной динамики для учета конечно-температурных колебаний решётки, в данной работе были рассмотрены структура и транспорт светлого экситона в монослое MoS_2 . Используя центры максимально локализованных функций Ванье была изучена скоррелированная динамика электрон дырочной пары, образующей экситон, при различных температурах, получены соответствующие радиальные функции распределения с явной кулоновской асимптотикой, а также температурная зависимость коэффициента диффузии светлого экситона, по которой была определена энергия активации [4]. Кроме того, в данном докладе будет рассмотрена радиальная функция распределения и для темного экситона.

1. Frank I. et al., J. Chem. Phys., **108** 4060–4069 (1998).
2. Fedorov I.D., Stegailov V.V., Chem. Phys. Chem., **24**, 6 (2023).
3. Fedorov I.D., Stegailov V.V. J. Chem. Phys., **161**, 15 (2024).
4. Fominykh N.A., Stegailov V.V., J. Chem. Phys., **163**, 11 (2025).

ORAL



THE INFLUENCE OF ELECTRONIC CORRELATIONS ON THE FERMI SURFACES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF TOPOLOGICAL SEMIMETAL WTe_2

С.Т. Байдак^{1*}, *А.В. Лукоянов*^{1,2}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: baidak@imp.uran.ru

Квантовый материал WTe_2 – это полуметалл Вейля II типа, для его исследования были использованы теоретические расчеты на основе первых принципов с учетом сильных электронных корреляций. Электронная структура рассчитана в рамках метода DFT+U + SOC, значение Хаббардовского параметра U для состояний W-5d определяется в рамках DFPT (Density-Functional Perturbation Theory) при помощи кода hp.x в программном пакете Quantum ESPRESSO, значение параметра получилось равным 3 эВ для орторомбической структуры T_d - WTe_2 . В зонной структуре были обнаружены два небольших дырочных кармана и два почти вырожденных электронных кармана чуть большего размера вдоль высокосимметричного направления $\Gamma - X$ [1]. Валентная зона состоит из электронных состояний W-5d и Te-5p, а зона проводимости в основном содержит состояния W-5d. В зонной структуре также были обнаружены две пары точек Вейля и вычислены их координаты в импульсном пространстве, по результатам расчета обе пары лежат в плоскости зоны Бриллюэна $k_z = 0$. Также были смоделированы поверхности Ферми и рассчитаны их максимальные площади поперечного сечения в рамках метода DFT+U с расчетным и другими значениями параметра U. В зоне Бриллюэна были обнаружены две замкнутые электронные и две дырочные поверхности, которые соответствуют небольшим карманам в районе уровня Ферми в зонной структуре соединения. В расчетах также получена поверхность Ферми в форме эллипсоида еще меньшего размера вокруг высокосимметричной точки Γ , которая очень чувствительна к значению параметра U. Данные поверхности Ферми были сопоставлены с экспериментальными измерениями осцилляций Шубникова-де Гааза и было обнаружено хорошее согласие теоретических результатов и экспериментальных данных. Из квантовых колебаний также была получена нетривиальная фаза Берри и в сочетании с теоретическими исследованиями делается вывод, что точки Вейля расположены внутри дырочных карманов [1]. Полученное значение параметра U показывает, что в топологическом полуметалле WTe_2 действительно присутствуют сильные электронные корреляции, учет которых дает лучшее согласие с экспериментальными результатами.

Это исследование было поддержано Российским научным фондом в рамках проекта № 24-72-00168.

1. Fominykh B.M., Perevalova A.N., Baidak S.T., Lukoyanov A.V., Naumov S.V., Marchenkova E.B., Marchenkov V.V., J. Alloys Compd. **1039**, 182966 (2025).



MAGNON THERMAL HALL EFFECT IN SKYRMION CRYSTAL

Ю.В. Барамыгина^{1}, Д.Н. Аристов^{1,2}*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: barjv@mail.ru

Магнитные скирмионы – это топологически нетривиальные вихри локальной намагниченности. В широком спектре материалов они упорядочиваются в решётки, так называемые скирмионные кристаллы (СкК). Спектр элементарных возбуждений СкК также обладает нетривиальной топологией. Топологические свойства спектра приводят к возникновению в системе ряда уникальных явлений, одним из которых является тепловой эффект Холла (ТЭХ) магнонов. Этот эффект заключается в появлении потока тепла, перпендикулярного созданному в системе градиенту температуры.

Механизм появления ТЭХ в системе, где отсутствуют свободные носители заряда, предполагает наличие особых свойств системы. Например, было теоретически предсказано наличие теплового эффекта Холла магнонов в двумерном ферромагнетике со структурой решётки Кагомэ [1]. В 2022 году были опубликованы результаты эксперимента по обнаружению теплового холловского отклика в СкК [2].

В настоящей работе рассматривается двумерная модель ферромагнетика со взаимодействием Дзялошинского-Мории и внешним магнитным полем. В такой модели в некотором диапазоне параметров реализуется фаза скирмионного кристалла. Исследуется магнонный спектр СкК в подходе стереографической проекции [3]. Такой подход позволяет представить функцию, описывающую СкК, в виде суммы функций одиночных скирмионов. Отдельные ветки спектра магнонов соответствуют различным деформациям одиночных скирмионов в кристалле. Топологические свойства спектра определяются наличием таких ненулевых характеристик как кривизна Берри и числа Черна. Мы предлагаем аналитический вывод формулы для коэффициента холловской теплопроводности в двумерной модели СкК. Исследуется линейный отклик системы на внешнее возмущение в виде градиента температуры. Полученное выражение содержит кривизну Берри, что говорит о топологическом происхождении теплового эффекта Холла в предложенной модели.

1. Katsura H., Nagaosa N., Lee P. A., Physical review letters **104**, 066403 (2010).

2. Akazawa M. et al., Physical Review Research **4**, 043085 (2022).

3. Timofeev V.E. and Aristov D.N., Physical Review B **105**, 024422 (2022).



NON-FERMI-LIQUID BEHAVIOR AND FERMI-SURFACE EXPANSION INDUCED BY VAN HOVE-DRIVEN FERROMAGNETIC FLUCTUATIONS: THE D-TRILEX ANALYSIS

I.S. Dedov^{1,*}, *A.A. Katanin*^{1,2}, *E.A. Stepanov*^{3,4}

¹Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

²M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

³CPHT, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

⁴Collège de France, Paris, France

*E-mail: il.lyshin20@gmail.com

We consider the electronic and magnetic properties of the two-dimensional Hubbard model near a van Hove singularity within the D-TRILEX [1] approach, which consistently incorporates both local dynamical and nonlocal magnetic correlations. The system is studied at the next-nearest-neighbor hopping ratio $t'/t = -0.45$, corresponding to the vicinity of a ferromagnetic instability.

In contrast to DMFT, where only local correlations are included, the self-consistent D-TRILEX treatment reveals strong momentum-dependent self-energy corrections induced by ferromagnetic fluctuations. We find in D-TRILEX that these fluctuations cause a characteristic splitting of the electronic spectral function. This splitting exhibits only weak momentum dependence, and only one of the resulting bands crosses the Fermi level. As a consequence, the Fermi surface itself remains unsplit but expands in area, signaling a violation of the Luttinger theorem and reflecting the presence of non-Fermi-liquid excitations.

The quasiparticle damping extracted from the self-energy behaves as $\gamma \sim \text{const}(T)$ near the van Hove singularity at high temperatures and increases closer to the transition temperature $T^* = 0.03t$. Whereas DMFT yields a conventional Fermi-liquid-like $\gamma \sim T^2$ dependence at low temperatures $T < 0.02t$, however analysis at higher values gives $\gamma \sim T$. Moreover, the damping exhibits a pronounced nodal-antinodal dichotomy, being largest near the nodal region. These findings demonstrate that nonlocal self-energy effects qualitatively modify the low-energy spectra and prevent the restoration of Fermi-liquid behavior even at the lowest temperatures considered.

By comparing D-TRILEX with the λ -corrected [2] and self-consistent D Γ A [3] approaches, we show that the former provides a more physically consistent picture of the quasiparticle band structure. The flat upper band obtained in λ -corrected D Γ A is identified as an artifact of the approximation, violating the Pauli principle.

Overall, our results highlight that ferromagnetic fluctuations near a van Hove singularity drive non-Fermi-liquid behavior and Fermi-surface expansion with split band, and that their accurate description requires self-consistent inclusion of nonlocal correlations as realised in D-TRILEX.

The study is supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 24-12-00186).

1. Vandelli M. et al., SciPost Phys. **13**, 036 (2022).

2. Toschi A., Katanin A. A., Held K., Phys. Rev. B **75**, 045118 (2007).

3. Kaufmann J. et al., Phys. Rev. B **103**, 035120 (2021).



ENTANGLING TWO POLARITON BOSE–EINSTEIN CONDENSATES: CHALLENGES AND INSIGHTS

A.A. Elistratov, A.N. Asriyan, A.V. Kavokin

N. L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automation, Rosatom, Moscow, Russia

*E-mail: andrei.a.elistratov@mail.ru

Abstract Exciton–polariton condensates are promising for quantum technologies, but entangling macroscopic condensates remains challenging. We show that under parametric pumping, entanglement and coherence can coexist in a stationary state, evidenced by quadrature squeezing and second-order coherence function. However, using the Wouters–Carusotto model, we find that such entanglement cannot emerge dynamically from an initially entangled seed under standard incoherent pumping—quantum correlations decay during condensate growth. Thus, while entangled steady states are theoretically accessible, their realization requires coherent driving or active protection mechanisms, not achievable with incoherent excitation alone.

Exciton–polariton Bose-Einstein condensates (BECs) form at cryogenic temperatures (a few kelvins), can be coherently controlled by optical means, and achieve mutual phase synchronization on picosecond timescales. These and other favorable properties position polariton condensates as a promising platform for quantum information processing. Several qubit architectures based on this system have been proposed, with the design introduced in [1] gaining particular attention.

In that scheme, a ring-shaped polariton condensate is created by a circular laser pump spot, while a narrow segment of the ring is shielded from excitation. This shadowed region hosts a stationary dark soliton that imposes a π -phase jump across the condensate. As a result, two persistent, dissipationless supercurrents circulate in opposite directions. The symmetric and antisymmetric superpositions of these currents correspond to the two lowest-energy quantum states — effectively forming a macroscopic two-level system. This configuration bears a close analogy to a superconducting flux qubit containing a Josephson junction.

Numerical simulations and analytical estimates in [1] suggest an energy relaxation time $T_1 \sim 100$ ns, while single-qubit gate operations can be performed in ~ 100 ps. This implies the potential for $\sim 10^3$ coherent operations – comparable to leading solid-state qubit platforms. However, a critical open question remains: can two such polariton qubits be reliably entangled to enable high-fidelity two-qubit gates?

Ref. [1] proposes a vertical, coaxial arrangement of two ring condensates, with qubit-qubit coupling mediated by the magnetic interaction between their circulating supercurrents. Yet, practical implementation faces significant theoretical and experimental hurdles, calling for a deeper investigation into the fundamental mechanisms of entanglement generation between macroscopic polariton condensates.

In this work, we first investigate the dynamics of two entangled exciton-polariton Bose–Einstein condensates subject to parametric pumping [2], with a focus on the interplay between quantum entanglement and coherence. By means of stochastic Gross–Pitaevskii simulations, we demonstrate that entanglement and coherence can coexist in a stationary regime of the system. We quantify this coexistence by evaluating the degree of squeezing in the entangled quadratures of the polariton fields and by computing the second-order coherence function, across a broad range of parametric pump strengths and coupling rates to the excitonic reservoir.

While the aforementioned results demonstrate the principle possibility of coexisting entanglement and coherence in a stationary state under externally driven parametric pumping, a



crucial question remains: can such an entangled coherent state emerge dynamically without pre-imposed quantum correlations? To address this, we investigate whether entanglement can survive — or be generated — during the growth of polariton condensates from an initially entangled microscopic seed under incoherent pumping from an excitonic reservoir.

Using the widely adopted driven-dissipative two-component model of Wouters and Carusotto [3], we simulate the condensate dynamics starting from an entangled initial state.

Our results show that entanglement is not preserved during the condensation process under incoherent pumping: quantum correlations rapidly decay as the condensates grow and approach the steady state.

These findings imply that, although entangled coherent stationary states are theoretically accessible (e.g., via engineered parametric drives), they cannot be achieved through standard incoherent excitation alone. An additional mechanism is required to generate or protect entanglement during condensate formation.

1. Y. Xue, I. Chestnov, E. Sedov, E. Kiktenko, A. K. Fedorov, S. Schumacher, X. Ma, and A. Kavokin, Split-ring polariton condensates as macroscopic two-level quantum systems, *Phys. Rev. Research* **3**, 013099 (2021).
2. B. Mollow and R. Glauber, Quantum theory of parametric amplification, *Phys. Rev.* **160**, 1076 (1967).
3. M. Wouters and I. Carusotto, Excitations in a nonequilibrium Bose-Einstein condensate of exciton polaritons, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 140402 (2007).



POLARON TRANSPORT AND TRIMERON ORDERING IN THE HIGH-TEMPERATURE PHASE OF MAGNETITE

В.В. Стегайлов^{1,2}, Н.А. Фоминых^{1,2*}

¹Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: fominykh.na@phystech.edu

Магнетит Fe_3O_4 претерпевает сложное структурное искажение при температуре ~ 125 К с понижением группы симметрии с $Fd\bar{3}m$ до Cc . Данный переход был назван переходом Вервея и послужил исходным прототипом концепции фазового перехода металл-изолятор [1]. Однако, хотя некоторые противоречия ещё сохраняются, современные экспериментальные работы характеризуют переход Вервея как переход полупроводник-полупроводник [2, 3]. Долгое время точная кристаллическая структура низкотемпературной фазы магнетита оставалась неизвестна. На данный момент наиболее достоверной моделью является структура с группой симметрии Cc , которая обладает тримеронным упорядочением [4]. Кроме того, экспериментально было показано вероятное существование тримеронного упорядочения и в высокотемпературной фазе [5].

Ранее, основываясь на успешном применении статического метода расчёта энергии поляронного хоппинга в рамках DFT+U для хромита FeCr_2O_4 [6] и феррита никеля NiFe_2O_4 [7], нами была изучена низкотемпературная фаза магнетита. В рамках этой работы наряду с Cc структурой были рассмотрены альтернативные варианты орбитально-зарядового упорядочения: $P2_1$, $P4_12_12$, $P2/c$, $Pnma$, $Imma$. Показано наличие тримеронного упорядочения для структур Cc , $P2/c$ и $Pnma$. Получены ширины запрещённой зоны со значениями в диапазоне $E_g = 0.55 - 1.12$ эВ, а также оценка энергии активации электронного и дырочного поляронного хоппинга $E_a = 0.13 - 0.16$ эВ. На основе чего предложена гармонизирующая интерпретация экспериментальных данных по оптической проводимости с сосуществованием вкладов зонного и поляронного механизмов [8].

В данном докладе будут представлены развитие подхода для описания высокотемпературной фазы в рамках квантовой молекулярной динамики для явного учета температурных эффектов. Будет показано изменение ширины запрещённой зоны при переходе Вервея и получена энергии активации поляронного хоппинга в высокотемпературной фазе напрямую из аррениусовской зависимости частоты хоппинга. А также рассмотрено влияние активного поляронного хоппинга на тримеронное упорядочение.

1. Mott N.F., Rev. Mod. Phys. **40**, 677 (1968).
2. Schrupp D. et al., Europhys. Lett. **70**, 789 (2005).
3. Prozorov R. et al., Mat. Res. Bulletin **167**, 112442 (2023).
4. Senn M.S. et al., Nature **481**, **173** (2012).
5. Perversi G. et al., Nat. Commun., **10**, 2857 (2019).
6. Фоминых Н.А., Стегайлов В.В., Письма в ЖЭТФ **117**, 857–862 (2023).
7. Fominykh N.A. et al., Comput. Mater. Sci. **246**, 113326 (2025).
8. Fominykh N.A., Stegailov V.V., Phys. Rev. B **111**, 115130 (2025).



THE EFFECT OF STRONG MAGNETIC FLUCTUATIONS IN THE SINGLE-BAND HUBBARD MODEL NEAR HALF FILLING

I.A. Goremykin^{1}, A.A. Katanin^{1,2}*

¹Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

²M. N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: goremykin.ia@phystech.edu

The report examines the single-band Hubbard model on a two-dimensional square lattice with nearest-neighbor and next-nearest-neighbor hopping.

Within the static (MF) and dynamical mean-field theory (DMFT) approaches, magnetically ordered states of this system are obtained at finite hole doping.

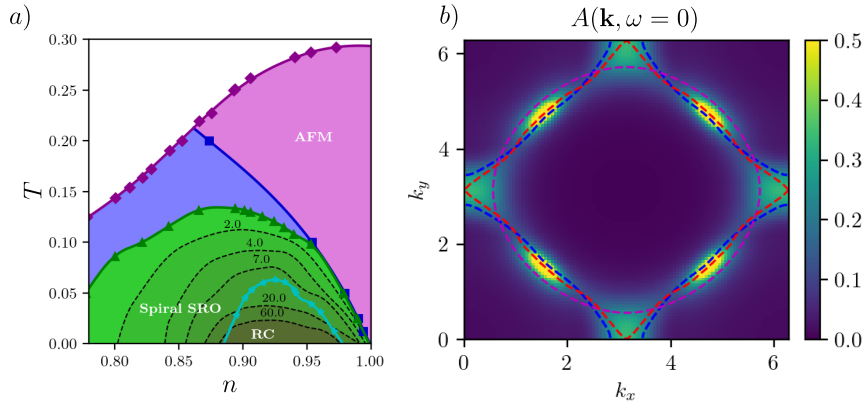


Рис. 1. (a) Phase diagram of the single-band Hubbard model within the mean-field theory. (b) Spectral density in DMFT at $\omega = 0$, $U = 5.6t$, and $x \approx 4$.

For these states, the spin stiffnesses are calculated and used to determine the correlation length ξ . Taking into account the frequency dependence of the temporal spin stiffness in the mean-field theory makes it possible to describe the formation of states with short-range magnetic order. Figure ??a shows the resulting phase diagram, which contains short-range magnetically ordered states surrounding a small “island” of long-range ordered states that exists in an intermediate region of electron concentrations $n^{\text{RC}} \approx 0.93$.

For states in which the correlation length is sufficiently large, the electronic spectral density can be obtained by transforming from the local reference system—where the mean-field calculations are performed—to the global one. This procedure produces a nontrivial and significant dependence of the resulting self-energy on the wave vector. In particular, the analysis of magnetically ordered states makes it possible to obtain pseudogap states within DMFT. Figure ??b shows the electronic spectral density, where the Fermi surface remains only along the nodal directions of the Brillouin zone.

Numerical calculations were supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 24-12-00186). I. A. G. also acknowledges financial support of the derivation of equations from BASIS Foundation (Grant No. 24-1-5-152-1).

1. I. A. Goremykin and A. A. Katanin, Phys. Rev. B **107**, 245104 (2023); **110**, 085153 (2024); **112**, L060405 (2025).



DENSITY WAVE PHASE DIAGRAM OF CREUTZ LATTICE: EFFECT OF CORRELATION AND SPIN-ORBIT COUPLING

K.K. Kesharpu

Bogolyubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia

* E-mail: kesharpu@theor.jinr.ru

Creutz lattice is a quasi one-dimensional ladder with diagonal rungs connecting the upper and lower legs of the ladder [1]. In some defined parameter range this model has the flat bands, which results in topological protected edge states. At the beginning, it remains mostly of academic interest, due to lack of physical compounds. However, recently, due to advent of the cold atom based experimental platform, a renewed interest has been invigorated in this model [2].

Following the initial proposal, the Creutz model has been investigated mostly for the spinless electrons. However, we investigate the Creutz model with spinfull electron. Specifically, we investigate the effect of spin-orbit coupling and electron correlation on the topological phase diagram. We also introduce the lattice coupling to the Creutz model through Hubbard-Holstein framework, and look for charge density wave (CDW) and spin density wave (SDW) in different parameter ranges. We also perform the numerical density matrix renormalization group (DMRG) calculations to corroborate our analytical results.

1. Creutz, M., Physical review letters **83**(13), 2636 (1999).
2. Jünemann, J., et. al., Physical Review X **7**(3), 031057 (2017).



MAGNETIC FLUX VORTICES IN MOVING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS FOR MAGNETIC LEVITATION

В.В. Коледов^{1*}, С.В. Фонгратовски¹, М.В. Матюнина², И.В. Бычков², Д.А. Кузьмин²

¹Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*E-mail: victor_koledov@mail.ru

Задача о захвате магнитного потока, формировании и движении вихрей в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) в последние годы становится все более актуальной, в связи со значительными усилиями, которые направляются на экспериментальное исследование и технологические разработки по исследованию возможности создания наземного транспорта с магнитной левитацией по вакуумной трассе из постоянных магнитов (ВМЛТ). Магнитная левитация ВТСП устраняет в таких экспериментах механическое трение, а вакуумная среда, аэродинамическое [1,2].

При сверхпроводящей магнитной левитации с использованием ВТСП, сверхпроводник, чаще всего, поддерживается при температуре жидкого азота, при которой в сверхпроводнике возникает смешанное вихревое состояние. В докладе анализируется движение вихрей в образцах ВТСП, движущимися в поле постоянных магнитов, в том числе с высокими скоростями. Обсуждаются различные механизмы потерь, связанных с вихревыми процессами, оценивается их вклад и обсуждаются возможности предотвращения этих потерь. Рассматриваются различные процессы, связанные с движением вихрей, включая электрические токи и электромагнитное излучение, и др.

В магнитных полях, превышающих первое критическое поле H_{c1} , магнитные вихри или нити магнитного потока проникают в сверхпроводники 2-го рода, включая ВТСП. Большое количество работ (см., например, [3-8]) посвящено изучению вихревого движения в сверхпроводниках под действием транспортного тока, свойств вихрей и другим смежным вопросам. Хотя основные принципы, положения и методы, описанные в литературе, также могут быть корректно применены при движении сверхпроводника с вихрями относительно магнитов, в последнем случае будут происходить процессы и физические явления, существенно отличающиеся от тех, которые происходят с вихрями в сверхпроводниках с током, вызванным внешним источником. Хотя в обоих случаях вихри могут перемещаться и вызывать рассеивание энергии (сопротивление потоку), механизмы, описывающие их формулы, и явления, возникающие в этом случае, различны. Динамика вихрей в сверхпроводниках, движущихся относительно магнита, требует независимого тщательного изучения, особенно для реализации ВМЛТ.

Работа поддержана грантом РФФ № 25-19-20141.

1. Карпухин Д.А., Петров А.О., Коледов В.В. и др., Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №11. (2022). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.5>
2. Deng Z., Zhang W., Kou L., et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**(8), 1–5 (2021).
3. Bardeen J., Stephen M.J., Physical Review **140**(4A), A1197 (1965).
4. Gorkov, L.P., Kopnin, N.B., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **116**(7), 413–448. (In Russian) (1975).
5. Maeda A, Hirasawa N., IEEE Trans. Appl. Supercond. **25**, 6800304 (2015).
6. Wagenleithner R.J., Appl. Phys. **121**, 123901 (2017).
7. Руднев И.А., Анищенко И.В., Журнал технической физики **91**(12), 1813–1847 (2021).
8. Максимова А.Н., Кашурников В.А., Мороз А.Н., Руднев И.А., Физика твердого тела **63**(5), 592–601 (2021).



NEURAL NETWORK APPROXIMATION OF CLASSICAL CORRELATIONS IN QUANTUM SYSTEMS

D.A. Konyshov^{1}, V.V. Mazurenko^{1,2}*

¹Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow, Russia

*E-mail: dankon.and@mail.ru

The mutual information (M) quantifies interconnection between random variables. It plays a key role in analyzing correlations in various systems, but in most interesting cases its estimation is vast problem due to a huge number of the system's states, which complicates definition of the system states probabilities. To solve this problem, a number of parameterized methods have been developed to approximate the mutual information, even when there is a deficit of information on the system's states. One of them is MINE [1] aimed at maximizing the lower bound of mutual information with the supposition of its proximity to the exact value M . Being based on neural networks MINE allows one to get reliable estimates of M and evaluate other important characteristics such as the specific Shannon entropy (s) and the von Neumann entropy (S_{vN}) in the case of quantum systems.

In our study, by the example of the Ising quantum chain in a longitudinal and transverse magnetic field we have estimated the classical mutual information by using MINE with a limited number of measurements. On this basis we have defined a relationship between the entropy-based quantities and mutual information [2,3]. This allows to perform a quantitative estimate of entanglement entropy based on classical mutual information (Fig.1a), and likewise identify unique features of phase diagrams. For example, a comparison of the critical changes in the behavior of information entropy with known solutions and the other results [4] helped us to reveal a previously unknown FM-PM phase transition in this spin model (Fig.1b).

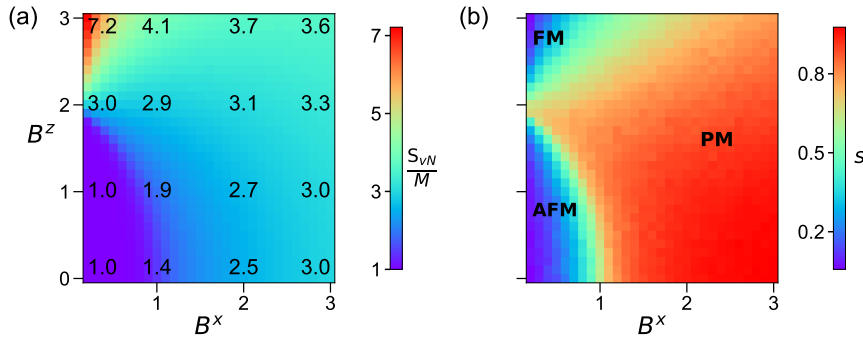


Рис. 1. (a) A numerical map of one-dimensional 16-spins quantum Ising model in longitudinal B^z and transverse B^x magnetic fields that visualizes the ratio between entanglement entropy calculated for a subsystem of 8 spins and classical mutual information. (b) An extended phase diagram is reconstructed with a neural network estimate of the specific information entropy of the entire system.

1. Belghazi, M. I., Baratin, A., Rajeshwar, S., Ozair, S., Bengio, Y., Hjelm, D., Courville, A. International Conference on Machine Learning, pp. 530–539 (2018).
2. Nir A., Sela E., Beck R., Bar-Sinai Y., PNAS **117**, 30234–30240 (2020).
3. Y. Meurice, Phys Rev Research **7**, L022023 (2025).
4. Bonfim O. F. de A., Boechat B, Florencio J., Phys Rev E. **99**, 012122 (2019).



PROGRAMMABLE SOLITON DYNAMICS IN ALL-JOSEPHSON-JUNCTION LOGIC CELLS AND NETWORKS

A.A. Maksimovskaya^{1,2,3*}, V.I. Ruzhickiy¹, N.V. Klenov^{1,2}, A.E. Schegolev³, S.V. Bakurskiy^{1,3},
I.I. Soloviev¹

¹All-Russian Research Institute of Automatics n.a. N.L. Dukhov (VNIIA), 127030, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991, Russia

*E-mail: stasyahime@gmail.com

In this work, we propose a novel approach to programmable control of kinetic soliton dynamics in all-Josephson-junction (all-JJ) logic circuits and neuromorphic networks. Our design centers on a tunable cell, the Kinetic Inductance Controllable Key (KICK), which exploits engineered inhomogeneity to fundamentally alter the solitons behavior [1]. Such inhomogeneity may be designed as an element of tunable kinetic inductance [2]. Through theoretical modeling and numerical simulations, we demonstrate that:

1. The KICK cell supports four distinct dynamical modes (Open, Close, T-Mode, M-Mode) by tuning the kinetic inductance L/L_J and damping parameter α , fundamentally altering soliton propagation;
2. Structural asymmetry in the KICK enables a soliton diode effect, enforcing unidirectional signal propagation – a functionality dynamically switched "on/off" via kinetic inductance;
3. These principles underpin the WayMatrix, a reconfigurable network for collision-free soliton routing in high-density circuits, with direct applications in superconducting logic and bio-inspired neuromorphic hardware.

Our research demonstrates that engineering artificial inhomogeneity into the circuit architecture enhances robustness in all-JJ logic circuits, 2D transmission line all-JJ lattices, and neuromorphic computing systems.

1. Ruzhickiy V.I. et al., Beilstein J. Nanotechnol. **16**, 1883 (2025).

2. Annunziata A.J. et al., Nanotechnology **21** (44), 445202 (2010).



NONLINEAR EXCITON DYNAMICS IN 2D SEMICONDUCTORS MODELED FOR PUMP-PROBE EXPERIMENTS

M.A. Малахов^{1,}, M. Quintela², M. Sa², G. Cistaro³, A. Picon²*

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Departamento de Quimica, Universidad Autonoma de Madrid, E-28049 Madrid, Spain

³Theory and Simulation of Materials (THEOS), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, Switzerland

* E-mail: MMalakhov89@yandex.ru

Экситоны играют важную роль в оптическом отклике двумерных магнитных материалов. Это связанные состояния, рассматриваются как квазичастицы, образованные электроном и дыркой. Выполняя моделирование в реальном времени, мы показываем, что ультракороткий (несколько фемтосекунд) УФ-импульс может создавать когерентную суперпозицию экситонных состояний, которая вызывает когерентное движение электронов и дырок между различными псевдоспиновыми долинами в k -пространстве и в реальном пространстве. Без приложения внешней деформации, псевдоспиновые долины и соответствующие им экситонные состояния вырождены по энергиям. Мы показываем, как снятие этого вырождения при нарушении кристаллической симметрии в результате приложения внешнего давления, позволяет управлять динамикой экситонных состояний лазерным импульсом.

Мы также показываем, что наши теоретические методы расчета [1–3] могут быть применены для описания экспериментов в сверхбыстрой спектроскопии импульс-накачка. В данной работе мы моделируем экситонные спектры и динамику экситонов в реальном времени для монослойных материалов, в частности для гексагонального нитрида бора.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

1. G. Cistaro et al., Journal of Chemical Theory and Computation **19**, 333 (2023).

2. M. Malakhov et al., Communications Physics **7**, 96 (2024).

3. M. Quintela et al., arXiv:2501.16036 (2025).



LOW DIMENSIONAL MAGNETISM. SPHERICALLY SYMMETRIC APPROACHES

А.Ф. Барабанов¹, В.Э. Валиулин^{1,2}, А.В. Михеенков^{1,2*}, П.С. Савченков^{3,4}

¹Институт физики высоких давлений РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Мос. обл., Россия

³НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

⁴НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

* E-mail: mikheen@bk.ru

В низкоразмерных магнитных системах существенной оказывается роль квантовых флуктуаций. Дезорганизующим фактором служит также и фрустрация. В соединениях с локализованными моментами последняя приводит к интересным и не очевидным эффектам. Это, например, образование нетривиальной спиновой конфигурации или потеря спинового упорядочения даже при $T = 0$. Как и роль квантовых флуктуаций, эффекты фрустрации особенно сильны при низкой размерности.

Описание таких эффектов в рамках традиционных методов теории магнетизма не всегда результативно. Приходится искать альтернативные алгоритмы. Один из них – сферически симметричный самосогласованный подход, СССРП (англоязычная нотация rotation-invariant Green's function method, RGM) [1–3].

В докладе представлены основные идеи и некоторые полученные за последние 25 лет важнейшие результаты сферически симметричного самосогласованного подхода и ряда родственных теоретических алгоритмов [4].

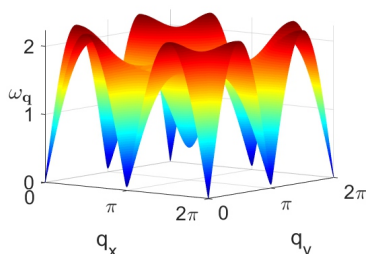


Рис. 1. Пример спектра спиновых возбуждений

Ключевая идея в этой области и важнейшее отличие от спин-волнового (и близких к нему) подходов – сохранение исходной симметрии: SU(2) спиновой и трансляционной. Это позволяет исследовать низкоразмерные спиновые модели (в том числе фрустрированные), при точном учете теоремных ограничений, а также узельного спинового констрейнта.

Таким образом, обходятся трудности, которые могут возникать при традиционном анализе низкоразмерных магнитных систем. Подход может быть встроен в более сложные конструкции при рассмотрении спиновых моделей со свободными носителями, таких как базовая и трехзонная модели Хаббарда, $t-J$ и $s-d$ модели, решетка Кондо. Это порождает

нетривиальные реализации идеи спинового полярона.

Алгоритмы метода работают и при анализе низкоразмерной спин-псевдоспиновой модели (модели Кугеля-Хомского). Причем в этом случае, помимо стандартных термодинамических характеристик, удается получить указания на квантовую запутанность подсистем.

1. Kondo J. and Yamaji K., Prog. Theor. Phys., **47**, 807 (1972).

2. Shimahara H. and Takada S., J. Phys. Soc. Jpn., **60**, 2934 (1991).

3. Барабанов А.Ф., Березовский В.М., ЖЭТФ, **106**, 1156 (1994).

4. Барабанов А.Ф., Валиулин В.Э., Михеенков А.В., Савченков П.С., УФН (2025), DOI: 10.3367/UFNr.2025.06.039948 (принято в печать).



VIOLATION OF THE LUTTINGER'S THEOREM IN FRACTIONAL CHERN INSULATORS

A.M. Никитшин^{1,2,}, A.A. Марков^{2,3}, L.P. Gavensky^{3,4}, N. Goldman^{3,4,5}*

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Российский квантовый центр, Москва, Россия

³Center for Nonlinear Phenomena and Complex Systems, Universit e Libre de Bruxelles, CP 231, Campus Plaine, 1050 Brussels, Belgium

⁴International Solvay Institutes, 1050 Brussels, Belgium

⁵Laboratoire Kastler Brossel, Coll ge de France, CNRS, ENS-Universit e PSL, Sorbonne Universit e, 11 Place Marcelin Berthelot, 75005 Paris, France

*E-mail: a.nikishin@rqc.ru

В данной работе исследуются одноэлектронные возбуждения в дробном изоляторе Черна. Фаза дробного изолятора Черна может быть описана в терминах слабовзаимодействующих дробнозаряженных квазичастиц без прямой связи с электронами системы. Теоретически было однако предсказано [1], что электрон — стабильное возбуждение в этой сильнокоррелированной жидкости. Более того, с использованием теоремы Латинжера можно показать [2] как связаны электронные корреляции и низко энергетическая физика дробного эффекта Холла.

Фокус данного исследования — изучение физики дробного эффекта Холла в реш точных системах (дробные изоляторы Черна) используя теорему Латинжера [3]. В работе [2] в достаточно общей постановке вопроса было аналитически показано, что во взаимодействующих системах теорема нарушается, а именно появляется ненулевой вклад от интеграла Латинжера N_2 в плотность частиц при нулевой температуре.

В данном исследовании мы аналитически и численно показали нарушение данной теоремы в дробной Холловской фазе, что связывается с возникновением в ней нулей функции Грина внутри одночастичной щели. В частности это приводит к отклонению многочастичного числа Черна C от величины N_3 , которая является инвариантом и хорошо работает в целочисленном эффекте Холла.

При анализе изучались свойства возникающих особенностей (нулей) и их влияние на квантование Холловской проводимости σ_{xy} , однозначно связанной с числом Черна. Обнаружение нулей функций Грина в спектре состояний системы является качественно новым результатом для фермионных систем в дробной фазе.

1. Jain J. K. and Peterson M. R., Reconstructing the Electron in a Fractionalized Quantum Fluid., Phys. Rev. Lett. **94**, 186808 (2005).
2. Gavensky L. P., Sachdev S. and Goldman N., Connecting the many-body Chern number to Luttinger's theorem through St reda's formula., Physical review letters **131**, 236601 (2023).
3. Luttinger J. M., Fermi surface and some simple equilibrium properties of a system of interacting fermions., Physical Review **119**, 1153 (1960).



SOLITARY SUPERCONDUCTIVITY IN FERROMAGNET-SUPERCONDUCTOR TRILAYERS (NEW ASPECTS)

Ю.Н. Прошин^{1*}, Д.А. Арбузов^{1,2}, В.А. Туманов¹,
А.А. Камашев², Н.Н. Гарифьянов², И.А. Гарифуллин²

¹Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²Физико-технический институт, ФИЦ КНЦ РАН, Казань, Россия

*E-mail: Yurii.Proshin@kpfu.ru

В искусственных слоистых структурах ферромагнитный металл - сверхпроводник (FS) сверхпроводимость за счет эффекта близости проникает в F металл, и, одновременно, обменное поле ферромагнетиков стремится подавить сверхпроводимость в S металле. Последний эффект растет с увеличением толщин ферромагнитных слоев (см. обзоры [1-3] и приведённые в них ссылки).

Поэтому неожиданным выглядело теоретическое предсказание уединённой сверхпроводимости как для “чистых” трехслойных F_1SF_2 систем [4], так и для “грязных” F_1SF_2 и F_1F_2S систем [5-7]. Уединённая сверхпроводимость появляется в виде пика на фазовой диаграмме критической температуры от толщины F_2 слоя $T_c(d_{f2})$, который возникает **при увеличении** толщины d_{f2} до d_{f2}^* и исчезает при $d_{f2}^{**} > d_{f2}^*$. Это происходит при антипараллельной (AP) взаимной ориентации намагниченностей слоёв F_1 и F_2 , при параллельной (P) ориентации намагниченностей сверхпроводимость не возникает. Изложенный в работе [6] рецепт по практической реализации условий экспериментального наблюдения уединённой сверхпроводимости был применен к системе $HA_1/HA_2/Pb$, где HA – сплав Гейслера ($HA = Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl$) [8]. В этой нашей работе, благодаря оптимально подобранным параметрам конструкции сверхпроводящего спинового клапана (ССК), было впервые экспериментально реализовано состояние с уединённой сверхпроводимостью и был обнаружен аномально большой эффект спинового клапана $\Delta T_c = T_c^{AP} - T_c^P > 0.2$ K, который может достигать величины 1.6 K в магнитном поле 1 кЭ. До настоящего времени сопоставимые результаты по величине эффекта ССК наблюдались лишь в структурах ССК с триплетной сверхпроводимостью во внешних магнитных полях, значительно превышающих 1 кЭ.

Основываясь на анализе фазовых диаграмм, полученных алгоритмически точным методом решения уравнений Узаделя [9], кроме уединённой сверхпроводимости также исследуется вопрос о возможном экспериментальном детектировании “скрытого” межэлектронного взаимодействия в F слоях.

Работа Д.А. Арбузова, А.А. Камашева, Н.Н. Гарифьянова и И.А. Гарифуллина по исследованию сверхпроводящих свойств была выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ РАН.

1. Изюмов Ю.А., Прошин Ю.Н., Хусаинов М.Г., УФН, **172**, 113 (2002).
2. Buzdin A. Rev. Mod. Phys. **77**, 935 (2005).
3. Golubov A.A. et al., arXiv:2509.16387 (2025).
4. Хусаинов М.Г. и др., Письма в ЖЭТФ, **90**, 402 (2009).
5. Авдеев М.В., Прошин Ю.Н., Письма в ЖЭТФ, **102**, 106 (2015).
6. Авдеев М.В., Прошин Ю.Н., Международная зимняя школа физиков-теоретиков Коуровка-36: Тезисы докладов. - С. 33. (2016).
7. Avdeev M.V., Proshin Y.N., JMMM, **440**, 116 (2017).
8. Арбузов Д.А. и др., Письма в ЖЭТФ, **123**, 41 (2026).
9. Туманов В.А., Прошин Ю.Н., Письма в ЖЭТФ, **120**, 636 (2024).



VORTEX STRUCTURE AND INTERVORTEX INTERACTION IN SUPERCONDUCTING STRUCTURES WITH INTRINSIC DIODE EFFECT

A.V. Putilov^{1,4*}, D.V. Zakharov², A. Kudlis³, A.S. Mel'nikov^{1,4}, A.I. Buzdin⁵

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russia

²ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

³Science Institute, University of Iceland, Reykjavik, Iceland

⁴Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia

⁵University of Bordeaux, LOMA UMR-CNRS 5798, F-33405 Talence Cedex, France

*E-mail: alputilov@ipmras.ru

We consider a thin superconducting film deposited on an insulating ferromagnet within the modified Ginzburg-Landau functional.

The magnetochiral anisotropy triggered by the exchange field and the interfacial spin-orbit interaction can be incorporated into the GL free-energy density through the odd spatial-derivative terms whose strength is set by two phenomenological constants ϵ_1 and ϵ_3 .

The interface normal $\mathbf{n}$ breaks inversion symmetry, while an in-plane exchange field $\mathbf{h}$ breaks time-reversal symmetry; taking $\mathbf{h}$ parallel to the layers suppresses stray fields.

The vectors $\mathbf{n}$ and $\mathbf{h}$ together single out the in-plane direction $[\mathbf{n} \times \mathbf{h}]$ that governs all non-reciprocal responses.

Since the spin-orbit interaction is confined to an atomic-scale interface layer, its effects are more pronounced if the film thickness is of the order of coherence length ξ . In this limit, variations of the order parameter along $\mathbf{n}$ can be neglected, which leads to the two-dimensional density of free energy

$$F = -\alpha|\psi|^2 + 0.5\beta|\psi|^4 + \xi^2\alpha|\mathbf{D}\psi|^2 + (\epsilon_1\psi^*[\mathbf{n} \times \mathbf{h}]\mathbf{D}\psi + \epsilon_3\mathbf{D}\psi^*[\mathbf{n} \times \mathbf{h}]\mathbf{D}^2\psi + c.c.),$$

where operator $\mathbf{D} = -i\nabla - 2\pi\mathbf{A}/\Phi_0$, where $\mathbf{A}$ is a vector potential.

Within this modified GL functional, we demonstrate that the intrinsic superconducting diode effect can strongly reshape Abrikosov vortices and leads to a chiral distortion of the superfluid velocity, non-central interaction forces and resulting torque in a vortex-antivortex pair, and anisotropy of the Bean-Livingston barrier [1].

These results are fully confirmed by time-dependent GL numerical simulations carried out with a fourth-order least-squares finite-difference solver, which captures equilibrium single vortex configuration in realistic mesoscopic geometries. The analysis shows that the cubic gradient term shifts vortex cores by an amount proportional to the in-plane exchange field and simultaneously generates a lateral torque that can rotate entire vortex ensembles, showing how spin-orbit coupling and the exchange field enable breakdown of the vortex-antivortex symmetry in a finite-size sample.

This work has been supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 25-12-00042).

1. Putilov A. V. et al., Phys. Rev. B **112**, 134507 (2025).



QUANTUM PROPERTIES OF NONEQUILIBRIUM KINETICS OF TWPA

S.V. Remizov^{1,2,3}, A.S. Plyashechnik¹, A.A. Elistratov¹, A.V. Lebedev¹*

¹Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

³National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

*E-mail: sremizov@gmail.com

Modern quantum technologies demand precise handling of weak microwave signals, highlighting the importance of understanding nonequilibrium and quantum effects in travelling-wave parametric amplifiers (TWPAs), which provide low-noise amplification. Describing the propagating signals as bosonic fields shows that interactions between modes of the TWPA couple their first moments to higher-order cumulants, producing nontrivial dynamics. Notably, such effects arise already at first order in the nonlinearity, where Fermi's golden-rule-based approaches fail and the kinetic description becomes non-obvious.

To address the kinetics of such a system, we employ the Schwinger-Keldysh diagrammatic technique within the Nambu representation to describe inter-boson correlations. We also explicitly incorporate nonzero field displacements (first moments), which may evolve in time. Using a TWPA as a model, we study the kinetics of Gaussian states in a medium with a quartic bosonic-field nonlinearity.

Using a standard approach [1,2], we derive equations for the temporal evolution of the field displacements and the corresponding Dyson equations. From these, we obtain equations of motion for the cumulants, which explicitly include the field displacements. Crucially, the cumulants also enter the equations for the displacements, preventing a closed description in terms of first or second moments alone.

Our analysis shows that coherent signal propagation in such a nonlinear medium is accompanied by periodic oscillations, signifying the conversion of a small fraction of photons from a coherent to a squeezed state. When inter-mode interactions are neglected, the problem admits an exact analytical solution at first order in the nonlinearity.

The derived formalism allows us to analyze a TWPA in the amplification regime and investigate the noise properties of the amplified signal. From a practical perspective, the case of classical (coherent) pump and input signals is particularly relevant. We demonstrate that, at first order in the nonlinearity, the amplified signal's signal-to-noise ratio depends on the TWPA length and on the powers of the signal and pump, which results from differences in the dynamics of field displacements and cumulants.

Furthermore, our theory provides a means to estimate higher-order correlators. For a strong coherent input signal, the estimated $g^{(2)}$ of the amplified output is close to 1, indicating its classical behavior. In contrast, for a weak input signal, $g^{(2)}$ increases, reflecting the enhanced role of quantum effects that lead to photon bunching. We further demonstrate that relaxation caused by nonlinearity imposes limits on the achievable squeezing parameter of the generated radiation, so that the interplay between relaxation and squeezed-radiation generation determines the optimal TWPA length.

1. Buchhold M. and Diehl S., Eur. Phys. J. D **69** 224 (2015).

2. Vasil'ev A.N., Functional Methods in Quantum Field Theory and Statistical Physics, Taylor & Francis Ltd (1998).



EVALUATION THE TENDENCIES TO SUPERCONDUCTING PAIRING OF EPSILON-IRON AND IRON-BASED SUPERCONDUCTORS FROM DFT+DMFT CALCULATIONS

S.L. Skornyakov^{1,2*}, A.S. Belozеров¹, A.A. Katanin^{1,3}, V.I. Anisimov^{1,2}

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

³Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia *E-mail: skornyakov@imp.uran.ru

Iron and iron-based compounds exhibit a variety of unusual properties that attract the attention of a broad circle of researchers. Over the past two decades this interest gained a significant boost due to the discovery of superconductivity of epsilon-iron and the entirely new class of superconducting materials – iron pnictides and chalcogenides. In particular, many efforts have been devoted to microscopic first-principle modeling of the electronic structure of iron-based systems, aimed at explaining their phase diagrams and understanding the nature of the superconducting state.

Here, we employ the Bethe-Salpeter equation (BSE) approach to evaluate the tendencies to superconducting pairing of epsilon-iron and parent compounds of iron-based superconductors. As a first step, we use the dynamical mean-field theory plus density functional theory (DFT+DMFT) method to calculate the electronic structure and non-uniform spin susceptibility taking into account the effect of local Coulomb correlations in the Fe 3d shell. In these calculations the quasiparticle mass enhancement m^*/m is found to range from 1.5 (33 GPa) to 1.8 (12 GPa) for epsilon-iron and reach 2 for iron-based superconductors FeSe and LaFeAsO signaling moderate correlations. In addition, we calculate the imaginary time spin correlation functions and the nonuniform spin susceptibility which indicate the presence of strong antiferromagnetic fluctuations and short-lived local moments. Next, using the DFT+DMFT local self-energy and non-local particle-hole bubble we construct and solve the multiband BSE with the pairing vertex calculated by the second-order perturbation theory. For epsilon-iron we analyze the evolution of BSE eigenvalues and eigenfunctions under pressure and speculate on the spin fluctuation-mediated mechanism of superconductivity. In particular, we show that the tendency to superconducting pairing in epsilon-iron becomes weaker under pressure consistent with vanishing of the superconductivity at 30 GPa. For the parent compounds FeSe and LaFeAsO our calculations give a singlet pairing with sign-changing gap sharing similar features with the so-called s+-scenario of superconductivity proposed earlier for iron pnictides and chalcogenides. Altogether, our results demonstrate that the BSE with the interaction vertex obtained by perturbation theory can be used to explore the fundamental properties of superconducting state such as the symmetry of the superconducting gap of strongly correlated materials.

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-12-00024).



CLUSTER QUANTUM-CHEMICAL APPROACH TO THE STUDY LOCAL ELECTRONIC PROPERTIES AND EXCHANGE SPIN INTERACTIONS IN COMPLEX TRANSITION METAL OXIDES

*L.A. Siurakshina**

Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies, JINR, Dubna, Russia

*E-mail: siuraksh@jinr.ru

Ab initio quantum chemical approach has been developed [1–5] to calculate the local electronic structure (N -electron wave functions and their energies) of small crystalline fragments (clusters) of complex transition metal (TM) oxides. All three families of TMs with partially filled nd -orbital electron subshells ($n = 3, 4, 5$) differing in the strength of spin-orbit coupling are considered. This wavefunction methodology utilizes post-Hartree-Fock calculations and symmetry analysis of local electron configurations to account for static and dynamic electron correlations and classify the resulting stationary cluster's multi-electron configurations.

On this basis, for a large set of TM oxides with diverse crystal structures, first, the energy spectrum of local $d - d$ electron transitions was calculated with the accuracy required by experimental resolution, for example, by RIXS spectroscopy [6]. Second, a numerical scheme was elaborated for the ab initio estimation of the exchange model parameters for a variety of effective spin-1/2 Hamiltonians relevant to a number of heavy TM oxides of the $5d$ family with strong spin-orbit interaction. In my presentation, the general structure of the cluster ab initio approach together with details of its application will be discussed using the example of the Heisenberg compass model for the iridate Ba_2IrO_4 .

1. Hozoi L., Siurakshina L., Fulde P., van den Brink J., Scientific Reports **1**, 65 (2011).
2. Huang H.-Y., Bogdanov N., Siurakshina L., Fulde P., van den Brink J., and Hozoi L., Phys. Rev. B. **84**, 235125 (2011).
3. Katukuri V., Yushankhai V., Siurakshina L., van den Brink J., Hozoi L., and Rousochatzakis I., Phys. Rev. X **4**, 021051 (2014).
4. Siurakshina L., Yushankhai V., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **89**, 1802 (2025).
5. Xu L., Yadav R., Yushankhai V., Siurakshina L., van den Brink J., and Hozoi L., Phys. Rev. B. **99**, 115119 (2019).
6. Yushankhai V., Siurakshina L., Int. J. of Mod. Physics. B **27**, 1350185 (2013).



MAGNETOELASTIC DYNAMICS OF THE SPIN JAHN-TELLER TRANSITION IN CoTi_2O_5

*K. Guratinder¹, R.D. Johnson^{2,3}, D. Prabhakaran⁴, R.A. Taylor⁴, F. Lang⁴, S.J. Blundell⁴,
L.S. Taran^{5*}, S.V. Streltsov⁵, T.J. Williams⁶, S.R. Giblin⁷, T. Fennell⁸, K. Schmalzl⁹, C. Stock¹⁰*

¹School of Physics and Astronomy, University of Edinburgh, Edinburgh, UK

²Department of Physics and Astronomy, University College London, London, UK

³London Centre for Nanotechnology, University College London, Gordon Street, London, UK

⁴Department of Physics, Clarendon Laboratory, University of Oxford, Oxford, UK

⁵M. N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

⁶Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

⁷ISIS Pulsed Neutron and Muon Source, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot, UK

⁸School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Cardiff, UKa

⁹Laboratory for Neutron Scattering, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland

¹⁰Juelich Centre for Neutron Science, Forschungszentrum Juelich GmbH,
Institut Laue-Langevin, Grenoble, France

*E-mail: leonidtaran97@gmail.com

In this work, the dynamics of the spin Jahn–Teller transition in CoTi_2O_5 have been investigated for the first time using inelastic neutron scattering and Raman spectroscopy. It is found that upon entering the magnetically ordered state, the acoustic shear mode with Γ_2^+ symmetry undergoes a pronounced hardening and narrowing. This mode corresponds to a C_{66} -type deformation and possesses the appropriate symmetry to break the mirror plane m_x , which is responsible for magnetic frustration.

Notably, the energy scale of this anomaly ($\sim 3\text{--}4$ meV) coincides with that of magnetic excitations—spin waves—indicating strong magnetoelastic coupling. Complementary Raman spectroscopy data revealed an optical phonon mode of the same Γ_2^+ symmetry (~ 21.5 meV), which, unlike typical lattice modes, softens upon cooling—a signature of dynamic instability and a possible structural distortion. Density functional theory calculations show that this mode is associated with displacements of oxygen ions out of the mirror plane, thereby lifting the frustration. These results suggest that the spin-driven Jahn–Teller transition in CoTi_2O_5 is realized through cooperative magnetoelastic fluctuations, in which acoustic phonons play a crucial role.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the IMP UB RAS.



MAGNON EDGE STATES OF SKYRMION CRYSTAL IN NON-UNIFORM MAGNETIC FIELD

V.E. Timofeev^{1,2*}, D.N. Aristov^{1,2}

¹NRC “KI” Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*E-mail: viktor.timofeev@spbu.ru

We investigate the magnon excitation spectrum of skyrmion crystals (SkX) formed in thin ferromagnetic films with Dzyaloshinskii–Moriya interaction when the system is subjected to a spatially nonuniform external magnetic field. In uniform fields, the low-energy magnon bands of SkX exhibit a field-induced topological transition: the gap between two modes near the Brillouin-zone center closes and subsequently reopens with an exchange of their Chern numbers [1,2]. We explore a configuration where two adjoining half-planes reside on opposite sides of this transition point. Such a setup creates an interface separating topologically distinct SkX phases.

Using the stereographic projection approach within semi-classical quantization [3], we perform full-scale calculations of the magnon band structure in an elongated strip geometry. In parallel, we employ a reduced effective description based on an extended Dirac equation for the breathing and counterclockwise low-energy modes. Both approaches consistently reveal the emergence of chiral magnon edge states bound to the interface. Their group velocity is governed by the orientation of the magnetic-field gradient, providing a direct mechanism for field-controlled unidirectional magnon transport. We further show that these edge states remain strongly confined within only a few lattice periods of the skyrmion crystal, corresponding to submicron scales in realistic materials, and that their localization properties are robust over a wide range of magnetic fields.

Our results [4] demonstrate that spatially engineered magnetic fields offer a powerful means of creating and tuning chiral magnon channels in skyrmion crystals. Such field-reconfigurable edge states provide a promising platform for magnonics applications, including controllable waveguides and quasi-one-dimensional conduits for heat and spin transport.

The work was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-72-00083.

1. S. A. Diaz, T. Hirose, J. Klinovaja, and D. Loss, Physical Review Research **2**, 013231 (2020).
2. V. E. Timofeev, Yu. V. Baramygina, D. N. Aristov, JETP Letters **118**, 12, 911–916, (2023).
3. V. E. Timofeev and D. N. Aristov, Phys. Rev. B **105**, 024422 (2022).
4. V. E. Timofeev and D. N. Aristov, arXiv:2510.16970.



CRITICAL DYNAMICS OF SPIN BOSON MODEL

М.Г. Васин^{1,2,}, А.А. Елистратов¹, С.В. Ремизов^{1,3,4}*

¹НИИ автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА), Москва, Россия

²Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

*E-mail: dr_vasin@mail.ru

В представленной работе изучаются низкоэнергетические свойства спин-бозонной модели, описывающей динамику спина $1/2$, связанного с бозонным термостатом, характеризующимся степенной спектральной функцией $f(\omega) \propto \omega^s$. Предложен альтернативный подход, основанный на спиновой фермионизации с использованием майорановских спиноров [1] и применении критической динамики и ренормгруппового анализа в рамках формализма Швингера–Келдыша.

Прежде всего, была преодолена проблема перенормируемости. Показано, что стандартная формулировка гамильтониана в терминах майорановских фермионов приводит к неперенормируемой теории. Для решения этой проблемы было предложено эквивалентное, но перенормируемое представление гамильтониана, корректно учитывающее коммутационные соотношения спиновых операторов. Это позволило нам в рамках однопетлевого приближения ренормгруппы вывести уравнения для перенормировки туннельной константы Δ и константы связи λ . В результате были получены аналитические выражения для неподвижных точек ренормализационной группы.

Теория согласуется с теоретическими положениями Леггетта [2] и последовательно описывает три режима в зависимости от индекса спектральной функции s : Для омического режима ($s = 1$) вычислена критическая точка λ^* . Показано, что переход между локализованной и делокализованной фазами происходит при $\lambda = \sqrt{2}\lambda^*$; В субомическом режиме ($s < 1$), как и в омическом, существует переход между делокализованной (при $\lambda < \sqrt{2}\lambda^*$) и локализованной (при $\lambda > \sqrt{2}\lambda^*$) фазами. Критическое значение константы связи, $\lambda^*(s)$, стремится к нулю с уменьшением s , сужая область делокализации. Полученное в рамках этой модели выражение для критического индекса намагниченности $1/\delta = (1 - s)/(1 + s)$, а также функциональная зависимость критической константы связи от s согласуются с результатами численных расчётов при $s \lesssim 1$ [3-6]; В суперомическом режиме ($s > 1$) локализованная фаза отсутствует, а спин всегда остаётся делокализованным, поскольку параметры Δ и λ не перенормируются.

Предложенный подход описывает процессы диссипации, позволяя рассчитывать времена релаксации и декогеренции. Показано, что: при $\lambda < \lambda^*$ время декогеренции больше периода туннельных колебаний, что соответствует затухающему колебательному режиму; при $\lambda > \lambda^*$ время декогеренции меньше времени туннелирования, что соответствует некогерентному режиму релаксации.

1. Schad P. et al., *Annals of Physics* **361**, 401 (2015).

2. Leggett A. J. et al., *Rev. Mod. Phys* **59**, 1 (1987).

3. Vojta M. et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 070604 (2005).

4. Winter A. et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 030601 (2009).

5. Zhang Y.-Y. et al., *Phys. Rev. B* **81**, 121105 (2010).

6. Wang Y.-Z., et al., *Phys. Rev. B* **100**, 115106 (2019).



NON-EQUILIBRIUM DYNAMICS IN LOW-DIMENSIONAL MODELS OF QUANTUM MAGNETISM

*V. Yushankhai**

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, Dubna, Russia

*E-mail: yushankh@theor.jinr.ru

ORAL

With the advent of quantum computers, i.e., the analog and digital quantum simulation platforms, and their expected experimental development in the near future, new opportunities arise for investigating the relationship between microscopic quantum theory and macroscopic thermodynamics. One of the key problems is the emergence of irreversibility in the non-equilibrium quantum dynamics of isolated many-body systems. Moreover, the development of sophisticated computational methods, in particular those based on the tensor-network framework, provide complementary tools to study dynamical properties of low-dimensional quantum systems of growing size with the use of classical computers.

In the context of both approaches a quantum quench protocol is commonly used. In such quench protocols, a system with the Hamiltonian $H = H_0 + \lambda H_1$ is first prepared in an eigenstate $|\psi(0)\rangle$ of H_0 . Next, the second term with nonzero value of λ is suddenly switched on at $t = 0$, such that $|\psi(0)\rangle$ is no longer an eigenstate of H , and hence one expects the many-body system to exhibit for $t > 0$ a nontrivial time evolution, for instance, relaxing to an equilibrium state.

Approaching a thermalization as a result of a late-time evolution, when physical observables agree with a (micro)canonical Gibbs ensemble, is a central problem of any simulation of the quantum dynamics of a many-body system. At the same time, several classes of systems fail to fully thermalize. These include some strongly disordered systems that undergo a transition to a many-body localized (MBL) phase, or regular systems featuring “quantum scars” where nearly stationary states are embedded in an otherwise thermal spectrum.

The aim of my talk is to present a mini-review of recent results in the field of non-equilibrium dynamics of quantum models of low-dimensional magnetism. The results reported in the literature are obtained by analog simulations on quantum platforms, as well as by application of numerical tensor-network methods including our own original program package.

POSTER



EXACTLY SOLVABLE MODEL OF ELECTRON-PHONON INTERACTION WITH FORWARD-FOCUSED SCATTERING

*R.G. Babaian**, *E.Z. Kuchinskii*

Institute of Electrophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: babaian@iep.uran.ru

In this study, we consider a two-dimensional model with a Fröhlich-type Hamiltonian that describes forward-focused electron-phonon scattering. The corresponding matrix element of the interaction, $g(q)$, is given by $g(q) = g_0 \exp(-|q|/q_0)$, where $q_0 \ll a^{-1}$ and a is the in-plane lattice constant. This model was first proposed in the context of the FeSe/STO system in [1].

Using the specific form of the Ward identity obtained in [2], we are able to take into account all diagrams in the asymptotic expansion of the full one-particle electron Green's function and derive a self-consistent equation for the Green's function. The model is studied in various regimes, including the antiadiabatic case ($\epsilon_F/\Omega_0 \ll 1$, where Ω_0 is the characteristic energy of phonons), the strong coupling case ($\lambda_0 = 2g_0^2 N(\epsilon_F)/\Omega_0 \gg 1$, where $N(\epsilon_F)$ is the DOS at the Fermi level), and at other values of the model's parameters, including those relevant to the FeSe/STO system. Numerical results (e.g., the spectral function and the effective dimensionless electron-phonon coupling) are compared with those obtained using the self-consistent Born approximation (for the FeSe/STO case, with the results from [3]).

This research was supported by the Russian Science Foundation (grant number 25-12-00418).

1. J.J. Lee et al., Nature **515**, 245–248 (2014).
2. Kuchinskii E.Z. et al., Phys. Rev. B **75**, 115102 (2007).
3. Y. Wang et al., Supercond. Sci. Technol. **29**, 054009 (2016).



QUANTUM ERROR MITIGATION WITH COMBINED DATA

Д.В. Бабухин^{1*}, В.В. Порогов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н. Л. Духова, 127030 Москва, Россия

*E-mail: dv.babukhin@gmail.com

POSTER

Квантовое смягчение и коррекция ошибок являются основными инструментами борьбы с шумом в квантовых вычислениях. Сочетание этих инструментов может обеспечить более плавный и быстрый переход между шумными квантовыми вычислениями промежуточного масштаба (NISQ) и отказоустойчивыми квантовыми вычислениями. В докладе будет рассказано, как одновременное использование данных, полученных с использованием и без использования квантовой коррекции ошибок, может улучшить работоспособность экстраполяции к нулевому шуму - одного из базовых методов квантового смягчения ошибок. В частности, будет показано, что объединение данных, полученных с использованием квантовой коррекции ошибок и без неё, приводит к оценкам с нулевым шумом, которые имеют лучшую точность и меньшее стандартное отклонение по сравнению с использованием данных, полученных либо только с использованием, либо без использования коррекции ошибок. В качестве демонстрации используется симуляция динамики многочастичной спиновой системы под действием гамильтониана модели Изинга в поперечном поле. Помимо улучшенной точности, комбинированное использование квантового смягчения и коррекции ошибок может давать экономию физических ресурсов в процессе квантовых вычислений. Аргументы в пользу такого утверждения приводятся в докладе.

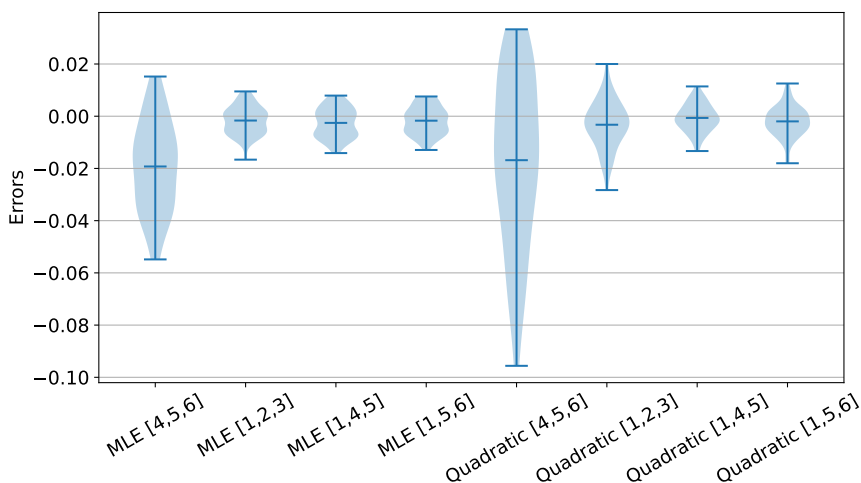


Рис. 1. Распределение отклонений оценок средней намагниченности, полученных экстраполяцией к нулевому шуму от значений средней намагниченности без шума.



ANDERSON TRANSITION OF A QUANTUM PARTICLE WITH LONG-RANGE HOPPING AMPLITUDES IN ONE DIMENSION

М.С. Баховадинов^{1,2}, Ф.Н. Джалолов^{1,3}, Б.Л. Альтшулер¹, Г.В. Шляпников^{1,4}*

¹Российский квантовый центр, Москва, Россия

² Международная лаборатория физики конденсированного состояния НИУ ВШЭ, Москва, Россия

³ Сколковский институт наук и технологий, Москва, Россия

⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: m.bahovadinov@rqc.ru

Известно, что квантовая частица в одномерной геометрии в присутствии сколь угодно слабого беспорядка локализуется [1,2]. В докладе будут представлены результаты нашего недавнего исследования по локализации Андерсона в присутствии дальних перескоков в одномерной решётке [3,4].

Рассматривается локализация квантовой частицы с амплитудами перескоков $t(r) \sim r^{-\alpha}$, в диагональном беспорядке. В отличие от стандартной модели Андерсона в одномерной геометрии ($\alpha \rightarrow \infty$), где все состояния локализованы, а длина локализации минимальна на краях зоны, в данной задаче при $1 < \alpha < 3/2$ на краю зоны наблюдается переход по амплитуде беспорядка, в то время как все остальные состояния остаются локализованными при любой амплитуде беспорядка. Мы исследовали этот переход в координатном и импульсном пространствах для основного состояния. Получены аналитические выражения для характеристических функций и моментов волновых функций, а также для фрактальной размерности в режиме слабого беспорядка в импульсном пространстве. Построены бета-функции, проверена гипотеза однопараметрического скейлинга и построена фазовая диаграмма модели. Полученные результаты сравнены с численными результатами точной диагонализации и применимы также к одномерной XY модели с дальнодействующими обменными взаимодействиями в односпиновом режиме, что может быть экспериментально реализовано на платформе холодных ионов.

1. Anderson P.W., Phys. Rev. **109**, 58, (1958).

2. Mott N.F., Advances in physics, **10**, 38, (1961).

3. De Moura F. A. et al., Phys. Rev. B, **71**, 17, (2005).

4. Tikhonov K.S. et al., Annals of physics, **435**, 168524, (2020).



TOPOLOGICAL TRANSITION IN Co_2MnAl DURING SUBSTITUTION OF COBALT FOR COPPER

Е.Д. Чернов^{1*}, А.В. Лукоянов^{1,2}

¹Институт физики металлов УрО РАН имени М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

²Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: chernov_ed@imp.uran.ru

Благодаря уникальным магнитным и транспортным свойствам, сплавы Гейслера являются перспективными материалами для спинтроники и магнитоэлектроники [1]. Их отличительная черта – способность проявлять свойства полуметаллов, топологических полуметаллов и сверхпроводников в зависимости от состава и структуры [2]. Высокая температура Кюри, аномальный эффект Холла и значительная спиновая поляризация усиливают их прикладной потенциал, при этом особое внимание уделяется системам на основе кобальта [3].

В данной работе представлены результаты первопринципных расчетов для сплава Гейслера Co_2MnAl при замещении атомов кобальта на медь. Исследование показало, что сплав Co_2MnAl проявляет полуметаллические свойства, а в проекции спина «вверх» в высокосимметричных точках X и W на уровне Ферми обнаружены точки Вейля. Полный магнитный момент составил $4.12 \mu_B$. Обнаружено, что с ростом концентрации атомов меди топологические особенности меняются, состояние становится металлическим. Полный магнитный момент системы $\text{Cu}_x\text{Co}_{2-x}\text{MnAl}$ с ростом концентрации меди сначала увеличивается до $4.5 \mu_B$ (при $x = 0.5$), а потом уменьшается до $3.6 \mu_B$ (при $Z = 2$) [4]. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал данных сплавов для использования в спинтронике.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 25-22-00481.

1. S. Tavares, K. Yang, M. A. Meyers, Prog. Mater. Sci. **132**, 101017, (2023).
2. A. Difalco, A. Castellero, M. Palumbo, M. Baricco, S. Boldrini, A. Ferrario, C. Fanciulli, O. Rouleau, B. Villeroy, G. Barrera, P. M. Tiberto, P. Allia, E. Alleno, J. Alloys Compd. **1027**, 180557 (2025).
3. B. Mallett, Y. Zhang, C. Pot, K. V. Koughnet, B. Stanley, R. G. Buckley, A. Koo, Y. Yin, N. V. Medhekar et al., Phys. Rev. Mater. **7**, 094203 (2023).
4. Е.Д. Чернов, А.В. Лукоянов, ЖЭТФ **168**, 5 (11), 676 (2025).



SUB-BRAGG AND SMALL ANGLE SCATTERING OF THE RAYLEIGH WAVE AS A TOPOLOGICAL INTERSECTION OF META-RAYLEIGH SPECTROSCOPY AND THE LAUE-BRAGG-WULFF META-SPECTROSCOPY

В.Н. Чуков*

Институт Биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

*E-mail: vcukov@mail.ru

Получено, что новые топологические законы рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея на детерминированной трёхмерной шероховатости свободной поверхности изотропного твёрдого тела формируют топологии мета-рэлеевского рассеяния и мета-рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа, включающих законы рассеяния Рэлея и Лауэ-Брэгга-Вульфа [1–6], расширяя и дополняя их, вплоть до их полного нарушения [2–6]. Данные топологии описывают как периодические, так и полностью хаотические неоднородности. Для хаотических решёток рассеивателей данные топологические законы выявляют значения топологических характеристик решётки, для которых хаотические решётки подчиняются закону Лауэ-Брэгга-Вульфа для виртуальной периодической решётки, имеющей определённый эффективный размер элементарной ячейки и соответствующей реальной хаотической решётке. При других определённых топологических характеристиках в общем случае полностью хаотических решёток нарушается данный закон Лауэ-Брэгга-Вульфа. Спектр может иметь произвольный характер, форма которого определяется не только рассматриваемыми законами фазового синхронизма, определяемого топологией неоднородностей, но и динамико-геометрическим фактором. Физически данный множитель индикатрисы рассеяния описывает как увеличение плотности потока энергии рассеянной волны, так и его уменьшение с ростом геометрической гладкости неоднородности при увеличении частоты волны. Данный динамико-геометрический фактор не учитывается в феноменологической [1] теории Лауэ-Брэгга-Вульфа. Но в рамках новых законов рассеяния он также имеет свою топологию наравне с топологией фазового синхронизма.

Получено, что в переходной частотной области от рэлеевского рассеяния к рассеянию Лауэ-Брэгга-Вульфа, то есть, в области суб-брэгговского рассеяния и в области малоуглового рассеяния, но высокочастотного по параметру Рэлея – отношению размера неоднородного участка к длине волны, закономерности формирования спектра рассеяния определяются взаимодействием мета-рэлеевского рассеяния и мета-рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа [5,6]. С точки зрения топологий законов рассеяния и структуры неоднородности это означает, что данные закономерности определяются пересечением топологий мета-рэлеевского рассеяния и мета-рассеяния Лауэ-Брэгга-Вульфа.

Сконструированы топологические структуры неоднородностей, реализующих мета-рэлеевскую спектроскопию, мета-спектроскопию Лауэ-Брэгга-Вульфа и их топологическое пересечение [2–6]. Полученные мета-рэлеевская спектроскопия и мета-спектроскопия Лауэ-Брэгга-Вульфа могут быть использованы в разных областях экспериментальной и теоретической физики, в новых технологиях акустоэлектроники, микроэлектроники, акустической и электромагнитной, в частности, рентгеновской визуализации строения вещества, в сейсмологии при конструировании сейсмических ловушек волн Рэлея.

Работа выполнена в рамках Госзадания НИОКР № 122041400112-8, код темы FFZR-2022-0012.

1. Ewald P.P. Acta Cryst. **A25**, 103 (1969).
2. Чуков В.Н. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки **16** (2), 557 (2023).
3. Chukov V.N. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **89** (1), 96 (2025).
4. Chukov V.N. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics **18** (5), 585 (2025).
5. В.Н. Чуков. Суб-брэгговский спектр рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея. Материалы ЛЛФ-2025, Иркутск, С. 142.
6. Чуков В.Н. Мета-спектроскопия рассеяния волны Рэлея на топологических структурах шероховатости. Препринт/ИБХФ РАН. Москва: Паблит, 2025. 33 с.



COLLECTIVE MODES IN CORRELATED π -CONJUGATED SYSTEM

G.S. Dedov^{1,2*}, *A.N. Rubtsov*^{2,3}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

²Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow, Russia

³Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: dedovgrigor@gmail.com

Strongly correlated π -conjugated materials, such as organic conductors of the Fabre salts family (TMTTF₂X) [1], display rich phase diagrams driven by the interplay of charge- and spin-density fluctuations. Traditional mean-field approaches, while efficient, fail to capture essential non-local correlations and overestimate symmetry-breaking tendencies.

The Fluctuating Local Field (FLF) method [2] provides a systematic way to go beyond mean-field theory by explicitly introducing fluctuating collective fields associated with the leading instability channels. These fields are integrated out in the partition function, effectively restoring the influence of collective fluctuations, allowing for quantitative improvement with modest computational cost.

We apply the FLF framework to the half-filled extended Hubbard model on an 8×8 lattice, focusing on the interplay between antiferromagnetic (AFM) and charge-density-wave (CDW) instabilities.

The FLF method eliminates spurious mean-field transitions and provides smoother thermodynamic quantities near criticality. In particular, the artificial kink in the total energy and the divergence of magnetic susceptibility predicted by the Hartree–Fock (HF) approximation are removed once fluctuations are accounted for.

Extending the method to include multiple fluctuating channels (spin and charge) enables us to capture competing orders and metastable states near the first-order CDW–AFM transition (around $V = U/4$). This multichannel FLF reproduces known phase boundaries and shows metastable regions beyond the reach of simple mean-field theory.

The next stage involves applying DFT+FLF to real π -conjugated conductors, aiming to describe the complex balance between charge ordering and antiferromagnetism in TMTTF₂X compounds. This approach paves the way for realistic modeling of correlated organic materials with strong fluctuation effects and competing collective modes.

1. Jacko, A. C., Feldner, H., Rose, E. et al. Phys. Rev. B **87**, 155139 (2013).

2. Rubtsov, A. N., Stepanov, E. A., Lichtenstein, A. I. et al. Phys. Rev. B **102**, 224423 (2020).



POLARONIC EFFECTS IN THE EXCHANGE INTERACTION OF CORRELATED SYSTEMS: THE ROLE OF COMPETITION BETWEEN HOLSTEIN AND PEIERLS CONTRIBUTIONS

A.V. Dudarev^{1}, S.V. Nikolaev^{1,2}, E.I. Shneyder¹*

¹Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia

* E-mail: dudarev.av@ksc.krasn.ru

The influence of electron–phonon interaction (EPI) on exchange processes in strongly electron correlated systems remains a subject of active debate. In the literature, both suppression of the superexchange parameter due to strong EPI [1,2] and enhancement of exchange in the presence of Peierls or SSH-type coupling [3,4] have been reported. Therefore, a universal picture of EPI effects on exchange in strongly correlated materials is still lacking.

To analyze the influence of EPI on exchange processes in strongly correlated systems, we consider an extended pd model that includes Holstein (local) and Peierls (nonlocal) EPI mechanisms:

$$H = H_{pd} + H_{EPI}.$$

Here, H_{pd} is the electronic pd -model, and H_{EPI} incorporates both types of electron-lattice contribution mechanism.

Using the polaronic version of the generalized tight-binding method [5] (pGTB), the model is rewritten in the Hubbard-operator representation, which enables a projection onto an effective single-band model and the derivation of an exchange interaction parameter via the projection-operator technique [6,7]. The expression obtained thereby fully incorporates the competing on-site contributions of Coulomb and lattice interactions.

In this work, we construct a phase diagram in the parameter space of Holstein and Peierls EPI for the extended pd -model. In particular, the diagram shows a non-uniform variation of the exchange interaction, including regions of both suppression and enhancement. The detailed discussion of the underlying mechanisms of renormalizing exchange interaction in a system with strong electron and electron-phonon contributions will be presented in the poster.

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-12-00044.

1. Kugel K.I., Khomskii K.I., Zh. Eksp. Teor. Fiz. **79**(3), 987–1005 (1980).
2. Badrtdinov D.I., et al, Phys. Rev. B **110**, L060409 (2024).
3. Cai X., et al., Phys. Rev. Lett. **127**, 247203 (2021).
4. Zhang C., et al., Phys. Rev. X **13**, 011010 (2023).
5. Makarov I.A., et al., Phys. Rev. B **92** 155143 (2015).
6. Gavrichkov V.A., et al., Phys. Rev. B **95** 144424 (2017).
7. Chao K.A., et al., J. Phys. C: Solid State Phys. **10** L271, (1977).



CIRCUIT-QED SIMULATOR OF THE BOSE-HUBBARD MODEL FOR QUANTUM SPIN DYNAMICS

I.V. Dudinets^{1,2}, J. Kim³, T. Ramos⁴, A.K. Fedorov^{1,5,6}, V.I. Man'ko⁶, J. Huh⁷*

¹ Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russia

³ SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

⁴ Institute of Fundamental Physics IFF-CSIC, Madrid, Spain

⁵ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

⁶ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁷ Department of Chemistry, Yonsei University, Seoul, South Korea

*E-mail: dudinets@phystech.edu

We present an experimentally feasible circuit quantum electrodynamics (circuit-QED) simulator for the Bose-Hubbard model, which captures the complex spin dynamics of Heisenberg models. The design of the circuit-QED Bose-Hubbard simulator is depicted in Fig. 1.

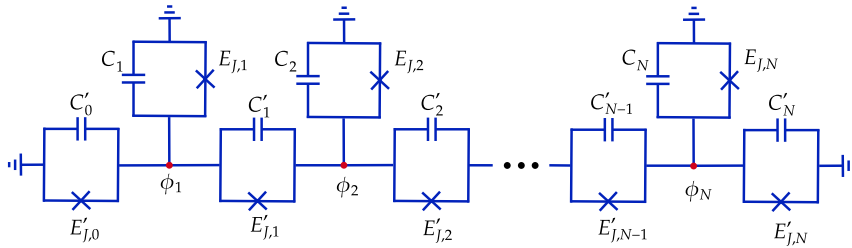


Рис. 1. The design of a circuit-QED Bose-Hubbard simulator [1]. It consists of a Josephson junction array, where at each site $j = 1, \dots, N$, a capacitance C_j and a Josephson junction with an energy $E_{j,j}$ are connected to ground. Flux variables ϕ_j indicated by red dots play the role of nonlinear microwave oscillators. These nonlinear oscillators interact via capacitive couplings C'_j , nonlinear inductive couplings $E'_{j,j}$, $j = 0, \dots, N$.

Our approach involves mapping spin-1/2 systems onto bosonic states using the Dyson-Maleev (DM) transformation. This transformation translates the intricate behavior of spins into a format that is compatible with bosonic devices, such as those used in circuit-QED setups. For comparison, we also implement the polynomially expanded Holstein-Primakoff (HP) encoding for spin-1/2 systems and demonstrate that, in this context, DM and HP are equivalent. Rigorous numerical analyses confirm the effectiveness of our DM-based protocol. Specifically, we investigate the concurrence between the spin dynamics and the behavior of microwave photons within our circuit-QED-based analog simulator designed for the Bose-Hubbard model. By utilizing the microwave photons inherent to circuit-QED devices, our framework provides an accessible and scalable method for investigating quantum spin dynamics in a practical experimental setting.

1. I. Dudinets, J. Kim, T. Ramos, A. Fedorov, V. Man'ko, J. Huh, arXiv:2507.03587.



ALL-TO-ALL CONNECTIVITY OF RYDBERG-ATOM-BASED QUANTUM PROCESSORS WITH MESSENGER QUBITS

I.V. Dudinets^{1,2*}, *S.S. Straupe*^{1,3}, *A.K. Fedorov*^{1,4}, *O.V. Lychkovskiy*^{5,6,1}

¹ Russian Quantum Center, Skolkovo Innovation Center territory, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russia

³ Quantum Technology Centre, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

⁵ Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo, Moscow, Russia

⁶ Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: dudinets@phystech.edu

Rydberg atom arrays are a front-running platform for quantum processors. A major challenge threatening the scalability of this platform is the limited qubit connectivity due to the finite range of interatomic interactions. In this work [1], we explore an approach to realize dynamical all-to-all connectivity with the use of moving “messenger” atomic qubits that couple distant “computational” qubits held in a static tweezer array.

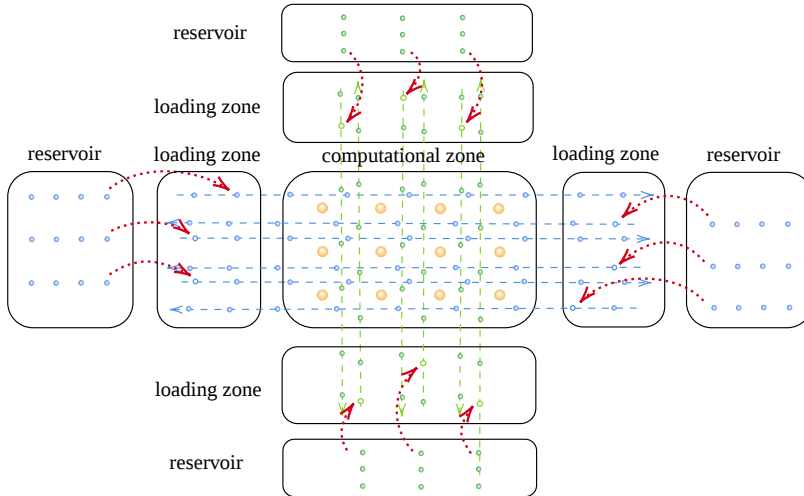


Рис. 1. General layout of one of the five architectures. See [1] for a detailed description.

We detail and compare five specific architectures (see Fig. ??) based on this concept, each presenting distinct advantages and challenges tied to the efficacy of techniques used to couple, move and measure atomic qubits. We demonstrate that, though technologically demanding, the messenger-qubit paradigm opens a promising avenue to a truly scalable quantum processor based on Rydberg atoms.

1. I. V. Dudinets, S. S. Straupe, A. K. Fedorov, and O. V. Lychkovskiy, arXiv:2504.05087.



MODELING THE DYNAMICS OF CIRCUIT ELEMENTS FOR NEURAL NETWORK COMPUTING BASED ON OVERDAMPED JOSEPHSON JUNCTIONS

A.A. Elistratova^{1,2*}, *G.I. Gubochkin*³, *A.G. Shishkin*^{1,2}, *S.V. Bakursky*^{2,3}, *N.V. Klenov*^{2,3},
V.S. Stolyarov^{1,2}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (NRU), Dolgoprudnyy, Russia

²Federal State Unitary Enterprise VNIIA named after. N.L. Dukhova, Moscow, Russia

³Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

*E-mail: elistratova.aa@yandex.ru

Neuromorphic computing based on SFQ logic is also a rapidly developing field. Spiking neural networks (SNNs) are a particularly attractive approach for implementation in the context of single-quantum electronics. The use of logic based on single magnetic flux quanta allows for the natural implementation of information transmission in the form of discrete pulses, analogous to neural "spikes". Experimental implementations of such networks have already demonstrated the ability to learn and classify input patterns. However, a key challenge remains: the fundamental components required for the fastest and most energy-efficient Josephson-based implementations currently possess excessively large planar dimensions, limiting the scalability of such systems.

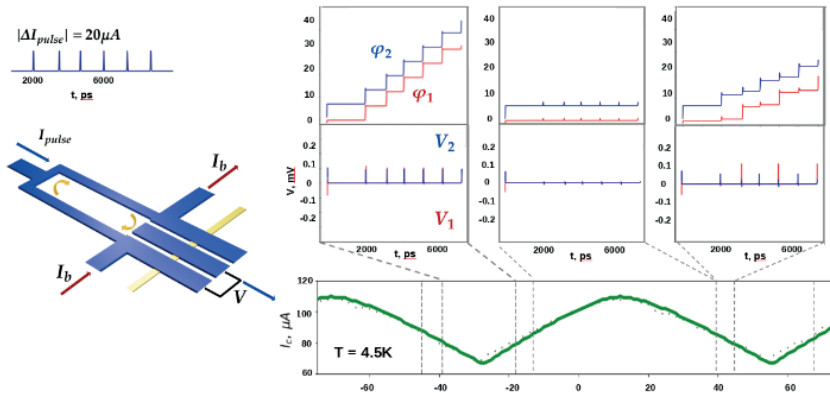


Рис. 1. SQUID response to short current pulses with an amplitude of 20mkA. At certain bias current values, the pulse becomes sufficient to cause a phase shift of 2π and, accordingly, contact switching.

In this study, we explore the practical feasibility of implementing Josephson junctions with a weak normal (SNS) region—an approach that may overcome the existing barriers to miniaturizing Josephson biosimilar neurons [1, 2]. Josephson SNS contacts Nb/Au/Nb and a two-contact SQUID were manufactured. The SQUID's parameters were also investigated by applying a bias current (see Fig. 1b). Based on the experimental results obtained, a simulation modeling of the neuromorphic system was conducted. The system's possible operating modes were investigated depending on the circuit design and technical parameters of the superconductor circuit and bias currents.

1. Schegolev, A., Klenov, N., Gubochkin, G., Kupriyanov, M., Soloviev, I.I., Nanomaterials, **13**(14) 2101 (2023).

2. Gubochkin G.I., Elistratova A.A., Shishkin A.G., Sidelnikov M.S., Klenov N.V., Stolyarov V.S., Radiotekhnika i elektronika **70**, 2 (2025).



SCRAMBLING HORIZON FOR A LOCAL QUENCH: THE EMERGENT BOUNDARY BEYOND WHICH INFORMATION BECOMES DELOCALIZED

G.A. Ershov^{1,3}, N.S. Arefyeva^{1,2}, E.A. Polyakov¹*

¹Russian Quantum Center, Moscow, Russia

²Physical Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

*E-mail: gleb.ershov003@gmail.com

Understanding how quantum information scrambles and becomes irreversibly delocalized following a local quench is a central challenge in non-equilibrium many-body physics. While tools like OTOCs quantify the spread of information, a complete spacetime description of its irreversible recording has remained elusive.

In this talk, we introduce the concept of a "Scrambling Horizon"[1] — an emergent causal boundary that dynamically forms in the wake of a local quench. We show that the key to identifying this structure is a Bogoliubov transformation to a causally diagonal frame, which plays a role analogous to the transformation to Rindler coordinates in relativity. Just as the Rindler transform reveals a partition of spacetime into causally disconnected wedges, our transformation reveals a sharp algebraic partition of the environment's degrees of freedom.

This partition defines the Scrambling Horizon, separating the "recorded wedge" of irreversibly decoupled modes from the "future wedge" of dynamically active modes. This structure directly parallels the Unruh effect: while entanglement across the Rindler horizon leads to a thermal state for an accelerated observer, entanglement across our Scrambling Horizon leads to the emergence of a classical, stochastic ensemble of decoherent histories. The horizon is the active boundary where this transition occurs: as modes cross it, local quantum information is transformed into a global, scrambled record, accompanied by the production of classical history entropy. In contrast to the recent research [2, 3], which consider only non-integrable or Markovian environment, our method allows us to observe the phenomenon of the emergence of decoherent histories in non-Markovian integrable environment.

We demonstrate the universality of this framework across distinct physical systems: first, in a local open quantum system coupled to a free bosonic/fermionic environment, extended to finite temperatures; and second, in a local quench within an interacting spin chain. In both cases, we explicitly construct the horizon's growth and quantify the corresponding rise in history entropy, providing a new paradigm for visualizing information dynamics.

1. Arefyeva N.S., Polyakov E.A., arXiv:2509.00845v1 (2025).

2. Strasberg P., Reinhard T.E., Schindler J., Phys. Rev. X **14**, 041027 (2024).

3. Wang J., Strasberg P., arXiv:2406.15577v3 (2025).



SYMMETRY-INDUCED ENHANCEMENT OF TRANSMISSION THROUGH A DISORDERED SYSTEM

А.О. Флегонтов^{1,2*}, Д.Б. Рогозкин¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*E-mail: kuairenn@gmail.com

Интерференция волн в сложных рассеивающих системах чувствительна к присутствию симметрии и к различным факторам, её нарушающим. Наиболее важна симметрия относительно обращения времени. Также представляют интерес различные типы глобальной пространственной симметрии системы в целом. Последний случай наиболее изучен в контексте электронного транспорта через квантовые точки/хаотические полости.

Цель настоящей работы – обобщить полученные для симметричных квантовых точек результаты [1] на случай среды с зеркально-симметричным объемным беспорядком. Рассматривается эффект усиления пропускания через систему симметричных (left-right) диффузных слоев, разделенных слабопроницаемым барьером. С помощью диаграммной техники, показано, что интерференция между симметричными путями приводит к перенормировке коэффициентов пропускания и отражения барьера. Это лежит в основе предложенного нами объяснения эффекта усиления пропускания [2]. Вводится транспортное уравнение для корреляционной функции волн, распространяющихся по симметричным путям, и через его решение выражаются значения перенормированных коэффициентов и кондактанса системы в целом. Это уравнение служит инструментом для анализа чувствительности эффекта усиления к различным нарушающим симметрию факторам, например, смещению рассеивающих центров и барьера из их симметричных положений (рис. 1). Проанализировано влияние параметров барьера на эффект усиления. Применительно к электронному транспорту определена обусловленная симметрией зависимость кондактанса от магнитного поля, что может быть использовано для высокочувствительной магнитометрии.

Полученные результаты представляют собой теоретическую основу для изучения обусловленных симметрией изменений в когерентных эффектах более высокого порядка (слабой локализации, флуктуаций кондактанса и т.д.) и могут быть полезны для анализа эффекта усиления в других мезоскопических системах (холодных атомов в оптическом спекл-потенциале и др.).

1. Whitney R.S., Marconcini P. and Macucci M., Phys. Rev. Lett. **102**, 186802 (2009).

2. Flegontov A.O. and Rogozkin D.B., Phys. Rev. B **111**, 174205 (2025).

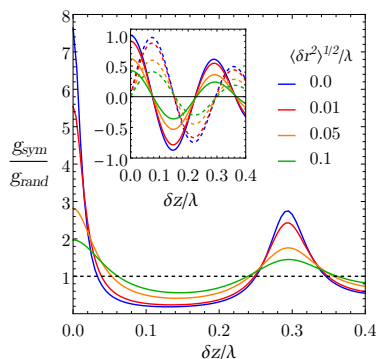


Рис. 1. Усиление пропускания как функция смещения барьера для различных значений случайного сдвига рассеивающих центров (длина образца $L/l = 10$, пропускание барьера $t = 10^{-3}$).



OBSERVATION OF THE KONDO EFFECT IN MAGNETICALLY-DOPED TUNGSTEN DITELLURIDE SINGLE CRYSTAL

B.M. Fominykh*, A.N. Perevalova, A. Stepanov, S.V. Naumov, E.B. Marchenkova,
V.V. Marchenkov

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: bogdan.fominyh@mail.ru

This work presents a comparative study of the electronic transport properties between pristine WTe₂ and W_{0.97}Fe_{0.03}Te₂ single crystals. Fe doping at a 3% level induces profound modifications in the low-temperature electrical and magnetotransport behavior. While pristine WTe₂ exhibits metallic conductivity [1], the Fe-doped crystal shows a significant increase in resistivity and a drastic reduction in the residual resistivity ratio from 38 to 3.17.

The most striking feature in W_{0.97}Fe_{0.03}Te₂ is the emergence of a distinct low-temperature resistivity minimum, accompanied by a nearly logarithmic increase in resistivity with decreasing temperature below 10 K. This behavior is a hallmark of the Kondo effect, arising from the scattering of conduction electrons on localized magnetic moments of the Fe impurities. The resistivity data, including the minimum, are excellently described by the Hamann equation, yielding a Kondo temperature of approximately 5.2 K. Furthermore, the magnetoresistance becomes strongly negative and exhibits an almost quadratic field dependence at low fields, which is another characteristic signature of the Kondo regime.

Analysis rules out weak localization and electron-electron interaction as the primary origins of the observed logarithmic correction. The significant changes in Hall resistivity and carrier concentrations upon doping also suggest a substantial reconstruction of the electronic structure. Our results provide compelling evidence for the Kondo effect in Fe-doped WTe₂, suggesting the potential for realizing a Weyl-Kondo semimetal phase in this system, where magnetism intertwines with topologically non-trivial electronic states.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the IMP UB RAS and the youth project No. 14-25 (B.M. Fominykh).

1. B.M. Fominykh, A.N. Perevalova, S.T. Baidak, A.V. Lukoyanov, S.V. Naumov, E.B. Marchenkova, V.V. Marchenkov, *Journal of Alloys and Compounds* **1039**, 182966 (2025).



COMPETITION OF SUPEREXCHANGE INTERACTIONS IN CHARGE-ORDERED INSULATING MANGANITES

Л.Э. Гончарь^{1,2*}

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: L.e.gonchar@urfu.ru

Многообразие магнитных структур псевдоперовскитных редкоземельных манганитов с общей формулой $R_{1-x}A_xMnO_3$, где R^{3+} – ион редкоземельных элементов или Bi^{3+} , A^{2+} – ион щелочноземельных элементов, x – концентрация примеси, включает в себя ферромагнетики, антиферромагнетики и существенно неколлинеарные упорядочения [1–4].

Наиболее интересными упорядочениями являются структуры, в которых имеются конкурирующие обменные взаимодействия, вызывающие магнитную фрустрацию. Равновесное магнитное упорядочение в зависимости от орбитального и зарядового упорядочений в таких соединениях невозможно установить, руководствуясь только правилами Гуденафа-Канамори [1]. В псевдокубических магнетиках, какими являются рассматриваемые соединения, обычно ситуация фрустрации связана с конкуренцией обменных взаимодействий ближайших и следующих за ближайшими магнитных соседей [4]. В манганитах с высокой степенью допирования ($x = 2/3, 3/4, 4/5$) и в $BiMnO_3$ при низких температурах присутствует конкуренция сверхобмена между ближайшими соседями в плоскости [5, 6]. Сверхобменные параметры могут принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от орбитальной и зарядовой структур.

Основной элемент магнитной ячейки, в котором появляются конкурирующие обменные взаимодействия, – это квадрат, в углах которого расположены ионы Mn^{3+} или Mn^{4+} (см. Рис.1). В зарядово-упорядоченных манганитах с высокой концентрацией примеси три обменные связи квадрата имеют антиферромагнитный характер, а одна – ферромагнитная. В кристалле $BiMnO_3$ фрустрированная часть магнитной ячейки содержит три ферромагнитных и одну антиферромагнитную связь. В исследовании рассмотрены орбитально-зависимые механизмы формирования фрустрированных элементов в магнитных ячейках манганитов. Получены магнитные структуры этих элементов, рассмотренных отдельно от полноценной магнитной ячейки. Показано влияние фрустрированного фрагмента на равновесную магнитную структуру кристалла манганита в зависимости от соотношений обменных параметров.

Доклад подготовлен в рамках Программы финансовой поддержки от АО «АЛЬФА-БАНК» «Альфа-Будущее Гранты преподавателям» (2025 год).

1. J. B. Goodenough, Phys. Rev. **100**, 564 (1955).
2. P.G. Radaell et al., Phys. Rev. B **59**, 14440 (1999).
3. T. Kimura et al., Phys. Rev. B **68**, 060403 (2003).
4. D.P. Kozlenko et al., Phys. Rev. B **82**, 014401 (2010).
5. L.E. Gonchar, A.E. Nikiforov, Phys. Rev. B **88**, 094401 (2013).
6. L.E. Gonchar, Phys. Met. Metallogr. **125**, 433 (2024).

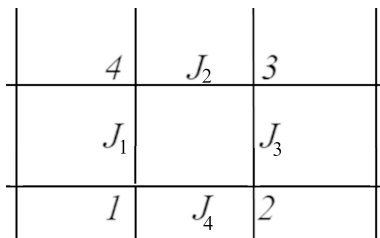


Рис. 1. Элемент магнитной ячейки с конкуренцией сверхобменных взаимодействий.



QUANTUM SELECTION OF GROUND STATES IN LOW DIMENSIONAL MAGNETS

K.K. Kesharpu, P.A. Maksimov*

Bogolyubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia

*E-mail: kesharpu@theor.jinr.ru

Order-by-disorder, whereby fluctuations lift an accidental classical ground state degeneracy to stabilize a subset of ordered states, is a recurrent and prominent theme in the field of frustrated magnetism where magnetic moments are subject to competing interactions. The Kitaev-Heisenberg model [1] is one such Hamiltonian, which does not have the required symmetry but the ground state is largely degenerate [2,3]. It implies that quantum fluctuations are necessarily stabilize the ordered ground phase.

Motivated by this, the magnetic phase diagram and magnon spectra of the anisotropic Kitaev-Heisenberg model with first and third nearest neighbour coupling are investigated using linear and non-linear spin wave theory in triangular and honeycomb lattice. We find that interplay of several bond-dependent interactions of Kitaev-Heisenberg model stabilize several magnetic states through quantum fluctuations. Moreover, quantum effects are also prominently pronounced in the magnetic spectrum. The results are corroborated by the numerical density matrix renormalization group (DMRG) calculations.

1. Jackeli G., Khaliullin G., Physical review letters **102** (1), 017205 (2009).
2. Jackeli G., Avella A., Physical Review B **92**(18), 184416 (2015).
3. Maksimov P.A. et al., Physical Review X **9**(2), 021017 (2019).



TENSOR NETWORKS IN CONDENSED MATTER PHYSICS: FROM DMRG TO FEYNMAN DIAGRAMS

*P.M. Kashaev**

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: khashaev.rm@phystech.edu

POSTER

Идея тензорных сетей зародилась независимо в физике конденсированного состояния, для представления волновой функции многочастичной системы через малое количество параметров, что получило название Matrix Product State (MPS) и в математике, где та же конструкция называется Tensor Trains (TT). Цель данной работы — представить обзор современных методов и областей применения этого подхода.

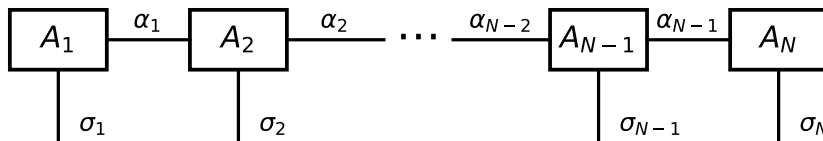


Рис. 1. Волновая функция системы в MPS-представлении.

Для системы из N узлов, на каждом из которых может быть состояние из набора $\{\sigma_i\}$, где $i = 1, \dots, N$, волновую функцию можно записать как:

$$|\psi\rangle = \sum_{\sigma_1, \dots, \sigma_N} c_{\sigma_1, \dots, \sigma_N} |\sigma_1, \dots, \sigma_N\rangle$$

, где $c_{\sigma_1, \dots, \sigma_N}$ тензор ранга N . Используя SVD разложение можно представить данный тензор в виде свертки тензоров 3 ранга:

$$c_{\sigma_1, \dots, \sigma_N} = \sum_{\alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}} A_{\alpha_1}^{\sigma_1} A_{\alpha_1, \alpha_2}^{\sigma_2} \dots A_{\alpha_{N-2}, \alpha_{N-1}}^{\sigma_{N-1}} A_{\alpha_{N-1}}^{\sigma_N}$$

Это разложение и называется Matrix Product State, схематически изображенное на Рис. ?? На этом представлении основаны все дальнейшие методы.

Первый из них – Density Matrix Renormalization Group [1], в котором гамильтониан системы также записывается в тензорном виде (Matrix Product Operator), после чего каждый тензор из MPS разложения оптимизируется для нахождения основного состояния системы.

Второй – вычисление многомерных интегралов, возникающих при анализе фейнмановских диаграмм [2] вида $F_N = \int dt_1 \dots dt_N \mathcal{F}_N(t_1, \dots, t_N)$, где $\mathcal{F}_N(t_1, \dots, t_N)$ представляется в виде тензорного поезда (TT), после чего интеграл представляется как свертка из N одномерных интегралов.

Для оптимизации и нахождения таких тензорных систем могут использоваться такие методы как Tensor Cross Interpolation [3] или упомянутый выше метод DMRG.

1. Schollwöck, U. The density-matrix renormalization group in the age of matrix product states. *Annals of Physics* (2010).
2. Fernández, Y. N. et al., *Phys. Rev. X*, **12**, 041018 (2022).
3. Fernández, Y. N. et al., *SciPost Physics*, **18**, 104 (2025).



BEYOND PBE: HIGH-FIDELITY MACHINE LEARNING POTENTIALS FOR Ti-AL ALLOYS VIA FOUNDATION MODEL-BASED TRANSFER LEARNING

E.O. Хазиева, P.E. Рыльцев*

Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: cat.hazieva@yandex.ru

При разработке новых материалов всё большее значение приобретает атомистическое моделирование на основе первопринципных методов. Однако стандартные приближения теории функционала плотности (DFT), особенно широко используемый обменно-корреляционный функционал GGA-PBE, часто демонстрируют недостаточную точность в описании термодинамических и транспортных свойств сложных сплавов [1]. В частности, это имеет место для титановых сплавов, где решающую роль играют многочастичные взаимодействия и колебательная энтропия. Эта ограниченность делает невозможным построение надёжных моделей фазовой стабильности, кинетики распада и влияния легирующих элементов (Zr, Hf, Si, Mo), что тормозит рациональный дизайн титановых сплавов.

Для преодоления этих ограничений нами разработаны машинно-обучаемые потенциалы (MLIP) на основе инновационной схемы трансферного обучения с использованием Foundation Models [2], что позволило эффективно переносить знания, извлечённые из обширных атомистических датасетов, на специфическую систему Ti-Al. Сравнительный анализ показал, что потенциалы глубокого обучения (Deep Potential, DP), обученные на данных DFT/PBE демонстрируют значительную погрешность в расчетах энтальпий смешения и температур плавления, что не позволяет использовать их для количественного моделирования. В то же время DP, обученные на данных, полученных с мета-GGA функционалом r^2 SCAN, обеспечивают значительно более высокую точность как для термодинамических, так и для транспортных свойств.

Эти результаты подчёркивают фундаментальную проблему: качество MLIP напрямую ограничено точностью опорных данных DFT, а универсальные «золотые стандарты» вроде PBE часто оказываются непригодными для сложных сплавов. Наши результаты дают вклад в решение проблемы построения надёжных, переносимых и физически обоснованных потенциалов, критически необходимых для предсказательного моделирования материалов следующего поколения.

1. Khazieva E.O., Chtchelkatchev N.M., Ryltsev R.E., The Journal of Chemical Physics **17**, 161, (2024) 2. Qin, Yujia, et al., ACM Computing Surveys **57**, 1–40, (2024).



ROLE OF CHARGE IMBALANCE POTENTIAL RELAXATION IN HIGH-FREQUENCY DYNAMICS OF ABRIKOSOV VORTICES IN SUPERCONDUCTORS

R.I. Kinzibaev^{1,2*}, *A.S. Mel'nikov*^{1,3}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, Moscow region, 141701 Russia

²Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow 127055, Russia

³Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, GSP-105, Russia

*E-mail: travelerintime2@mail.ru

Starting from the seminal paper [1] the problem of vortex mass in the equation of motion of flux lines has been addressed in the variety of experimental and theoretical works. The importance of this issue for the physics of vortex matter is obvious as the frequency-dependent vortex response to the external current determines the microwave impedance and Ohmic losses of superconductors in magnetic fields.

We investigate the motion of isolated Abrikosov vortex in a thin superconducting film driven by a microwave transport current (Fig. 1). Within the time-dependent Ginzburg – Landau equations [2], we show that dynamics of vortex line is retarded with relaxation time τ_E and the equation of motion can be written as:

$$\left(\eta_{\text{Rel}} + \eta_{\text{Ohm}} \frac{1}{1 - i\omega\tau_E} \right) \mathbf{v}(\omega) = \frac{8|e|TD}{\sigma\pi\Delta_\infty^2} [\mathbf{j}_{s,\infty}(\omega), \mathbf{e}_z], \quad (1)$$

where $\eta_{\text{Rel}} \approx 0.279$ is the viscosity of vortex caused by relaxation of order parameter, $\eta_{\text{Ohm}} \approx 2l_E^2/\xi^2$ is viscosity caused by relaxation of charge imbalance potential for dc transport current $\mathbf{j}_{s,\infty}$ case, $\tau_E = l_E^2/D$ is characteristic relaxation time of charge-imbalance potential, l_E is the electric field penetration depth, D is the diffusion coefficient, $\mathbf{v}$ is the vortex velocity, σ is the normal state conductivity, Δ_∞ is the gap magnitude far from the vortex core, T is temperature, e is electron charge. In addition, for superconducting devices, we evaluate corrections for kinetic inductance Δl_k resulting from non-stationary vortex dynamics and determine its temperature dependence:

$$\Delta l_k = \frac{\pi\hbar}{|e|c} \frac{\eta_{\text{Ohm}}}{\eta_{\text{Rel}}^2 \omega^2 \tau_E^2 + (\eta_{\text{Rel}} + \eta_{\text{Ohm}})^2} B \quad (2)$$

1. Gittleman J.I. and Rosenblum B., Phys. Rev. Lett. **16**, 734, (1966).

2. Kopnin N., Theory of Nonequilibrium Superconductivity, Oxford Science (2001).

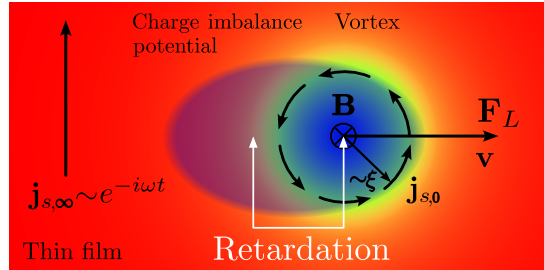


Рис. 1. Schematic illustration of a moving vortex with core radius of order coherence length ξ and charge-imbalance potential induced by the vortex motion. Here $\mathbf{j}_{s,\infty}$ is ac transport current produces the Lorentz force $\mathbf{F}_L$, $\mathbf{j}_{s,0}$ is superfluid current circulating around the vortex core, $\mathbf{B}$ is magnetic field.



FORMATION OF INHOMOGENEOUS MAGNETIC STATES TRIGGERED BY ELECTROMAGNETIC PROXIMITY EFFECT IN PLANAR SUPERCONDUCTOR/FERROMAGNET HYBRIDS

A.A. Kopasov^{1,2,3*}, S.V. Mironov², A.S. Mel'nikov^{3,2}

¹National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

²Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, GSP-105 Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, Moscow region 141701, Russia

*E-mail: kopasov.aa@misis.ru

Planar hybrid structures consisting of superconducting (S) and ferromagnetic (F) layers are known to host a huge variety of fascinating phenomena coming from the proximity effect, i.e., partial penetration of the Cooper pair wave function from superconductors to ferromagnets. Among such phenomena one recognizes, e.g., the generation of spin-triplet superconducting correlations [1] and the spin-valve effect [2]. Since the superconducting state is extremely sensitive to the magnetization profile in ferromagnetic layers, the understanding of the influence of the induced superconducting correlations on the orientation of the magnetic moments is important for further progress in this field.

This talk discusses the back-action of the superconducting order on the magnetic texture of F layers in S/F hybrids. We show that the proximity-induced superconducting correlations in planar S/F heterostructures are responsible for the appearance of a nonlinear interaction between the magnetic moments of the F layers [3]. This interaction originates from the combined influence of the orbital and exchange phenomena and can result in the spontaneous formation of noncollinear magnetic states in these systems. The appearance of this interaction is demonstrated via direct free energy minimization for dirty S/F₁/F₂ trilayers. The physics underlying the joint influence of orbital and paramagnetic mechanisms is associated with the strong dependence of the Meissner response of the induced superconducting correlations and, correspondingly, the energy of screening supercurrents in F layers on the relative orientation of the magnetic moments. Particularly, important role is played by the odd-frequency spin-triplet correlations, which provide the paramagnetic contribution to the electromagnetic response. This paramagnetic contribution can suppress the total energy of screening currents making the noncollinear magnetic ordering more energetically favorable.

As a next step, we show that the predicted nonlinear magnetic interaction can lead to instability of the state with homogeneous magnetization in S/F bilayers [4]. We demonstrate that the electromagnetic proximity effect favors the formation of magnetic domains in the ferromagnet for the broad range of system parameters. Specifically, for the model of the isolated domain wall separating two domains we determine the energetically favorable domain thicknesses and the magnetic texture. It is shown that the instability of a homogeneous magnetic state in S/F bilayer is not restricted to the case of rather thick F layer and can also occur when the spin-triplet superconducting correlations in the F layer are not developed. In this case both analytical and numerical calculations performed in this work reveal the formation of two magnetic domains with anti-parallel relative orientation of the magnetic moments. In the general case we carry out direct minimization of the system free energy and determine the dependence of the optimal domain size as a function of the F layer thickness and show that (i) it is strongly non-monotonic and (ii) the ground state angle between magnetic moments in two neighboring domains corresponds either to the anti-parallel or noncollinear orientation.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No 25-12-00042).

1. F.S. Bergeret, A.F. Volkov, and K.B. Efetov, Rev. Mod. Phys. **77**, 1321 (2006).

2. L.R. Tagirov, Phys. Rev. Lett. **83**, 2058 (1999).

3. A.A. Kopasov, S.V. Mironov, and A.S. Mel'nikov, Phys. Rev. B **110**, 214501 (2024).

4. A.A. Kopasov, S.V. Mironov, and A.S. Mel'nikov, accepted for publication in J. Supercond. Nov. Magn (2025).



CHANNEL SPECTRUM BENCHMARKING OF THE TOFFOLI GATE

D.K. Korliakov^{1,2*}, *B.I. Bantysh*¹, *A.S. Borisenko*³, *I.V. Zalivako*³, and *E.O. Kiktenko*^{1,4,5}

¹Russian Quantum Center, Moscow 143025, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

*E-mail: korliakov.dk@phystech.edu

Channel spectrum benchmarking (CSB) provides a robust framework for characterizing quantum gate fidelity while remaining insensitive to state preparation and measurement (SPAM) errors. However, CSB protocol, proposed in [1], struggles due to high degeneracy in the target operation's eigenvalue spectrum and off-diagonal noise elements in the target operation's eigenbasis. We present an alternative CSB protocol incorporating more reliable processing method.

As an alternative to a single point estimate, our method introduces a Fidelity Estimate Interval (FEI) approach that circumvents eigenvalue matching ambiguities by providing fidelity bounds. The protocol incorporates a refined fitting model with additional terms to account for off-diagonal noise contributions, followed by a filtering procedure to eliminate spurious eigenvalues. We demonstrate that in CSB protocol simulations for fidelity estimation of a three-qubit Toffoli gate, the obtained FEI is sufficiently narrow, and its midpoint closely approximates the true fidelity value.

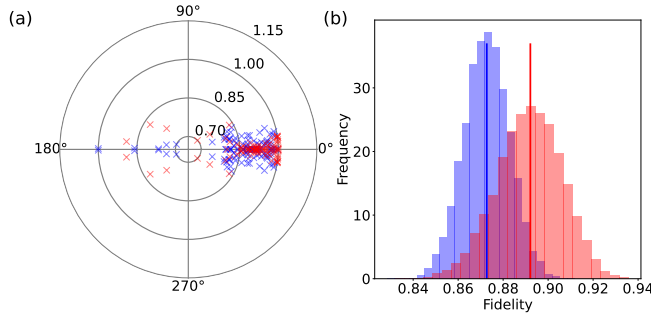


Рис. 1. CSB experimental results for qubit (blue) and qutrit (red) Toffoli implementations. (a) Filtered noisy eigenvalues in polar coordinates; (b) Distributions of fidelity estimates from 64 eigenvalues.

We experimentally validate our protocol on a trapped-ion processor, characterizing qubit and qutrit [2] implementations of a three-qubit Toffoli gate. Fig. 1 displays the obtained filtered noisy eigenvalues sets and corresponding fidelity estimate distributions. For the qubit implementation, we obtained $\text{FEI}_{\text{qubit}} = [0.854; 0.894]$ ($\hat{\mathcal{F}}_{\text{qubit}} = 0.873$). The qutrit implementation yielded $\text{FEI}_{\text{qutrit}} = [0.866; 0.922]$ ($\hat{\mathcal{F}}_{\text{qutrit}} = 0.892$).

The work was supported by Rosatom in the framework of the Roadmap for Quantum computing (Contract No. 868-1.3-15/15-2021).

1. Y. Gu, W.-F. Zhuang, X. Chai et al., Nat. Commun. **14**, 5880 (2023).

2. A.S. Nikolaeva, E.O. Kiktenko, A.K. Fedorov, Phys. Rev. A **109**, 022615 (2024).



INVERSE FARADAY EFFECT IN MESOSCOPIC SUPERCONDUCTING DISKS AND FILMS WITH COLUMNAR DEFECTS

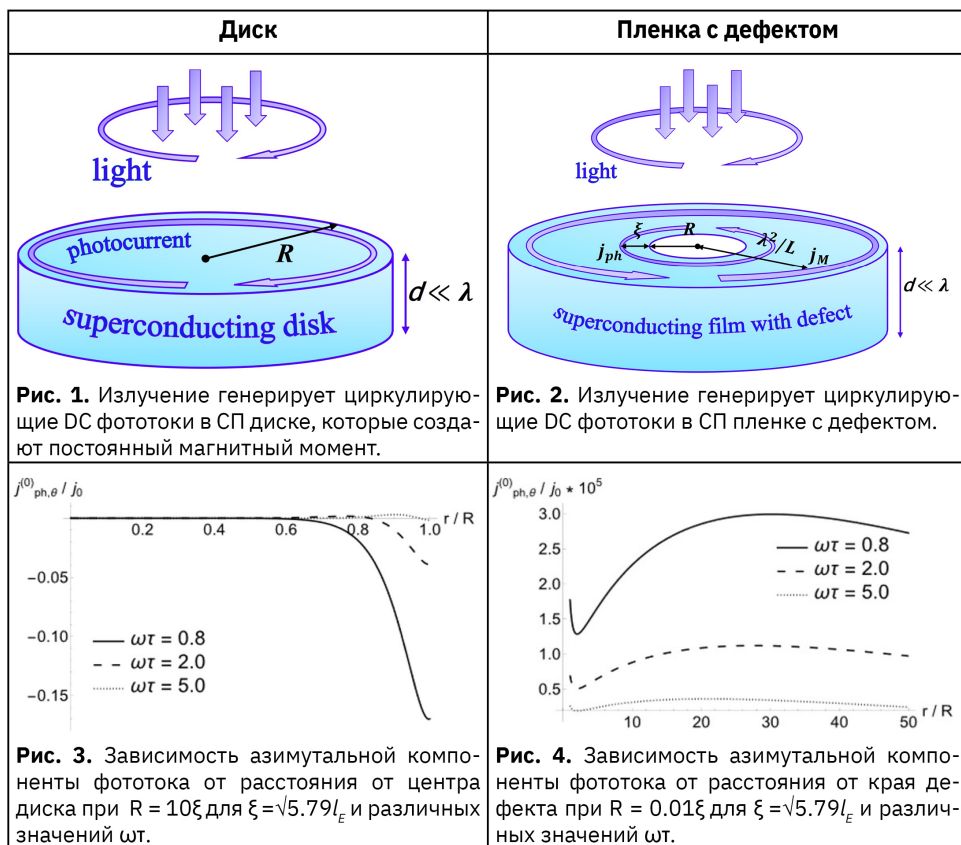
М.В. Коваленко^{1*}, *А.С. Мельников*^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: kovalenko.m@phystech.edu

Обратный эффект Фарадея (ОЭФ) в сверхпроводниках представляет исключительный интерес для изучения, так как дает возможность создавать бездиссипативные DC токи, которыми можно быстро управлять с помощью внешнего излучения и которые могут оставаться в системе даже после прекращения облучения.



Для теоретического описания ОЭФ в рассматриваемых сверхпроводящих системах мы используем уравнение нестационарной теории Гинзбурга-Ландау на сверхпроводящий параметр порядка Ψ , которое ранее применялось в ряде теоретических работ



[1, 2], посвященных фотогальваническим эффектам в сверхпроводниках:

$$(T - T_c)\alpha\Psi + \beta\Psi|\Psi|^2 + \frac{\hbar^2}{4m}(-i\nabla - \frac{2\pi}{\Psi_0}\mathbf{A})^2\Psi + \Gamma(\partial_t + \frac{2ie}{\hbar}\Phi)\Psi = 0, \quad (1)$$

где $\Gamma = (\frac{\pi\alpha}{8} + i\gamma)\hbar$ – константа релаксации, мнимая часть которой отвечает за электронно-дырочную асимметрию. Полагая поле волны достаточно слабым, мы развиваем теорию возмущений на параметр порядка, который ищем в виде $\Psi = (\Delta_0 + \Delta_1)e^{i\chi}$, где $\Delta_1 \propto A$, $\chi \propto A$, $\Delta_0^2 = \alpha|T - T_c|/\beta$ – параметр порядка в отсутствии поля.

Схематические установки для детектирования ОЗФ показаны на рис. 1 и рис. 2, а графики полученных циркулирующих фототоков изображены на рис. 3 и рис. 4.

Для диска:

$$j_{ph,\theta}^{(0)} = \frac{j_0}{\omega\tau(1 - \frac{\xi^2}{2l_E^2})} \frac{R}{\xi} \text{Re} \left\{ [f(q_1r) - f(q_2r)] \left[1 - \frac{R}{r} f(q_2^*r) \right] \right\}, \quad (2)$$

Для пленки с дефектом:

$$j_{ph,\theta}^{(0)} = \frac{j_0}{\omega\tau(1 - \frac{\xi^2}{2l_E^2})} \frac{R}{\xi} \text{Re} \left\{ [g(q_1r) - g(q_2r)] \left[1 - \frac{R}{r} g^*(q_2r) \right] \right\}, \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) $j_0 = \frac{32|e|^3\Delta_0^2E_0^2\tau^3\gamma}{\xi m^2\pi^2\alpha^2}$, $\tau = \frac{\pi\hbar}{8|T - T_c|}$, $l_E^2 = \frac{\hbar\sigma_n}{\Delta_0^2e^2\pi\alpha}$, $q_1 = \sqrt{\frac{i\omega\tau - 2}{\xi^2}}$, $q_2 = \sqrt{\frac{i\omega\tau}{\xi^2} - \frac{1}{l_E^2}}$,
 $f(qr) = \frac{J_1(qr)}{qRJ_0(qR) - J_1(qR)}$, $g(qr) = \frac{H_1^{(1)}(qr)}{qRH_0^{(1)}(qR) - H_1^{(1)}(qR)}$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-12-00042.

1. Mironov S.V., Mel'nikov A.S., Tokman I.D. et al., Phys. Rev. Lett. **126** (2001).
2. Mironov S.V., Mel'nikov A.S., Buzdin A.I., Phys. Rev. Lett. **132** (2024).



EXTENDED HUBBARD MODEL ON THE KAGOME LATTICE

P.P. Kovaleva^{1*}, *A.I. Poteryaev*^{1,2,3}, *S.V. Streltsov*^{1,2}

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia.

²³Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

*E-mail: pp.kovlvt@gmail.com

This work investigates the Hubbard model on a "breathing" kagome lattice with alternating small and large triangles (Fig. 1).

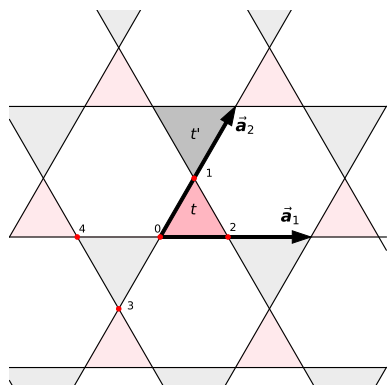


Рис. 1. "Breathing" kagome lattice with translation vectors and atomic positions. Parameters t и t' correspond to the hopping amplitudes in the "up" and "down" triangles, respectively.

In the strong coupling approximation, the non-interacting Hamiltonian and the band structure dependence on the parameter $\alpha = \frac{t'}{t}$ were obtained.

A phase diagram was constructed at $\alpha = -0.9$, and the dependence of the gap magnitude on α was analyzed for fixed values $U = 3$ eV and $V = 0.8$ eV. In the standard Hubbard model, it was shown that the metal-insulator transition is possible at half-filling with a critical Coulomb interaction $U_c \approx 1.2$ eV. The extended model includes non-local interaction V on small triangles, leading to the formation of a Mott phase confirmed by cluster dynamical mean field theory (cDMFT). The results for $\text{LiZn}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ with the "breathing" kagome lattice demonstrate agreement between calculations and experiments [1,2], confirming the critical role of Coulomb interactions in the formation of the insulator and spin localization. The extended model adequately describes the electronic properties of real compounds and requires further study of the U/V phase diagram.

This work was performed under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

1. Nikolaev S.A. et al., Quantum spin liquid and cluster Mott insulator phases in the Mo_3O_8 magnets npj Quantum Mater. (2021).
2. S.V. Streltsov et al. Beyond a cluster-Mott state in the breathing kagome lattice of $\text{LiZn}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$, Phys. Rev. B (2025).



CRYSTAL STRUCTURE, ELECTRONIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF Sr_2NbO_4

L.S. Taran¹, A.E. Lebedeva^{2}, and S.V. Streltsov^{1,2}*

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: nastya.leb2004@gmail.com

The study of layered perovskites exhibiting high-temperature superconductivity remains a highly relevant area of research.

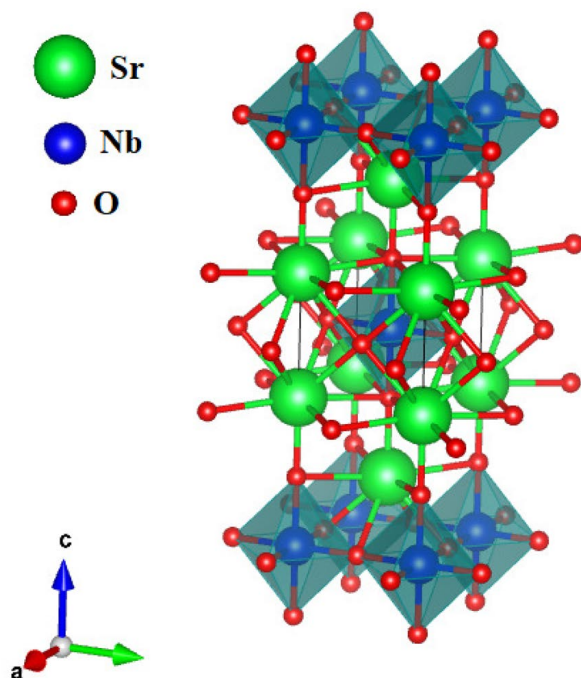


Рис. 1. Unit cell structure of Sr_2NbO_4 .

The groundbreaking discovery of superconductivity in the copper-free perovskite Sr_2RuO_4 [1] significantly impacted the scientific community and stimulated the search for analogous compounds, including the niobium-based system Sr_2NbO_4 .

Major challenges in perovskite research stem from the complexity of synthesis and an insufficient understanding of the underlying superconducting mechanisms. Although the synthesis of Sr_2NbO_4 has been reported previously [2], and its possible superconductivity has been suggested [3], data on its crystal structure and physical properties remain controversial and poorly characterized.

In this work, we investigate the structural, electronic, and magnetic properties of the layered perovskite Sr_2NbO_4 using first-principles calculations based on density functional theory (DFT). We assess the thermodynamic stability of the system, thereby providing new insights into its intrinsic behavior and potential for functional applications.

1. Y. Maeno et al., *Nature* **372**, 532–534 (1994).
2. G.G. Kasimov et al., *J. Inorg. Chem.* **19**, 148 (1974).
3. K. Isawa, M. Nagano, *Physica C* **357–360**, 359–362 (2001).



FLUCTUATION-DRIVEN SPIN AND CHARGE ORDER IN GEOMETRICALLY FRUSTRATED ELECTRON SYSTEMS

Ya.S. Lyakhova

Russian Quantum Center, Moscow, Russia

*E-mail: yanalyakhova@gmail.com

POSTER

Geometrically frustrated quantum systems represent an intriguing frontier in the physics of correlated fermions. Interest in frustration effects has grown significantly over the past two decades, driven by their experimental relevance in organic conductors, twisted bilayer graphene, and other correlated materials [1]. Geometric frustration—often manifesting as incommensurate ordering wavevectors—is a key ingredient for rich phase diagrams, while simultaneously posing a major challenge for theoretical description.

The aim of this work is to elucidate the role of order-parameter fluctuations in shaping the emergent structural and magnetic patterns of such systems. We focus on the single-band Hubbard model on the triangular lattice, where the interplay between spin and charge fluctuations gives rise to competing instabilities (e.g., 120° magnetic order, incommensurate CDW, nematicity). To this end, we employ the Fluctuating Local Field (FLF) method as a controllable, beyond-mean-field framework to capture coupled instabilities in both channels [2], benchmarked against Exact Diagonalization (ED) on small clusters.

The two-channel FLF partition function reads:

$$Z = \iint e^{-S_{\text{ex}}[c^*, c] - \frac{\beta N}{2} \left(\sqrt{\lambda_s} \hat{s}^l + \sqrt{\lambda_c} \nabla^l \hat{n} + \frac{v_s^l}{\sqrt{\lambda_s}} + \frac{v_c^l}{\sqrt{\lambda_c}} \right)^2} \mathcal{D}[c^*, c] d\vec{v}_s d\vec{v}_c, \quad (1)$$

where $S_{\text{ex}}[c^*, c]$ is the exact fermionic action, $\hat{s}^l = c_{l\alpha}^\dagger \sigma_{\alpha\beta}^l c_{l\beta}$ and $\hat{n}^l = c_{l\sigma}^\dagger c_{l\sigma} - \langle n \rangle$ are the local spin and charge operators, and v_s^l, v_c^l are auxiliary fluctuating fields. The parameters λ_s, λ_c control the strength of spin and charge fluctuations, respectively—and crucially, the gradient structure $\nabla^l \hat{n}$ explicitly enables the symmetry-allowed spin–charge coupling $\hat{\mathbf{s}} \cdot \nabla \hat{n}$.

Within this framework, we compute key observables such as the spin–charge cross-susceptibility:

$$\chi_{\text{sc}}(\mathbf{q}) = \frac{1}{\beta N} \int_0^\beta d\tau \langle \hat{\mathbf{s}}(\mathbf{q}, \tau) \cdot \nabla \hat{n}(-\mathbf{q}, 0) \rangle, \quad (2)$$

which serves as a direct diagnostic of fluctuation-mediated coupling—and vanishes in decoupled (mean-field or purely Ising) treatments.

It will be demonstrated that fluctuations impact the system strongly and qualitatively: the intrinsic spin–charge coupling $\hat{\mathbf{s}} \cdot \nabla \hat{n}$ leads to a pronounced transfer of spectral weight from magnetic to charge channels, resulting in the suppression of 120° spin correlations and the emergence of robust incommensurate charge modulations—even at half-filling.

1. Pal H.K., Spitz S., Kindermann M., Phys. Rev. Lett. **123**, 186402 (2019).
2. Lyakhova Ya.S., Semenov S.D., Lichtenstein A.I., et al. Phys. Rev. B **110**, 245134 (2024).



ELECTRONIC STRUCTURE, MAGNETIC STATE AND ORBITAL-SELECTIVE PHYSICS IN THE NICKELATE SUPERCONDUCTOR $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ AT AMBIENT PRESSURE

P.O. Makarova^{1,2}, I.V. Leonov²

¹Institute of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

The discovery in 2019 of superconductivity with a critical temperature $T_c \sim 13$ K (~ 31 K under pressure ~ 40 GPa) in $\text{ANiO}_2/\text{SrTiO}_3$ films (with $A = \text{Sr, La, REE}$) synthesized using soft chemical topotactic reduction of the parent perovskite phase [1] has gained much recent interest to this novel class of superconducting materials [2–4]. In 2023, superconductivity with a critical temperature of up to ~ 80 K was found in poly- and singlecrystal samples of the bi- and three-layer Ruddlesden-Popper phases $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n = 2$ and 3) under pressure above ~ 14 GPa [5,6]. In spite of a large experimental progress in understanding the properties of such systems (synthesis of high-quality crystalline phases of such materials has become possible only in recent years), the microscopic understanding of their unusual properties still poses a great challenge.

In this work, we explore the effects of the Coulomb correlations on the electronic structure, spin and charge state of Ni ions, and structural phase equilibrium of the bilayer superconductor $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (LNO) at ambient pressure using the DFT+U method. Using DFT+U we perform structural optimization of the internal atomic positions of LNO. We study different types of spin-charge long-range orderings, perform a comparative analysis of their electronic structure and magnetic properties, evaluate total energy differences, perform analysis of the phase stability of "breathing mode" lattice distortions, evaluate orbital polarization and charge disproportionation of Ni ions. Our results show the emergence of a double spin-charge-density stripe state characterized by a propagation wave vector $\mathbf{q} = (1/4 \ 1/4)$. This state is characterized by an alternation of the high-spin Ni^{2+}A and the low-spin Ni^{3+}B ions, which form zigzag ferromagnetic chains alternating in the ab plane (diagonal hole stripes oriented at an angle of 45° to the Ni-O bond). The phase transition is accompanied by a cooperative "breathing mode" distortion of the crystal structure and leads to a reconstruction of the low-energy electronic structure and magnetic properties of LNO. We find a narrow-gap correlated insulator with a band gap value of ~ 0.2 eV characterized by strong localization of the Ni $3d$ states and significant spin-orbital polarizations of the charge deficient Ni^{3+}B ions. We note the importance of double exchange to determine the magnetic properties of LNO, similarly to that in charge-ordered manganites and nickelates. We propose that spin and charge stripe fluctuations play an important role to tune superconductivity in LNO under pressure.

The work was supported by the Russian Science Foundation grant № 25-12-00416.

1. D. Li et al., Nature (London) **572**, 627 (2019).
2. N.N. Wang et al., Nature Commun. **13**, 4367 (2022).
3. A.S. Botana et al., Front. Phys. **9**, 813532 (2021).
4. I. Leonov, S.L. Skornyakov, and S.S. Savrasov, Phys. Rev. B **101**, 241108(R) (2020).
5. H. Sun et al., Nature **621**, 493 (2023).
6. Y. Zhu et al., Nature **631**, 531 (2024).



STUDYING QUANTUM PHASE TRANSITIONS WITH QUANTUM KERNEL METHODS

A. Mardanova^{1,2*}, *J.A. López-Saldivar*², *S. Semenov*^{1,2}, and *E. Kiktenko*^{2,3}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

²Russian Quantum Center, Skolkovo Innovation Center territory, Moscow, Russia

³Department of Mathematical Methods for Quantum Technologies, Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: mardanova.aa@phystech.edu

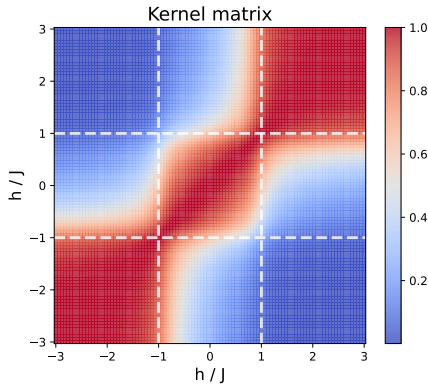


Рис. 1. The obtained kernel matrix for TFIM model $\hat{H} = -J \sum_i \hat{\sigma}_i^z \hat{\sigma}_{i+1}^z - h \sum_j \hat{\sigma}_j^x$. Dashed lines correspond to the known points of the phase transition $h/J = \pm 1$.

Quantum machine learning (QML) is a cutting-edge field where classical machine learning techniques are adapted to leverage quantum computations. This work addresses the specific problem of quantum phase recognition, where purely classical methods face fundamental limitations [1]. We develop an unsupervised approach for this problem using kernel-based clustering. The elements of a quantum kernel matrix are obtained by the SWAP-test [2] and represent similarity between quantum states, enabling effective dimensionality reduction while preserving essential quantum features.

We validate our method on quantum systems with known phase transitions, including the transverse field Ising model (TFIM) [3]. The resulting kernel matrix Fig. 1 has a block structure, demonstrating our approach's capability to identify quantum phases and compute transition points in an unsupervised manner.

We expect that this hybrid quantum-classical algorithm is well-suited for noisy intermediate-scale quantum (NISQ) devices. By combining quantum kernel estimation with classical clustering algorithms, we provide an efficient method for extracting physical insights about phase diagrams from quantum states.

1. Yusen Wu, et al., Quantum **7**, 981 (2023).
2. Wiebe N., Kapoor A., Svore K., arXiv:1401.2142v2 (2014).
3. Sancho-Lorente T., Román-Roche J., Zueco D., Phys. Rev. A **105**, 042432 (2022).



HEAT CAPACITY AND MAGNETIC PHASE TRANSITIONS OF Mn_5Si_3 COMPOUND

A.B. Маширов^{1*}, A.C. Кузнецов¹, К.Р. Ерагер², В.В. Соколовский²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*E-mail: a.v.mashirov@mail.ru

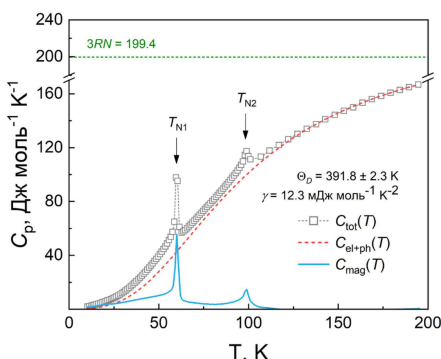


Рис. 1. Температурные зависимости полной теплоемкости $C_{tot}(T)$ с выделением электрон-фонного $C_{el+ph}(T)$ и магнитного $C_{mag}(T)$ вкладов для соединения Mn_5Si_3 .

рого определены: температура Дебая со значением $\Theta_D = 391,8 \pm 2,3$ К и коэффициент электронной теплоемкости $\gamma = 12,3 \pm 0,1$ мДж·моль⁻¹·К⁻² (рис. 1). По результатам теоретического моделирования показано, что основным состоянием Mn_5Si_3 является гексагональная структура $P6_3/mcm$, упорядоченная ферромагнитно (ФМ). Однако, полученные в рамках ионной релаксации значения температуры Дебая ($\Theta_D = 446,7$ К) и, соответственно, теплоемкости C_{ph} ромбической антиферромагнитной (АФМ) структуры гораздо лучше согласуются с экспериментальными результатами, что обусловлено малой энергетической разницей 9,774 мэВ/атом между ФМ и АФМ упорядочениями. Увеличение объема элементарной ячейки структуры $Pm\bar{3}m$ на 5%, приводит к количественному воспроизведению теоретической функцией $C_{ph}(T)$ экспериментальной кривой теплоемкости с температурой Дебая $\Theta_D = 392$ К. Существенное понижение температуры Θ_D на 54,7 К при увеличении объема кристаллической решетки с ромбической симметрией, может быть объяснено значительным тепловым расширением со значением коэффициента объемного расширения $\beta = 2,4 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ при относительном изменении объема $\Delta V/V = 4,9 \cdot 10^{-2}$ в рассматриваемом диапазоне температур.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, тема FFWZ-2024-0007.

1. Tegus O. et. al., Journal of Alloys and compounds **1-2**, 249–252 (2002).
2. Кузнецов А.С., Радиотехника и электроника **70**, 53–64 (2025).



SEMICONDUCTOR-METAL TRANSITION OF GOLD NANOTUBES

И.А. Матвеев, Г.И. Миронов*

ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», Йошкар-Ола, Россия

* E-mail: matveev_ia@marsu.ru

Целью работы является исследование электронной структуры нанотрубок из атомов золота вблизи перехода из полупроводникового состояния в металлическое, поскольку в этой области наиболее ярко проявляются необычные свойства золотых нанотрубок. Материалы и методы. Исследование проводилось в рамках модели Хаббарда, поскольку нанотрубки из атомов золота являются системами с сильными корреляциями. Для описания d -электронной системы золотой нанотрубки гамильтониан Хаббарда [1, 2] имеет вид:

$$\hat{H} = \epsilon \sum_{f=1}^N (\hat{n}_{f\uparrow} + \hat{n}_{f\downarrow}) + B \sum_{f \neq f'}^N \left(a_{f\uparrow}^+ a_{f'\uparrow} + a_{f\uparrow}^+ a_{f'\downarrow} + a_{f\downarrow}^+ a_{f'\downarrow} + a_{f\downarrow}^+ a_{f'\uparrow} \right) + U \sum_{f=1}^N \hat{n}_{f\uparrow} \hat{n}_{f\downarrow}$$

где $a_{f\uparrow}^+$ – оператор рождения d -электронов на узле f с проекцией спина $\uparrow$, $a_{f\uparrow}$ – оператор уничтожения, $\hat{n}_{f\downarrow} = a_{f\downarrow}^+ a_{f\downarrow}$ – оператор числа d -электронов, ϵ – собственная энергия электронов, B – интеграл переноса, описывающий перескоки электронов с узла на соседний узел, U – энергия кулоновского отталкивания двух электронов с разными проекциями спинов, находящихся на одной орбитали атома золота в нанотрубках, N – количество атомов.

Написав уравнения движения для всех атомов нанотрубок, решив эти уравнения, мы получили выражения для антикоммутирующей функции Грина, а также корреляционные функции, описывающие свойства нанотрубок.

Результаты. Полученные выражения для функций Грина были использованы для описания электронной структуры нанотрубок.

Выводы. Анализируя энергетические спектры был сделан вывод, что по мере увеличения длины нанотрубок происходит плавный переход полупроводник-металл [5], вычисление энергий основного состояния привели к выводу, что золотая нанотрубка ведет себя при взаимодействии со сторонними молекулами как единая система сильнокоррелированных электронов, обладает свойствами и акцепторов и доноров. Для современного материаловедения актуальной задачей является синтез материалов с заданными физико-химическими свойствами. Золотые нанотрубки, находящиеся в полупроводниковом состоянии а также вблизи границы перехода полупроводник-металл, обладают необычными, удивительными свойствами, например, металл Au ведет себя как полупроводник. Нанотрубки, обладающие такими свойствами, можно использовать в различных практических целях, например, можно применять для создания коннекторов, связывающих транзисторы в современных процессорах, ввиду их баллистического характера проводимости, поскольку в этом случае джоулевские потери будут незначительными. Они могут быть использованы для создания более эффективных катализаторов, поскольку все активные атомы золота нанотрубки, обладающей свойствами и донора и акцептора, находятся на поверхности, а также использовать для диагностики и лечения раковых заболеваний [3].

1. Hubbard J., The Basic Cause of Superconductivity, Proceedings of the Royal Society A **276**, 238 (1963).
2. Хомский Д.И. ФММ **29**, 31 (1970).
3. Mironov G.I., Physica B: Condensed Matter **704**, 417018 (2025).



ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В СКРЕЩЕННЫХ МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

Т.В. Максимов^{1}, И.Л. Курбаков², Н.С. Воронова^{3,4}*

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИСАН, Троицк, Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

⁴Российский Квантовый Центр, Сколково, Москва, Россия

*E-mail: bygrus@yandex.ru

Диполь-дипольные взаимодействия играют ключевую роль в многочастичных явлениях в ферми- и бозе-газах при температурах, достаточно низких для достижения квантового вырождения. Мы разрабатываем многотельную теорию дипольных экситонных поляритонов в оптическом микрорезонаторе в скрещенных поперечных электрическом и магнитном полях.

В работе показано, что даже в относительно слабых полях в спектре экситонных поляритонов возникают два минимума. Управление относительной глубиной этих минимумов приводит к переходу между конденсатом Бозе-Эйнштейна поляритонов и конденсатом экситонов. Мы предсказываем, что такой дипольный конденсат демонстрирует ротон-максонский характер спектра возбуждения, никогда ранее не наблюдавшийся для поляритонов.

При переходе между двумя режимами конденсации слабые корреляции в поляритонном газе сменяются промежуточными межчастичными корреляциями, характерными для экситонов. Этот переход сопровождается резким уменьшением фотолюминесценции по мере увеличения времени жизни на несколько порядков. В поляритонном режиме пик люминесценции конденсата смещается на ненулевой угол.

Рассчитана угловая зависимость времени двухфотонного распада в эксперименте Хэнбери Брауна и Твисса, которая используется как инструмент для доказательства формирования макроскопически-когерентного состояния. Наша работа открывает возможности для управления сверхтекучими свойствами и корреляциями диполь-дипольных взаимодействий в конденсатах экситон-поляритонов.



CREATION OF LARGE-SCALE PHOTONIC WEIGHTED GRAPH STATES WITH LINEAR-OPTICAL FUSION OPERATIONS

A.A. Melkozerov^{1,2}, S.S. Straupe^{3,1,2}, M.Yu. Saygin^{3,2}*

¹Russian Quantum Center, Moscow, Russia

²Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Sber Quantum Technology Center, Moscow, Russia

*E-mail: melkozerov-a@yandex.ru

The most advanced protocols for linear-optical quantum computing rely on two key primitives: the repeated generation of small entangled photonic resource states and the probabilistic entangling measurements, known as fusion operations, applied to them. Prior research has focused predominantly on specific entangled states, notably graph states, which are key components in well-established quantum computing models [1,2], while broader families of states with variable entanglement remain largely unexplored. Although experimentally feasible, existing fusion-based approaches suffer from inherently low success probabilities. Notably, the success probability of fusing two maximally entangled qubit states cannot exceed 50% without using extra photonic resources.

In this work, we investigate the linear-optical generation of multiqubit weighted graph states, a generalization of standard graph states that allow varying degrees of entanglement. These states find various applications in quantum algorithms, including measurement-based quantum computing [3], and they are encompassed by the recent extension of Pauli stabilizer formalism [4], a powerful tool underpinning many modern quantum error correction and quantum computing protocols.

We propose and analyze a novel approach for constructing large-scale photonic weighted graph states using modifications of standard fusion gates. Using the matrix product state formalism, we study the fusion of weighted graph states, characterize the resulting entanglement structure, and evaluate the performance and scalability of the method. Our results provide a new pathway toward resource-efficient photonic entanglement generation, expanding the toolbox for scalable quantum computing and quantum communication.

1. Bartolucci S. et al. Fusion-based quantum computation, Nat. Commun. **14**, 912 (2023).
2. Gimeno-Segovia M. et al. From three-photon greenberger-horne-zeilinger states to ballistic universal quantum computation, Physical Review Letters **115**, 2 (2015).
3. Gross D. et al. Measurement-based quantum computation beyond the one-way model, Physical Review A **76**, 5 (2007).
4. Webster M.A. et al. The xp stabiliser formalism: a generalisation of the pauli stabiliser formalism with arbitrary phases, Quantum **6**, 815 (2022).



ANALYSIS OF THE EXCITATION SPECTRUM IN MAGNETIC SKYRMION STRUCTURES

А.А. Михеева^{1,2}, Д.Н. Аристов^{1,2}*

¹ НИЦ«КИ», Петербургский Институт Ядерной Физики, Гатчина, Россия

² Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: anmikheeva14@gmail.com

Магнитные скирмионы – это крошечные топологические объекты масштаба десятков нанометров, которые привлекают огромное внимание исследователей в последнее десятилетие. Интерес к этой теме связан с возможностью практической реализации этих объектов в будущих устройствах памяти [1,2], а также с их фундаментальными свойствами.

Известно, что спектры элементарных возбуждений (магнонов) в скирмионных кристаллах (СкК) находятся путем диагонализации гамильтониана типа Боголюбова - де Жена в присутствии калибровочного поля. В [3] было показано, что напряженность этого калибровочного поля в среднем равна нулю и что она характеризуется двумя вкладками, один из которых - гладкая компонента поля с двумя квантами потока, пронизывающими элементарную ячейку. Другая компонента калибровочного поля сингулярна, пропорциональна дельта-функции в координатном пространстве, расположенной в центре каждого скирмиона, и вес такой дельта-функции равен минус двум квантам потока. Имея нулевое среднее поле на элементарную ячейку, можно определить магнетонные спектры в обычном базисе плоских волн. Однако, при таком описании спектра учёт дельта-функционной сингулярности требует значительных вычислительных мощностей, либо регуляризации задачи. Получаемая зонная структура уже обсуждалась в работах некоторых авторов [4,5], но понимание многих особенностей спектров до сих пор отсутствует.

Мы предлагаем альтернативный метод расчета зонной структуры магнонов в СкК на основе базиса вырожденных уровней Ландау (УЛ). На первом этапе мы построили унитарное преобразование волновой функции для удаления сингулярности из калибровочного поля. Это привело к появлению аналога постоянного магнитного поля с двумя квантами потока на элементарную ячейку. На втором этапе мы получили формулы для матричных элементов возникающих операторов в базисе УЛ. На основе построенного унитарного преобразования и отработанного метода расчёта матричных элементов операторов в новом базисе ожидается явное численное построение матрицы гамильтониана. Предварительные оценки показывают, что для каждого волнового вектора в первой зоне Бриллюэна зонная структура дается полосчатой матрицей, т.е. обеспечивается хорошая численная сходимость спектра.

This research was supported by the Russian Science Foundation (grant number 25-12-00418).

1. Vakili H., et al, J. Appl. Phys. **130**, 070908 (2021).
2. Yan Z., et al, Phys. Rev. Appl. **15**, 064004 (2021).
3. Timofeev V.E., Aristov D.N., Phys. Rev. B **105**, 024422 (2022).
4. Schütte C., Garst M., Phys. Rev. B, **90**, 094423 (2014).
5. Garst M., J. Phys. D: Appl. Phys. **53** 363001 (2020).



CONTROLLING PROPERTIES OF NON-GAUSSIAN LIGHT STATES VIA MEASUREMENTS ON A SQUEEZED ANCILLARY MODE

E.I. Mingazhitdinov^{1*}, *O.V. Tikhonova*^{1,2,3}

¹Sarov Branch, Lomonosov Moscow State University, Sarov, Russia

²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Russian Quantum Center, Moscow, Russia

*E-mail: emildave@mail.ru

The generation of non-Gaussian states of light is a cornerstone for enabling universal quantum computation, particularly for error correction using Schrödinger cat codes [1]. However, deterministic approaches are often hampered by weak material responses. In this work, we propose a method for non-Gaussian state engineering based on a cross-Kerr interaction. We extend the capabilities of the scheme [2] through the use of quantum-tailored ancillary states.

Specifically, we use a displaced squeezed state $|\psi_{\text{anc}}\rangle = \hat{D}(\beta)\hat{S}(r)|0\rangle$ as the ancilla. The interaction is described by the Hamiltonian $\hat{H} = -\hbar\gamma\hat{n}_a\hat{n}_b$. A homodyne measurement of the ancillary mode's X -quadrature projects the signal mode (initially in a coherent state $|\alpha\rangle$) into a conditional state:

$$|\psi(x)\rangle_a \propto \sum_n c_n \Phi_n(x) |n\rangle_a, \quad (1)$$

where $\Phi_n(x)$ acts as a programmable "quantum filter". This filter selectively amplifies or suppresses specific Fock components depending on the photon number n . Analytically, $\Phi_n(x)$ corresponds to the wavefunction of a displaced squeezed vacuum whose parameters depend linearly on n due to the cross-Kerr interaction. The structure of the generated states is illustrated by their Wigner functions in Fig. 1.

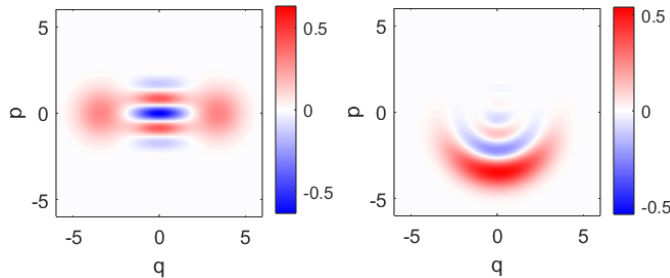


Fig. 1. Wigner functions of the generated states: (left) Schrödinger cat state via strong squeezing ($r = 5$); (right) a state approximating a cubic phase state via squeezing ($r = 2$) and displacement ($\beta = 7$).

We demonstrate that by varying the squeezing r and displacement β of the ancillary mode, one can deterministically shape the output state's properties. For instance, strong squeezing transforms the filter into an oscillatory comb, generating high-fidelity Schrödinger cat states. A combination of squeezing and large displacement allows for the synthesis of cubic phase states, which are critical for non-Gaussian quantum gates [3].

1. M. Mirrahimi et al., *New J. Phys.* **16**, 045014 (2014).
2. T. Tyc and N. Korolkova, *New J. Phys.* **10**, 023041 (2008).
3. S. Lloyd and S. L. Braunstein, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1784 (1999).



FLAT BANDS IN “PYROCUBIC” LATTICE

Д.А. Мякотников^{1,2}, С.В. Стрельцов^{1,2}*

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: myakotnikovdaniil49@gmail.com

Плоские электронные зоны важны при описании многих физических явлений, в частности для топологических сверхпроводящих фаз и спиновой жидкости. Классические примеры структур – кагомэ-решётка с одной плоской зоной в модели сильной связи и её квадратный аналог, где плоская зона возникает при равенстве диагональных и боковых перескоков электронов. В обоих случаях наличие плоских зон обусловлено геометрической фрустрацией и деструктивной интерференцией блоховских волновых функций.

Было проведено численное моделирование зонной структуры и плотности состояний для модельной системы на основе кагомэ-подобной решётки в приближении сильной связи. Рассматриваемая решётка представляет собой правильные квадратные пирамиды, которые соединяются друг с другом по ребрам оснований, образуя внутреннюю полость в виде куба. В результате чего формируется «пирокубическая» решётка. Пространственная группа такой решётки $Pm\bar{3}m$ (no.221). Параметр перескока электрона был учтен только для ближайших соседей. Расчёт зонной структуры выявил характерные особенности электронного спектра: наличие четырёх плоских зон, среди которых обнаружены трижды вырожденная и однократно вырожденная зоны. Такое распределение вырождения связано с высокой симметрией кристаллической структуры и геометрическим фрустрированием решётки. Также были обнаружены особенности Ван-Хова в точках высокой симметрии.



A SPIN MODEL TEST FOR A GENERATIVE QUANTUM EIGENSOLVER

V.S. Okatev^{1}, O.M. Sotnikov^{1,2}, V.V. Mazurenko^{1,2}*

¹Theoretical Physics and Applied Mathematics Department, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow, Russia

*E-mail: okatev.v9@gmail.com

Large language models (LLM) help to solve problems in completely different fields of knowledge, including condensed matter physics and quantum computing. A prominent example of the latter is a quantum circuits-based approach for solving the eigenvalue problem using generative transformers - Generative Quantum Eigensolvers (GQE) proposed in [1]. Using this approach, the ground states of the electronic Hamiltonians of various molecules have been approximated. However, the unitary transformations the authors used cannot be effectively implemented on modern quantum devices with shallow circuits of basic one- and two-qubit gates.

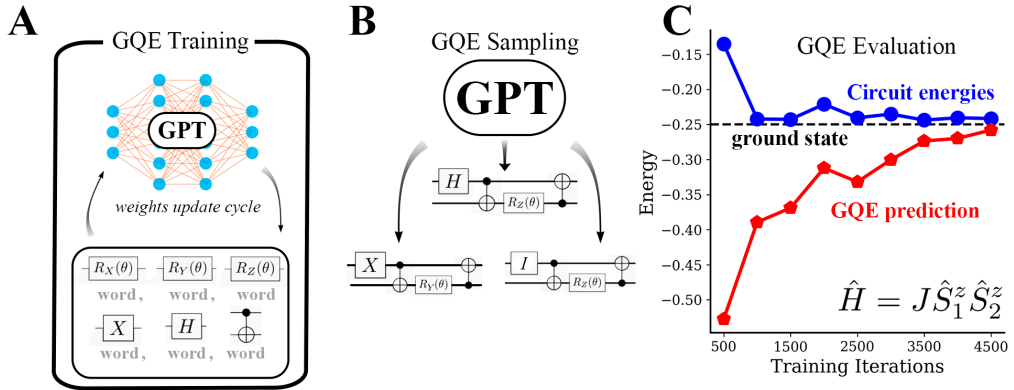


Figure 1. (A) Within GQE training each item from a given set of one- and two-qubit gates is associated to a word. Random quantum circuits (sentences) are generated and the corresponding energies are estimated. They are used for training GPT. (B) The GPT models at different training steps are employed to sample quantum circuits approximating the ground state of the given Hamiltonian. (C) Two-spin Ising model example shows that GPT predictions of the ground state energy converge to those estimated for the quantum circuits that are constructed on the basis of sentences generated with the trained GPT.

Here, we explore the efficiency of the GQE algorithm for solving eigenvalue problems for the Ising model of a few spins using a pool of 1-qubit rotational and CNOT gates. The results (Fig 1C) obtained with different initial states evidence that GQE can construct quantum circuits that minimize the energy of the quantum model. However, the current realization requires a huge number of parameters at the level of GPT and calls for further optimization of this procedure.

1. Kouhei Nakaji et al., arXiv:2401.09253 (2024).



THEORETICAL APPROACH FOR TREATING QUANTUM FLUCTUATIONS OF THE ORDER PARAMETER IN CORRELATED FERMIONIC SYSTEMS

S.S. Onuchin^{1,2*}, *Ya.S. Lyakhova*^{1,3}, *A.N. Rubtsov*^{1,4}

¹Russian Quantum Center, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

⁴Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: semyon_onuchin@vk.com

This work is devoted to the study of dynamic fluctuations of the order parameter within the framework of the Fluctuating Local Field (FLF) method [1].

The main idea of the FLF method is to approximate the exact partition function using functions of a parental method (e.g., mean-field) averaged over an ensemble of external fields v introduced in the leading fluctuation channel. Considering the example of antiferromagnetic fluctuations in a one-dimensional Hubbard chain with N sites, the FLF transformation is written as [2]:

$$Z_{FLF} = \left(\frac{\beta N}{2\pi\lambda} \right)^{3/2} \iint \exp \left\{ -S_h - \frac{\beta N}{2\lambda} (v - h - \lambda s)^2 \right\} \mathcal{D}[c^\dagger, c] d^3 v, \quad (1)$$

where β is the inverse temperature, S_h is the action of the system without interaction in the external field h , λ is an arbitrary parameter of the method.

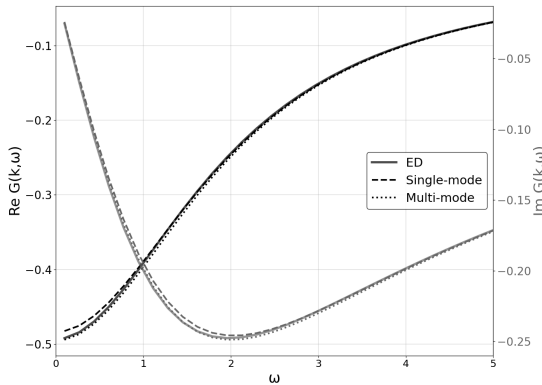


Рис. 1. Temperature Green's function for $\beta = 10$ at momentum $k = \pi$ for a chain of $N = 4$ sites in the moderate correlation regime $U/t = 1$

The aim of this work is to develop an approach for accounting for quantum fluctuations of the order parameter. For this purpose, the field v^a is expanded in imaginary time τ in terms of Matsubara frequencies ω_n . Assuming the contribution of non-zero modes is small compared to the zero mode:

$$v^a = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} v_n^a e^{i\omega_n \tau} \approx v_0 + v_1 e^{i\omega_1 \tau} + v_{-1} e^{i\omega_{-1} \tau} \quad (2)$$

Within this approximation, analytical expressions for the partition function and Green's functions were obtained (Fig.1). While the developed approach provides general improvements, the most notable enhancement in accuracy is observed for systems with a suppressed leading channel.

1. A.N. Rubtsov, Fluctuating local field method probed for a description of small classical correlated lattices, Phys. Rev. E **97**, 053306 (2018).
2. Ya.S. Lyakhova [et al.], Fluctuating field series: towards calculations of correlated systems with high accuracy, Phys. Rev. B **110**, 245123 (2024).



FROM DISCRETE TO CONTINUOUS VARIABLES SYSTEMS VIA JORDAN–SCHWINGER TOMOGRAPHIC TRANSFORMATION

В.А. Орлов*

Российский квантовый центр, Москва, Россия

* E-mail: vorlovac@outlook.com

Гибридные квантовые архитектуры, объединяющие системы с дискретными (ДП) и непрерывными (НП) переменными, представляют перспективное направление в квантовых вычислениях [1, 2]. Однако математические формализмы ДП- и НП-систем существенно различаются, и даже одинаково называемые концепции нередко обладают различными свойствами и физическими интерпретациями. В работе [3] предложен единый вероятностный подход, основанный на томографическом представлении квантовых состояний и отображении Йордана–Швингера (ЙШ) [4], позволяющий устанавливать взаимно-однозначные соответствия между ДП- и НП-описаниями квантовых систем. В томографическом представлении описание квантового состояния осуществляется не через оператор плотности, а посредством томограмм. Для систем с НП [5] используется симплектическая томограмма, функция плотности вероятности. Для систем с ДП применяются фотонно-числовая томограмма для бесконечномерных состояний [6] и спиновая томограмма для конечномерных состояний [7]. Эти распределения являются информационно полными и биективно связаны с операторами стандартной квантовой механики в рамках формализма квантайзера–деквантайзера [8]. Показано, что использование отображения ЙШ, устанавливающего изоморфизм между спином j и двухмодовым состоянием Фока с фиксированным числом возбуждений $n = 2j$, позволяет построить аналитические интегральные преобразования между всеми указанными типами томограмм. Получены явные выражения ядер перехода между различными томограммами и функцией Вигнера.

Предложенные преобразования не требуют предварительной реконструкции матрицы плотности, что снижает вычислительную сложность и накопление ошибок при обработке экспериментальных данных [9]. Предложенный метод позволяет, начиная, например, со спиновой томограммы, измеренной в ДП-эксперименте, напрямую восстановить симплектическую или фотонно-числовую томограмму соответствующего НП-состояния, принадлежащего фиксированной подсекции пространства Фока. Аналогично построены и обратные преобразования, обеспечивающие переход от НП-к-ДП-описаниям. Предложенный формализм имеет прямое прикладное значение: он позволяет сравнивать различные аппаратные платформы, разрабатывать ДП–НП гибридные протоколы, выполнять кросс-платформенный бенчмаркинг и тестирование квантовых устройств [10], а также формулировать новые стратегии квантовой коррекции ошибок.

1. Andersen U.L. et al., Nat. Phys. **11**, 713 (2015).

2. Takeda S. et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 100501 (2015).



EXACT SOLUTION OF ONE-DIMENSIONAL SPIN MODELS WITH MARKOV PROPERTY

Y.D. Panov*

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: yuri.panov@urfu.ru

Одномерные спиновые модели благодаря своей концептуальной простоте и разрешимости служат для проверки различных теоретических концепций и методов статистической физики, а также закладывают основу для понимания сложного поведения реальных физических систем. Для анизотропных спиновых систем, таких как декорированные цепочки Изинга, Блюма-Эмери-Гриффитса и Поттса, стандартный метод получения точного решения заключается в построении трансфер-матрицы и нахождении ее наибольшего собственного значения. Существование трансфер-матрицы конечного размера приводит к отображению модели на некоторую марковскую цепь. Такое отображение позволяет, в частности, детально описать различные свойства фаз основного состояния [1-5]. Однако, также это дает возможность точного решения статистической модели без вычисления наибольшего собственного значения трансфер-матрицы.

Рассмотрим спиновую цепочку, для которой собственные состояния являются прямым произведением состояний на узлах. Введем средние $P(a) = \langle \hat{P}_{a,i} \rangle$ и парные функции распределения $P(ab) = \langle \hat{P}_{a,i} \hat{P}_{b,i+1} \rangle$, где $\hat{P}_{a,i}$ — проектор на состояние a узла i , $a = 1, \dots, q$, и $\langle \dots \rangle$ означает термодинамическое среднее. Энтропия такой системы может быть выражена через парные функции распределения:

$$S = - \sum_{a,b} P(ab) \ln P(ab) + \sum_a P(a) \ln P(a). \quad (1)$$

Поскольку для рассматриваемого класса спиновых моделей внутренняя энергия также выражается через функции $P(a)$ и $P(ab)$, то можно записать явный вид зависимости функционала свободной энергии от парных функций распределения. Минимизация этого функционала дает точное решение статистической модели. В докладе рассмотрены примеры применения этого метода поиска точного решения для одномерной анизотропной модели Поттса, модели Киттеля и разбавленной изинговской цепочки.

1. Panov Yu. D. JMMM **514**, 167224 (2020).
2. Panov Y. Phys. Rev. E **106**, 054111 (2022).
3. Panov Y., Rojas O. Phys. Rev. E **108**, 044144 (2023).
4. Panov Y. Ferroelectrics **618**, 1207 (2024).
5. Ясинская Д. Н., Панов Ю.Д. ФТТ **66**, 1106 (2024).



IMPACT OF VIBRATIONAL ENTROPY ON ORDERING AND PHASE STABILITY IN α -Ti–Al

М.В. Петрик^{1,}, А.Ю. Строев^{2,3}, И.К. Разумов¹, И.А. Насчётникова^{1,4}*

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

⁴Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*E-mail: mikk@imp.uran.ru

Задача исследования титановых сплавов имеет высокую практическую значимость в связи с их перспективами использования в авиа- и автомобилестроении, а также в медицине. Важную роль в формировании их свойств играет появление наноструктурированных состояний, содержащих дисперсные частицы упрочняющих фаз, прежде всего Ti_3Al . Упорядоченная фаза α_2 (структура DO_{19} на основе интерметаллида Ti_3Al) оказывает существенное влияние на механическое поведение сплавов Ti–Al: её образование повышает прочность, но сопровождается снижением пластичности. Поэтому теоретическое понимание механизмов упорядочения в системе Ti–Al является необходимым условием для целенаправленного управления их структурой и эксплуатационными характеристиками.

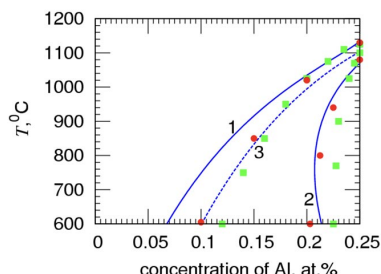


Рис. 1.

В работе [1] с помощью метода кластерного разложения (cluster expansion) было показано, что вклад колебательной энтропии имеет решающее значение для корректного описания фазового равновесия в системе Ti–Al. Однако данный подход непрозрачен для качественного анализа, и сложен для повторного воспроизведения. Целью данной работы является сопоставление различных приближений и вычислительных схем, применяемых при описании фазового равновесия в системе Ti–Al, а также количественный анализ роли конфигурационной и вибрационной составляющих свободной энергии. Для этого используется комплексный подход, включающий расчёт многочастичных взаимодействий методом изолированных

кластеров Al в hcp-Ti, моделирование разупорядоченного состояния с помощью SQS, Монте-Карло моделирование для оценки отклонений от среднеполевого приближения и расчёты колебательной энтропии и фононных спектров в рамках формализма VASP + Phonopy (Harmonic approximation).

На основании проведённых расчётов предложен удобный и воспроизводимый способ построения фазовой диаграммы Ti–Al. Учёт многочастичных взаимодействий, полученных из моделирования изолированных кластеров Al в hcp-Ti, приводит к снижению температуры упорядочения примерно на 200 K по сравнению с моделями, использующими только парные потенциалы. Основной вклад в правильное положение линии упорядочения вносит колебательная энтропия: без её учёта температура упорядочения получается существенно завышенной. Такой подход даёт согласованную с экспериментом диаграмму и может быть использован для дальнейшего уточнения термодинамики, включая расчёты за пределами гармонического приближения и моделирование тройных сплавов Ti–Al–X.

1. Axel van de Walle, Ghosh, G., & Asta, M. (2007). Ab initio modeling of alloy phase equilibria. In G. Ghosh & M. Asta (Eds.), **Applied computational materials modelling: Theory, simulation and experiment**. Kluwer Academic Publishers (Springer).



NON-EQUILIBRIUM QUANTUM DYNAMICS IN INHOMOGENEOUS JOSEPHSON TRAVELING-WAVE PARAMETRIC AMPLIFIERS

А.С. Пляшечник^{1,2,}, А.С. Ремизов^{1,3,4}, А.А. Елистратов¹, А.В. Лебедев¹*

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА), Москва, Россия

²АО НПП «Исток» им. Шокина, Фрязино, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН), Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия

*E-mail: a_plyashechnik@mail.ru

Параметрический усилитель бегущей волны на основе цепочки связанных джозефсоновских переходов является перспективным элементом квантовых схем благодаря способности усиливать слабые сигналы и генерировать квантово-запутанные состояния. Запутанные квантовые состояния – ключевой ресурс для квантовой связи, метрологии и вычислений. Интерес вызывают компактные источники запутанных фотонных пар, совместимые с твердотельными квантовыми схемами. Параметрические усилители на джозефсоновских переходах благодаря сильной нелинейности и низким потерям способны генерировать такое излучение в режиме накачки.

В классическом приближении [1] прохождение сигнала через параметрический усилитель описывается нелинейным волновым уравнением, в котором нелинейность обусловлена синусоидальной характеристикой джозефсоновского элемента.

В настоящей работе мы развиваем квантовое неравновесное описание такой системы в присутствии внешней накачки. Для этого применяется формализм Швингера–Келдыша [2], а самосогласованные уравнения для средних и корреляторов строятся с использованием функциональных преобразований Лежандра [3]. Такой подход естественным образом воспроизводит классический предел и, что принципиально, позволяет описать спонтанную генерацию запутанных фотонных пар за счёт параметрического распада накачки — эффект, недоступный в рамках классического подхода.

В отличие от большинства теоретических моделей, предполагающих идеальную однородность и использующих импульсное представление, мы явно учитываем неоднородности, которые могут быть вызваны разбросом параметров элементов усилителя, геометрией системы (например, изгибы цепочки), а также краевыми условиями подключения. Это делает необходимым переход к координатному представлению и приводит к системе связанных нелинейных волновых уравнений для одно- и двухчастичных средних. В установившемся режиме задача сводится к решению связанной системы уравнений, соответствующей задаче рассеяния. В пределе однородной цепочки наш подход воспроизводит известные кинетические уравнения для огибающих, полученные в импульсном представлении, подтверждая его согласованность.

Полученные результаты открывают путь к проектированию источников запутанного излучения на сверхпроводящих чипах с учётом реальных технологических ограничений.

1. Yaakobi O., Friedland L., Macklin C., Siddiqi I., Phys. Rev B **87**, 144301 (2013).
2. Kamenev A., Field Theory of Non-Equilibrium Systems, Cambridge University Press (2011)
3. Васильев А.Н., Функциональные методы в квантовой теории поля и статистике, Издательство Ленинградского университета (1976).



FERROELECTRIC AND ANTIFERROELECTRIC INSTABILITIES IN BI MONOLAYER

Д.В. Понкратова^{1,2,3*}, И.В. Загороднев^{1,2,3}, В.В. Еналдиев^{2,3}

¹НИУ ВШЭ, Москва, Россия

²ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*E-mail: poncratova.d@gmail.com

POSTER

В последнее время активно исследуется сегнетоэлектричество в двухмерных материалах, в том числе состоящих из атомов одного вида [1,2]. В нашей работе мы показываем возможность сегнетоэлектрического и антисегнетоэлектрического перехода в монослой висмута с решеткой, подобной черному фосфору, с использованием формализма Клазиуса-Моссотти. Поляризуемость атомов висмута в решетке, вычисленная с использованием DFT, отличается от поляризуемости свободного атома висмута наличием компоненты α_{xz} .

Определим тензор восприимчивости как $P_i = \chi_{ij} E_{extj}$. На рис.?? показана наиболее существенная компонента χ_{xx} как функция обезразмеренных постоянных решеток. Значения диагональных компонент тензора поляризуемости α указаны на графиках; при этом для всех подрешеток $\alpha_{xz} = \pm 1.1 \text{ \AA}^3$. При малых α монослой висмута является паразлектриком (PE). При увеличении α сначала наблюдается возможность перехода в антисегнетоэлектрическую фазу (AFE), а затем - в сегнетоэлектрическую (FE).

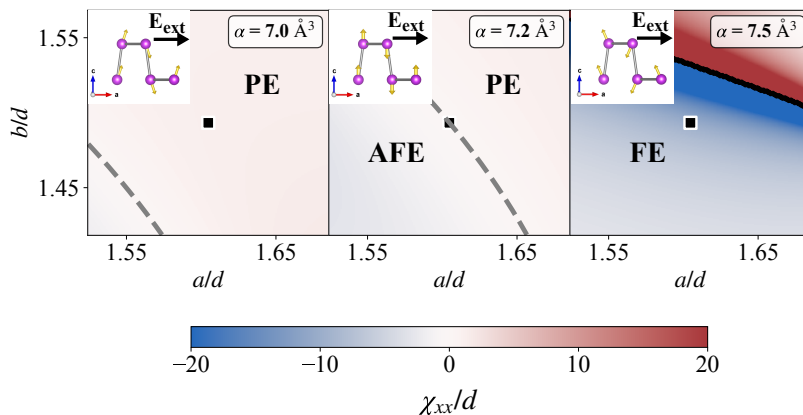


Рис. 1. χ_{xx} как функция обезразмеренных постоянных решетки a/d и b/d . Черный квадрат показывает экспериментально измеренные параметры решетки. Серые пунктирные линии показывают параметры a/d и b/d , при которых χ_{xx} обращается в ноль, черные сплошные - при которых χ_{xx} испытывает расходямость. Вставки показывают монослои висмута, лежащие в плоскости XY (ось $X||\hat{a}$, $Y||\hat{b}$, $Z||\hat{c}$), а также дипольные моменты атомов (желтые векторы) при приложении внешнего электрического поля вдоль X .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-72-10015 с использованием суперкомпьютерного комплекса НИУ ВШЭ.

1. Qi L. et al., Advanced Materials **33**, 13 (2021).

2. Gou J. et al., Nature **617**, 7959 (2023).



STRONGLY CORRELATED ELECTRONIC STATE IN THE FERRIMAGNETIC QUADRUPLE PEROVSKITE $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Re}_2\text{O}_{12}$

A. Poteryaev, Z. Pchelkina, S. Streltsov, V. Irkhin*

Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: poteryaev.alexander@gmail.com

Recently synthesized quadruple perovskite $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Re}_2\text{O}_{12}$ possesses strong ferromagnetism and unusual electron properties, including enhanced electronic specific heat. The application of the first principles electronic structure approaches unambiguously shows the importance of the many-body effects in this compound. Although $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Re}_2\text{O}_{12}$ is a half-metallic ferrimagnet in the DFT+U method, in the density functional theory (DFT) combined with the dynamical mean-field theory (DMFT) it appears to be a metal. Strong electronic correlations lead to a renormalization of the electronic spectrum and the formation of incoherent states close to the Fermi level. The electronic specific heat and magnetic properties obtained in the DFT+DMFT approach agree better with the available experimental data than those derived by other band structure techniques.

This work was supported by RSF grant # 23-42-00069.



THEORETICAL INTERPRETATION OF EXPERIMENTS ON MAGNETIC MOMENTS DETERMINATION

С.Д. Просняк^{1}, Л.В. Скрипников^{1,2}*

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: prosnyak_sd@npi.nrcki.ru

Значительный интерес для физики твердого тела, молекулярной, атомной и ядерной физики представляет магнитный момент ядра. Существует несколько типов экспериментов, с помощью которых можно определить данную величину. Одним из них является спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для атомно-молекулярных систем. Зачастую получаемая точность экспериментальных данных настолько высока, что для надёжной интерпретации необходимо проведение прецизионных теоретических расчётов. Приближённые теоретические оценки уже приводили к появлению различных загадок, например, загадке сверхтонкой структуры в атоме висмута [1]. В докладе на примере молекулярного иона ReO_4^- будет показано, как с использованием прецизионных расчётов из данных ЯМР эксперимента определить магнитные моменты ядер ^{185}Re и ^{187}Re , учитывая в том числе и конечное распределение намагниченности по объёму ядру [2].

Также большой интерес представляют магнитные моменты короткоживущих ядер. Проведение ЯМР экспериментов в этом случае достаточно затруднительно. Однако, для короткоживущих ядер возможно измерение константы сверхтонкого расщепления нейтрального атома. Зная из ЯМР эксперимента магнитный момент стабильного ядра, а также константы сверхтонкого расщепления для обоих изотопов в двух электронных состояниях, оказывается возможным определить магнитный момент короткоживущего изотопа. При этом, если эти числа известны с высокой точностью, необходимо учитывать также сверхтонкую магнитную аномалию — специальную комбинацию сверхтонких констант и g-факторов, которая оказывается ненулевой для ядер конечных размеров. В докладе будет представлено вычисление этой величины для атома таллия, позволившее уточнить магнитные моменты ряда короткоживущих изотопов этого элемента [3, 4, 5].

1. Ullmann J. et al., Nature communications, **8.1**, 15484 (2017).
2. Skripnikov L. V., Prosnyak S. D., Physical Review C, **106.5**, 054303 (2022).
3. Prosnyak S. D., Maison D. E., Skripnikov L. V., J. Chem. Phys., **152.4**, 044301 (2020).
4. Prosnyak S. D., Skripnikov L. V., Physical Review C, **103.3**, 034314 (2021).
5. Yue Z. et al., Physics Letters B, **849**, 138452 (2024).



**ELECTRONIC AND MAGNETIC PROPERTIES
OF $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$) HEUSLER ALLOYS:
FROM TOPOLOGICAL SEMIMETAL Co_2MnAl TO SPIN GLASSES
SEMICONDUCTOR Mn_2CoAl**

А.А. Семянникова^{1*}, Е.Д. Чернов¹, А.В. Лукоянов^{1,2}, В.Ю. Ирхин¹, Е.И. Шредер¹,
А.А. Маркин¹, В.Н. Неверов¹, Е.Б. Марченкова¹, В.В. Марченков^{1,2**}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: semiannikova@imp.uran.ru **E-mail: march@imp.uran.ru

Особенности электронной структуры соединений Гейслера $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$) могут приводить к формированию состояний спинового бесщелевого полупроводника (СБП) [1], полуметаллического ферромагнетика (ПМФ) или топологического полуметалла (ТПМ) [2, 3, 4]. В ПМФ и СБП уровень Ферми для электронных состояний со спином вниз лежит в широкой щели ($\Delta E \sim 1$ эВ), тогда как для состояний с противоположной проекцией спина в ПМФ щель отсутствует, а в СБП она равна нулю [1, 2]. В ТПМ линейное соприкосновение валентной зоны и зоны проводимости становится причиной возникновения экзотических бесщелевых поверхностных состояний. Реализовать указанные электронные состояния возможно посредством малой вариации элементного состава вблизи стехиометрии, а также частичной заменой одних атомов, входящих в состав соединения, на другие. Поскольку сплав Co_2MnAl демонстрирует свойства ТПМ, а Mn_2CoAl представляет собой СБП, то при постепенной замене атомов Co на атомы Mn при переходе от Co_2MnAl к Mn_2CoAl предполагаются соответствующие изменения в электронных характеристиках соединений на основе Co-Mn-Al.

Цель данной работы – изучение особенностей электронной структуры, электронных и магнитных свойств сплавов Гейслера $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$) при переходе от соединения Co_2MnAl к Mn_2CoAl .

Сплавы Гейслера $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$) синтезированы методом индукционной плавки в атмосфере аргона. Затем в течение 7 суток выполнялся отжиг при 600°C с последующей закалкой в воду. Структурная аттестация и элементный анализ сплавов выполнены на растровом электронном микроскопе «Tescan Mira». Измерения температурных зависимостей электросопротивления проведены общепринятым четырехконтактным методом в диапазоне температур от 4.2 до 300 К. Оптические свойства исследованы эллипсометрическим методом Битти при комнатной температуре. Расчеты электронной структуры и магнитных свойств были выполнены в рамках теории функционала плотности (DFT) при использовании GGA и потенциалов PBEsol.

Показано, что с изменением соотношения Co/Mn в сплавах $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Al}$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$), наблюдается существенное изменение электросопротивления, которое увеличивается от 252 мОм·см для Co_2MnAl до 383 мОм·см для Mn_2CoAl , при этом вид зависимостей $\rho(T)$ изменяется с металлического на полупроводниково-подобный. Статическая и оптическая проводимости уменьшаются с ростом концентрации Mn. Анализ дисперсии диэлектрической проницаемости в ИК-области спектра свидетельствует об ослаблении проводящих свойств сплавов по сравнению с обычными металлами. Дисперсия оптической проводимости показывает доминирующую роль межзонных переходов в формировании оптических свойств.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-72-00152, <https://rscf.ru/project/24-72-00152/>, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Свердловская обл.).

1. Wang X.L., Phys. Rev. Lett. **100**, 156404 (2008).
2. Manna K., Sun Y., Muechler L. et al., Nat. Rev. Mater. **3**, 244 (2018).
3. Xu S.-Y., Belopolski I., Alidoust N. et al., Science **349**, 613 (2015).
4. Li P., Koo J., Ning W. et al., Nat. Commun. **11**, 3476 (2020).



ANALYSIS OF FLUCTUATION STATISTICS VIA THE FLUCTUATING LOCAL FIELD METHOD

L.D. Silakov^{1,2,}, Ya.S. Lyakhova^{2,3}, A.N. Rubtsov^{2,4}*

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

²Russian Quantum Center, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: l.silakov@rqc.ru

The Hubbard model is used to describe a variety of correlated systems, including high-temperature superconductors. An important feature of this model is the presence of fluctuation channels that determine the system's behavior. In this context, we study the fluctuation statistics of the Hubbard model at half-filling; its Hamiltonian is written as

$$H = t \sum_{J,\sigma} \left(c_{J+x,\sigma}^\dagger c_{J,\sigma} + c_{J+y,\sigma}^\dagger c_{J,\sigma} + h.c. \right) + U \sum_J \left(n_{J\uparrow} - \frac{1}{2} \right) \left(n_{J\downarrow} - \frac{1}{2} \right) - h \sum_J (-1)^J (n_{J\uparrow} - n_{J\downarrow}). \quad (1)$$

Here U is the magnitude of the Coulomb interaction between $\sigma = \uparrow$ and $\sigma = \downarrow$, h is an external magnetic field that supports the antiferromagnetic (AFM) state. Hopping between neighboring sites occurs with amplitude t . The index J denotes the site position (j_x, j_y) , so that $J + x = (j_x + 1, j_y)$.

This work is devoted to the application of the Fluctuating Local Field (FLF) method [1,2], proposed to account for collective fluctuations, as a tool for the quantitative evaluation of fluctuation statistics in the Hubbard model. It is known that mean-field (MF) approximations do not account for fluctuations in the AFM channel. By introducing an external field h in the AFM fluctuation channel, we replace the fixed effective field of MF with an ensemble of fields that fluctuate in a controlled way. This allows us to probe the distribution of fluctuations directly, rather than relying on Gaussian assumptions.

The flexibility of the FLF method and the presence of tunable calibration parameters suggest that it can provide a tool for exploring non-Gaussian fluctuation effects and gaining quantitative insight into the fluctuation dynamics of correlated fermionic systems. It will be shown that the FLF approach enables a controlled reconstruction of the full fluctuation distribution, going beyond Gaussian assumptions and standard mean-field limitations.

1. Rubtsov A. N., Phys. Rev. E **97**, 052120 (2018).

2. Lyakhova Y.S., Rubtsov A.N., J Supercond Nov Magn **35**, 2169–2173 (2022).



EXPLORING MAGNETIC PROPERTIES OF SINGLE MOLECULAR MAGNETS: GENERAL AB INITIO QUANTUM-CHEMICAL APPROACH AND ITS APPLICATIONS

A. Syurakshin*

Institute of Mathematical Problems of Biology, Pushchino, Russia

*E-mail: a_syurakshin@mail.ru

Prominent physical properties of a broad family of single-molecule magnets (SMM) based on the transition metal ions with the partially filled electronic 3d-orbital shell are characterized and their potential for practical applications is disclosed. In particular, molecular magnets can serve as elements of magnetic memory or as quantum bits [1]. Among the major characteristic of SMM is the strength of intra-ion magnetic anisotropy $D(Sz)^2$, known also as zero field splitting (ZFS), that determines the barrier U_{eff} for SMM magnetization reversal.

To evaluate the expected characteristic of a SMM such as the aforementioned ZFS, the low-energy subspace including the multi-electron states have to be obtained, together with their energies, by solving Schrodinger equation with a general all-electron Hamiltonian of the SMM. In our work this is done for mononuclear complexes such as metal-organic molecule, based on explicitly correlated (multiconfigurational) ab initio quantum-chemical calculations performed with the use of Firefly computer program [2].

Particular attention is paid to establishing the dependence of the ZFS value on the characteristics of the ligand field formed by the organic environment of the magnetic transition metal ion.

1. Raza A., Perfetti M., Coordination Chemistry Reviews **490**, 215213 (2023)
2. Granovsky Alex A., Firefly version 8, <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>;
Schmidt M.W., Baldridge K.K., Boatz J.A., et al., J. Comput. Chem. **14**, 1347–1363 (1993).



BOSON SAMPLING WITH SELF-GENERATION OF SQUEEZING VIA INTERACTION OF PHOTONS AND ATOMS

*S.V. Tarasov**, *Vi.V. Kocharovsky*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: serge.tar@gmail.com

We suggest a novel scheme for generating multimode squeezed states for Gaussian boson sampling. The idea is to replace a commonly used linear interferometer with a multimode resonator containing a passive optical element: an ensemble of two-level atoms dispersively interacting with photons and self-generating a squeezed compound state of both bosons – photons and atoms. The suggested scheme does not require (a) on-demand external sources of photons in squeezed or Fock quantum states and (b) numerous interchannel couplers which introduce phase noise and losses that prevent scaling up the system and achieving quantum advantage. The idea is illustrated by a setup based on a Bose-Einstein-condensed gas confined in a multimode resonator, one of whose optical modes is in the classical coherent regime [1].

Challenging quantum advantage with Gaussian boson sampling has been suggested in [2] and is widely discussed nowadays in the race to demonstrate advantage of quantum simulators over classical computers. The concept relies on the fact that if a multimode entangled squeezed vacuum state is prepared and then measured in the multimode Fock basis, the output probabilities are proportional to the hafnians of certain matrices. Classical computation of these hafnians, in general, requires a number of operations that grows exponentially with the matrix size (i.e., with the number of occupied modes). Hence, the described sampling process in a properly scaled system is believed to be classically intractable.

Although the quantum optical implementation of the concept looks straightforward – take a large number of beam splitters, build a large multimode linear interferometer, feed it with proper photon states, and measure the photon numbers in the output channels – the prospects for achieving quantum advantage with this traditional architecture are questionable. Such interferometers suffer from exponential decay of transmission with circuit depth, and losses drive the output state far from a squeezed vacuum, dramatically reducing the cost of classical simulation. For example, for the largest experiment based on traditional architecture [3], involving 144 mixed modes and 113 detected photons on average, the effective computational complexity can be reduced to that of ideal Gaussian boson sampling with 5 photons only [4].

We propose instead to generate multimode squeezed photonic states directly inside the multimode cavity, avoiding external squeezed-light sources, input synchronization, and interferometric mixing. The idea is to fill the cavity supporting a number of high-Q optical modes with a medium introducing counter-rotating terms in the system's description. As an example of such a medium, we consider a cold, partially condensed gas of two-level Bose atoms interacting with photons in the non-resonant way. The counter-rotating terms associated with the light-atom interaction bring the desired squeezing effects to the hybrid modes of the system, and the coupling existing between atoms and light distributes that squeezing to photons. With an appropriate choice of parameters, the resulting multimode photonic squeezing becomes strong enough to yield output statistics that are classically hard to simulate, while remaining accessible to standard well-developed detecting tools of quantum optics.

The suggested scheme is modeled using a standard cavity QED approach, and the statistics are analyzed via the method of characteristic functions together with a recently established theorem on the hafnian generating function [5].

1. Tarasov S.V., Kocharovsky Vi.V. arXiv preprint: 10.48550/arXiv.2409.09027 (2024).
2. Kruse R., Hamilton C.S., Sansoni L., Barkhofen S., Silberhorn C., Jex I., Physical Review A **100**, 032326 (2019).
3. Zhong H.-S., Deng Y.-H., Qin J., Wang H., Peng L.-C. et al., Physical Review Letters **127**, 180502 (2021).
4. Oh C., Liu M., Alexeev Y., Fefferman B., Jiang L., Nature Physics **20**, 1461–1468, (2024).
5. Kocharovsky V.V., Kocharovsky Vi.V., Tarasov S.V., Linear Algebra and its Applications **651**, 144 (2022).



RATTLING EFFECT IN QUADRUPLE PEROVSKITES AND ITS POSSIBLE PSEUDO JAHN–TELLER ORIGIN

F.V. Temnikov, S.V. Streltsov*

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: temnikov.fedor.v@gmail.com

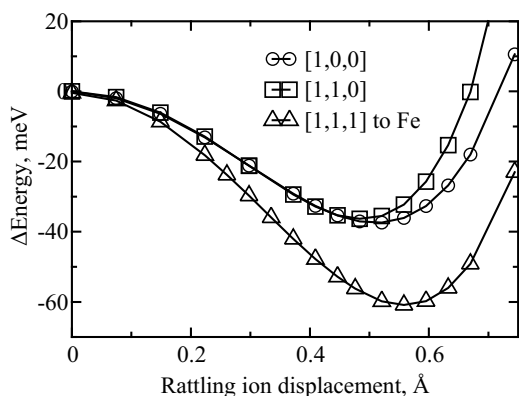


Рис. 1. Change in the total energy upon displacement of the Cu ion from the CuO_{12} icosahedron center along various directions.

calculations made by authors show that the first type of Cu atoms can be displaced off-center from the icosahedral site along several symmetry-related directions; the energetically most favorable displacement is along $[1, 1, 1]$ (Fig. 1).

The microscopic origin of these off-center displacements has not yet been explained. In the present work, we analyze the pseudo Jahn–Teller (PJT) effect as a possible origin of the observed rattling. The PJT effect, arising from vibronic coupling between a ground state and an excited electronic state of appropriate symmetry, is known to drive ferroelectricity in perovskites such as BaTiO_3 by displacing Ti ions [2]. We discuss the applicability of the PJT mechanism to quadruple perovskites and other rattling systems.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the IMP UB RAS.

1. Xiao Wang et al. *Inorg. Chem.* **64**, 20796 (2025).
2. Bersuker I. B., *Phys. Lett.* **20**, 589 (1966).

Rattling is a vibration of a loosely bound ion inside an oversized coordination cage. The presence of such local vibrational modes can give rise to different solid-state properties, in particular to a notable reduction of the lattice thermal conductivity due to phonon scattering on the rattling mode. In quadruple perovskites $\text{AA}_3\text{B}_2\text{B}'_2\text{O}_{12}$, rattling-like behavior has been reported, for example, in $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Os}_2\text{O}_{12}$ [1]. This compound exhibits a low thermal conductivity of $1.4 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ at room temperature. $\text{CuCu}_3\text{Fe}_2\text{Os}_2\text{O}_{12}$ contains two crystallographically distinct Cu sites: one located in CuO_{12} icosahedra with a large factor ($U_{\text{iso}} = 9.82$), and another one in CuO_4 plaquettes with much smaller $U_{\text{iso}} = 0.23$. DFT+U



COULOMB CORRELATIONS AND THE COHERENT-INCOHERENT ELECTRONIC CROSSOVER IN VANADIUM OXYCHALCOGENIDES

I.O. Trifonov^{1}, S.L. Skornyakov^{1,2}*

¹ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: trifonov.i@bk.ru

Quasi-two-dimensional van der Waals vanadium oxychalcogenides V_2Ch_2O ($Ch = Se, Te$) represent a new class of materials with unique electronic properties arising from Coulomb correlations. Experimental studies have revealed substantial differences in the physical properties of these isoelectronic compounds: V_2Te_2O is a moderately correlated metal with an anomalously large Sommerfeld coefficient, which cannot be explained within standard band theory approaches [1], while V_2Se_2O exhibits an unusual temperature dependence of resistivity $\sim \log(1/T)$ [2], reminiscent of underdoped cuprates [3] and indicating proximity to a Mott insulating state.

In this work, we investigate the effect of Coulomb correlations on the electronic properties of vanadium oxychalcogenides using the density functional theory combined with dynamical mean-field theory (DFT+DMFT). It is shown that in the paramagnetic state, single-crystalline V_2Te_2O and V_2Se_2O are moderately correlated metals with orbital-dependent localization of spin moments [4,5]. For V_2Te_2O , accounting for electronic correlations improves the agreement between the calculated and experimental Sommerfeld coefficients. A comparison of the self-energy between V_2Te_2O and V_2Se_2O reveals qualitative differences between these compounds. The temperature dependence of the imaginary part of the orbital-resolved self-energy $\text{Im}\Sigma(\omega_n)$ at a fixed $\omega_0 = \pi k_B T$ demonstrates fundamentally different behavior: in V_2Te_2O , linear extrapolation to $T = 0$ yields zero for all vanadium d orbitals, indicative of Fermi-liquid behavior, whereas in V_2Se_2O the extrapolation remains finite for most orbitals, signaling a loss of electronic coherence and pointing to non-Fermi-liquid behavior.

The obtained results demonstrate the critical role of Coulomb correlations in shaping the electronic properties of vanadium oxychalcogenides and may help explain the experimentally observed transition from metallic behavior in V_2Te_2O to anomalous transport in V_2Se_2O .

The DFT+DMFT calculations was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-12-00024). The DFT calculations were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the IMP UB RAS and youth project No. 12-25. The theoretical analysis of electronic structure was supported by the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics "BASIS".

1. Ablimit, Abduweli, et al., Inorganic Chemistry **57**, 14617 (2018).
2. Lin H., et al. Physical Review B **98**, 075132 (2018).
3. D.J. Scalapino, Rev. Mod. Phys **84**, 1383 (2012).
4. Skornyakov S.L., Trifonov I.O., et al., JETP Letters **7**, 120 (2024).
5. Trifonov I.O., Skornyakov S.L., et al., JETP Letters **3**, 122 (2025).



EDGE STATES OF PERIODICALLY DEFORMED TOPOLOGICAL INSULATOR AND THEIR FORBIDDEN ZONES OSCILLATING UNDER MAGNETIC FIELD

А.В. Цветкова^{1*}, Я.М. Родионов², П.Д. Григорьев³

¹Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия

³Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: al.v.tsvetkova@yandex.ru

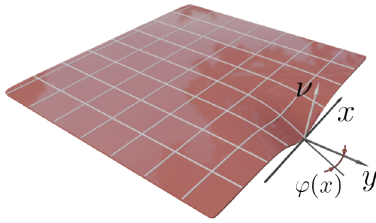


Рис. 1. Схематическая иллюстрация геометрической неидеальности края двумерного ТИ

Топологический изолятор (ТИ) обладает проводящими поверхностными состояниями, защищенными топологически, в то время как состояния, относящиеся к объему, имеют изолирующую щель в своем спектре. Защищенность поверхностных состояний может быть разрушена нарушением симметрии по обращению ко времени, например, добавлением внешнего магнитного поля. В данной работе обнаружено нетривиальное поведение запрещенных зон краевых состояний в двумерном топологическом изоляторе, поверхность которого была деформирована.

Рассматривается внесенный во внешнее магнитное поле двумерный ТИ, край которого деформирован периодически. Система описывается одномерным модельным гамильтонианом [1]:

$$\hat{H}^{1D}(x) = v_F \hat{p}_x \sigma_y + \mu \sigma_z + \hat{U}(x), \quad (1)$$

где $\mu = \mu_B g \mathcal{H}$, g — g -фактор для краевых электронов, σ_i — матрицы Паули. Наличие дефекта изменяет спин-орбитальное взаимодействие в системе, и потенциал $U(x) = \frac{a}{2} [\hat{p}_x \varphi(x) + \varphi(x) \hat{p}_x] \sigma_z$ отражает этот факт [1]. Здесь $\varphi(x)$ описывает кривую касательной к краю образца (рис. 1).

При решении одномерного уравнения $\hat{H}^{1D} \psi(x) = \epsilon \psi(x)$ был применен метод Покровского-Халатникова [2, 3]. В приближении больших магнитных полей, сравнимых с энергией частицы, было получено выражение для коэффициента рассеяния электрона на периодическом потенциале деформации, что, в свою очередь, дало выражение для ширины запрещенной зоны [3]:

$$\Delta_n = \frac{4}{\pi T_n} \left| \cos \left(\frac{\pi a \delta \epsilon}{v_F} \right) \Gamma \left(\frac{|\tilde{a}| \delta \epsilon}{v_F} + \frac{1}{2} \right) \right|^2 \times \left| \frac{a \delta \epsilon}{e v_F} \right|^{\frac{2a \delta \epsilon}{v_F}} \exp \left(-4 \text{Im} \int_{z_0}^{x_0} q_+(z') dz' \right), \quad (2)$$

где T_n — время прохождения частицей длины периода потенциала, $\Gamma(x)$ — гамма-функция, a — константа, зависящая от периода потенциала, $q(z)$ — квазиклассический импульс. Полученное выражение (3) показывает, что ширина n -ой зоны осциллирует как функция от разности энергии частицы и величины магнитного поля $\delta \epsilon = \epsilon_n - \mu$. При выполнении условия $\cos 2\pi |\tilde{a}| \delta \epsilon = -1$ ширина энергетической щели Δ_n обращается в ноль и запрещенная зона исчезает полностью.

This research was supported by the Russian Science Foundation (grant number 25-12-00418).

1. Dotdaev A.C. et al, JETP Letters **120**, 675 (2024).
2. Pokrovskii V. L., Khalatnikov I. M., Soviet Phys. JETP **13**, 1207 (1961).
3. A. Dykhne, Sov. Phys. JETP **13**, 999 (1961).



NEURAL NETWORK FOR PREDICTING PARAMETERS OF A MODEL CUPRATE SUPERCONDUCTOR

*В.А. Улитко**, Д.Н. Ясинская, А.А. Кошелев, Ю.Д. Панов¹

Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

*E-mail: vasiliy.ulitko@urfu.ru

Прямое вычисление фазовых диаграмм для многопараметрических моделей сложных материалов, таких как высокотемпературные сверхпроводящие купраты, является вычислительно сложной задачей. Еще более трудоемкой является обратная задача – подбор параметров физической модели для воспроизведения особенностей фазовой диаграммы конкретного соединения. Нами была рассмотрена псевдоспиновая $S = 1$ модель купрата [1], с многопараметрическим гамильтонианом [2], включающим в себя локальные (Δ) и нелокальные (V) заряд-зарядовые корреляции, обменное взаимодействие (J), а также одночастичный (t_p) и двухчастичный переносы (t_b). Каждый из параметров модельного гамильтониана сложным образом влияет на вид фазовых диаграмм, что делает обратную задачу по точному подбору параметров чрезвычайно ресурсоемкой.

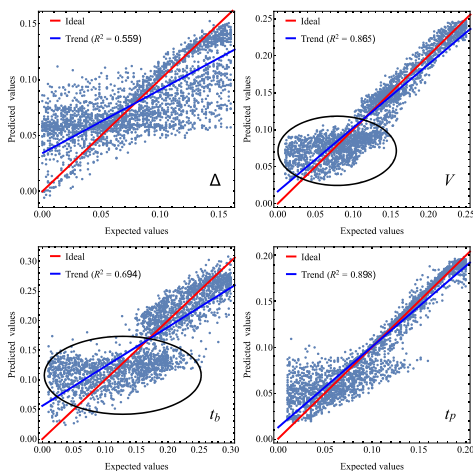


Рис. 1. Корреляционные диаграммы рассеяния между предсказанными и истинными значениями для каждого параметра

ней - основной тренд в соответствии с коэффициентом детерминации R^2 . Чёрным цветом обведены области отсутствия корреляции между предсказанными и истинными значениями параметров. В ходе работы было показано, что использование нейронных сетей такой архитектуры позволяет с хорошей точностью предсказывать значения параметров гамильтониана, а также находить области параметрической нечувствительности фазовых диаграмм.

В этой работе мы предлагаем подход на основе машинного обучения, позволяющий предсказывать параметры гамильтониана модельного купрата по его фазовой диаграмме. Методами среднего поля и Монте-Карло были получены фазовые диаграммы в переменных температура–плотность заряда, которые в дальнейшем использовались в качестве обучающего набора данных. Нами было проведено сравнительное исследование архитектур VGG, ResNet и U-Net [3] и на основе последней реализован оригинальный вариант архитектуры нейронной сети с двухэтапной схемой обучения.

Для оценки корреляции между предсказанными и истинными значениями параметров были построены корреляционные диаграммы рассеяния (Рис. 1). Красной линией изображено наилучшее соответствие, синей - основной тренд в соответствии с коэффициентом детерминации R^2 .

1. Moskvina A., Panov Y. Condensed Matter **6**, 24 (2021)
2. Panov Y. D., Physics of Metals and Metallography **120**, 1276 (2019)
3. Ronneberger O. et. al., MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, 234 (2015).



SPIN-ORBIT EFFECTS INDUCED BY CURRENT IN MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS

*Н.Х. Усеинов**

Институт физики, Казанский федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: nuseinov@mail.ru

Исследование влияния спин-орбитального взаимодействия (СОВ), которое изменяет импульс и направление спина электрона, на спиновую проводимость гетероструктур привело к возникновению новой области физики, известной как спин-орбитроника [1, 2]. Особый интерес СОВ представляет в магнитных металлических и полупроводниковых системах благодаря своей ключевой роли во взаимном преобразовании спиновых и зарядовых токов. В низкоразмерных многослойных структурах эффекты СОВ, известные как эффекты Рашбы и Дрессельхауза, возникают вследствие нарушения структурной инверсионной симметрии как в объёме материала, так и на границах раздела, а также под действием приложенного электрического поля.

В работе исследуется влияние спин-орбитального момента, индуцированного эффектами Рашбы и Дрессельхауза, на магнитные свойства, проводимость и туннельное анизотропное магнитосопротивление (ТАМС) в магнитных туннельных контактах (МТК). Исследование сосредоточено на гетероструктуре типа «ферромагнитный металл / диэлектрический барьер / ферромагнитный металл» (ФМ/ДБ/ФМ) с одним барьером. В такой структуре направления намагниченности ферромагнитных слоёв могут находиться как в параллельной, так и в антипараллельной конфигурациях, а также поворачиваться относительно заданной кристаллографической оси.

Обычное туннельное магнитосопротивление (ТМС) определяется как разность проводимостей МТК в параллельной и антипараллельной конфигурациях намагниченности электродов. В рамках предложенной теоретической модели влияние эффектов Рашбы и Дрессельхауза, зависящее от ориентации намагниченности в ФМ, приводит к различию вероятностей туннелирования и отражения электронов с различными спиновыми ориентациями на границах раздела ФМ/ДБ. Это, в свою очередь, вызывает анизотропию локальной плотности состояний на поверхности Ферми и, как следствие, наблюдаемые эффекты в ТАМС. В работе представлены модельные расчёты для туннельных контактов Fe/ δ -барьер/Fe и Fe/MgO/Fe.

Полученные аналитические выражения и результаты численного моделирования описывают основные физические наблюдаемые величины с учётом спин-орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза. В частности, представлены зависимости спин-поляризованной проводимости, туннельного тока и ТАМС от величины приложенного напряжения. Кроме того, проанализированы угловые зависимости ТАМС и анизотропия коэффициентов прохождения электронов МТК при одновременном учёте как эффекта Рашбы, так и эффекта Дрессельхауза. Для расчёта спин-поляризованной проводимости в работе использовался формализм квазиклассических функций Грина и квантово-механический вывод коэффициентов прохождения электронов проводимости через МТК. Используемые теоретические представления и методы расчёта можно найти в работе [3]. Эти методы позволяют самосогласованно учитывать, как интерфейсные эффекты СОВ, так и эффекты, индуцированные током смещения, в рамках реалистичных зонных структур. Расчёты показывают, что угловая зависимость ТАМС существенно усиливается при учёте эффектов Рашбы и Дрессельхауза – практически на порядок. Данное усиление сохраняется даже в условиях умеренного обменного расщепления спиновых подзон, что указывает на перспективность использования подобных МТК для создания высокоэффективных спинтронных устройств.

1. Manchon A., Železný J., et al., Rev. Mod. Phys. **91**, 035004 (2019).
2. Fert A., Ramesh R., et al., Rev. Mod. Phys. **96**, 015005 (2024).
3. Useinov N., Zaitsev N., Tagirov L., Magn. Reson. Solids. EJ **26**, 24112 (2024).



ON CLASSICAL REWRITING OF CSS-PRESERVING STABILIZER CIRCUITS

V.I. Yashin^{1,2,}, E.O. Kiktenko^{2,3,1}, V.V. Yatsulevich⁴, A.K. Fedorov^{2,3}*

¹Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

²Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow 143025, Russia

³National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia

*E-mail: yashin.vi@mi-ras.ru

Simulation of stabilizer circuits is a well-studied problem in quantum information processing, with a number of highly optimized algorithms available. Yet, we argue that further improvements can arise from the theoretical structure of stabilizer operations themselves.

We focus on the subclass of stabilizer circuits composed of Calderbank-Shor-Steane (CSS)-preserving stabilizer operations [1], which naturally appear in fault-tolerant computations over CSS stabilizer codes. Using elementary circuit transformation techniques, we show that such circuits can be exactly rewritten as classical probabilistic circuits that reproduce measurement statistics [2]. This rewriting introduces no computational overhead, in contrast to the general case of stabilizer circuits.

To clarify the origin of this simplification, we introduce the standard quadratic form representation of general stabilizer operations (Clifford channels). It provides an efficient way to describe compositions of stabilizer operations and thus to simulate stabilizer circuits. CSS-preserving operations correspond to purely linear forms, which under a Walsh-Hadamard-Fourier transform yield a noncontextual hidden variable model, providing an alternative proof of the introduced rewriting.

Finally, we develop a theory of reference frames for multiqubit systems, where frames are encoded by quadratic forms [3]. This allows us to express stabilizer operations as probabilistic maps for proper reference frames. Non-CSS-preserving stabilizer circuits require dynamical modifications of reference frames, embodying a contextuality resource that leads to the computational overhead. This framework provides a new perspective on simulating stabilizer and near-stabilizer circuits within dynamically evolving quasiprobability models.

1. Delfosse N. et al., Phys. Rev. X **5**, 021003 (2015).

2. Johansson N. and Larsson J.Å., Quant. Inf. Process. **16**, 233 (2017).

3. Park G., Kwon H. and Jeong H., Phys. Rev. Lett. **133**, 220601 (2024).

4. Yashin V.I. et al., arXiv:2511.05478.



PREDICTING HAMILTONIAN PARAMETERS FROM PHASE DIAGRAMS USING MACHINE LEARNING

D.N. Yasinskaya^{1}, V.A. Ulitko¹, A.A. Koshelev¹, Y.D. Panov¹*

Ural Federal University named after first President Russia of B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: daria.iasinskaia@urfu.ru

Modern microscopic models for complex materials with nontrivial properties are typically multi-parametric, making the direct computation of their phase diagrams computationally expensive. This problem becomes particularly critical when solving the inverse problem: determining the model parameters that best reproduce an experimentally observed effect or a phase diagram. An example of such a multi-parameter system is the pseudospin model for high-temperature superconducting cuprates, proposed in [1, 2]. The Hamiltonian includes local and non-local density-density correlations, the Heisenberg exchange interaction, three types of correlated single-particle transport, two-particle transport and the chemical potential. For this model, we derived equations for the critical temperatures of various ordered phases within the mean-field approximation [3] and constructed temperature-density phase diagrams. For numerical modeling, we use the heat bath Monte Carlo algorithm [4], which allows for a more accurate treatment of temperature fluctuations and to identify existence of phase separation.

Each parameter of the model Hamiltonian influences the resulting phase diagrams in a complex and highly sensitive manner. This complexity makes the inverse problem of precisely tuning parameters to reproduce experimental results an extremely resource-intensive task. In this regard, it is feasible to explore the possibility of applying machine learning to reduce the required number of phase diagram calculations.

We present the adaptation of U-Net architecture [5] for regression tasks. This model was trained on a large dataset of mean-field approximation phase diagrams and subsequently validated on data generated using a heat bath Monte Carlo algorithm. We demonstrate that the model accurately predicts all considered Hamiltonian parameters, and regions of lower prediction accuracy correspond to regions of parametric insensitivity in the phase diagrams. This allows for the identification of physically significant patterns and the assessment of parameter importance for the system.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project 24-21-20147.

1. Moskvin A. S., Phys. Rev. B **84**, 075116 (2011).
2. Moskvin A., Panov Y., J. Magn. Magn. Mat. **550**, 169004 (2022).
3. Moskvin A., Panov Y., Cond. Mat. **6**, 24 (2021).
4. Miyatake Y., Yamamoto M., Kim J., Toyonaga M., Nagai O., J. Phys. C: Sol. St. Phys. **19**, 2539 (1986).
5. Ronneberger O., Fischer P., Brox T., International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention **492**, 234 (2015).

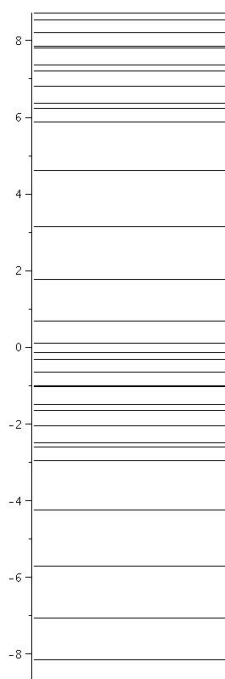


ELECTRONIC STRUCTURE AND OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF Au₇₂ GOLD FULLERENE

Г.И. Миронов*, Д.В. Юмаков

Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия

*E-mail: daniilyumakov@mail.ru



Металлические кластеры и фуллерены привлекают внимание физиков, химиков, материаловедов своими необычными электронными и оптическими свойствами, которые можно использовать в практических целях. Значительный интерес вызвали исследования [1, 2], в которых были рассмотрены физико-химические свойства золотых нанокластеров, особенно полых структур, демонстрирующих уникальную каталитическую активность. Целью настоящей работы является теоретическое исследование икосаэдрального ароматического золотого фуллерена из 72 атомов как сильнокоррелированной d – электронной системы в рамках модели Хаббарда [3]. Гамильтониан Хаббарда в случае золотого фуллерена Au₇₂ имеет вид:

$$\hat{H} = \varepsilon \sum_{\sigma, f=1}^{72} \hat{n}_{f\sigma} + B \sum_{\sigma, f \neq f'}^{72} a_{f\sigma}^+ a_{f'\sigma} + a_{f'\sigma}^+ a_{f\sigma} + U \sum_{f=1}^{72} \hat{n}_{f\uparrow} \hat{n}_{f\downarrow},$$

где $a_{f\sigma}^+, a_{f\sigma}$ – ферми-операторы рождения и уничтожения d -электронов на узле с проекцией спина σ ($\sigma = \uparrow, \downarrow$), $\hat{n}_{f\sigma} = a_{f\sigma}^+ a_{f\sigma}$ – оператор числа d - электронов, ε – собственная энергия d -электрона, U – энергия кулоновского отталкивания двух d -электронов с противоположно ориентированными проекциями спинов на одной орбитали атома золота, B – интеграл переноса d -электрона между соседними узлами.

Получены уравнения движения для операторов, характеризующих основные свойства системы d - электронов, эти уравнения решены в приближении статических флуктуаций [4], получены выражения для фурье-образов антикоммутирующих функций Грина, проведен анализ функций Грина. Для примера приведен энергетический спектр, который представлен на рис. 1 для атома в центре гексагона, он состоит из двух хаббардовских подзон, состоящих из 20 уровней энергии. В основном состоянии, когда на 72 узла фуллерена приходятся 72 d -электрона, нижняя подзона полностью заполнена, а верхняя – пуста. Каждая подзона имеет ширину 8,614 эВ, между ними узкая энергетическая щель шириной 0,236 эВ, фуллерен Au₇₂ ведёт себя как узкощелевой полупроводник. Проведено сравнение полученных результатов, с результатами ранее опубликованных работ, например, в работе [5] фуллерен Au₇₂ был исследован методом теории функционала плотности с функционалом BP86, зона запрещённых энергий оказалась равной 0,72 эВ, приведено объяснение различия результатов по вычислению энергетической щели. Показано, как можно использовать полученные в работе результаты для практических целей в физике, химии, медицине.

1. Manzoor D., Dar M.S., Sci. Eng. Appl. **2**, 156 (2017).
2. Haruta M., Kobayashi T., Sano H. et al., Chem. Lett. **10**, 405 (1987).
3. J. Hubbard, Proc. R. Soc. A **276**, 1365, 238 (1963).
4. Миронов Г. И., ФММ **104**, 610 (2008).
5. Antti J., Karttunen, Mikko L., et. al., Chem. Comm. **4**, 466 (2008).



SUPERCONDUCTING PHOTOCURRENTS INDUCED BY STRUCTURED ELECTROMAGNETIC RADIATION

О.Б. Зуев^{1*}, М.В. Коваленко¹, А.С. Мельников^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия ²Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: zuev.ob@phystech.edu

Современные исследования в области структурированных световых пучков, таких как пучки Лагерра-Гаусса и Бесселя, значительно расширили возможности изучения взаимодействия света с веществом. Эти пучки характеризуются пространственно изменяемыми параметрами, включая поляризацию, интенсивность и фазу, что открывает новые перспективы для изучения световых явлений в сложных электромагнитных полях [1]. Нелинейные эффекты взаимодействия света с веществом, включая фотогальванические эффекты, представляют особый интерес. Они находят практическое применение в создании устройств для оптической связи и обработки данных благодаря использованию орбитального углового момента света. Квадратичная электромагнитная реакция материалов, возникающая при взаимодействии с такими пучками, приводит к появлению четных гармоник, включая нулевую и вторую. Два ключевых явления, проявляющихся в этом контексте, это AC Hall эффект и photon drag [2]. AC Hall эффект характеризуется генерацией поперечного тока в сверхпроводниках под воздействием переменного электромагнитного поля. Этот эффект приводит к появлению токов второй гармоники. Photon drag связан с передачей импульса фотонов сверхпроводящему конденсату, что вызывает генерацию постоянного тока. Оба явления зависят от интенсивности падающей волны и асимметрии электрон-дырочного спектра. Сверхпроводники являются уникальной платформой для изучения этих эффектов, благодаря такому свойству, как бездиссипативные токи. Для вычисления этих фотоиндуцированных токов используется формализм нестационарной теории Гинзбурга-Ландау (TDGL), который позволяет изучать динамику взаимодействия сверхпроводников с внешними электромагнитными полями.

$$-\Gamma(\hbar\partial_t - 2ie\varphi)\Delta = -aT_c\epsilon\Delta + b|\Delta|^2\Delta + aT_c\xi_0^2\left(-\nabla + \frac{2\pi}{\Phi_0}\mathbf{A}\right)^2\Delta,$$

где $\Gamma = (\frac{\pi a}{8} + i\gamma)$. Мнимая часть константы релаксации пропорциональна асимметрии электрон-дырочного спектра.

В настоящей работе (опубликованной в [3]) мы разработали феноменологическую теорию, описывающую взаимодействие сверхпроводящего конденсата с бесселевским пучком закрученного света, характеризующимся ненулевым орбитальным моментом импульса m . Исходя из нестационарной теории Гинзбурга-Ландау с комплексной константой релаксации, мы рассчитываем пространственные профили стационарных (dc) фотоиндуцированных токов и магнитных полей, а также отклик на второй гармонике. Показано, что фотоиндуцированные токи и магнитные поля определяются как поляризацией света, так и его орбитальным моментом импульса m . Фотоиндуцированный (dc) ток имеет вклады различной природы: обратный эффект Фарадея, эффект поглощения фотона (photon drag), пондеромоторная сила, эти вклады различную чётность по орбитальному угловому моменту m . Вклад за счёт обратного эффекта Фарадея является чётным по m . Анализируя геометрии сверхпроводящего полупространства и тонкой плёнки, мы обсуждаем возможные эксперименты, позволяющие измерять сверхпроводящие фототоки и связанные с ними магнитные поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-12-00042.

1. A.A. Gunyaga, M.V. Durnev, and S.A. Tarasenko, Phys. Rev. B **108**, 115402, (2023).
2. S.V. Mironov, A.S. Mel'nikov, and A.I. Buzdin, Phys. Rev. Lett. **132**, 096001, (2024).
3. O.B. Zuev, M.V. Kovalenko, and A.S. Mel'nikov, Phys. Rev. B **112**, 144503, (2025).

AUTHOR INDEX

Lychkovskiy O.V., 56

Anisimov V.I., 41
 Annenkov D.S., 11
 Arefyeva N.S., 58
 Aristov D.N., 44
 Asriyan A.N., 27

Babaian R.G., 48
 Bakurskiy S.V., 34
 Bakursky S.V., 57
 Bantysh B.I., 67
 Belozеров A.S., 41
 Blundell S.J., 43
 Bondarenko V.I., 14
 Borisenko A.S., 67
 Brazhkin V.V., 18
 Buzdin A.I., 39

Cistaro G., 35

Dedov G.S., 53
 Dedov I.S., 26
 Dudarev A.V., 54
 Dudinets I.V., 55, 56

Elistratova A.A., 57
 Elistratov A.A., 27, 40
 Ershov G.A., 58

Fedorov A.K., 55, 56, 100
 Fennell T., 43
 Fominykh B.M., 60

Gavensky L.P., 37
 Giblin S.R., 43
 Gimazov I.I., 14
 Glazov M.M., 10
 Goldman N., 37
 Goremykin I.A., 30
 Grigorev P.D., 14
 Gubochkin G.I., 57
 Guratinder K., 43

Irkhin V., 89

Johnson R.D., 43

Katanin A.A., 26, 30, 41
 Kavokin A.V., 27
 Kesharpu K.K., 31, 62
 Kiktenko E., 74
 Kiktenko E.O., 67, 100
 Kim J., 55
 Kinzibaev R.I., 65
 Klenov N.V., 34, 57
 Kocharovskiy V.I., 94
 Konyshchev D.A., 33
 Kopasov A.A., 11, 66
 Korliakov D.K., 67
 Koshelev A.A., 101
 Kovaleva P.P., 70
 Kuchinskii E.Z., 48
 Kudlis A., 39

Lang F., 43
 Lebedeva A.E., 71
 Lebedev A.V., 40
 Leonov I.V., 9, 73
 Levakhova A.Yu., 14
 Lyakhova Ya.S., 72, 83, 92
 López-Saldívar J.A., 74

Makarova P.O., 73
 Maksimovskaya A.A., 34
 Maksimov P.A., 62
 Man'ko V.I., 55
 Mantsevich V.N., 10
 Marchenkova E.B., 60
 Marchenkov V.V., 60
 Mardanova A., 74
 Mazurenko V.V., 33, 82
 Mel'nikov A.S., 39, 65
 Melkozerov A.A., 78
 Mel'nikov A.S., 11, 66
 Mineev V.P., 12
 Mingazhitdinov E.I., 80
 Mironov S.V., 66

Naumov S.V., 60
 Nekrasov I.A., 14



Nikolaev S.V., 54

Okatev V.S., 82
Onuchin S.S., 83
Ovcharov A.V., 14
Ovchinnikov S.G., 13

Panov Y.D., 85, 101
Pavlov N.S., 14
Pchelkina Z., 89
Perevalova A.N., 60
Pervakov K.S., 14
Picon A., 35
Plyashechnik A.S., 40
Polyakov E.A., 58
Poteryaev A.I., 70
Poteryaev A., 89
Prabhakaran D., 43
Pudalov V.M., 14
Putilov A.V., 39

Quintela M., 35

Ramos T., 55
Remizov S.V., 40
Rubtsov A.N., 53
Rubtsov A.N., 83, 92
Ruzhickiy V.I., 34

Sadakov A.V., 14
Saygin M.Yu., 78
Sa M., 35
Schegolev A.E., 34
Schmalzl K., 43
Semenov S., 74
Shishkin A.G., 57
Shneyder E.I., 54
Silakov L.D., 92
Siurakshina L.A., 42
Skornyakov S.L., 41, 96
Soloviev I.I., 34
Sotnikov O.M., 82
Stepanov A., 60
Stepanov E.A., 26
Stock C., 43
Stolyarov V.S., 57
Straupe S.S., 56, 78
Streltsov S.V., 70
Streltsov S., 89
Streltsov S.V., 15, 43, 71, 95
Syurakshin A., 93

Talanov Yu.I., 14
Taran L.S., 43, 71
Tarasov S.V., 94
Taylor R.A., 43

Temnikov F.V., 95
Tikhonova O.V., 80
Timofeev V.E., 44
Trifonov I.O., 96

Ulitko V.A., 101

Vasiliev A.L., 14
Vlasenko V.A., 14

Williams T.J., 43

Yashin V.I., 100
Yasinskaya D.N., 101
Yatsulevich V.V., 100
Yushankhai V., 46

Zakharov D.V., 39
Zalivako I.V., 67
Zaripov R.B., 14
Zheleznyakova D.E., 14
Zyuzin V.A., 16

Альтшулер Б.Л., 50
Арбузов Д.А., 38
Аристов Д.Н., 19, 25
Аристов Д.Н., 79
Бабухин Д.В., 49
Байдак С.Т., 24
Барабанов А.Ф., 36
Барамыгина Ю.В., 25
Баховадинов М.С., 50
Бострем И.Г., 21
Бычков И.В., 32
Валиулин В.Э., 36
Васин М.Г., 45
Воронова Н.С., 77
Гарифуллин И.А., 38
Гарифьянов Н.Н., 38
Григорьев П.Д., 97
Джалолов Ф.Н., 50
Елистратов А.А., 45, 87
Еналдиев В.В., 88
Ерагер К.Р., 75
Загороднев И.В., 88
Зуев О.Б., 103
Ирхин В.Ю., 91
Камашев А.А., 38
Качоровский В.Ю., 19
Коваленко М.В., 68, 103
Коледов В.В., 32
Кошелев А.А., 98
Крайнов И.В., 19
Кузнецов А.С., 75
Кузьмин Д.А., 32
Курбаков И.Л., 77



Л.Э. Гончарь, 61
Лебедев А.В., 87
Лукоянов А.В., 24
Лукоянов А.В., 51, 91
Ляхов А.Д., 21
Максимов Т.В., 77
Малахов М.А., 35
Маркин А.А., 91
Марков А.А., 37
Марченков В.В., 91
Марченкова Е.Б., 91
Матвеев И.А., 76
Матюнина М.В., 32
Маширов А.В., 75
Мельников А.С., 68, 103
Миронов Г.И., 76, 102
Михеева А.А., 79
Михеенков А.В., 36
Мякотников Д.А., 81
Насчётникова И.А., 86
Неверов В.Н., 91
Никишин А.М., 37
Ниязов Р.А., 19
Овчинников А.С., 21
Орлов В.А., 84
Панов Ю.Д., 98
Петрик М.В., 86
Пляшечник А.С., 87
Погосов В.В., 49
Понкратова Д.В., 88
Просняк С.Д., 90
Прошин Ю.Н., 38
Разумов И.К., 86
Ремизов А.С., 87
Ремизов С.В., 45
Рогозкин Д.Б., 59
Родионов Я.М., 97
Рыльцев Р.Е., 64
Савченков П.С., 36
Семянникова А.А., 91
Синицын Вл.Е., 21
Скрипников Л.В., 90
Соколовский В.В., 75
Стегайлов В.В., 22, 29
Стрельцов С.В., 81
Строев А.Ю., 86
Туманов В.А., 38
Улитко В.А., 98
Усеинов Н.Х., 99
Флегонтов А.О., 59
Фоминых Н.А., 22, 29
Фонгратовски С.В., 32
Хазиева Е.О., 64
Хашаев Р.М., 63
Цветкова А.В., 97

Чернов Е.Д., 51, 91
Чуков В.Н., 52
Шляпников Г.В., 50
Шредер Е.И., 91
Юмаков Д.В., 102
Ясинская Д.Н., 98

**XLI INTERNATIONAL
WINTER SCHOOL
IN THEORETICAL PHYSICS**

Kowhar ka

FEBRUARY 1-6, 2026

Ski resort “Sunny Valley”

BOOK OF ABSTRACT

Electronic publication

Layout – *P.A. Zayats*

Responsible for the release – *S.V. Streltsov, A.N. Rubtsov*