

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.28.1998>

“РІЗДВЯНІ ДИСКУСІЇ 2023”,
ПРИСВЯЧЕНІ 70-РІЧЧЮ ФІЗИЧНОГО ФАКУЛЬТЕТУ
(Львів, 27–29 грудня 2023 року)

“CHRISTMAS DISCUSSIONS 2023”
DEDICATED TO THE 70th ANNIVERSARY OF THE FACULTY OF PHYSICS
(Lviv, December 27–29, 2023)

27–29 грудня 2023 року на кафедрі теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука та фізичному факультеті Львівського національного університету імені Івана Франка відбувалися 27-і Різдвяні наукові дискусії, присвячені 70-річчю фізичного факультету. Традиційно предметом обговорення були проблеми квантової механіки, фазових переходів, статистичної фізики, астрофізики, космології, теорії складних систем, фізики твердого тіла, математики та історії науки. Усі доповіді викликали зацікавлення аудиторії та спричинили активні дискусії. Нижче подаємо анотації виголошених доповідей.

THE FATE OF ERNST ISING AND THE FATE OF HIS MODEL: A HUNDRED YEARS ON

Yurij Holovatch^{1,2,3}

¹Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv,

²^L⁴ Collaboration & Doctoral College for the Statistical Physics of Complex Systems,
Leipzig–Lorraine–Lviv–Coventry

³Centre for Fluid and Complex Systems, Coventry University, United Kingdom

⁴Complexity Science Hub Vienna, Vienna, Austria

The talk is based on an ongoing project that aims to prepare a bilingual, commented edition of Ernst Ising’s doctoral thesis [1]. This project emerged through collaborations enabled by the Ising lectures [2], a workshop that started in Lviv in 1997 with ‘traditional’ statistical physics and has recently broadened its scope to encompass a more general context of complex systems [3]. Gradually, the workshop gave rise to various research projects centered around the Ising model and its history [4–6]; some collected historical documents and memoirs are displayed publicly with permission of Ernst Ising’s family at <http://www.icmp.lviv.ua/ising>.

The model suggested by Wilhelm Lenz for ferromagnetism in 1920 was formulated and solved in one dimension by his doctoral student Ernst Ising in 1924. That work of Lenz and Ising marked the start of a scientific direction that delivered extraordinary successes in explaining collective behavior in a vast variety of systems, both within and beyond natural sciences. Some of the milestones in this direction will be a subject of this talk.

Another goal of the talk is to present a personal story of Ernst Ising, who had to struggle to survive during the years of the Nazi regime. The story of his fate stirs special feelings today, when its background is repeated by an (academic) community supporting a dictator, and supporting aggression — in this case the Russian aggression against Ukraine.

[1] B. Berche, R. Folk, Yu. Holovatch, R. Kenna, *in preparation*

[2] *Ising lectures in Lviv (1997–2017)*, edited by M. Krasnytska, R. de Regt, P. Sarkanych (Lviv, ICMP, 2017).

[3] Yu. Holovatch, R. Kenna, S. Thurner, *Eur. Journ. Phys.* **38**, 023002 (2017).

[4] T. Ising, R. Folk, R. Kenna, B. Berche, Yu. Holovatch, *Journ. Phys. Stud.* **21**, 4001 (2017).

[5] R. Folk, Yu. Holovatch, *Eur. J. Phys. H* **47**, 9 (2022).

[6] R. Folk, in: *Order, Disorder and Criticality. Advanced Problems of Phase Transition Theory. Vol. 7*, Yu. Holovatch (editor) (World Scientific, Singapore, 2023), pp. 1–77.

INVARIANT IDEMPOTENT *-MEASURES FOR ITERATED FUNCTION SYSTEMS

N. Mazurenko¹, Kh. Sukhorukova², M. Zarichnyi²

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian University, Ivano-Frankivsk

²Ivan Franko National University of Lviv

A triangular norm (t-norm) is a continuous, associative, commutative and monotonic operation on the unit segment $[0,1]$ for which 1 is a unit. Every t-norm $*$ determines the notion of idempotent $*$ -measure, i.e., a functional on the spaces of continuous functions on a space that preserves constant, maxima, and is $*$ -homogeneous [1].

In [2] the invariant idempotent measures for iterated function systems are defined and the existence and uniqueness theorem for such measures is proved. The proof is based on functional representation of measures. In [3] the authors proved the existence and uniqueness of invariant idempotent measures by using Zaitov's metric [4] as well as modified Bazylevych–Repovš–Zarichnyi metric on the space of idempotent measures [5] and applying the Banach contraction principle.

In the talk, we provide a simple proof of existence and uniqueness of invariant idempotent measures that works also for the $*$ -idempotent measures.

[1] Kh. Sukhorukova, *Matem. Studii* **59**, 215 (2023).

[2] N. Mazurenko, M. Zarichnyi, *Carpathian Math. Publ.* **10**, 172 (2018).

[3] R. D. da Cunha, E. R. Oliveira, F. Strobil, *J. Fixed Point Theory Appl.* **25**, 8 (2023).

[4] A. A. Zaitov, *Appl. Gen. Topol.* **21**, 35 (2020).

[5] L. Bazylevych, D. Repovš, M. Zarichnyi, *Topology Appl.* **157**, 135 (2010).

APPLICATION OF A QUANTUM WAVE IMPEDANCE APPROACH FOR 1D INFINITE PERIODIC MEDIA

Orest Hryhorchak

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,

Ivan Franko Lviv National University of Lviv

Orest.Hryhorchak@lnu.edu.ua

Our objective is to demonstrate the applicability of a quantum wave impedance approach in describing periodic structures, commonly used as models for crystals. To solve a quantum-mechanical problem of an electron which is subjected to a periodic potential caused by positive ions even in the case of omitting an electron–electron interaction is feasible only for specific forms of such potentials. Therefore, developing an effective approach for investigating models with periodic potentials is crucial for practical applications.

The approach we used involves reformulating the Bloch–Floquet theorem in terms of a quantum wave impedance. By doing so, we derive an expression for a quantum wave impedance function in the presence of a periodic potential. The resulting formula, when combined with matching conditions for the quantum wave impedance function, facilitates a more straightforward derivation of dispersion relations for quantum mechanical infinite periodic systems. To illustrate our methodology, we apply it to two specific models: the infinite Dirac comb model and the Kronig–Penney model. Using these examples, we demonstrate the effectiveness of our approach in describing the behavior of non-interacting electrons in one-dimensional periodic media.

МОДЕЛЬ ІЗИНҐА В СТАТИСТИЦІ РЕНІ

В. В. Ігнатюк, А. П. Моїна

Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів

Досліджено термодинамічні характеристики одновимірної моделі Ізинґа в статистиці Рені. На відміну від традиційного підходу [1–3], коли система є в наперед визначеному фіксованому оточенні скінченного розміру, ми розглядаємо як резервуар певну частину самої досліджуваної системи. Наклавши умови, щоб внутрішня енергія ланцюжка спінів у статистиці Рені U_R дорівнювала внутрішній енергії в мікромеханічному ансамблі U_{micro} , а “фізично спостережувана” [2] температура T_R збігалася з температурою T_{micro} , ми отримуємо систему трансцендентних рівнянь для визначення параметра Рені q та множника Лаґранжа T , пов’язаного з температурою системи. Параметри q^* та T^* , як розв’язки цієї системи рівнянь, знаходимо за умови максимуму ентропії Рені S_R .

Загалом ці параметри є функціями довжини ланцюжка L та кількості пар різнонапрямлених спінів M , яка за фіксованого розміру всієї системи N визначає її температуру T_{micro} . Показано, що обидва параметри мають стрибок за збільшеного розміру ланцюжка, після чого ентропія S_R стає неадитивною функцією L . Є підстави вважати, що цей стрибок визначає ентропійний фазовий перехід, який за значень $\varepsilon = 1 - q \ll 1$ добре вивчений [1]. Однак, на відміну від традиційної термостатистики Рені [3], ми можемо описувати поведінку системи в усій ділянці значень параметра q : від $q \rightarrow 1$, що відповідає канонічному розподілу Гіббса, до $q \rightarrow 0$, що відповідає мікроканонічному розподілу.

Окремо розглянуто можливість відтворення температурної залежності $U_R(T_R)$, максимально наближеної до $U_{\text{micro}}(T_{\text{micro}})$, коли вибирається та фіксується лише одна пара розв'язків (q^*, T^*) . Результати обчислень показують, що надійне відтворення можливе лише в ділянці $L < L_{\text{cr}}$, коли ще зберігається адитивна поведінка ентропії.

-
- [1] A. G. Bashkurov, in: *Chaos, Nonlinearity, Complexity: The Dynamical Paradigm of Nature* (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006), pp. 114–161.
 [2] E. Ruthotto, preprint arXiv:cond-mat/0310413v1 (2003).
 [3] A. S. Parvan, T. S. Biró, Phys. Lett. **374**, 1951 (2010).

ОБЕРТОВА ДИНАМІКА ДИПОЛЬНИХ ЧАСТИНОК В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ З УРАХУВАННЯМ РЕАКЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

А. Дувіряк

Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів

На основі умови балансу моменту імпульсу сформульовано рівняння руху дипольної композитної частинки як твердого тіла в електростатичному полі з урахуванням крутного моменту реакції випромінювання. Вищі похідні в правій частині редуковано за допомогою незбурених рівнянь Ойлера та їхніх диференціальних наслідків. Для частинки з аксіально-симетричним еліпсоїдом інерції рівняння руху лінеаризовано в околі нерухомих точок, проаналізовано стійкість системи та її характеристичні частоти. Показано, що частинка зі швидким власним обертанням може перейти в режим “сплячої” дзиги. Якщо ж композитну частинку розглядати як гантель з протилежними зарядами на кінцях або, загальніше, як поляризований тонкий стрижень, то система зводиться до збуреного сферичного маятника. Таку модель аналізуємо методом усереднення нелінійної динаміки. Показано, що для швидкого обертання дзиги характерне степеневе сповільнення, яке асимптотично переходить в експоненційне загасання коливань диполя навколо напрямку його рівноваги (тобто зовнішнього поля). Як приклади розглянуто композитні частинки з великим перманентним дипольним моментом, як-от: целюлозні нанокристали та DAST-нанокристали. Оцінено ефективність стабілізації таких частинок у зовнішньому полі.

ЗАПЛУТАНІСТЬ СПІНУ $S = 1$ З ІНШИМИ СПІНАМИ В ГРАФОВОМУ СТАНІ ДЛЯ РІЗНИХ ПОЧАТКОВИХ СТАНІВ СПІНІВ

Ростислав Колесник

Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука,
Львівський національний університет імені Івана Франка

Знайдено заплутаності спіну $S = 1$ з іншими спінами в графовому стані з урахуванням його ступеня вузла. Заплутаності знайшли, використовуючи ентропію фон Неймана для ступенів вузла $k = 1, 2, 3$. Ступінь вузла $k = 1$ ми утворюємо за допомогою оператора еволюції $U_{12} = e^{i\alpha S_1^z S_2^z}$, поділявши ним на початковий стан $|\psi_0\rangle = |000 \dots 0\rangle$. Ступені вузла вищого порядку утворюємо добутком подібних операторів еволюції. Оскільки такі оператори еволюції комутують між собою, то ми можемо впливати??? ними на початковий стан $|\psi_0\rangle$ довільно. Виявлено, що матриця густини для досліджуваного спіну в графовому стані завжди зводиться до однакової форми. Побудовано залежність заплутаності від параметра еволюції для кожного ступеня вузла. Знайдено середню заплутаність для всіх ступенів вузла та побудовано залежність середньої заплутаності від ступеня вузла. Аналогічні обчислення були проведені також для випадку, коли досліджуваний l -тий спін є в стані $|1\rangle$, тобто початковий стан усіх спінів задається наступною хвильовою функцією: $|\psi_0\rangle = |000 \dots 1 \dots 0\rangle$.

PHASES OF BOSE-FERMI MIXTURES IN $4 - \epsilon$ DIMENSION

V. Pastukhov

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,
Ivan Franko Lviv National University of Lviv

We discuss universal properties of strongly interacting mixtures of bosons and spin-polarized fermions in the dimension close to $d = 4$. In four dimensions precisely, the system exhibits a stable phase comprising dimers composed of one bosonic and one fermionic atom, as well as nondimerized fermions. At some critical density of bosons, the BEC transition emerges, signaling an instability of the mixed state. A small ϵ completely changes the phase diagram of the system enriching it with various p -wave fermionic superfluids. A further increase in bosonic density leads to the formation of a three-component mixture with the fermions, dimers and trimers involved.

DETAILED PHOTOIONIZATION MODELING OF THE NEBULAR ENVIRONMENT IN DWARF GALAXIES

B. Melekh, O. Buhajenko, I. Koshmak

Department for Astrophysics, Ivan Franko National University of Lviv

Photoionization modeling allows us to determine the ionization structure of nebular plasmas surrounding the central active star formation region in a dwarf galaxy. Such modeling is based on spatial distributions of gas density, chemical abundances, and temperature in the superwind region provided by chemo-dynamical simulations (ChDS) of such objects. We perform the multicomponent photoionization modeling (MPhM) of the ionized nebular gas with a detailed calculation of the diffuse ionizing radiation (DCDIR) transfer using 2-D ChDS result of a dwarf galaxy. To reproduce the relative intensity of important emission lines, a thin dense shell (TDS) was artificially added between the superwind region and the outer part of the nebular environment. Emissivities and opacities obtained in this way for emission lines and continuum are used in the following iterations to calculate the diffuse ionizing radiation fluxes in a detailed way with adaptive selection of integration steps.

After the convergence of the ionization structure (spatial distributions of gas density and temperature as well as ionization fractions of chemical elements and emissivities of important emission lines), the modeling ionization structure (IoS) was analyzed. It was concluded that the IoS of the nebular environment is quite different from the one calculated in the popular and fast OUTW approximation.

The so-called diagnostics T_e - and R_{23} -methods were used to derive the chemical abundance of oxygen based on MPhM+DCDIR emission lines obtained for a synthetic small central aperture as well as a long slit and tested for reproducing the oxygen abundance assumed in the model. Also, we tested the popular Kennicutt's estimator for star formation rate using the H_α MPhM+DCDIR luminosity.

STRUCTURAL FEATURES AT FORMATION OF STRETCHABLE ELECTRONICS SYSTEMS ON THE BASE LIQUID In-Ga-Sn AND MAGNETIC NANOPARTICLES

S. Mudry¹, I. Shtablavyi¹, M. Dudek², M. Marć², W. Wolak² A. Drzewiński²

¹Department for Physics of Metals, Ivan Franko National University of Lviv,

²Institute of Physics, University of Zielona Góra, Poland

Gallium-based alloys due to their low melting point attract the attention of researchers in various areas of industry, among which is also flexible electronics, revealing significant progress over recent years. In this work, we present the results of an investigation into the possibilities of using a liquid In-Ga-Sn alloy of ternary eutectic composition as a functional element for the creation of stretchable electronic systems containing magnetic nanoparticles. A few rows of nanoparticles, with nanoscale distances between them, were arranged on the surface of a thin polymer film, and the space between these rows was filled with liquid In-Ga-Sn. This system can be used as an active element in various devices, wherein the current in the metallic melt excites a spin wave in a row of magnetic nanoparticles. Creating the optimal thermodynamic and kinetic conditions for spin wave excitation and their passage is a very important problem. For this reason, in the initial stage, we investigated the structural changes that occur when magnetic nanoparticles are mixed with the In-Ga-Sn eutectic melt.

Based on X-ray diffraction data, it was shown that there are no significant changes in the structure of the molten alloy and nanoparticles. However, it should be noted that the size of the structural units (clusters) in the melt is slightly reduced due to contact with the nanoparticles. This effect is likely more pronounced at the boundaries between the melt and the nanoparticles. These features, as inferred from the XRD results, are also confirmed by electroconductivity and DSC measurements.

LOCAL STRUCTURE AND SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF COMPLEX LEAD SILICATE GLASS DOPED WITH Cu

*I. I. Kindrat*¹, *B. V. Padlyak*^{1,2}, *Y. O. Kulyk*³, *A. Drzewiecki*¹, *Y. S. Hordieiev*⁴,
*V. I. Goleus*⁴, *R. Lisiecki*⁵

¹Institute of Physics, University of Zielona Góra, Poland

²Vlokh Institute of Physical Optics, Lviv, Ukraine

³Faculty of Physics, Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine

⁴Department of Ceramics, Glass and Construction Materials, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

⁵Division of Optical Spectroscopy, Institute of Low Temperature and Structure Research of the PAS, Wrocław, Poland

The glass, with a base composition of 0.521PbO–0.371SiO₂–0.068ZnO–0.027K₂O–0.013BaO, doped with CuO (or PbSiZnKBaO:CuO) was obtained by using the standard melt quenching method. The glass was then characterized using various techniques, including XRD, EPR, IR transmission, optical absorption, and photoluminescence (emission and excitation spectra and decay kinetics) [1]. The glassy-like XRD pattern of the PbSiZnKBaO:CuO glass was analyzed in order to obtain the radial distribution function. The average interatomic distances and coordination numbers for SiO₄ and PbO_{*n*} (*n* = 4 – 6) structural units, as well as the Pb–Pb interatomic distances in the network of the studied glass, were determined. The observed characteristic axially-symmetric EPR spectrum of the Cu²⁺ (*3d*⁹, ²D_{5/2}) paramagnetic ions was adequately described by the spin Hamiltonian formalism. The IR transmission spectrum of the PbSiZnKBaO:CuO glass in the spectral range of 400–4000 cm⁻¹ was registered and analyzed.

The optical absorption spectrum shows a broad band with a maximum around 870 nm attributed to the ²B_{1g} → ²B_{2g} transition of Cu²⁺ ions. The fundamental absorption edge was analyzed to determine the optical band gap and the Urbach energy of the PbSiZnKBaO:CuO glass. Photoluminescence spectra (excitation and emission) and decay kinetics of the studied glass were registered and interpreted. The weak emission band observed in the blue spectral range, with a luminescence lifetime of 0.56 μs, is attributed to the *3d*⁹4*s*⁻¹ → *3d*¹⁰ transition of Cu⁺ (*3d*¹⁰, ¹S₀) ions. The intense broad emission band observed in the green spectral range, with very fast decay kinetics, was attributed to the intrinsic luminescence as a result of the band-to-band electron-hole recombination. The CIE chromaticity diagram for the Cu⁺ emission and intrinsic luminescence in the studied glass was constructed and discussed.

-
- [1] B. V. Padlyak, I. I. Kindrat, Y. O. Kulyk, Y. S. Hordieiev, V. I. Goleus, R. Lisiecki, *Mater. Res. Bull.* **158**, 112071 (2023).

LONG-WAVELENGTH PROTEIN CRYSTALLOGRAPHY AT DIAMOND LIGHT SOURCE

V. B. Mykhaylyk

Diamond Light Source, Harwell Campus, Didcot, UK

The long wavelength I23 beamline at Diamond Light Source stands out as an exceptional facility designed for advancing the resolution of crystallographic phase problems. Its primary focus is to conduct X-ray diffraction (XRD) experiments near the atomic absorption edges of light atoms naturally present in proteins. Operating within a core wavelength range spanning 1.2 to 5 Å, this beamline provides a valuable experimental setup that complements the capabilities of five other XRD beamlines available at Diamond Light Source.

To mitigate absorption effects, the entire beamline, including the end station equipped with a goniometer and detector, functions within a vacuum environment (< 10⁻⁷ mbar). The cooling process for samples during storage, transfer, and data collection is executed through a network of conductive links connecting pulse tube cryocoolers with sample storage and the kappa goniometer. Featuring a large cylindrical Pilatus 12M detector, the beamline facilitates access to diffraction data up to 2θ = ±90°, coupled with the absence of X-ray scattering, ensuring superior quality diffraction data.

The beamline supports a diverse array of phasing experiments, including sulphur/phosphorus single wavelength anomalous dispersion (S/P-SAD). This versatility is further highlighted by recent results obtained from the beamline, and the discussions will explore the newly discovered possibilities it offers for macromolecular crystallography, particularly with the extension of the wavelength range towards the sulfur and phosphorous K-absorption edges.

Examples showcasing the identification of biologically crucial ions such as Ca^{2-} , K^+ , or Cl^- through anomalous contrast will be presented. Additionally, insights into structures solved on the beamline based on the anomalous signal from elements like S, Cl, I, K, Ca, V, etc., will be explored.

NUMERICAL GROUND STATE ENERGY PREDICTION VIA NEURAL VARIATIONAL MONTE CARLO WITH EVOLUTION STRATEGIES

M. Moroz, O. Bovgyra

Department for Solid State Physics, Ivan Franko National University of Lviv
e-mail: michael08840884@gmail.com

Variational Monte Carlo (VMC) is a well-studied method originating in the late 1940s. However, it gained prominence only in the 1970s due to advancements in computer power and the development of more powerful algorithms. Traditionally, VMC has primarily been employed for computing the initial wavefunction ansatz, which is then used in Diffusion Monte Carlo (DMC) methods to obtain a more precise prediction of the ground state energy. Historically, the main limitation of VMC has been its functional form and optimization method. Despite some advancements, such as incorporating Jastrow factors, backflow transformations, and stochastic reconfiguration, VMC has remained restricted in terms of its expressiveness and performance. In today's era, thanks to the rapid progress of neural network models, we can optimize large parametric functions for any type of data with the desired level of precision. Furthermore, hardware optimization for these types of computations continues to improve steadily.

Recently, it has been proposed and shown that one can use such neural networks as the base ansatz for a wave function. Due to the striking similarity between stochastic gradient descent optimization methods and VMC optimization methods, it has been a very natural progression to use machine learning techniques to optimize these ansatzes with remarkable accuracy, often surpassing the need for DMC. Some of the more prominent recent advances include reaching chemical accuracy on a set of molecules using a model called FermiNet by Pfau et al. [1], computing excited state energies [2], computing band spectra of real solids in second-quantization formalism [3] etc.

In this study, we present a novel approach to optimize neural network wave function ansatzes using Evolution Strategies (ES) within a VMC framework. Evolution Strategies enable the effective optimization of intricate functions that are inherent in many-electron systems.

Our ES-VMC method can accurately predict the ground state energy of simple systems with higher precision compared to Hartree-Fock methods. For instance, in the case of Lithium, our method achieved a highly accurate energy prediction of -7.45 Hartree, closely approximating the exact energy value of -7.47 Hartree. Likewise, for Methane, our method yielded an energy value of -40.292 Hartree, demonstrating a narrow margin of error of only 0.5% compared to the exact value of -40.514 Hartree.

These results highlight the potential of ES-VMC as a promising alternative to classical optimization methods used in VMC. The method's ability to optimize functions without relying on their gradients makes it faster and capable of optimizing more challenging functional forms of different ansatzes.

-
- [1] D. Pfau, J. S. Spencer, A. G. D. G. Matthews, W. M. C. Foulkes, Phys. Rev. Res. **2**, 033429 (2020).
[2] D. Pfau, S. Axelrod, H. Sutterud, I. von Glehn, J. S. Spencer, arXiv:2308.16848 [physics.comp-ph] (2023).
[3] N. Yoshioka, W. Mizukami, F. Nori, Commun. Phys. **4**, 106 (2021).

SEMICLASSICAL LIMIT OF QUANTUM LOGIC: INFORMATION LOSS

Maksym Teslyk^{1,2}, Olena Teslyk¹

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

²University of Oslo, Norway

e-mail: machur@ukr.net

Quantum logic expressions can be reduced to their classical counterparts by applying the semiclassical limit $\hbar \rightarrow 0$. This reduction enables us to estimate the extent of information loss that occurs in each gate from the complete set. Notably, expressions containing non-commuting operators exhibit the most significant loss. This observation suggests that non-commutativity can be regarded as a resource for quantum speed-up. To illustrate these findings, we apply the reduction technique to the quantum discrete Fourier transform and the Grover search algorithms.

КВАНТОВІ ФЛУКТУАЦІЇ ТА КВАНТОВИЙ ХАОС ЛОКАЛІЗОВАНИХ СТАНІВ: ПОЗАЧАСОВО ВПОРЯДКОВАНІ КОРЕЛЯЦІЙНІ ФУНКЦІЇ ДЛЯ МОДЕЛІ ФАЛІКОВА–КІМБАЛА

А. Швайка

Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів

Досліджено квантові флуктуації й квантовий хаос локалізованих станів для сильнокорельованих електронних систем. Зокрема, для моделі Фалікова–Кімбала, що описує систему взаємодійних колективізованих та локалізованих електронних станів, розраховано позачасово впорядковані кореляційні функції, які слугують мірою поширення/перемішування квантової інформації. Установлено три режими поведінки системи. Для малих значень кулонової взаємодії система швидко хаотизується внаслідок термічних флуктуацій. Для більших значень кулонової взаємодії логарифмічна похідна (відповідник показника Ляпунова) проявляє коливання насичення, які можна пов'язати з резонансами Рюеля–Поллікотта для стохастичних динамічних систем. Для ще більшої кулонової взаємодії динаміка системи ускладнюється з руйнуванням резонансів Рюеля–Поллікотта за великих часів.

UNEXPECTED LOCAL DENSITY BIMODALITY IN 2D HARD DISKS UNDER EXTREME CONFINEMENT

Andriy Trokhymchuk^{1,2}

¹Faculty of Chemistry and Chemical Technology, University of Ljubljana, Slovenia

²Institute for Condensed Matter Physics NASU, Lviv, Ukraine

By using NVT , computer simulations and cell theory, we show that a two-dimensional (2D) array of hard disks, which is laterally confined within a narrow (quasi-1D) hard wall channel of a width that aligns with the vertical triangular lattice, exhibits a bimodal distribution of local density. This unique characteristic has not been previously reported in either bulk or confined systems of hard disks.

We contend that the simplicity of a quasi-1D system of hard disks provides us with a significantly enhanced and more quantitative understanding of both the gas-liquid and liquid-to-solid transformations observed and discussed in condensed matter.

СИГНАЛ У ЛІНІЇ ГІДРОГЕНУ 21 см З РАНЬОГО ВСЕСВІТУ: ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТА СПОСТЕРЕЖНІ ПЕРСПЕКТИВИ

Б. Новосядлий, Ю. Кулініч

Астрономічна обсерваторія, Львівський національний університет імені Івана Франка

Аналіз формування лінії надтонкої структури 21 см нейтрального гідрогену в ранньому Всесвіті, в епохи Темних віків, Космічного світанку та Рейонізації вказує на три спектральні особливості, детектування яких може стати важливим космологічним тестом щодо природи частинок темної матерії чи величини первісного магнітного поля. У стандартній Λ CDM-моделі цими спектральними особливостями є лінія поглинання на частоті ~ 15 МГц, що формується в епоху Темних віків на червоних зміщеннях $80 \leq z \leq 90$, лінія поглинання на частоті ~ 80 МГц, що формується в епоху Космічного світанку на $12 \leq z \leq 20$, та лінія випромінювання на частоті ~ 120 МГц, що формується в епоху Рейонізації на $6 \leq z \leq 10$. Лінія, що формується в епоху Темних віків, чутлива до додаткових механізмів йонізації та нагрівання, які наявні в моделях з розпадною/самоанігіляційною темною матерією чи за наявності первинного магнітного поля, а також до додаткового охолодження в моделях з негравітаційною взаємодією баріонної й темної матерії. Сигнал у цій лінії має глобальний характер — однаковий у різних напрямках на небі. Лінія з епохи Космічного світанку визначається локальним спектральним енергетичним розподілом випромінювання перших джерел світла, зокрема співвідношенням Ly_{α} і Ly_{c} квантів, яке визначає положення лінії, її характер (поглинання чи випромінювання) та інтенсивність. Це означає, що сигнал в лінії 21 см гідрогену з цієї епохи не є глобальним, що пояснює різницю в результатах експериментів EDGES (2018) і SARAS 3 (2022). Оцінка очікуваних сигналів у лінії 21 см нейтрального гідрогену з епохи Темних віків і Космічного світанку вказує на можливість їх детектування сучасними найчутливішими телескопами декаметрового та метрового діапазону довжин хвиль наземного базування. Перспективними є проекти розташування телескопів для детектування цих сигналів на зворотній стороні Місяця для усунення завад техногенного характеру.

ION MIGRATION PATHWAYS IN CRYSTALS WITH SCHEELITE-TYPE STRUCTURE

Volodymyr Shevchuk, Ihor Kayun

Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv
shevchuk@electronics.lnu.edu.ua

The study presents data obtained from computer calculations and stereo-atomic crystal structure analysis applied to AMO_4 compounds ($A = Ba, Ca, Cd, Pb, Sr, Zn, Eu$; $M = W, Mo$), as well as solid solutions based on these compounds. The focus of the investigation is on exploring the potential migration 3D-paths and channels for W or Mo ions within nano-sized scheelite- and wolframite-type structures of AMO_4 . The TOPOS program package was utilized for calculating the ion migration in real crystals.

In our previous paper [1], we presented an analysis of the pathways for W - or Mo -ion migration in scheelite-type crystals. The study identified four influencing factors (structural factors, partial cationic substitution, temperature, and technological conditions of compound growth technique) that can lead to changes in the possible ion migration path, eventually resulting in the formation of continuous migration pathways. Furthermore, the proposed approach demonstrated its usefulness as a tool for investigating structural point defects. The talk discussed both the calculated and experimental data on ion migration in crystals.

[1] V. N. Shevchuk, I. V. Kayun, *Electron. Inform. Technol.* **19**, 3 (2022).

ВИСОКОТОННА ПОЛЯРИМЕТРІЯ КРИСТАЛІВ Rb_2SO_4

І. Пришко¹, Н. Фтомин¹, В. Стадник¹, Я. Шоп²

¹Кафедра загальної фізики, Львівський національний університет імені Івана Франка

²Університет кардинала Стефана Вишинського, Варшава, Польща

НАУР (High-accuracy universal polarimeter) поляриметрія та споріднені з нею методики є найточнішими в сучасному оптичному експерименті й широко застосовуються для вимірювання температурних і спектральних змін параметрів матеріалів (оптична активність, лінійне двопронезаломлення, лінійний та циркулярний дихроїзм). Високоточні поляриметри постійно удосконалюються, зокрема, використовуються ПЗЗ (прилади із зарядовим зв'язком) лінійки [1], застосовуються схеми з двома лазерами (два джерела світла з близькими довжинами хвилі — двопронеза поляриметрія [2]) тощо. Тому результати, отримані на основі поляриметричного експерименту, характеризуються високою надійністю.

Основою нашої методики є вимірювання оптичного пропускання системи, яка складається з поляризатора зразка та аналізатора (система PSA Polarizer–Specimen–Analyzer). Відносна інтенсивність світла J на виході з такої поляризаційної системи залежить від азимутів поляризатора (θ) та аналізатора (χ) й описується квадратичною функцією $J(\theta, \chi)$. Однією з особливостей методики поляриметрії є аналіз НАУР-мап (сукупність кривих другого порядку, які утворюються перерізом поверхні оптичного пропускання площинами однакової інтенсивності). Особливу увагу приділено також урахуванню параметрів недосконалої поляризаційних елементів (поляризатора та аналізатора), які використовують під час вимірювань. Оскільки поверхні зразків, які застосовано в нашій методиці, зазвичай характеризуються високою якістю, то доволі часто можуть спостерігатися ефекти багатократного відбивання світла.

Мета цієї роботи — поляриметрія кристалів Rb_2SO_4 (кристали групи K_2SO_4). Оптико-електронні дослідження параметрів цих матеріалів описано в [3]. Вимірювання проводили на комп'ютеризованому лазерному поляриметрі для трьох довжин хвилі випромінювання ($\lambda = 532, 635, 650$ нм). Використовуючи аналітичні співвідношення для кута нахилу мінімізованих інтенсивностей $\partial\chi/\partial\theta$, отримали температурні залежності величини $\cos\Gamma$ ($\Gamma = (2\pi/\lambda)d\Delta n$, d — товщина зразка, Δn — лінійне двопронезаломлення). Проаналізовано температурну еволюцію кута нахилу головних осей еліпсів на НАУР-мапах. Розраховано величину лінійного двопронезаломлення цих кристалів у температурному діапазоні від 20 до 100°C.

[1] A. Takanabe, H. Koshima, T. Asahi, *AIP Adv.* **7**, 025209 (2017).

[2] Y. Shopa, M. Shopa, N. Ftomyn, *J. Appl. Cryst.* **56**, 432 (2023).

[3] M. Ya. Rudysh, I. A. Pryshko, P. A. Shchepanskyi, V. Yo. Stadnyk, R. S. Brezvin, Z. O. Kogut, *Optik* **269**, 169875 (2022).

HARMONIC OSCILLATOR WITH A DELTA-FUNCTION POTENTIAL AT THE ORIGIN IN DEFORMED SPACE WITH MINIMAL LENGTH

M. I. Samar

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,
Ivan Franko National University of Lviv

In the general case of a deformed space with minimal length, we examine the 1D Schrödinger equation with a potential perturbed by a Dirac delta function. A Green's function technique is used to calculate an exact implicit expression, providing the impact of the 1D delta function potential on the eigenvalues of bound states. Additionally, it is demonstrated that the weak coupling limit of this expression is in agreement with the perturbative treatment of the delta function. A few quantum systems are presented where the effect of adding a delta function potential on bound states can be precisely computed. We explicitly determine the exact transcendental equation for the bound state energies of a one-dimensional harmonic oscillator perturbed by a single point interaction.

ВПЛИВ ДОМІШКИ МАНГАНУ НА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛА СУЛЬФАТУ КАЛІЮ

В. Й. Стадник, П. А. Щепанський, Р. С. Брезвін

Кафедра загальної фізики, Львівський національний університет імені Івана Франка

Синтезовано якісний монокристал сульфату калію з домішкою мангану, визначено його кристалічну структуру, досліджено дисперсію показників заломлення та розраховано зонно-енергетичну структуру. З'ясовано, що кристалічну структуру домішкових кристалів K_2SO_4 можна розглядати як результат кратного гетеровалентного заміщення двох атомів K^+ на один атом Mn^{2+} та укладання колон з тетраедрів SO_4^{2-} .

Показано, що дно зони провідності сформоване *s*- та *p*-станами атомів сірки та калію, а вершина валентної зони утворена *p*-станами кисню та *s*-станами кисню. Домішка мангану в густині станів кристала сульфату калію представлена вузьким інтенсивним піком *d*-електронів, що відповідає рівням домішки в забороненій зоні поблизу вершини валентної зони. Розрахована ширина забороненої зони домішкового кристала, отримана з використанням GGA—PBE-методу, становить $E_g = 5.92$ eV, тоді як чистого кристала — 5.20 eV.

З'ясовано, що введення домішки спричиняє зміщення положення центрів УФ-осциляторів у довгохвильову ділянку спектра, зменшення сили відповідних осциляторів, величин рефракції зв'язків та електронної поляризованості щодо чистих кристалів. Розрахований кількісний коефіцієнт анізотропії домішкового кристала вказує на зменшення його анізотропії порівняно з чистим кристалом.

LOCAL STRUCTURE AND SPECTROSCOPY OF THE $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ GLASS

B. V. Padlyak^{1,2}, I. I. Kindrat¹, Y. O. Kulyk³, A. Drzewiecki¹, V. T. Adamiv², I. M. Teslyuk²

¹Institute of Physics, University of Zielona Góra, Poland

²Department of Optical Materials, Vlokh Institute of Physical Optics, Lviv, Ukraine

³Faculty of Physics, Ivan Franko National University of Lviv, Ukraine

High quality glass with $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ composition containing 1.0 mol.% MnO_2 and Er_2O_3 impurities was obtained and studied by using X-ray diffraction (XRD), electron paramagnetic resonance (EPR) and optical spectroscopy techniques for the first time.

Local structure parameters (interatomic distances and coordination numbers) of the $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ were derived from the radial distribution function, calculated from XRD data. Analysis of EPR and optical spectroscopy (absorption, luminescence excitation, emission, decay kinetics) results shows the presence of $Mn^{2+}(3d^5)$, $Mn^{3+}(3d^4)$ and $Er^{3+}(4f^{11})$ ions in the $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ glass network. Particularly, in the studied glass three types of the Mn^{2+} centres have been identified: single Mn^{2+} (1) centres in the strongly distorted sites of rhombic symmetry (ratio of rhombic and axial constants $|E/D| \leq 1/3$), single Mn^{2+} (2) centres in sites of almost cubic symmetry ($D \simeq 0$, $E \simeq 0$), and Mn^{2+} pair centres and their small clusters, coupled by magnetic dipolar and exchange interactions.

The optical absorption spectrum of the $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ glass shows a very broad intense band peaked at 467 nm that belongs to the ${}^5E_g(D) \rightarrow {}^5T_{2g}(D)$ transition of Mn^{3+} ions and a number of weak narrow lines belonging to *f*—*f* transitions of the Er^{3+} ($4f^{11}$, ${}^4I_{15/2}$) ions. The emission spectrum of the $Li_2B_4O_7:Mn,Er$ glass exhibits a broad band corresponding to the ${}^4T_{1g}(G) \rightarrow {}^6A_{1g}(S)$ transition of Mn^{2+} ions. The photoluminescence emission and excitation spectra as well as decay kinetics of Mn^{2+}

centres in the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn,Er}$ glass were discussed in comparison with the corresponding results obtained for the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ glass. The absence of the characteristic Er^{3+} and Mn^{3+} photoluminescence in the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn,Er}$ glass is explained by the proposed mechanisms of energy transfer from Er^{3+} to Mn^{2+} and Mn^{3+} ions.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine (scientific research project No. 0122U001833), realized in the Vlokh Institute of Physical Optics (Lviv, Ukraine).

ON RANK-ONE PERTURBATIONS OF PT -SYMMETRIC HAMILTONIANS

Oles Doboševych¹, Monika Homa², Rostyslav Hryniv^{1,2}

¹Ukrainian Catholic University, Lviv, Ukraine

²University of Rzeszów, Poland

e-mails: {rhrniv, doboševych} @ucu.edu.ua, mhoma@ur.edu.pl

Perturbation theory offers powerful methods to understand how small changes of Hamiltonians affect their spectral properties. Additive rank-one perturbations have attracted much attention since, on the one hand, they are simple enough to allow an explicit and often closed-form analysis and, on the other hand, they are rich enough to produce unexpected spectral effects.

In this talk, we demonstrate that generic rank-one perturbations of a given Hermitian Hamiltonian with discrete spectrum can create an arbitrary non-real spectrum. Even more surprising is the fact that a PT -symmetric rank-one perturbation of a Hermitian PT -symmetric Hamiltonian with discrete spectrum can produce a fairly generic set of complex bound states. We also discuss the inverse problem of constructing a rank-one perturbation with the desired spectral effect.

The talk is based on the papers [1–3].

-
- [1] O. Doboševych, R. Hryniv, *Linear Algebra Appl.* **609**, 339 (2021).
 [2] O. Doboševych, R. Hryniv, *Integral Equ. Oper. Theory* **93(2)**, 18 (2021).
 [3] M. Homa, R. Hryniv, *J. Phys. A: Math. Theor.* **53**, 375202 (2020).

КВАНТОВА ТЕОРЕМА ЕРНШОУ

Юрій Яремко

Інститут фізики конденсованих систем НАН України, Львів, Україна

У статті [1] на класичному рівні досліджена задача контролю поступального та обертального руху великої молекули чи наночастинки зі сталим дипольним моментом за допомогою електричних та магнітних полів. Ці поля генеруються електродами та котушками певної конфігурації, які обрамлюють робочу камеру пастки. Завдання ускладнюється теоремою Ерншоу, яка забороняє утримання систем заряджених частинок (молекул чи наночастинок) тривимірним статичним полем у положенні стійкої рівноваги [2, §6.3]. У цій статті на прикладі молекули атома водню розглянуто квантовий опис проблеми. Із використанням наближення Борна–Опенгаймера знайдено електронний потенціал та описано вібрації протонів поблизу його мінімуму. Обертання молекули моделювали суперпозицією сферичних гармонік [2, 3]. Взаємодія виродженого власного стану вільної молекули з фіксованим моментом J

$$\Psi_J^{\text{rot}}(\theta, \varphi) = \sum_{M=-J}^J D_{JM} Y_J^M(\theta, \varphi), \quad (1)$$

із магнітним полем цілком знімає виродження, розщеплюючи спільну енергію обертального руху вільної молекули на $2J + 1$ рівнів. Оскільки частоти обертального руху значно перевищують частоти, які характеризують рух центру мас, ми використовуємо квазікласичний підхід [3]: внутрішню динаміку розглядаємо як квантову, а рух центру мас описуємо класично. Квантове усереднення обертальних рухів приводить до класичного гамільтоніана з потенціалом, який є функцією модуля магнітного поля, а не окремих компонент з різними знаками, як це в класичній теоремі Ерншоу.

Аналогічний результат отримуємо, досліджуючи взаємодію статичного електричного поля з дво-рівневою системою

$$\Psi(\theta, \varphi; t) = e^{-iE_a t} \psi_a(\theta, \varphi) + e^{-iE_b t} \psi_b(\theta, \varphi), \quad (2)$$

скомпонованою з двох вироджених взаємно ортогональних станів

$$\psi_a(\theta, \varphi) = \sum_{M=-J}^J D_{JM} Y_J^M(\theta, \varphi), \quad \psi_b(\theta, \varphi) = \sum_{N=-J-1}^{J+1} D_{J+1,N} Y_{J+1}^N(\theta, \varphi). \quad (3)$$

Стан знормований на одиницю: $\langle \psi_a | \psi_a \rangle = \kappa$ та $\langle \psi_b | \psi_b \rangle = 1 - \kappa$, де параметр $0 < \kappa < 1$. Енергії оберտального руху молекули водню дорівнюють $E_a = B_e J(J+1)$ (для стану ψ_a) та $E_b = B_e (J+1)(J+2)$ (для стану ψ_b). Тут $B_e = 29.3 \text{ cm}^{-1}$ — ротаційна константа молекули водню. Зовнішнє електричне поле знімає виродження. Після квантового усереднення отримуємо гамільтоніан руху центра мас із потенціалом, залежним від модуля електричного поля.

-
- [1] M. Przybylska, A. J. Maciejewski, Yu. Yaremko, *New J. Phys.* **22**, 103047 (2020).
[2] R. V. Krems, *Molecules in Electromagnetic Fields* (John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2019).
[3] A. Hashemloo, C. M. Dion, *J. Chem. Phys.* **143**, 204308 (2015).

PHILOSOPHICAL, THEOLOGICAL AND CLASSICAL FOUNDATIONS OF MATHEMATICS

Taras Banakh

Department for Algebra, Topology and Fundamentals of Mathematics,
Ivan Franko National University of Lviv

We shall discuss the most basic 14 axioms that lie in the foundations of modern mathematics, their similarity to the Ten Commandments, analogies between constructing the mathematical universe from the empty set and creating our physical universe from the singularity, the presence of materialism and idealism in mathematics, the impact of Occam's razor on the development of mathematics, the concepts of classes and sets, and other intriguing philosophical aspects of mathematics.

PARTITION PROBLEM AND ITS SOLUTION WITH QUANTUM PROGRAMMING

Kh. P. Gnatenko, V. M. Tkachuk

Professor Ivan Vakarchuk Department for Theoretical Physics,
Ivan Franko National University of Lviv
e-mails: khrystyna.gnatenko@gmail.com, voltkachuk@gmail.com

A well-known problem in computer science and number theory is the partition problem. This problem involves dividing a set of numbers into two subsets in such a way that the sums of the numbers in the subsets are as nearly equal as possible. In this context, we propose a quantum algorithm for finding the absolute difference between the sums of subsets using quantum programming. Specifically, we demonstrate that this problem is connected to determining the energy of the ground state of a spin system described by the Ising model. For solving this problem, quantum algorithms for detecting energy levels of spin systems can be used. The algorithms are presented in our recent papers [1,2].

-
- [1] Kh. P. Gnatenko, H. P. Laba, V. M. Tkachuk, *Eur. Phys. J. Plus* **137**, 522 (2022).
[2] Kh. P. Gnatenko, H. P. Laba, V. M. Tkachuk, *Phys. Lett. A* **424**, 127843 (2022).

ЗАПЛУТАНІСТЬ КВАНТОВИХ СТАНІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ СИСТЕМ

В. М. Ткачук

Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука,
Львівський національний університет імені Івана Франка

Ми розглянемо заплутаність квантових станів у межах одночастинкового рівняння Дірака. Вивчено заплутаність дискретних (спінових) та неперервних (координатних) змінних під час вільного руху релятивістського електрона. Показано, що релятивізм призводить до додаткової заплутаності квантових станів, яка зникає в нерелятивістській межі.

ПАМ'ЯТІ ПРОФЕСОРА ОЛЕКСІЯ ГОРДІЙОВИЧА МИКОЛАЙЧУКА (1931–2024)

IN MEMORY OF PROFESSOR OLEKSIY MYKOLAYCHUK (1931–2024)



12.02.2024 року відійшов у вічність професор кафедри фізики металів Олексій Гордійович Миколайчук. Народився Олексій Гордійович 15.04.1931 р. в селі Синиці Христинівського р-ну Черкаської області. Фізик, кандидат фізикоматематичних наук (*Структура и некоторые физические свойства сернистой ртути в тонких пленках*, 1965; наук. кер. Я. Й. Дутчак), доцент (1967 р.), професор (1990 р.). Закінчив фізичний факультет Львівського університету 1958 року. У 1958–59 рр. — лаборант кафедри експериментальної фізики, протягом 1959–61 рр. — старший лаборант кафедри фізики твердого тіла, упродовж 1961–63 рр. — старший інженер проблемної НДЛ росту і дослідження фізичних властивостей кристалів, у 1963–66 рр. — асистент, протягом 1966–88 рр. — доцент, у 1988–96 рр. — завідувач, від 1996 р. — професор кафедри рентгенометалофізики, упродовж 1973–78 рр. — заступник декана фізичного факультету.

Від перших днів роботи молодий науковець Олексій Миколайчук виявив зацікавленість до тодішніх проблем фізики твердого тіла — вирощування кристалів з практично

важливими властивостями. Водночас він мав талант бачити майбутнє цього наукового напрямку. Зокрема, його зацікавили такі унікальні об'єкти, як тонкі плівки, що швидко завойовували собі місце в різних технологіях і ставали цікавими з погляду фундаментальної науки. Отож, як утворилась нова кафедра — рентгенометалофізики, він у складі нового колективу взявся за створення лабораторії фізики тонких плівок. Необхідно було придбати нове обладнання, освоїти наявні й розробити нові методики синтезу металічних і напівпровідникових плівок, навчитися правильно й усебічно аналізувати й інтерпретувати отримані результати та знайти їхнє практичне застосування. У цій нелегкій праці він мав підтримку фундатора нової кафедри та колеги — проф. Ярослава Дутчака.

Протягом короткого часу інтенсивної роботи досягнення нової лабораторії стали відомими науковцям світу, з якими почали налагоджуватися тісні зв'язки і які тривають дотепер. Публікації з розробки технології отримання тонких плівок напівпровідникових сполук і металевих сплавів, з результатами досліджень ближнього порядку в аморфних матеріалах, кінетики фазових переходів у конденсатах та їхніх фізичних властивостей стали всесвітньо відомими і знайшли практичне застосування на різних підприємствах. Ці роботи актуальні й на сьогодні, коли тонкі плівки стали одними з основних об'єктів дослідження нанофізики, наноматеріалознавства та нанотехнологій. Приємно зазначити, що вагомий внесок у ці наукові напрями зробив професор О. Г. Миколайчук, піонерські роботи якого з фізики тонких плівок актуальні й тепер, про що свідчить значна кількість цитувань у працях науковців світу. Професор О. Г. Миколайчук створив колектив науковців і педагогів, які в різних лабораторіях продовжують роботу, що він розпочав. Вагомість його внеску в науку підтверджується тим, що Олексій Гордійович був керівником 27 кандидатських дисертацій, автором близько 500 наукових праць, 32 патентів й авторських свідоцтв. Він відзначений, як Соросівський професор (1997 р.), заслужений професор Львівського університету (2003 р.). Протягом тривалого часу професор О. Г. Миколайчук був членом редколегії “Журналу фізичних досліджень” та “Вісника Львівського університету. Серія фізична”.

Колектив фізичного факультету та члени редакційної колегії ЖФД висловлюють щире співчуття родині та друзям Олексія Гордійовича. Він залишиться в наших серцях як чудова людина та професіонал.