



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2020-2

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2019 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2019  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**

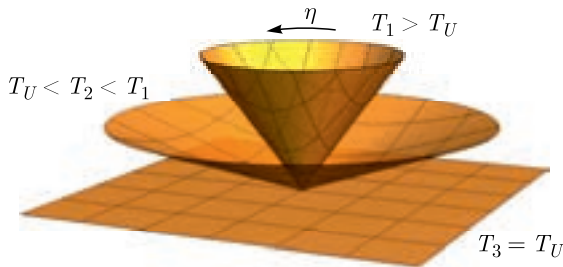
Дубна 2020

## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	5
Физика частиц . . . . .	5
Физика тяжелых ионов высоких энергий . . . . .	7
Физика тяжелых ионов низких энергий . . . . .	8
Нейтронная ядерная физика . . . . .	8
Физика конденсированных сред . . . . .	11
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	14
Ускорительная тематика . . . . .	16
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	18
Образовательная деятельность . . . . .	21
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	22
Theoretical Physics . . . . .	24
Experimental Physics . . . . .	26
Particle Physics . . . . .	26
High Energy Heavy Ion Physics . . . . .	28
Low Energy Heavy Ion Physics . . . . .	28
Neutron Nuclear Physics . . . . .	29
Condensed Matter Physics . . . . .	31
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	34
Accelerator Topics . . . . .	37
Information Technology and Computer Physics . . . . .	39
Educational Activities . . . . .	42
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members	43

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Выполнены расчеты аксиального тока и плотности энергии во вращающейся и ускоренной среде с использованием оператора плотности Зубарева и функции Вигнера. Показано, что их результаты приводят к отождествлению угловой скорости и ускорения с действительным и мнимым химическими потенциалами. Установлено, что плотность энергии обращается в нуль при температуре  $T$ , равной температуре Унру  $T_U$ , что интерпретируется как неустойчивость фазы с температурой  $T < T_U$ . Доказана дуальность между квантово-статистическим подходом в пространстве Минковского и эффектами нетривиальной геометрии в пространстве с конической сингулярностью. Результаты применены к физике столкновений тяжелых ионов.



Изменение эффективной конической сингулярности, дуальной квантово-статистическому подходу, при приближении температуры к температуре Унру сверху ( $\eta = 1/(rT)$ )

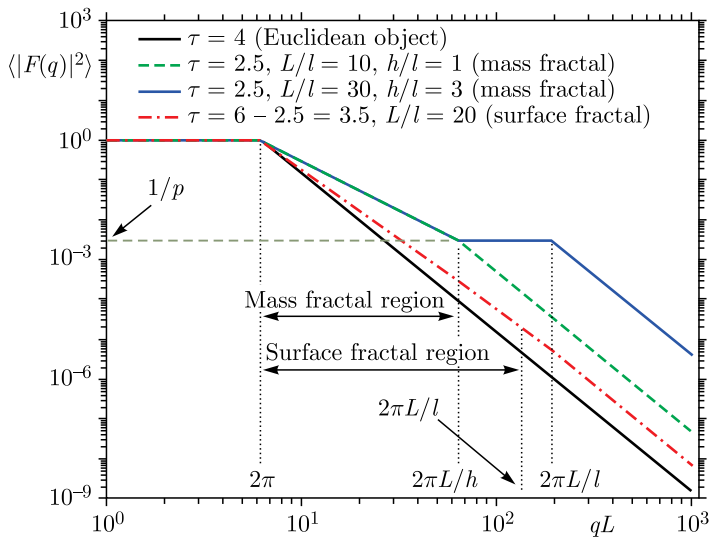
- *Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I.* // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. P. 071901; V. 100. P. 125009;  
*Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I.* // JHEP. 2019. V. 1902. P. 146.

Впервые в рамках программы по изучению распадов атомных ядер альфа-распад, кластерную радиоактивность и спонтанное деление удалось описать в едином подходе, основанном на рассмотрении динамики ядра по координате зарядовой асимметрии. Рассчитанные периоды полураспада для ядер  $^{232,234,236}\text{U}$ ,

$^{236,238}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Cm}$  и  $^{248}\text{Cf}$  оказались в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными. Представленная модель описывает периоды полураспада, которые различаются между собой до 12 порядков, и позволяет предсказывать характерные времена для кластерной радиоактивности и спонтанного деления тяжелых и сверхтяжелых ядер.

- Rogov I. S., Adamian G. G., Antonenko N. V. // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 024606.

Исследовано малоугловое рассеяние (МУР) рентгеновских лучей, нейтронов и световых волн на ансамблях детерминированных фрактальных структур. Их положения в пространстве и ориентации предполагаются случайными. Стандартная методика обработки данных МУР позволяет извлечь только три характерных параметра системы: размер фрактала и нижний и верхний пределы фрактального диапазона. Показано, что самоподобие детерминированных фрактальных структур позволяет получить их дополнительные характеристики в реальном пространстве. В настоящей работе предложены и рассмотрены точно решаемые модели, описывающие МУР на таких системах. Разработанные модели позволяют понять, как извлечь дополнительную информацию о структуре фрактала и аналитически описать интенсив-



Схематическое представление интенсивностей МУР для регулярных и фрактальных объектов в зависимости от импульса передачи

ности МУР, а также предлагают эффективные вычислительные алгоритмы. В качестве основных примеров использованы обобщенный фрактал Кантора и некоторые его вариации, которые моделируют массовые, поверхностные и мультифрактальные структуры. Изучены различия данных МУР для детерминированных и случайных фрактальных структур. Обсуждаются пределы применимости предложенных моделей и перспективы будущих исследований детерминированных фрактальных структур.

- *Cherny A. Yu., Anitas E. M., Osipov V. A., Kuklin A. I.* The Structure of Deterministic Mass and Surface Fractals: Theory and Methods of Analyzing Small-Angle Scattering Data // Phys. Chem. Chem. Phys. 2019. V. 21. P. 12748–12762.

Дана общая классификация конечномерных неприводимых представлений простых алгебр Ли, основанная на построении представлений со старшим весом. В случае алгебр  $sl(N, C)$ ,  $su(N)$  и групп  $SL(N, C)$  и  $SU(N)$  представления строятся явно на основе дуальности Шура–Вейля. Ключевую роль здесь играют группа перестановок и ее представления, которые обсуждаются в рамках как подхода Юнга–Фробениуса, так и подхода Вершика–Окунькова. Для тензорных представлений групп Ли  $SO$  и  $Sp$  и их алгебр Ли аналогичную роль играет алгебра Брауэра и ее теория представлений. Рассмотрены спинорные представления алгебр  $so$ . На основе конструкции матриц сопряжения изучены спинорные группы Ли  $Spin(p, q)$  и их представления.

- *Исаев А. П., Рубаков В. А.* Теория групп и симметрий. Представления групп Ли и алгебр Ли. Приложения. Дубна: ОИЯИ, 2019. 482 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### Физика частиц

Развернуты и введены в эксплуатацию коллаборацией «Байкал» четвертый и пятый кластеры нейтринного телескопа Baikal-GVD. С их вводом эффективный объем телескопа Baikal-GVD достиг значения  $0,25 \text{ км}^3$  в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы, что составляет около 0,6 от эффективного объема антарктического детектора IceCube. В настоящее время телескоп состоит из 1440 оптических модулей, расположенных на 40 вертикальных гирляндах (8 гирлянд в каждом кластере) на глубине от 750 до 1250 м.

Выполнен предварительный анализ данных 2016–2018 гг. и частично 2019 г., позволивший выделить первые шесть событий с энергиями выше  $\sim 100$  ТэВ, где поток астрофизических нейтрино уже превалирует над фоном атмосферных нейтрино.

- *Aurorin A.D. et al.* Baikal-GVD: The New-Generation Neutrino Telescope in Lake Baikal // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83, No. 8. P. 921–922; Izv. Ross. Akad. Nauk: Ser. Fiz. 2019. V. 83, No. 8. P. 1016–1018.
- *Aurorin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.)*. Search for Cascade Events with Baikal-GVD // Proc. of ICRC2019; <https://pos.sissa.it/358/873/pdf>; arXiv:1908.05430.

Компактный детектор реакторных антинейтрино DANSS, созданный физиками ОИЯИ (Дубна) и ИТЭФ (Москва) и установленный на Калининской АЭС, регистрирует более 4000 реакторных антинейтрино в сутки при фоне, не превышающем 2–3% (на сегодня лучшее в мире значение). В 2019 г. проведен обновленный полномасштабный анализ данных 2016–2019 гг. с улучшенной оценкой всех источников фона и систематических погрешностей. Получено лучшее в мире модельно-независимое ограничение на существование стерильного нейтрино.

Кроме того, DANSS продемонстрировал непрерывный, долгосрочный (с октября 2016 г.) и высокоточный (1,5%) мониторинг мощности ядерного реактора и чувствительность к изменению состава топлива (различного соотношения  $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$  в ходе топливной кампании). Решение обеих задач важно в рамках разработки экспериментальных подходов к контролю нераспространения ядерных материалов.

- *Алексеев И. Г. и др.* Мониторирование мощности промышленного реактора по счету антинейтрино в детекторе DANSS // ЯФ. 2019. Т. 82, № 5. С. 371–381; Phys. At. Nucl. 2019. V. 82, No. 5. P. 415–424.

В эксперименте NO $\nu$ A (FNAL, США) с участием физиков ОИЯИ получен новый результат измерения параметров осцилляций нейтрино. Поочередный набор статистики с пучками нейтрино и антинейтрино, сформированными ускорительным комплексом FNAL с протонным пучком рекордной мощности ( $\sim 800$  кВ), и совместный анализ каналов исчезновения мюонных и появления электронных нейтрино позволили определить параметры осцилляций:  $|\Delta m_{23}^2| = 2,48_{-0,06}^{+0,11} \cdot 10^{-3}$  эВ<sup>2</sup> и  $\sin^2 \theta_{23}$  в диапазонах 0,53–0,60 и 0,45–0,48 для нормальной иерархии. При этом пред-

почтительны нормальная иерархия и верхний октант для угла  $\theta_{23}$  на уровне  $\sim 1,9\sigma$  и  $1,6\sigma$  соответственно, а обратная иерархия исключается на уровне более чем  $3\sigma$  для значения параметра нарушения CP вблизи  $\delta_{CP} = \pi/2$ .

- *Acero M. A. et al. (NO $\nu$ A Collab.). First Measurement of Neutrino Oscillation Parameters Using Neutrinos and Antineutrinos by NO $\nu$ A // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123, No. 15. P. 151803.*

В рамках проекта ATLAS на LHC (ЦЕРН) при активном участии сотрудников ОИЯИ были проведены исследования по поиску распадов бозона Хиггса Стандартной модели на  $bb$ -кварковую пару при ассоциативном рождении с бозонами  $W$  или  $Z$ . Проанализированные данные, соответствующие  $79,8 \text{ фб}^{-1}$  интегральной светимости, были получены в протон-протонных соударениях при  $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ . Измеренное превышение наблюдаемых событий над ожидаемыми фоновыми событиями в канале ассоциативного рождения только с векторным бозоном соответствует значимости  $5,3\sigma$ , что сравнимо со значимостью  $4,8\sigma$ , предсказанной в рамках СМ.

- *Aaboud M. et al. (The ATLAS Collab.). Measurement of  $VH$ ,  $H \rightarrow \rightarrow bb$  Production as a Function of the Vector-Boson Transverse Momentum in 13 TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector // JHEP. 2019. V. 5. P. 141.*

### **Физика тяжелых ионов высоких энергий**

Получены первые физические результаты по рождению гиперонов («странных» барионов) на установке BM@N в эксперименте, целью которого является исследование свойств сверхплотной ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов высоких энергий, пучки которых обеспечат ускорители комплекса бустер и нуклотрон (мегасайенс-проект NICA).

В реализации эксперимента участвует международная коллаборация, которая включает 240 физиков и инженеров из 21 исследовательского института из 11 стран, в том числе Германии, Франции, США и Израиля. В ходе сеанса на выведенных пучках нуклотрона были зарегистрированы сотни миллионов взаимодействий ионов углерода, аргона и криптона с мишенями от углерода до свинца.

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.). First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. "Strangeness in Quark Matter" (SQM-2019), Bari, Italy.*

## Физика тяжелых ионов низких энергий

В 2019 г. на фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2 был проведен эксперимент по поиску сверхтяжелого изотопа водорода  ${}^7\text{H}$  и изучению корреляций продуктов его распада  $t + 4n$ . Основное и возбужденное состояния  ${}^7\text{H}$  заселялись в реакции  ${}^8\text{He} + d \rightarrow {}^3\text{He} + {}^7\text{H}$  на вторичном пучке радиоактивных ядер  ${}^8\text{He}$  с энергией 26 АМэВ. В спектре недостающей массы  ${}^7\text{H}$  наблюдался пик, который был интерпретирован как дуплет перекрывающихся состояний  $5/2^+$  и  $3/2^+$  с энергией 6,5(5) МэВ. Кроме того, были получены указания на заселение основного состояния  $1/2^+$  с энергией 1,8(5) МэВ. Проведены теоретические исследования низкоэнергичного спектра  ${}^7\text{H}$  и корреляций продуктов его распада.

- *Kaminski G. et al.* Status of the New Fragment Separator ACCULINNA-2 and First Experiments // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2019 (in press); <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.042>.
- *Bezbakh A. A. et al.* Evidence for the First Excited State of  ${}^7\text{H}$  // Phys. Rev. Lett. 2019 (in press); arXiv:1906.07818.
- *Sharov P. G., Grigorenko L. V., Ismailova A., Zhukov M. V.* Pauli-Principle Driven Correlations in Four-Neutron Nuclear Decays // JETP Lett. 2019. V.110. P.5–14; Pis'ma v ZhETF. 2019. V.110. P.7–8; arXiv:1808.00513.

## Нейтронная ядерная физика

Получены данные по эмиссии мгновенных нейтронов при делении (МНД)  ${}^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами и спонтанном делении  ${}^{252}\text{Cf}$  с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша и системой сбора данных на базе высокоскоростных



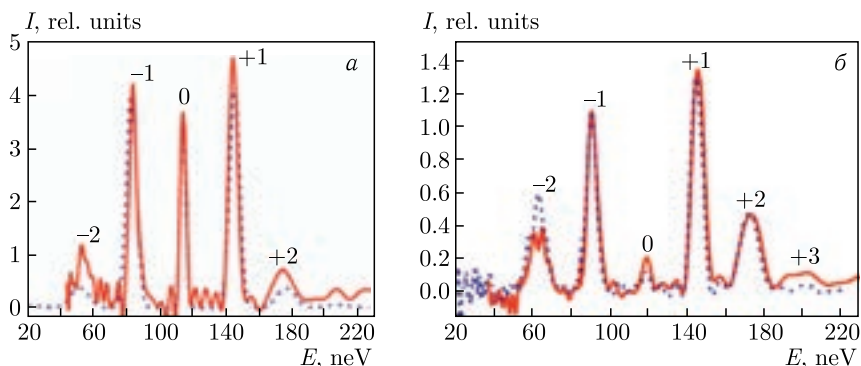
Позиционно-чувствительная двойная ионизационная камера для исследования МНД с 32 сцинтилляционными детекторами



оцифровщиков импульсов. Разработанные в ОИЯИ алгоритмы цифровой обработки сигналов и программное обеспечение анализа характеристик деления позволили скорректировать широко используемые в научной литературе зависимости множественности МНД для указанных реакций. Была разработана и испытана позиционно-чувствительная двойная ионизационная камера для исследования МНД с 32 сцинтилляционными детекторами. Установка открывает новые перспективы в исследованиях деления, индуцированного резонансными нейтронами, и подбарьерного деления, индуцированного тепловыми нейтронами ядер, таких как  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

- *Zeynalov Sh., Sedyshev P., Shvetsov V., Sidorova O.* Prompt Fission Neutron Investigation in  $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$  and  $^{252}\text{Cf}(sf)$  Reactions // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 211. P. 04003.
- *Zeynalov Sh., Sedyshev P., Shvetsov V., Sidorova O.* Nuclear Fission Investigation with Twin Ionization Chamber // Appl. Nucl. Techn. (CRETE2019); Intern. J. Mod. Phys.: Conf. Ser. (in press).

Продолжено исследование нестационарной дифракции нейтронов на движущейся дифракционной решетке. Показано, что выбором глубины профиля решетки можно существенно менять соотношение интенсивностей волн разных дифракционных порядков, меняя тем самым величину энергии, передаваемой нейтрону. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, основанными на многоволновой дина-

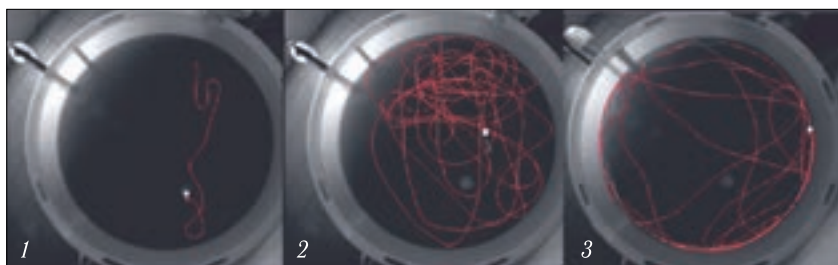


Энергетические спектры, возникающие при дифракции УХН на движущихся решетках. Экспериментальные (красные сплошные линии) и расчетные (синие пунктирные линии) данные показаны для решеток, отличающихся глубиной профиля

мической теории дифракции нейтронов на объемной периодической решетке.

- *Kulin G. V., Frank A. I., Zakharov M. A., Goryunov S. V., Bushuev V. A., Panzarella A., Geltenbort P., Jentschel M. // JETP. 2019. V. 129. P. 806.*

Впервые исследованы последствия влияния на потомство наночастиц серебра, поступивших из организма матери в пренатальный период и период лактации. Сравнение уровней когнитивных функций у молодых животных, подвергавшихся влиянию наночастиц серебра, и у контрольных животных показало, что в пренатальный период области мозга, отвечающие за формирование пространственной памяти, более уязвимы перед наночастицами серебра, чем после рождения, что может быть обусловлено незаконченным развитием гематоэнцефалического барьера у плода (рисунок).



Примеры траекторий движения животных с разными типами поведения в тесте Морриса: 1 — направленный поиск, 2 — случайный поиск, 3 — тигмотаксис (стратегия неспособных особей)

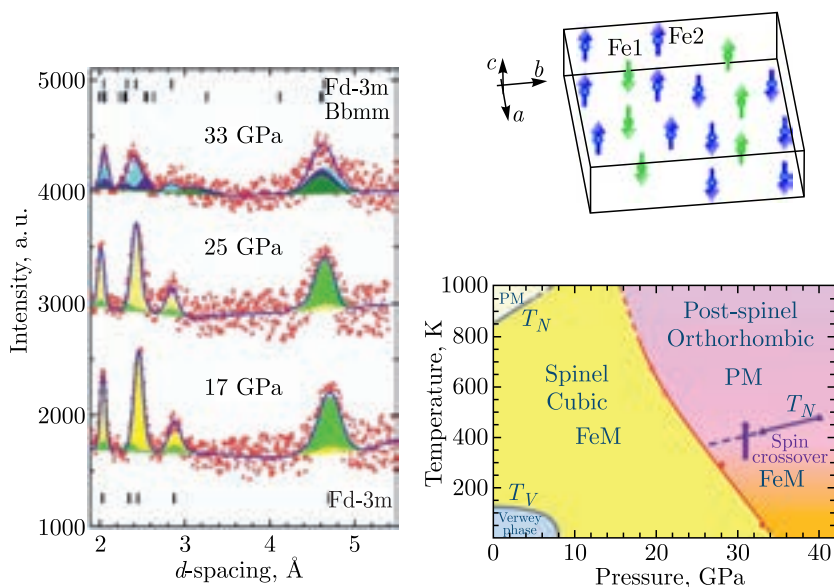
Содержание серебра в различных органах (в крови, печени, легких, почках и мозге) самок и их потомства было определено методом нейтронного активационного анализа. Среднее массовое содержание серебра в мозге самок составило  $(373 \pm 75)$  нг и в мозге потомства  $(385 \pm 57)$  нг. Полученные данные важны для оценки токсического влияния наноматериалов на репродуктивную систему человека.

- *Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Iolieva A., Petrinskaya E., Rogatkin D. Neutron Activation Analysis as a Tool for Tracing the Accumulation of Silver Nanoparticles in Tissues of Female Mice and Their Offspring // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2019. V. 322. P. 1079–1083; DOI:10.1007/s10967-019-06746-9.*

- *Ивлиева А., Петрицкая Е., Лопатина М., Рогаткин Д., Зиньковская И.* Оценка когнитивных способностей мышей, подвергнутых воздействию наночастиц серебра во время пренатального развития и лактации // Труды 7-го Международного форума по когнитивному моделированию (IFCM-2019), Ретимно, Греция (о. Крит), 5–15 сентября 2019 г. С. 276–282.

### Физика конденсированных сред

Исследованы магнитные и электронные свойства магнетита при высоком давлении в области структурного фазового перехода, происходящего при 20–25 ГПа, для выяснения природы аномального поведения физических свойств магнетита с помощью дифракции нейтронов и синхротронной мессбауэровской спектроскопии на изотопе железа  $^{57}\text{Fe}$  в диапазоне значений давления 0–40 ГПа и температуры 10–300 К. В фазе высокого давления обнаружено ферримагнитное упорядочение, возникающее при температуре  $T_{\text{NP}} \sim 420$  К, и установлена его симметрия. Определены структурная, магнитная и электронная диаграммы

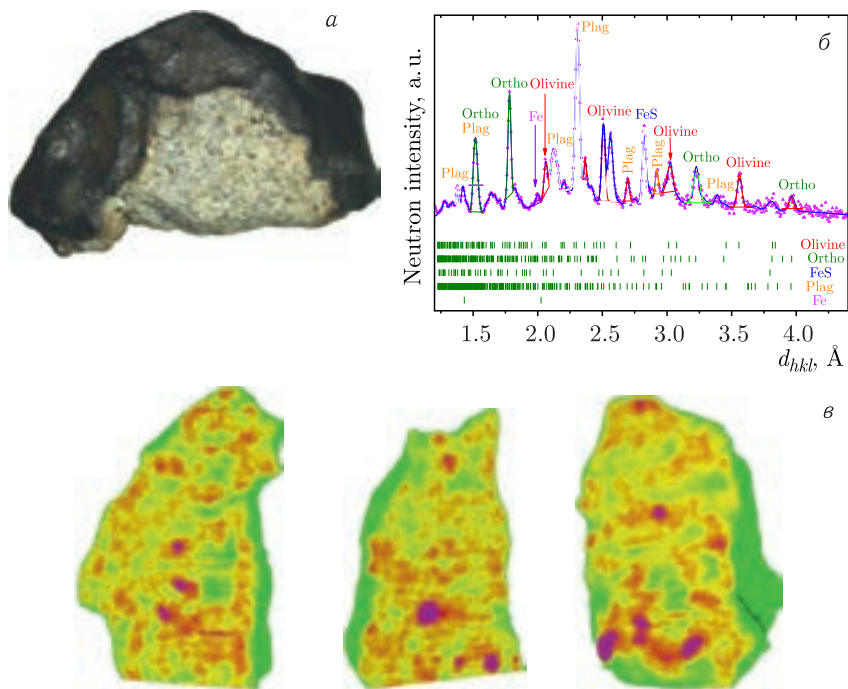


Слева: нейтронные дифракционные спектры магнетита, измеренные при разных значениях давления до 33 ГПа на дифрактометре ДН-6 в камере высокого давления с алмазными наковальнями и обработанные по методу Ритвельда. Справа: магнитная структура орторомбической фазы высокого давления магнетита (вверху) и структурная, магнитная и электронная фазовые диаграммы магнетита (внизу)

магнетита в исследуемом диапазоне термодинамических параметров.

- *Kozlenko D.P., Dubrovinsky L.S., Kichanov S.E., Lukin E.V., Cerantola V., Chumakov A.I., Savenko B.N.* Magnetic and Electronic Properties of Magnetite across the High-Pressure Anomaly // *Sci. Rep.* 2019. V.9. P. 4464.

Проведено комплексное исследование внутренней структурной организации и фазового состава фрагмента Челябинского метеорита методами нейтронной дифракции, томографии, оптической и рамановской спектроскопии. Определен объемный минеральный состав и пространственное распределение различных компонентов. В дополнение к ранее обнаруженным фазам минералов оливина, ортопироксена, плагиоклаза и троилита полученные данные указывают на наличие фазы камасита (FeNi) в ис-

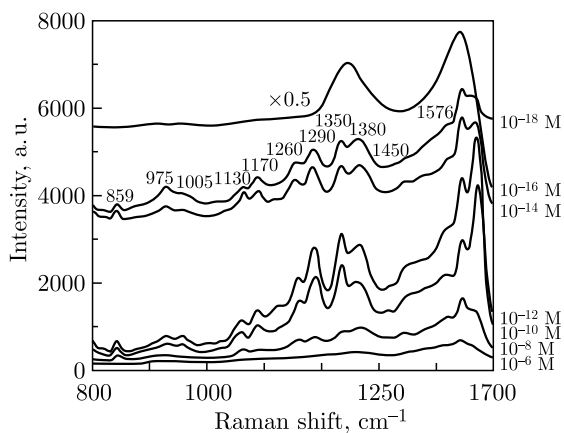


а) Исследуемый фрагмент Челябинского метеорита. б) Нейтронный дифракционный спектр фрагмента, обработанный методом полнопрофильного анализа. в) Фрагменты 3D-модели внутренней организации исследуемого образца, полученной с помощью нейтронной томографии. Розовые области соответствуют металлическим включениям

следуемом фрагменте. Обнаружено гетерогенное распределение железа в фазах оливина и ортопироксена, проведены морфологические расчеты для анализа пространственного распределения металлических компонентов.

- *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Kirillov A.K., Lukin E.V., Abdurakhimov B., Belozerova N.M., Rutkauskas A.V., Ivankina T.I., Savenko B.N.* A Structural Insight into the Chelyabinsk Meteorite: Neutron Diffraction, Tomography and Raman Spectroscopy Study // Springer Nat. Appl. Sci. 2019. V. 1. P. 1563.

Методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) были зарегистрированы спектры молекул человеческого лактоферрина, адсорбированных на посеребренном пористом кремнии (por-Si) в концентрациях от  $10^{-6}$  М до ультранизкой концентрации  $10^{-18}$  М (рисунок). ГКР-спектры лактоферрина, адсорбированного из  $10^{-6}$  М раствора, были довольно слабыми, но снижение концентрации до  $10^{-10}$  М привело к значительному усилению сигнала.



ГКР-спектры молекул лактоферрина, адсорбированных на посеребренном por-Si

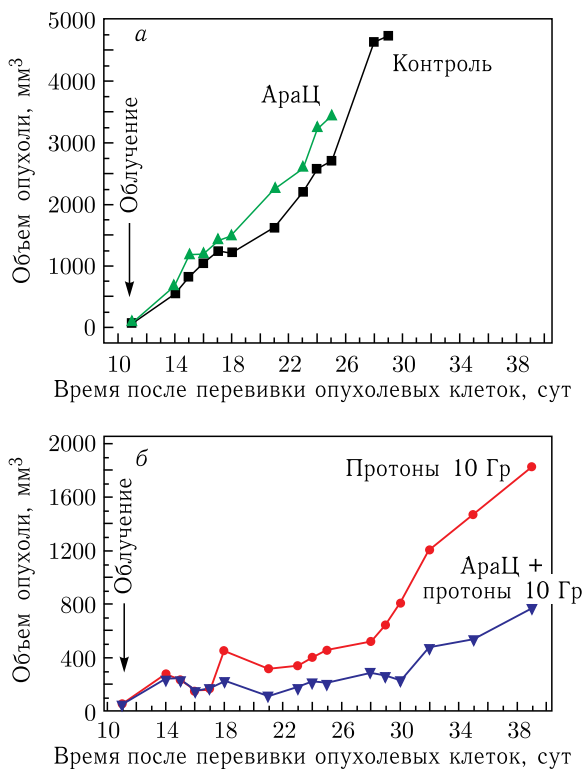
ГКР-спектры лактоферрина при концентрациях  $10^{-14}$  и  $10^{-16}$  М были менее интенсивными и начали меняться из-за увеличения вклада от молекул, выжженных лазером. Для предотвращения перегрева молекулы анализируемого вещества были защищены графеном, что позволило обнаружить адсорбированный лактоферрин из раствора  $10^{-18}$  М. Таким образом, впервые продемонстрирована возможность регистрации ГКР-

спектров молекул лактоферрина человека, адсорбированных на посеребренном пор-Si из  $10^{-6}$ – $10^{-18}$  М водных растворов.

- *Zavatski S., Arzumanyan G., Bandarenka H. et al.* Surface Enhanced Raman Spectroscopy of Lactoferrin Adsorbed on Silvered PS Covered with Graphene // *Biosensors*. 2019. V. 9. P. 34.

## РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Специалистами ОИЯИ и МРНЦ им. А.Ф.Цыба проведены предклинические исследования нового метода повышения биологической эффективности протонов для лечения опухолевых заболеваний *in vivo*. Группам животных (мыши) была привита опухоль меланомы. Опухоли животных подвергались облучению протонами в пике Брэгга с предварительным введением арабино-

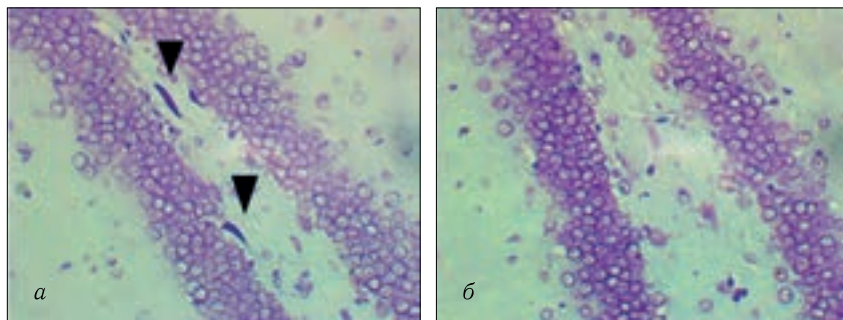


Кинетика роста опухоли меланомы у мышей: а) необлученный контроль; б) облучение протонами в пике Брэгга в дозе 10 Гр

зидцитозина (АраЦ) или без него. Контрольные (необлученные) животные погибли на 30-е сутки в результате развития опухолевого процесса. На 40-е сутки обе группы облученных животных оставались живы. Вместе с тем размеры опухоли меланомы у облученных животных с введением АраЦ были примерно в 3 раза меньшими по сравнению с облученными лишь одними протонами (рисунок). Получен патент № 2699670 на изобретение нового метода усиления радиационного воздействия на живые клетки.

- Красавин Е.А., Борейко А.В., Замулаева И.А. Новый метод повышения эффективности действия ионизирующих излучений на клетки опухолевых тканей // Материалы 3-й Российской конференции с международным участием «Радиобиологические основы лучевой терапии», ОИЯИ, Дубна, 2019. С. 84.

Исследованы морфофункциональные показатели воздействия протонов на центральную нервную систему. В период 1–8 сут после протонного облучения мышей и крыс в нелетальных дозах (0,5–5,0 Гр) происходит дозозависимое снижение основных показателей спонтанной двигательной активности грызунов. К 90-м суткам после облучения отмечается повышенный уровень показателей ориентировочно-исследовательской реакции и эмоционального статуса во всех группах облученных животных по сравнению с биоконтролем. Нарушение двигательной активности облученных протонами грызунов в ранний период и ее относительная нормализация в отдаленный после облучения период происходят на фоне увеличенного числа морфологически измененных и дистрофических нейронов в гиппокампе и разреженности клеток Пуркинье в мозжечке.



Морфологические изменения нейронов в полиморфном хилусе гиппокампа облученных в дозе 1 Гр (а) и необлученных (б) крыс. Черными стрелками отмечены нейроны с дистрофическими изменениями

- *Ляхова К.Н., Колесникова И.А., Утина Д.М., Северюхин Ю.С., Буденная Н.Н., Абросимова А.Н., Молоканов А.Г., Лалковичова М., Иванов А.А.* Морфофункциональные показатели воздействия протонов на центральную нервную систему // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, вып. 2. С. 75–81.

Построена математическая модель области САЗ гиппокампа, содержащей в общей сложности 1200 нервных клеток, с использованием программной среды NEURON. На основе данной модели произведен расчет возникновения синхронных нейронных осцилляций, вносящих вклад в формирование  $\gamma$ - и  $\theta$ -ритмов, играющих важную роль в механизмах памяти и обучения. На примере ионотропного рецептора глутамата NMDA, который играет ключевую роль в регуляции синаптической пластичности, обучении и формировании различных видов памяти, проведено молекулярно-динамическое моделирование процесса активации полноатомной структуры рецептора NMDA на базе пакета NAMD. Рассмотрено влияние одиночных и двойных точковых мутаций, а также структурной мутации (делеции) на структуру ионного канала и на функционирование нейронной сети в целом.

- *Batova A.S., Bugay A.N., Dushanov E.B.* Effect of Mutant NMDA Receptors on the Oscillations in a Model of Hippocampus // J. Bioinform. Comput. Biol. 2019. V. 17, No. 1. P. 1940003.

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

Завершается монтаж и осуществляется поэтапная проверка и ввод в эксплуатацию сверхпроводящего кольцевого ускорителя (с периметром 210 м) — бустера для исследовательского комплекса NICA. Все элементы магнитно-криостатной системы бустера (основы ускорителя) изготовлены в ОИЯИ по оригинальной технологии, получившей признание в Европе. Работу ускорителя и формирование пучка с высоким качеством обеспечивает комплекс высокотехнологичных систем, изготовленных при участии ведущих российских и зарубежных компаний и институтов.

- *Butenko A. et al.* NICA Accelerator Complex at JINR // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2019), Melbourne, Australia.

Введен в эксплуатацию уникальный ускорительный комплекс — фабрика сверхтяжелых элементов (СТЭ). Подготовлен





Магнитно-криостатная система бустера NICA в процессе сборки



Корпус фабрики СТЭ

первый эксперимент по синтезу изотопов 115-го элемента — московия. Этот эксперимент подводит итог многолетней работы ОИЯИ по созданию и запуску фабрики СТЭ и должен показать готовность комплекса к началу реализации долгосрочной программы, нацеленной на синтез элементов 119 и 120 — первых элементов 8-го периода Периодической таблицы Д. И. Менделеева — и изучение ядерно-физических и химических свойств новых элементов.



Газонаполненный сепаратор, фабрика СТЭ

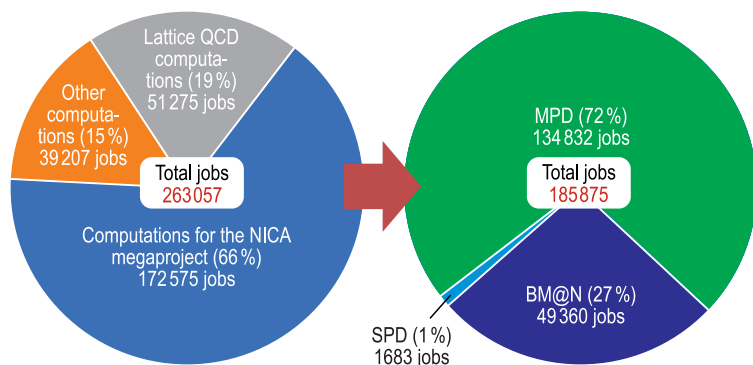
- *Dmitriev S. N., Oganessian Yu. Ts., Gulbekyan G. G., Kalagin I. V., Gikal B. N., Bogomolov S. L., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Yu., Ivanov G. N., Osipov N. F., Pashchenko S. V., Khabarov M. V., Semin V. A., Yereimin A. V., Utyonkov V. K.* SHE Factory: Cyclotron Facility for Super Heavy Elements Research // Proc. of CYC19 Intern. Conf., South Africa, Cape Town, 2019. <https://cyclotrons2019.vrws.de/>
- *Гульбемян Г. Г., Дмитриев С. Н., Иткис М. Г., Оганесян Ю. Ц., Гикал Б. Н., Калагин И. В., Семин В. А., Богомолов С. Л., Бузмаков В. А., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Осипов Н. Ф., Пащенко С. В., Соколов В. А., Пчелкин Н. Н., Прохоров С. В., Хабаров М. В., Гикал К. Б.* Запуск циклотрона ДЦ-280 — базовой установки фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 653–665.

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА**

Введена в эксплуатацию вторая очередь суперкомпьютера «Говорун», являющегося гетерогенным высокопроизводительным компонентом Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ. Суперкомпьютер содержит как CPU вычислительные компоненты, так и ускорители вычислений GPU NVIDIA V100, что позволяет проводить ресурсоемкие, массивно-параллельные расчеты, для которых требуются различные типы вычислительных архитектур. В настоящее время

суперкомпьютер занимает 10-е место в списке Top50 самых мощных суперкомпьютеров России и стран СНГ и используется для решения массивно-параллельных и ресурсоемких задач, связанных с реализуемым в ОИЯИ мегасайенс-проектом NICA.

За период эксплуатации пользователями из лабораторий ОИЯИ было выполнено свыше 260 000 задач на всех вычислительных компонентах суперкомпьютера «Говорун». Около 85 % ресурсов суперкомпьютера используются как для теоретических исследований, так и непосредственно для генерации и реконструкции событий мегапроекта NICA.



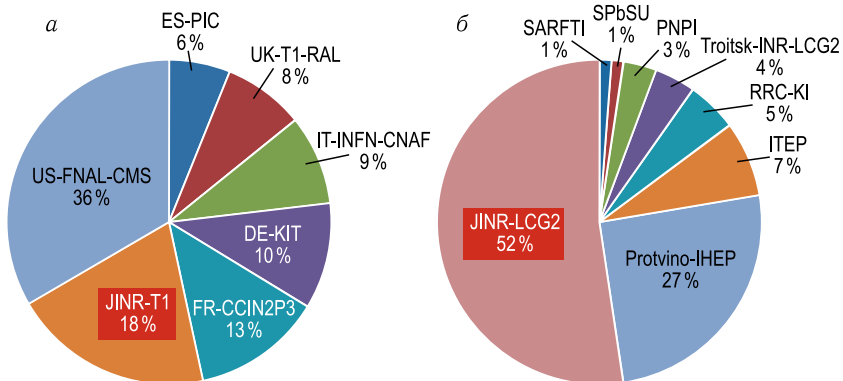
Использование ресурсов суперкомпьютера «Говорун»

- *Belyakov D. V. et al.* Using the “Govorun” Supercomputer for the NICA Megaproject // Proc. of the 27th Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC’2019), Budva, Becici, Montenegro, Sept. 30 – Oct. 4, 2019, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org). V. 2507 (in press).

В 2019 г. общая загрузка Tier-1 составила 18 % от суммарной производительности всех центров уровня Tier-1. Центр Tier-1 (T1\_JINR) демонстрирует стабильную работу и занимает 2-е место по производительности в мире.

Грид-компонент МИВК ОИЯИ включает центр Tier-1 для эксперимента CMS на LHC и Tier-2 для ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, BES, BIOMED, COMPASS, MPD, NOνA, STAR, ILC и т. д.

Сайт ОИЯИ Tier-2 (JINR\_LCG2) является лучшим в российском консорциуме RDIG (Russian Data Intensive Grid — Российский грид для интенсивных операций с данными). В 2019 г. было



Распределение по нормированному времени загрузки CPU в часах HS06 за 2019 г. для а) сайтов Tier-1 эксперимента CMS и б) сайтов Tier-2, входящих в консорциум RDIG

обработано более 3 млн заданий, что составляет 52% от общей загрузки CPU RDIG.

- *Baginyan A. S. et al.* Grid at JINR // Proc. of the 27th Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019), Budva, Becici, Montenegro, Sept. 30 – Oct. 4, 2019, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org). V. 2507 (in press).

Предложен метод реконструкции траекторий заряженных частиц на основе рекуррентной нейронной сети с помощью детектора GEM эксперимента VM@N. Показано, что предлагаемый одноэтапный алгоритм с глубокой рекуррентной нейросетью особой конструкции и специальной функцией ошибки, учитывающей сильную несбалансированность обучающей выборки, является точным, быстрым и не требует специальной стадии предварительной обработки. Работу модели удалось существенно ускорить с помощью средств, предоставляемых суперкомпьютером «Говорун». Представленные результаты данного подхода для смоделированных событий детектора GEM VM@N показали повышение эффективности обработки событий до 98,5%.

- *Baranov D. et al.* Catch and Prolong: Recurrent Neural Network for Seeking Track-Candidates // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 201. P. 05001.

Введен в эксплуатацию компьютерный off-line кластер, который является одним из четырех базовых кластеров распределенной компьютерно-информационной инфраструктуры проекта



Компьютерный off-line кластер ЛФВЭ

«Комплекс NICA». Он предназначен для моделирования, обработки, анализа исследуемых процессов и хранения экспериментальных данных.

Кластер построен по модульному принципу, состоит из восьми стоек с компьютерным и коммуникационным оборудованием, двух источников бесперебойного питания, системы охлаждения, электропитания и пожаротушения. Кластер имеет внутреннюю сеть 100 Гб/с Ethernet, подключен к кластерной сети на скорости 200 Гб/с и к лабораторной сети на скорости 100 Гб/с.

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.). First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. "Strangeness in Quark Matter" (SQM-2019), Bari, Italy.*

## **ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ**

В 2019 г. в Учебно-научном центре ОИЯИ прошли обучение около 500 студентов базовых кафедр МГУ, МФТИ, МИФИ, государственного университета «Дубна» и университетов государств-членов ОИЯИ. Летние учебные и производственные практики организованы для почти 500 студентов вузов Армении, Белоруссии, Казахстана, Кубы, России, Сербии, Украины.

Ежегодная международная практика в 2019 г. проводилась в 4 этапа для 134 представителей Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Египта, Кубы, Польши, Румынии, Сербии, Словакии, Чехии, Чили и ЮАР.

Около 60 студентов и аспирантов из Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Египта, Италии, Казахстана, Кубы, Мексики,

Нидерландов, Польши, России, Румынии, Сербии, Словакии, Узбекистана и Украины участвовали в летней студенческой программе 2019 г.

УНЦ и университетом «Дубна» была организована очередная летняя школа «Физика. Математика. Информатика» для 23 учителей из государств-членов ОИЯИ и почти 100 школьников из Белоруссии, России, Казахстана и Украины. В научной школе для учителей физики, проходившей в ЦЕРН, участвовали 24 преподавателя из Белоруссии, России и Украины.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении всероссийского фестиваля НАУКА 0+ в Москве и Дубне, российского фестиваля «PROНаука» в Казани, всемирного Дня темной материи, форума «Профессии будущего» в Дубне, Дней физики, 31-й летней международной компьютерной школы им. В. Волокитина и Е. Ширковой (МКШ-2019), 8-го турнира по робототехнике Открытой Верхневолжской образовательной кибернетической сети Cyber Dubna-2019, мастерской физики «105-й элемент» в рамках образовательного проекта «Летняя школа», экскурсий для студентов, школьников и учителей из государств-членов ОИЯИ и других стран. Сотрудники УНЦ организовали участие ОИЯИ в фестивале науки, технологий и искусства «Geek Picnic» в Санкт-Петербурге, принимали участие в 11-й Всемирной конференции научных журналистов (WCSJ) в Лозанне (Швейцария).

## **ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 13.12.2018 по 19.12.2019)**

- Книги — 10:

*Plechko V. N.* Grassmann Variable Analysis for 1D and 2D Ising Models (Lectures from 2002) / Ed. by T. C. Dorlas. — Dublin: DIAS, 2019. — 57 p. — (Communications of the Dublin Institute for Advanced Studies. Series A (Theoretical Physics), No. 31).

*Барбашов Б. М., Нестеренко В. В.* Приближение эйконала для процессов высокоэнергетического рассеяния частиц: Курс лекций. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: URSS, 2019. — 82 с. — Библиогр.: с. 79–82.

*Башашин М. В., Земляная Е. В., Стрельцова О. И.* Практическое введение в технологию MPI на кластере NubriLIT: Учебное пособие. — Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2019. — 50 с.: ил. — Библиогр.: с. 45. — 24 экз.

*Данилян Г.В.* Фундаментальные аспекты физики деления ядер: новейшие исследования. — М.: URSS, 2019. — 115, [1] с.: ил. — Библиогр.: с. 113–116.

*Исаев А.П., Рубаков В.А.* Теория групп и симметрий. Представления групп Ли и алгебр Ли. Приложения. — Дубна: ОИЯИ, 2019. — 482 с. — (ОИЯИ; 2019-38). — Библиогр.: с. 475–478. — 100 экз.

*Пенионжкевич Ю.Э., Вахтель В.М.* Современные ускорители заряженных частиц и их приложение: Учебное пособие. — Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2018. — 110, [1] с.: цв. ил. — Библиогр. в конце книги. — 50 экз.

*Прохоров С.В.* Многочастотные резонаторы. Методы расчета, математическое моделирование, построение. — М.: Радиотехника, 2019. — 220 с.: ил. — Библиогр.: с. 216. — 500 экз.

*Сморodinский Я.А.* Избранные труды / Ред.: Ю. А. Данилов, В. Г. Кадышевский, А. Н. Сисакян; Сост.: В. Г. Кадышевский, А. Н. Сисакян [и др.]. — Изд. 3-е. — М.: URSS, 2017. — 566 с.: ил. — (Классики науки, № 2). — Библиогр.: с. 542–561.

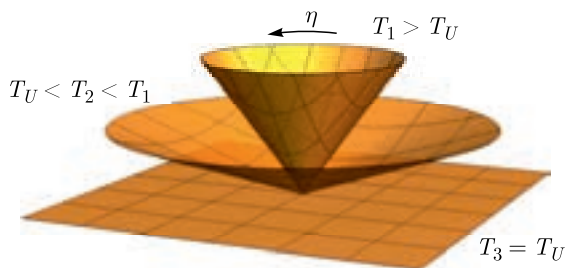
*Соловьев Е.А.* Новые подходы в квантовой физике / Ред. Л. И. Пономарев; Пер. с англ.: В. Е. Соловьев. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 214 с.: ил. — Библиогр.: с. 206–214.

*Франк И.М.* Научные труды: в двух книгах. Кн. 2 / Сост. А. И. Франк. — 2018. — 670 с.: ил. — Библиогр. в конце глав; Библиогр. список работ И. М. Франка: с. 627–653. — 880 экз.

- Журнальные статьи — 1164
- Публикации в трудах конференций — 321
- Препринты — 45
- Авторефераты диссертаций — 20
- Всего: 1560

## THEORETICAL PHYSICS

The calculations of axial current and energy density in rotating and accelerating medium were performed making use of the Zubarev density operator and Wigner function. Their results are shown to lead to the identification of angular velocity and acceleration with real and imaginary chemical potentials. It is established that energy density approaches zero for the temperature  $T$  equal to the Unruh temperature  $T_U$ , and this is interpreted as instability of the phase with the temperature  $T < T_U$ . The duality between quantum-statistical approach in Minkowski space and the effects of nontrivial geometry in the space with conical singularity is proved. The results are applied to the physics of heavy-ion collisions.



The change of effective conical singularity dual to the quantum-statistical approach for the temperature approaching the Unruh one from above  
( $\eta = 1/(rT)$ )

- Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I. // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. P. 071901; V. 100. P. 125009;  
Prokhorov G. Yu., Teryaev O. V., Zakharov V. I. // JHEP. 2019. V. 1902. P. 146.

In the framework of the program for the study of atomic nucleus decays, alpha decay, cluster radioactivity and spontaneous fission were described for the first time in the unique approach

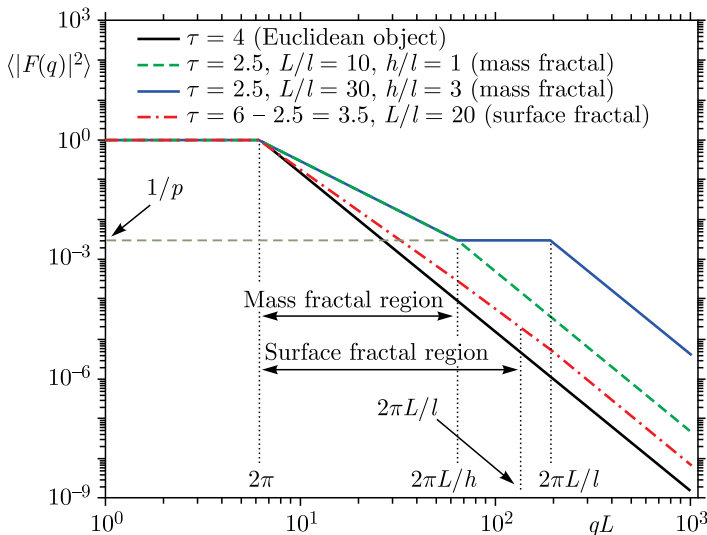


based on the consideration of the dynamics of nucleus in charge asymmetry coordinate. The calculated half-lives for  $^{232,234,236}\text{U}$ ,  $^{236,238}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Cm}$  and  $^{248}\text{Cf}$  nuclei are in good agreement with the available experimental data. The presented model describes well the half-lives, which differ up to 12 orders of magnitude, and allows one to predict the characteristic times for cluster radioactivity and spontaneous fission of heavy and superheavy nuclei.

- Rogov I. S., Adamian G. G., Antonenko N. V. // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 024606.

Small-angle scattering (SAS) of X-rays, neutrons, and light waves from ensembles of determined fractal structures is theoretically investigated. Their positions in space and orientation are assumed to be random. In the standard analysis, only three parameters can be determined from SAS data: the fractal dimension as well as the lower and upper limits of the fractal range. It is shown that the self-similarity of deterministic fractal structures allows one to obtain their additional characteristics in real space.

In the present paper, exactly solvable models that describe SAS from this type of systems are proposed and studied. The developed models make it possible to understand how to extract additional information about the fractal structures and analytically



Schematic SAS intensities from regular and fractal objects as a function of the momentum transfer

describe the intensities of SAS. The main examples are the generalized Cantor fractal and some of its variations, which model mass, surface, and multifractal structures. The differences in the SAS data between deterministic and random fractal structures are investigated. The limits of applicability of the proposed models and the prospects for future studies of deterministic fractal structures are discussed.

- *Cherny A.Yu., Anitas E.M., Osipov V.A., Kuklin A.I.* The Structure of Deterministic Mass and Surface Fractals: Theory and Methods of Analyzing Small-Angle Scattering Data // Phys. Chem. Chem. Phys. 2019. V. 21. P. 12748–12762.

The general classification of finite-dimensional irreducible representations of simple Lie algebras based on the construction of highest weight representations is given. In the case of algebras  $sl(N, C)$ ,  $su(N)$  and groups  $SL(N, C)$ ,  $SU(N)$  the construction of representations is based on the Schur–Weyl duality. The key ingredient here is a symmetric group and its representations which we discuss within both Young–Frobenius and Okounkov–Vershik approaches. For tensor representations of  $SO$  and  $Sp$  groups and their algebras, the relevant object is the Brauer algebra and its representation theory. Spinor representations of orthogonal Lie algebras were analyzed. The spinor Lie groups  $Spin(p, q)$  and their representations were investigated on the basis of conjugation matrices.

- *Isaev A.P., Rubakov V.A.* Theory of Groups and Symmetries. Representations of Lie Groups and Algebras. Applications. Dubna: JINR, 2019. 482 p.

## EXPERIMENTAL PHYSICS

### Particle Physics

The most important achievement of 2019 is the construction of the fourth and fifth clusters of the deep underwater detector in Lake Baikal as the next step to full-scale Baikal-GVD detector. With their introduction, the effective volume of the Baikal-GVD telescope achieved the value of  $0.25 \text{ km}^3$  in the task of registration of showers from high-energy neutrino of astrophysical origin that is about 0.6 of the effective volume of the IceCube detector in the Antarctic. The detector-2019 consists of 1440 optical modules assembled on

40 vertical strings (8 strings in each cluster) distributed from 750 to 1250 m depth. Preliminary data analysis for 2016–2018 and, partially, for 2019 for the search allows one to select first six events with energies above  $\sim 100$  TeV, where astrophysical neutrino flux exceeds background atmospheric one.

- *Avrerin A.D. et al.* Baikal-GVD: The New-Generation Neutrino Telescope in Lake Baikal // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83, No. 8. P. 921–922; Izv. Ross. Akad. Nauk: Ser. Fiz. 2019. V. 83, No. 8. P. 1016–1018.
- *Avrerin A.D. et al. (Baikal-GVD Collab.)*. Search for Cascade Events with Baikal-GVD // Proc. of ICRC2019; <https://pos.sissa.it/358/873/pdf>; arXiv:1908.05430.

A compact DANSS detector of reactor antineutrino, created by physicists of JINR (Dubna) and ITEP (Moscow), is installed at the Kalinin NPP and registers more than 4000 reactor antineutrinos per day with a background not exceeding 2–3% (today the best value in the world). In 2019, an updated full-scale analysis of 2016–2019 data was carried out with improved estimation of all background sources and systematic errors. The world's best model-independent restriction on the existence of a sterile neutrino has been obtained.

In addition, DANSS demonstrated continuous, long-term (since October 2016) and high-precision (1.5%) monitoring of the power of a nuclear reactor and sensitivity to changes in fuel composition (various ratios of  $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$  during the fuel campaign). The solution to both problems is important in the development of experimental approaches to controlling the nonproliferation of nuclear materials.

- *Alekseev I.G. et al.* Industrial Reactor Power Monitoring Using Antineutrino Counts in the DANSS Detector // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82, No. 5. P. 415–424.

New result on neutrino oscillation parameter measurement was obtained in the  $\text{NO}\nu\text{A}$  experiment (FNAL, USA) with participation of the JINR physicists. Data taking with both neutrino and antineutrino beam coming from FNAL accelerator complex with the proton beam of a record power ( $\sim 800$  kW) as well as combined analysis of a muon neutrino disappearance and electron neutrino appearance channels allowed one to measure the following neutrino oscillation parameters:  $|\Delta m_{23}^2| = 2.48_{-0.06}^{+0.11} \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  and  $\sin^2 \theta_{23}$  in the ranges of 0.53–0.60 and 0.45–0.48 for the normal hierarchy of neutrino masses. The data exclude most values near  $\delta_{\text{CP}} = \pi/2$  for the inverted mass hierarchy by more than  $3\sigma$  and favor the normal

neutrino mass hierarchy by  $1.9\sigma$  and  $\theta_{23}$  values in the upper octant by  $1.6\sigma$ .

- *Acero M. A. et al. (NO $\nu$ A Collab.). First Measurement of Neutrino Oscillation Parameters Using Neutrinos and Antineutrinos by NO $\nu$ A // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123, No. 15. P. 151803.*

Under the ATLAS project at the LHC (CERN), actively participated by JINR staff members, a search for the decay of the SM Higgs boson into a  $bb$  pair was conducted when produced in association with a  $W$  or  $Z$  boson. The data, corresponding to an integrated luminosity of  $79.8 \text{ fb}^{-1}$  were collected in  $pp$  collisions of the LHC at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ . A combination of results searching for the Higgs boson produced in association with a vector boson yields an observed (expected) significance of  $5.3(4.8)\sigma$ .

- *Aaboud M. et al. (The ATLAS Collab.). Measurement of  $VH, H \rightarrow \rightarrow bb$  Production as a Function of the Vector-Boson Transverse Momentum in 13 TeV  $pp$  Collisions with the ATLAS Detector // JHEP. 2019. V. 5. P. 141.*

## High Energy Heavy Ion Physics

First physical results on the production of hyperons (“strange” baryons) were obtained at the BM@N facility in the experiment aimed at studying properties of superdense nuclear matter in collisions of high-energy heavy ions, whose beams will be provided by the Booster and Nuclotron complex accelerators (NICA megascience project).

The experiment is represented by the international collaboration that includes 240 physicists and engineers from 21 research institutes from 11 countries, including Germany, France, the United States, and Israel. During the run, hundreds of millions of interactions of carbon, argon and krypton ions with targets from carbon to lead were collected on extracted Nuclotron beams.

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.). First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. “Strangeness in Quark Matter” (SQM-2019), Bari, Italy.*

## Low Energy Heavy Ion Physics

In 2019, an experimental search for the superheavy hydrogen isotope  $^7\text{H}$  was undertaken, and the correlations of its decay products  $t + 4n$  were studied at JINR FLNR using the ACCULINNA-2 fragment separator. The  $^7\text{H}$  ground and excited

states were populated in the  ${}^8\text{He} + d \rightarrow {}^3\text{He} + {}^7\text{H}$  reaction using the secondary beam of  ${}^8\text{He}$  radioactive nuclei with the energy of 26 A MeV. The  ${}^7\text{H}$  missing mass spectrum saw a peak that was interpreted as a doublet of the overlapping  $5/2^+$  and  $3/2^+$  states with the energy of 6.5(5) MeV. In addition, there were indications for the population of the  $1/2^+$  ground state with the energy of 1.8(5) MeV. The low-energy  ${}^7\text{H}$  spectrum and the correlations of its decay products were theoretically investigated.

- *Kaminski G. et al.* Status of the New Fragment Separator ACCULINNA-2 and First Experiments // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2019 (in press); <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.042>.
- *Bezbakh A. A. et al.* Evidence for the First Excited State of  ${}^7\text{H}$  // Phys. Rev. Lett. 2019 (in press); arXiv:1906.07818.
- *Sharov P. G., Grigorenko L. V., Ismailova A., Zhukov M. V.* Pauli-Principle Driven Correlations in Four-Neutron Nuclear Decays // JETP Lett. 2019. V. 110. P. 5–14; Pis'ma v ZhETF. 2019. V. 110. P. 7–8; arXiv:1808.00513.

## Neutron Nuclear Physics

Data on prompt fission neutron (PFN) emission in the reactions  ${}^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$  and  ${}^{252}\text{Cf}(sf)$  were measured using twin back-to-back ionization chamber (TIC) with Frisch grids along with data acquisition system based on fast waveform digitizers (WFD). Using the digital signal processing (DSP) algorithms along with fission fragments (FF) and PFN analysis software, we managed to correct PFN multiplicity dependences for measured reaction that is widely used in the scientific literature. Position-sensitive TIC for FF and PFN emission study was developed and investigated in capability to be used in combination with 32 liquid scintillators for

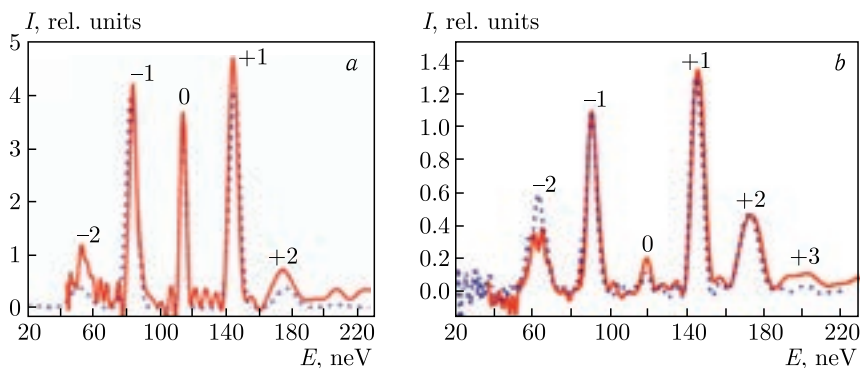


Position-sensitive TIC for PFN emission study in combination with 32 liquid scintillators

PFN characteristic measurement. The developed setup opens new perspectives for investigations of resonance neutron induced fission and the sub-barrier fission, induced by thermal neutrons for nuclei such as  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , and  $^{238}\text{U}$ .

- *Zeynalov Sh., Sedyshev P., Shvetsov V., Sidorova O.* Prompt Fission Neutron Investigation in  $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$  and  $^{252}\text{Cf}(sf)$  Reactions // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V.211. P.04003.
- *Zeynalov Sh., Sedyshev P., Shvetsov V., Sidorova O.* Nuclear Fission Investigation with Twin Ionization Chamber // Appl. Nucl. Techn. (CRETE2019); Intern. J. Mod. Phys.: Conf. Ser. (in press).

The study of nonstationary neutron diffraction by a moving diffraction grating was continued. It has been shown that by choosing the depth of the grating profile it is possible to significantly change the ratio between intensities of waves of different diffraction orders, thereby changing the amount of energy transferred to the neutron. Experimental results are in good agreement with theoretical predictions based on the multiwave dynamic theory of neutron diffraction by a 3D periodic grating.

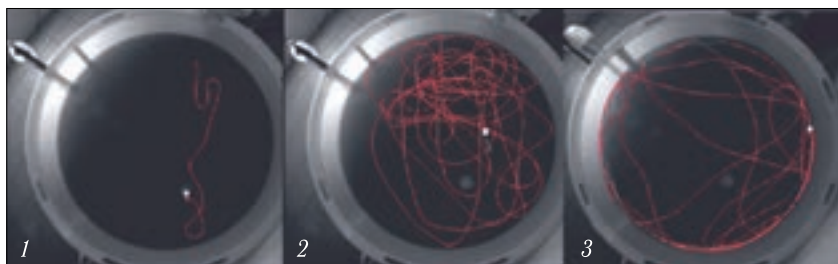


Energy spectra arising from UCN diffraction by moving gratings. Experimental (red solid lines) and calculated (blue dotted lines) data are shown for gratings that differ in profile depth

- *Kulin G. V., Frank A. I., Zakharov M. A., Goryunov S. V., Bushuev V. A., Panzarella A., Geltenbort P., Jentschel M.* // JETP. 2019. V. 129. P. 806.

For the first time the impact of silver nanoparticles received from the mother's body during the prenatal and lactation periods on offspring was investigated. Comparison of the cognitive abilities of experimental young animals, exposed to the effect of nanoparticles,

and control animals showed that during the prenatal period areas of the brain which are responsible for the formation of spatial memory were more vulnerable to silver nanoparticles than after birth, that can be explained by incomplete development of blood to brain barrier in fetus. Silver content in different tissues (blood, liver, brain, lungs and kidneys) was determined by neutron activation analysis. The average specific mass content of silver which crossed the blood–brain barrier was  $(373 \pm 75)$  ng (for female) and  $(385 \pm 57)$  ng (for offspring). The obtained results are important to assess the toxic effect of nanomaterials on human reproductive system.

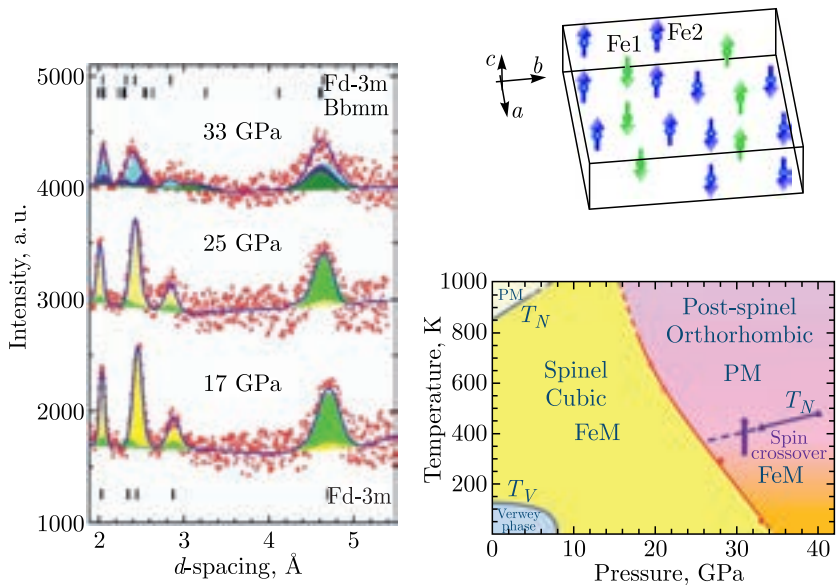


Examples of movement pattern of animal with different types of behavior in the Morris test: 1 — directional search, 2 — random search, 3 — thigmotaxis (strategy of incapable individuals)

- *Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Iolieva A., Petritskaya E., Rogatkin D.* Neutron Activation Analysis as a Tool for Tracing the Accumulation of Silver Nanoparticles in Tissues of Female Mice and Their Offspring // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2019. V.322. P. 1079–1083; DOI:10.1007/s10967-019-06746-9.
- *Iolieva A., Petritskaya E., Lopatina M., Rogatkin D., Zinicovscaia I.* Evaluation of Cognitive Abilities of Mice Exposed to Silver Nanoparticles during Prenatal Development and Lactation // *Proc. of the VII Intern. Forum on Cognitive Modeling (IFCM-2019)*, Rethymno, Greece (Crete), Sept. 5–15, 2019. P. 276–282.

## Condensed Matter Physics

Recently anomalous behavior of the physical properties of magnetite was observed in the region of the pressure-induced structural phase transition taking place at 20–25 GPa. For elucidation of the nature of this phenomenon, a study of magnetic and electronic properties was performed by means of synchrotron



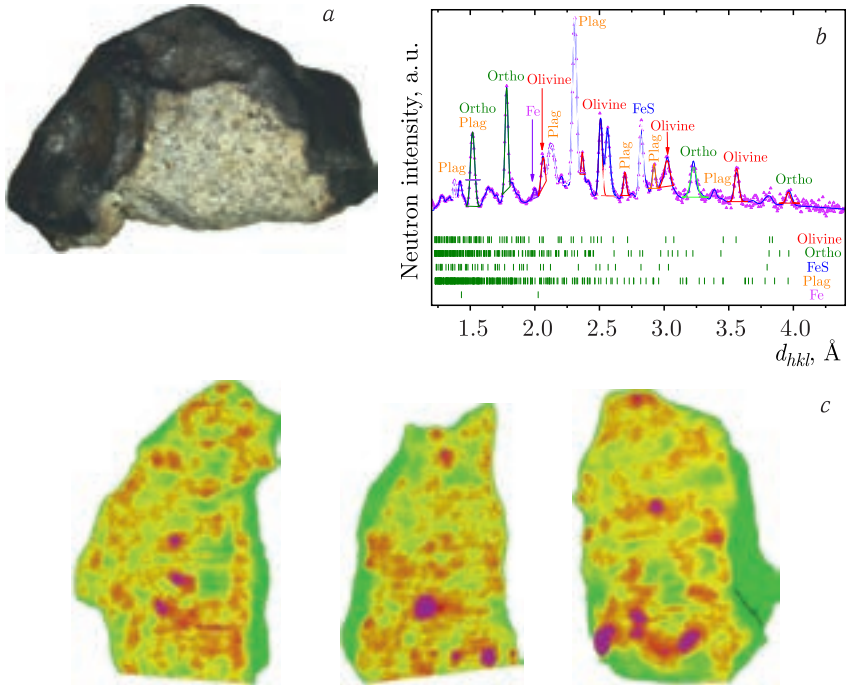
Left: neutron diffraction patterns of magnetite measured at pressures up to 33 GPa with the DN-6 diffractometer using diamond anvil cell and analyzed with the Rietveld method. Right: magnetic structure of the orthorhombic high-pressure phase of magnetite (top) and structural, magnetic and electronic phase diagram of magnetite (bottom)

$^{57}\text{Fe}$  Moessbauer spectroscopy and neutron diffraction in the pressure 0–40 GPa and temperature 10–300 K ranges. In the high pressure phase the long range ferrimagnetic order was observed, forming at  $T_{\text{NP}} \sim 420$  K, and its symmetry was established. The structural, magnetic and electronic phase diagram of magnetite in the studied range of thermodynamic parameters was determined.

- *Kozlenko D.P., Dubrovinsky L.S., Kichanov S.E., Lukin E.V., Cerantola V., Chumakov A.I., Savenko B.N.* Magnetic and Electronic Properties of Magnetite across the High-Pressure Anomaly // *Sci. Rep.* 2019. V.9. P.4464.

A complex study of internal structural organization and phase composition of the fragment of Chelyabinsk meteorite was performed by a combination of neutron diffraction, tomography, optical and Raman spectroscopy. The bulk mineral composition and spatial distribution of various components were determined. In addition to already discovered phases of minerals — olivine, orthopyroxene, plagioclase and troilite, the measured data point



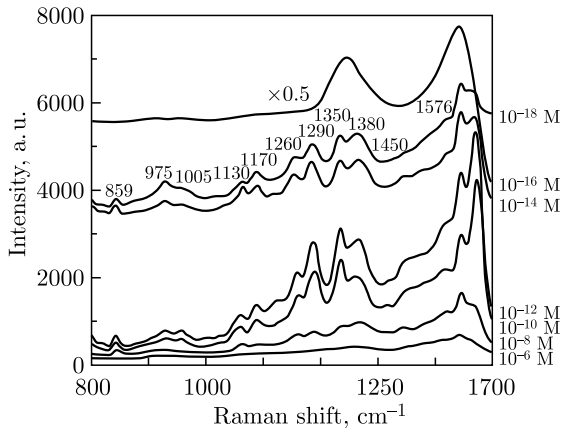


a) The studied fragment of Chelyabinsk meteorite. b) Neutron diffraction pattern of the fragment analyzed by the profile matching method. c) Parts of the 3D model of structural organization of the studied fragment obtained by neutron tomography. The pink regions correspond to metallic inclusions

to a presence of camacite (FeNi) phase in the studied fragment. The heterogeneous distribution of iron in the phases of olivine and orthopyroxene was observed, the morphologic calculations for analysis of spatial distribution of metallic components were performed.

- *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Kirillov A.K., Lukin E.V., Abdurakhimov B., Belozeroва N.M., Rutkauskas A.V., Ivankina T.I., Savenko B.N.* A Structural Insight into the Chelyabinsk Meteorite: Neutron Diffraction, Tomography and Raman Spectroscopy Study // Springer Nat. Appl. Sci. 2019. V. 1. P. 1563.

The SERS spectra of lactoferrin at the  $10^{-14}$  and  $10^{-16}$  M concentrations were less intensive and started to change due to increasing contribution from the laser burned molecules. To prevent overheating, the analyte molecules were protected with



SERS spectra of lactoferrin molecules adsorbed on the silvered por-Si

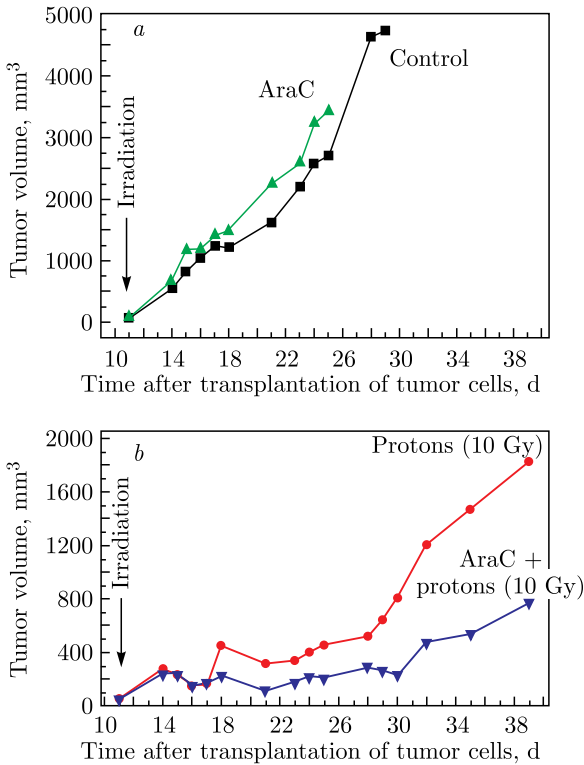
graphene, which allowed the detection of lactoferrin adsorbed from the  $10^{-18}$  M solution. Thus, for the first time, the ability to measure the SERS spectra of the human lactoferrin molecules adsorbed on the silvered por-Si from the  $10^{-6}$ – $10^{-18}$  M water solutions has been demonstrated.

- *Zavatski S., Arzumanyan G., Bandarenka H. et al.* Surface Enhanced Raman Spectroscopy of Lactoferrin Adsorbed on Silvered PS Covered with Graphene // *Biosensors*. 2019. V. 9. P. 34.

## RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

A group of specialists from the JINR LRB and Tsyb Medical Radiology Research Center performed pre-clinical *in vivo* studies of a new method of increasing the biological effectiveness of accelerated protons in the treatment of tumors. A group of animals (mice) was inoculated with a melanoma tumor. The tumors were exposed to Bragg peak protons – with and without pre-treatment of mice with cytosine arabinoside (AraC). The control (nonexposed) animals died of tumor development on the 30th day after exposure. On the 40th day, both irradiated groups were alive, the tumor size being smaller by a factor of  $\sim 3$  in the group exposed in the presence of AraC than in the group exposed without AraC pre-treatment. Patent No.2699670 has been obtained for a new method of enhancing the radiation effect on living cells.

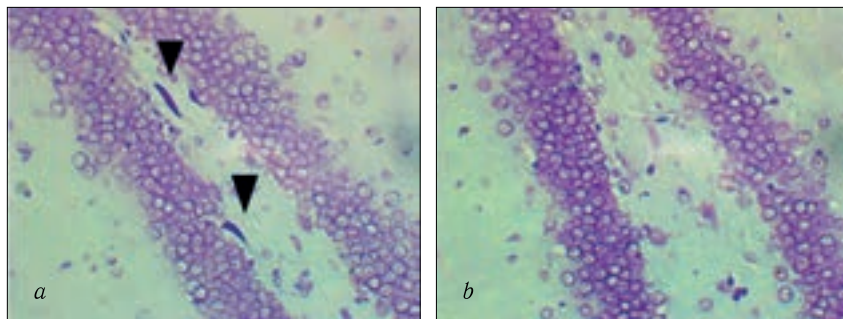
- *Krasavin E.A., Boreyko A.V., Zamulaeva I.A.* A New Method of Increasing the Efficiency of Ionizing Radiation Action on



The kinetics of melanoma tumor growth in mice: *a*) nonexposed control animals; *b*) Bragg peak proton exposure at a dose of 10 Gy

Tumor Tissue Cells // Proc. of the 3rd Russ. Conf. with Intern. Participation “Radiobiological Basis of Radiation Therapy”, JINR, Dubna, 2019. P. 84 (in Russian).

Morphofunctional indicators of accelerated protons’ action on the CNS have been studied. During the period of 1–8 days after proton exposure of mice and rats at nonlethal doses (0.5–5.0 Gy), a dose-independent decrease was observed in the main indicators of the rodents’ spontaneous motor activity. By the 90th day, an increase was observed in the orientation-and-exploratory response and emotional status indicators in all irradiated animal groups compared with the control animals. Motor activity disfunction in the proton-irradiated animals in the early period after exposure and its relative normalization in the long-term period take place against the background of an increase in the number of morphologically



Morphofunctional changes in hippocampal polymorphic hilus neurons in (a) rats exposed at a dose of 1 Gy and (b) nonexposed rats. The black arrows point to the neurons with dystrophic changes

changed and dystrophic neurons in the hippocampus and sparseness of Purkinje cells in the cerebellum.

- *Lyakhova K. N., Kolesnikova I. A., Utina D. M., Severyukhin Yu. S., Budennaya N. N., Abrosimova A. N., Molokanov A. G., Lalkovičova M., Ivanov A. A.* Morphofunctional Indicators of the Effects of Protons on the Central Nervous System // *Med. Radiol. Radiat. Safety*. 2019. V. 64, No. 2. P. 75–81 (in Russian); DOI: 10.12737/article\_5ca60c7bba45e9.77708543.

A mathematical model of the CA3 region of the hippocampus containing a total of 1200 nerve cells has been constructed in the NEURON software environment. Based on this model, a calculation has been done of the development of synchronous neuron oscillations, which make a contribution to the formation of the  $\gamma$  and  $\theta$  rhythms — important components of the memory and learning mechanisms. Using as an example the ionotropic glutamate NMDA receptor, which plays a key role in synaptic plasticity regulation, learning, and formation of different types of memory, a molecular dynamics simulation has been performed of the activation of the NMDA receptor's full-atom structure with the NAMD software package. The influence has been examined of single and double point mutations and a structure mutation (deletion) on the ion channel structure and functioning of the neural network as a whole.

- *Batova A. S., Bugay A. N., Dushanov E. B.* Effect of Mutant NMDA Receptors on the Oscillations in a Model of Hippocampus // *J. Bioinform. Comput. Biol.* 2019. V. 17, No. 1. P. 1940003.

## ACCELERATOR TOPICS

The assembling of the superconducting ring accelerator — Booster for the NICA research complex — is being completed, and the stage-by-stage testing and commissioning (with a perimeter of 210 m) is being carried out. All elements of the magnetic-cryostat Booster system (accelerator base) are manufactured at JINR using the unique technology which is appreciated in Europe. The accelerator operation and beam production with high quality are provided by a complex of high-tech systems manufactured with the participation of leading Russian and foreign companies and institutes.



Magnetic cryostat system of the NICA Booster is being assembled

- *Butenko A. et al.* NICA Accelerator Complex at JINR // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC2019), Melbourne, Australia.

A unique accelerator complex “Factory of Superheavy Elements” (SHE Factory) was commissioned. The preparations for the first experiment on the synthesis of the isotopes of element 115 (moscovium) were finalized. The experiment summarizes the results of JINR’s long-standing work in creating and commissioning the SHE Factory and aims at showing the complex ready for the long-term research programme on the synthesis of elements 119 and 120 — the first elements of the 8th row of the Mendeleev Periodic Table — and the study of the nuclear and chemical properties of new elements.



SHE Factory building



Gas-filled recoil separator, SHE Factory

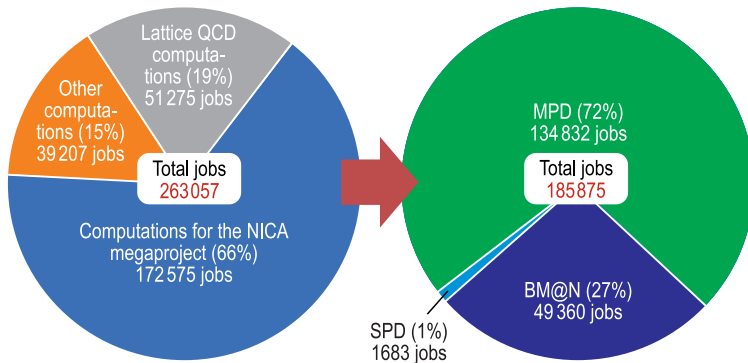
- *Dmitriev S.N., Oganessian Yu. Ts., Gulbekyan G.G., Kalagin I. V., Gikal B.N., Bogomolov S.L., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Yu., Ivanov G.N., Osipov N.F., Pashchenko S.V., Khabarov M.V., Semin V.A., Yeremin A.V., Utyonkov V.K.* SHE Factory: Cyclotron Facility for Super Heavy Elements Research // Proc. of CYC19 Intern. Conf., South Africa, Cape Town, 2019. <https://cyclotrons2019.vrws.de/>

- *Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G., Oganessian Yu.Ts., Gikal B.N., Kalagin I.V., Semin V.A., Bogomolov S.L., Buzmakov V.A., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Yu., Osipov N.F., Pashchenko S.V., Sokolov V.A., Pchelkin N.N., Prokhorov S.V., Khabarov M.V., Gikal K.B.* The Commissioning of the DC-280 Cyclotron — the Basic Facility of the Factory of Superheavy Elements of FLNR JINR // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 6. P. 866–875.

## INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

In 2019, the second modification of the “Govorun” supercomputer, which is a heterogeneous high-performance component of the Multifunctional Information and Computing Complex (MICC) of JINR, was commissioned. The supercomputer contains both CPU computing components and GPU computing accelerators NVIDIA V100, which enables one to carry out resource-intensive massively parallel calculations that require different types of computing architectures. The “Govorun” supercomputer takes the 10th place in the Top50 list of the most powerful supercomputers in Russia and the CIS. At present, the supercomputer is used to solve massively parallel and resource-intensive tasks related to the NICA megascience project underway at JINR.

For the period of operation, users from JINR laboratories accomplished over 260 000 tasks at all components of the “Govorun” supercomputer. About 85% of the supercomputer resources are used both for theoretical research and directly for generation and reconstruction of events of the NICA megaproject.



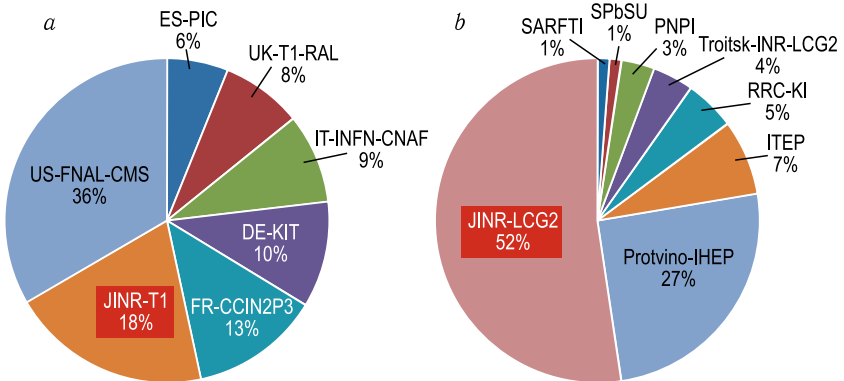
Using the resources of the “Govorun” supercomputer

- *Belyakov D.V. et al.* Using the “Govorun” Supercomputer for the NICA Megaproject // Proc. of the 27th Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC’2019), Budva, Becici, Montenegro, Sept. 30 – Oct. 4, 2019, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org). V. 2507 (in press).

In 2019, the total load of Tier-1 was 18% of the total performance of all Tier-1 centers. The Tier-1 center (T1\_JINR) demonstrates stable operation and is ranked second in performance in the world.

The grid component of the Multifunctional Information and Computing Complex at LIT comprises the Tier-1 center for the CMS experiment at the LHC and Tier-2 for ATLAS, CMS, LHCb, BES, BIOMED, COMPASS, MPD, NO $\nu$ A, STAR, ILC, etc.

The JINR Tier-2 site (JINR\_LCG2) is recognized as the best in the Russian consortium RDIG (Russian Data Intensive Grid). In 2019, more than 3 million jobs were processed, which comprises 52% of the total load of CPU RDIG.



Distribution by the normalized CPU load time in HS06 hours within 2019 for (a) Tier-1 sites for the CMS experiment and (b) Tier-2 sites being part of the RDIG consortium

- *Baginyan A.S. et al.* Grid at JINR // Proc. of the 27th Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC’2019), Budva, Becici, Montenegro, Sept. 30 – Oct. 4, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org). V. 2507 (in press).

A method for reconstructing trajectories of charged particles based on a recurrent neural network using the GEM detector of the BM@N experiment is proposed. It is shown that the proposed



single-pass algorithm with a deep recurrent neural network of a special design and a special error function, taking into account the strong imbalance of the training set, is accurate, fast, and does not require a peculiar preprocessing stage. The work of the model was significantly accelerated using tools provided by the “Govorun” supercomputer. The presented results of the given approach for simulated events of the BM@N GEM detector showed an increase in the efficiency of event handling up to 98.5%.

- *Baranov D. et al.* Catch and Prolong: Recurrent Neural Network for Seeking Track-Candidates // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 201. P. 05001.

The computer off-line cluster of the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics (VBLHEP) is one of the four basic clusters of the distributed computer and information infrastructure of the NICA complex project. It is designed for modeling, processing, analysis of the studied processes and storage of experimental data. The cluster is based on a modular principle, consists of eight racks with computer and communication equipment, two uninterrupted power supplies, cooling, power supply, and fire extinguishing systems.

The cluster has an internal 100 GB/s Ethernet network and is connected to the cluster network at 200 GB/s and to the laboratory network at 100 GB/s.



The computer off-line cluster of VBLHEP

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.).* First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. “Strangeness in Quark Matter” (SQM-2019), Bari, Italy.

## EDUCATIONAL ACTIVITIES

In 2019, about 500 students studied at the JINR-based departments of Moscow State University, the Moscow Institute of Physics and Technology, the Moscow Engineering Physics Institute, Dubna State University, and the universities of the JINR Member States. Summer internships and trainings were organized for almost 500 university students from Armenia, Belarus, Cuba, Kazakhstan, Russia, Serbia, and Ukraine.

In 2019, the annual International Student Practice was held in four stages for 134 representatives of Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Chile, Cuba, the Czech Republic, Egypt, Poland, Romania, Serbia, Slovakia, and South Africa.

Fifty-eight under- and postgraduate students from Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Cuba, Egypt, Italy, Kazakhstan, Mexico, the Netherlands, Poland, Romania, Russia, Serbia, Slovakia, Ukraine, and Uzbekistan participated in the Summer Student Programme 2019.

In 2019, the University Centre and Dubna State University organized and ran a summer school “Physics. Mathematics. Informatics” for 23 teachers of Physics, Mathematics, and Computer Science from the JINR Member States and almost 100 school students from Belarus, Kazakhstan, Russia, and Ukraine. The Scientific School for Physics Teachers held at CERN (Switzerland) was attended by 24 teachers from Belarus, Russia, and Ukraine.

The JINR UC participated in the organization and running of the All-Russian Science Festival NAUKA 0+ in Moscow and Dubna; Russian Festival “ProNauka” in Kazan; World Dark Matter Day; forum “Professions of the Future” in Dubna; Physics Days in Dubna; the 31st International Computer School named after V. Volokitin and E. Shirkova (ICS-2019); the 8th Open Robotics Tournament of the Upper-Volga Educational Cyber Network “CyberDubna-2019”; physics workshop “Element 105” as part of the educational project “Summer School”; excursions for students, schoolchildren, and teachers from the JINR Member States and other countries. The staff members of the University Centre arranged JINR’s participation in the Festival of Science,

Technology, and Art “Geek Picnic” in Saint Petersburg and took part in the 11th World Conference of Science Journalists (WCSJ) in Lausanne.

**GENERAL DATA ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS  
BY JINR STAFF MEMBERS  
(from 13.12.2018 to 19.12.2019)**

• Books — 10:

*Plechko V.N.* Grassmann Variable Analysis for 1D and 2D Ising Models (Lectures from 2002) / Ed. by T. C. Dorlas. — Dublin: DIAS, 2019. — 57 p. — (Commun. of the Dublin Institute for Advanced Studies. Ser. A (Theor. Phys.), No. 31).

*Barbashov B.M., Nesterenko V.V.* Eikonal Approximation for Processes of High Energy Scattering of Particles: Course of Lectures. — 2nd rev. and enlarg. ed. — M.: URSS, 2019. — 82 p. — Bibliogr.: p. 79–82.

*Bashashin M.V., Zemlyanaya E.V., Streltsova O.I.* Applicative Introduction to MPI Technique on HybriLIT Cluster: Manual. — Dubna: State Univ. “Dubna”, 2019. — 50 p.: ill. — Bibliogr.: p. 45. — 24 copies.

*Danilyan G.V.* Fundamental Aspects of Physics of Nucleus Fission: The Latest Research. — M.: URSS, 2019. — 115, [1] p.: ill. — Bibliogr.: p. 113–116.

*Isaev A.P., Rubakov V.A.* Theory of Groups and Symmetries. Representations of Lie Groups and Algebras. Applications. — Dubna: JINR, 2019. — 482 p. — (JINR; 2019-38). — Bibliogr.: p. 475–478. — 100 copies.

*Penionzhkevich Yu.Eh., Vakhtel V.M.* Modern Accelerators of Charged Particles and Their Application: Manual. — Voronezh: Publishing house VSU, 2018. — 110, [1] p.: col. ill. — Bibliogr.: end of book. — 50 copies.

*Prokhorov S.V.* Multi-Frequency Resonators. Methods of Calculation, Simulation, Construction. — M.: Radiotekhnika, 2019. — 220 p.: ill. — Bibliogr.: p. 216. — 500 copies.

*Smorodinsky Ya.A.* Selected Works / Eds.: Yu. A. Danilov, V. G. Kadyshevsky, A. N. Sissakian; Comp.: V. G. Kadyshevsky, A. N. Sissakian [et al.]. — 3rd ed. — M.: URSS, 2017. — 566 p.: ill. — (Classic Scientists, No. 2). — Bibliogr.: p. 542–561.

*Soloviev E.A.* New Approaches in Quantum Physics / Ed.: L.I. Ponomarev; Transl. from Eng.: V. E. Soloviev. — Fizmatlit, 2019. — 214 p.: ill. — Bibliogr.: p. 206–214.

*Frank I.M.* Scientific Works: in two books. Book 2 / Comp.: A. I. Frank. — 2018. — 670 p.: ill. — Bibliogr.: end of chap.; Bibliogr. list of works by I. M. Frank: p. 627–653. — 880 copies.

- Journal papers — 1164
- Publications in conference Proceedings — 321
- Preprints — 45
- Abstracts of theses — 20
- Total: 1560

Редакторы: *Е. И. Крупко, Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 24.01.2020.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,97. Тираж 170 экз. Заказ № 59863.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)