

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2013–2020 ГОДАХ

BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2013–2020  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна  
2021

Ответственный за подготовку обзора — *Б. М. Старченко*

Обзор подготовили *Ю. Г. Шиманская, Е. С. Асанова*

Обложка *И. Ю. Щербаковой*

Использованы фото *И. А. Лапенко, Е. В. Пузыниной*

**Краткий** обзор важнейших научных результатов Объединенного ин-  
К78 ститута ядерных исследований в 2013–2020 годах: — Дубна: ОИЯИ,  
2021. — 107 с.: ил.

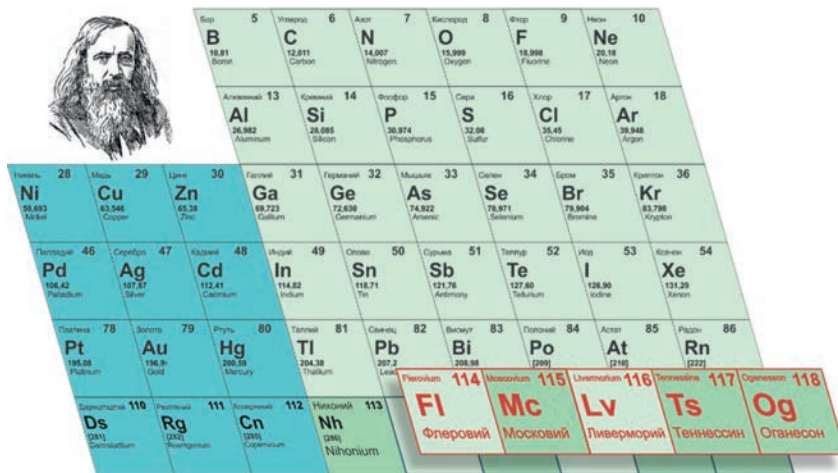
ISBN 978-5-9530-0549-4

## ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Завершен цикл экспериментов по синтезу новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы Д. И. Менделеева с атомными номерами 115, 117 и 118. Решением Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) от 28 ноября 2016 г. новым элементам присвоены названия:

- московий (Moscovium) и символ Mc для элемента 115;
- теннессин (Tennessine) и символ Ts для элемента 117;
- оганесон (Oganesson) и символ Og для элемента 118.

Синтез этих элементов был впервые осуществлен в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, являющейся признанным мировым лидером в области синтеза и изучения свойств сверхтяжелых ядер. Всего за последние 16 лет в ОИЯИ были открыты 5 элементов с атомными номерами 114–118 и, таким образом, завершен седьмой период таблицы Д. И. Менделеева. 2 марта 2017 г. состоялась инаугурация названий новых синтезированных в ОИЯИ элементов «московий», «теннессин» и «оганесон». Признание этого открытия закрепило лидирующие позиции ОИЯИ в мире по синтезу сверхтяжелых элементов.



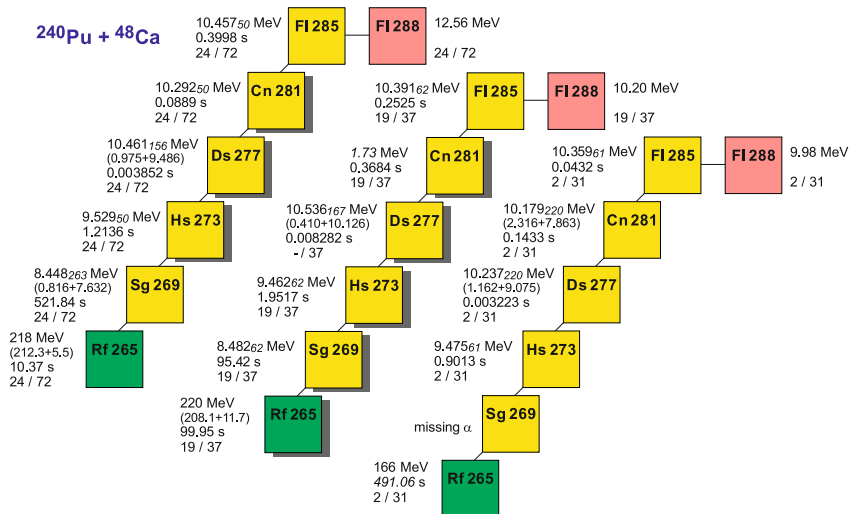
Бор 5 10,81 Boron	Углерод 6 12,011 Carbon	Азот 7 14,007 Nitrogen	Кислород 8 15,999 Oxygen	Фтор 9 18,998 Fluorine	Неон 10 20,18 Neon			
Алюминий 13 26,982 Aluminum	Силиций 14 28,086 Silicon	Фосфор 15 30,974 Phosphorus	Сера 16 32,06 Sulfur	Хлор 17 35,45 Chlorine	Аргон 18 39,948 Argon			
Никель 28 58,693 Nickel	Медь 29 63,546 Copper	Цинк 30 65,38 Zinc	Галлий 31 69,723 Gallium	Германий 32 72,63 Germanium	Мышьяк 33 74,922 Arsenic	Селен 34 78,971 Selenium	Бром 35 79,904 Bromine	Криpton 36 83,798 Krypton
Палладий 46 106,42 Palladium	Серебро 47 107,87 Silver	Кадмий 48 112,41 Cadmium	Индий 49 114,82 Indium	Олово 50 118,71 Tin	Сурьма 51 121,76 Antimony	Теллур 52 127,60 Tellurium	Йод 53 126,90 Iodine	Ксенон 54 131,29 Xenon
Платина 78 195,08 Platinum	Золото 79 196,9 Gold	Ртуть 80 200,59 Mercury	Таллий 81 204,38 Thallium	Свинец 82 207,2 Lead	Висмут 83 208,98 (209)	Полоний 84 (209)	Астат 85 (210)	Радон 86 (222)
Дармштадт 110 (281)	Рентгений 111 (282)	Коперниций 112 (285)	Нихоний 113 (286)	Флеровий 114 Флеровий	Московий 115 Московий	Ливерморий 116 Ливерморий	Теннессин 117 Теннессин	Оганесон 118 Оганесон

Часть Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева

- *Оганесян Ю. Ц., Дмитриев С. Н.* Синтез и исследование свойств сверхтяжелых атомов. Фабрика сверхтяжелых элементов // *Успехи химии*. 2016. Т. 85. С. 901.
- *Utyonkov V., Oganessian Yu., Dmitriev S., Itkis M., Moody K., Stoyer M., Shaughnessy D., Roberto J., Rykaczewski K., Hamilton J.* The Discovery of Elements 113 to 118 // *Proc. of the Nobel Symp. NS 160, Eur. Phys. J. Web Conf.* 2016. V. 131. P. 06003.

- *Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu.* Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
- IUPAC Press Release, <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>.

В 2015 г. завершены эксперименты по синтезу новых нейтронодефицитных изотопов сверхтяжелых элементов в реакциях слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{239}\text{Pu}$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Pu}$ . В обеих реакциях получен новый изотоп  $^{284}\text{Fl}$ , испытывающий спонтанное деление, а также три новые цепочки распада уже известного изотопа  $^{285}\text{Fl}$ . Планируется продолжить экспериментальное изучение области неизвестных сверхтяжелых ядер, находящихся между изотопами сверхтяжелых элементов, синтезированных методом «горячего» слияния в ОИЯИ (Дубна) и методом «холодного» слияния в GSI (Германия) и RIKEN (Япония). Работа имеет фундаментальное значение для понимания свойств ядер, находящихся вблизи границ острова стабильности сверхтяжелых элементов.



Новые цепочки распада ядра  $^{285}\text{Fl}$

- *Utyonkov V.K., Brewer N.T., Oganessian Yu. Ts., Rykaczewski K.P., Abdullin F.Sh., Dmitriev S.N., Grzywacz R.K., Itkis M.G., Miernik K., Polyakov A.N., Roberto J.B., Sagaidak R.N., Shirokovsky I.V., Shumeiko M.V., Tsyganov Yu.S., Voinov A.A., Subbotin V.G., Sukhov A.M., Sabel'nikov A.V., Vostokin G.K., Hamilton J.H., Stoyer M.A., Strauss S.Y.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 034609.

В 2017 г. на ускорителе У-400М введен в эксплуатацию новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 для получения пучков радиоактивных ядер. Экспериментально подтверждены проектные параметры данной установки: интенсивности пучков, полученные в реакции фрагментации  $^{15}\text{Ne} + \text{Be}$ , в среднем в 25 раз превышают ранее достигнутые. Сепаратор является базовой уста-

новкой для изучения легких экзотических ядер вблизи границ нуклонной стабильности и позволит впервые выполнить поиск и исследование экзотических ядерных систем, таких как  ${}^{5-7}\text{H}$ ,  ${}^{8-10}\text{He}$ ,  ${}^{24-26}\text{O}$  и др., а также новых видов радиоактивного распада.



Фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2

- *Fomichev A. S.* Commissioning of the ACCULINNA-2 Fragment Separator and its Day-One Experiments // 46th Meeting of the PAC for Nuclear Physics, Dubna, 15 June 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=251>.
- *Sharov P. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. P. 025807.

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

Введен в эксплуатацию уникальный ускорительный комплекс — фабрика сверхтяжелых элементов (СТЭ), и запущен ее базовый элемент — новый циклотрон ДЦ-280. 25 марта 2019 г. состоялось торжественное открытие экспериментального корпуса фабрики СТЭ и запуск нового ускорителя. На введенном в действие ускорительном комплексе начат первый эксперимент по синтезу изотопов 115-го элемента — московия в реакции взаимодействия ионов кальция-48 и америция-243. Этот эксперимент дает старт уникальной программе ОИЯИ по изучению ядерно-физических и химических свойств сверхтяжелых элементов, а также показывает готовность к экспериментам

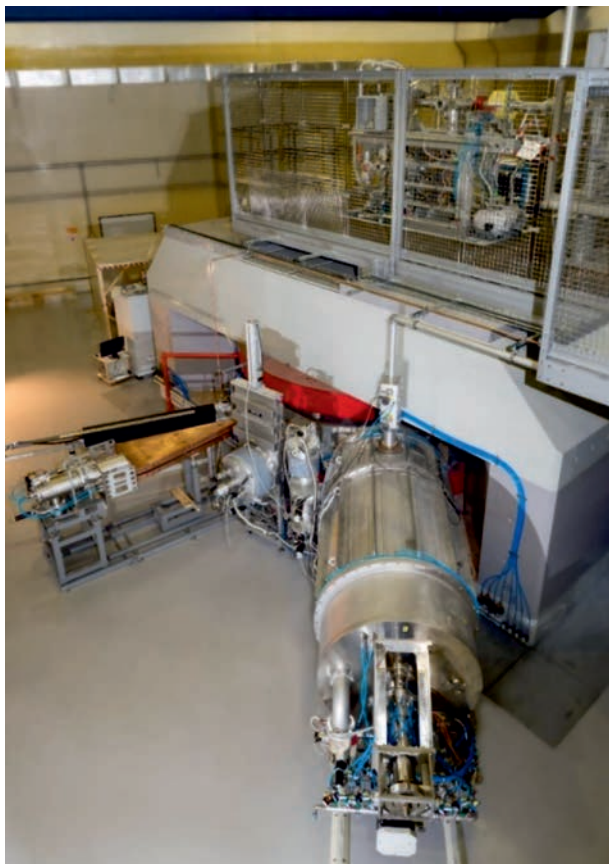


Корпус фабрики СТЭ



Газонаполненный сепаратор фабрики СТЭ





Базовая установка фабрики СТЭ — циклотрон ДЦ-280

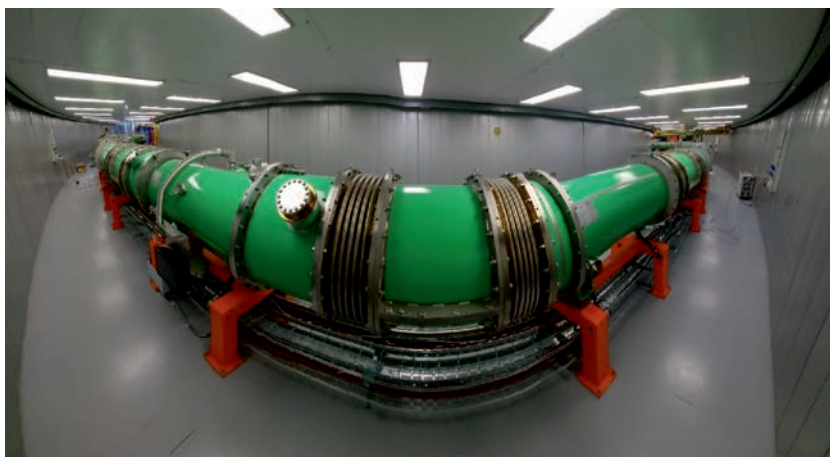
по синтезу новых элементов с атомными номерами 119 и 120 — первых элементов 8-го периода Периодической таблицы Д. И. Менделеева.

- *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/>.
- *Гульбекян 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. 635–665.
- *Oganessian Yu. Ts., Dmitriev S. N., Utyonkov V. K.* Project of Priority Experiments at SHE Factory // Proc. of the Intern. Symp. on Exotic Nuclei “EXON-2018”, Petrozavodsk, Russia, 10–15 Sept. 2018 / Eds. Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev. Singapore: World Sci., 2020. P. 431–436.

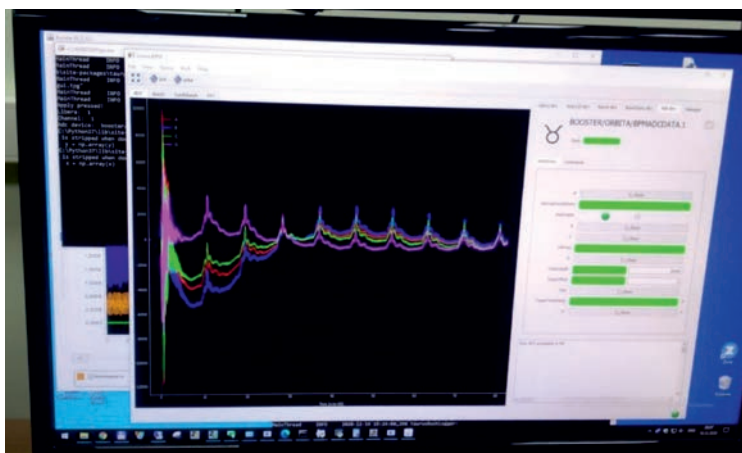
20 ноября 2020 г. председатель Правительства Российской Федерации М. В. Мишустин произвел технологический пуск одного из основных блоков мегасайенс-проекта «Комплекс NICA» — сверхпроводящего бустерного синхротрона (бустера).

Этому событию предшествовала длительная и напряженная работа по созданию и вводу в эксплуатацию всех объектов инжекционного комплекса проекта, включая источники поляризованных легких и тяжелых ионов и линейный ускоритель тяжелых ионов — основы для получения требуемых пучков и их ввода в бустер.

В четком соответствии с планом-графиком 19 декабря 2020 г. однозарядные ионы гелия были инжектированы в бустер и получена устойчивая циркуляция пучка. На фотографии, сделанной с монитора в пультовой, видно,



Бустер для исследовательского комплекса NICA



Показания бесконтактного электростатического детектора пучка с пиками от прохождения пучка на каждом обороте



как пучок однозарядных ионов He с энергией 3,2 МэВ/а.е.м. циркулирует в канале ускорителя с интенсивностью  $\sim 10^9$  ионов/оборот. Высокое качество изготовления и сборки всех элементов магнитной системы бустерного синхротрона позволило начать работу без использования системы коррекции ведущего магнитного поля. Настройка режима ускорения пучка — завершающий шаг к физическому пуску бустера.

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

В 2015 г. введена в эксплуатацию высокотехнологичная линия по сборке и криогенным испытаниям сверхпроводящих магнитов, включающая в себя участки для производства сверхпроводящего кабеля, изготовления обмоток, сборки магнитов, измерения качества поля, вакуумных и криогенных испытаний. Конструкция магнитов разработана в ОИЯИ и отмечена премией Правительства Российской Федерации за 2011 г. Осуществляется серийное производство сверхпроводящих магнитов для создаваемых ускорительных комплексов международных проектов NICA (ОИЯИ) и FAIR (ФРГ).

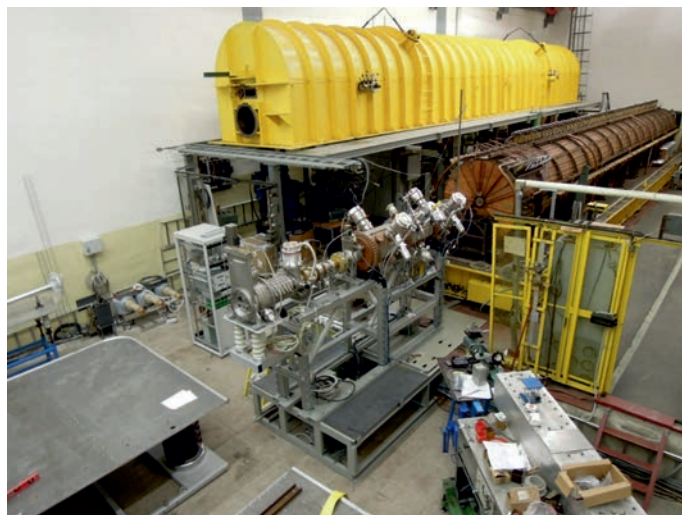


Зал высокотехнологичной линии по сборке и криогенным испытаниям сверхпроводящих магнитов для ускорительных комплексов международных проектов NICA (ОИЯИ) и FAIR (ФРГ)

- *Kostromin S. et al.* Facility for Assembling and Serial Test of Superconducting Magnets // Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014.
- *Nikiforov D. et al.* Cryogenic Test Facility of Superconducting Magnets for the Accelerator Complex NICA // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 507.

- *Khodzhibagiyan H. G. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Complex // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014. V. 24. No. 3.

В рамках реализации проекта NICA создан новый форинжектор для существующего линейного ускорителя ЛУ-20 на основе секции ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). В 2015 г. проведен его физический пуск с пучками дейтерия и углерода от лазерного



Форинжектор ЛУ-20 при сборке



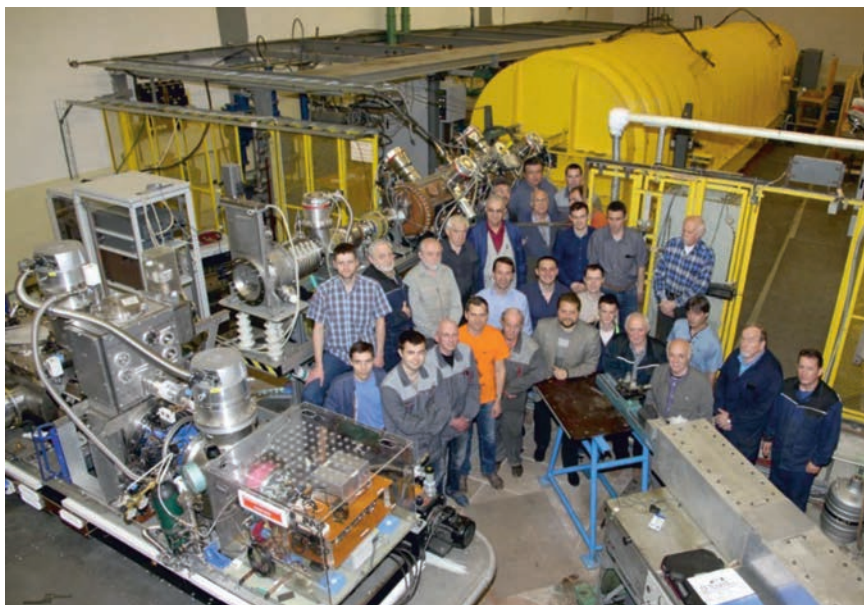
Начальная часть линейного ускорителя тяжелых ионов коллайдерного комплекса NICA

источника. Ускоритель, спроектированный совместно ИТЭФ и МИФИ, был изготовлен в ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина. Высокочастотный усилитель изготовлен в ИТЭФ. Системы питания источника ионов и канал транспортировки пучка низкой энергии разработаны и изготовлены в ОИЯИ. В создании систем диагностики и управления принимали участие специалисты из ИЯИ РАН. Успешное изготовление и испытание секции RFQ, предназначенной для ускорения легких ионов, является заметным достижением не только для ОИЯИ, но и для российской ускорительной науки в целом.

В сотрудничестве с фирмой Bevatech OHG (Германия) создан линейный ускоритель тяжелых ионов (вплоть до золота) с энергией 3,2 МэВ/нуклон и током до 10 мА для инжекционного комплекса коллайдера NICA. В декабре 2015 г. на выходе первой из трех ускоряющих секций были получены пучки ускоренных ионов дейтерия и гелия. В 2016 г. получен пучок с проектной энергией. Это первый в России сильноточный тяжелоионный ускоритель, в котором используется система высокочастотного питания на основе твердотельных транзисторных усилителей. В рамках широкой международной кооперации создана уникальная установка с параметрами, соответствующими передовому мировому уровню.

- *Butenko A. V., Trubnikov G. V. et al.* Commissioning of Heavy Ion Linear Accelerator (HILAC) of the NICA Project // Proc. of RUPAC2016, Saint-Petersburg, Russia.

В 2017 г. в рамках реализации в Дубне мегасайенс-проекта комплекса NICA проведен сеанс работы нуклотрона продолжительностью 1008 ч для подготовки программы исследований по изучению спиновой структуры нук-



Новый источник поляризованных ионов

лона и поляризационных явлений. Впервые штатно эксплуатировался новый источник поляризованных частиц и проведены эксперименты с пучками поляризованных дейтронов. Интенсивность пучков составляла от нескольких единиц  $10^8$  до  $2 \cdot 10^9$  частиц за цикл, максимальная энергия выведенного пучка составила 5,2 ГэВ/нуклон. В ходе сеанса получены пучки поляризованных протонов и продемонстрирована возможность их эффективного ускорения с энергией инжекции в нуклотрон 5 МэВ.

- *Sidorin A. O.* Progress towards Realization of the Nuclotron–NICA Project // 47th Meeting of the PAC for Particle Physics, Dubna, 26 June 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=260>.
- *Kekelidze V. D.* Progress of the NICA Project // 122nd Session of the Scientific Council, Dubna, 18 Sept. 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=300>.

В 2014 г. впервые на нуклотроне в качестве штатного реализован режим работы с двумя параллельными пользователями. Обеспечена циркуляция распущенного (бесструктурного) пучка последовательно на двух «столах» магнитного поля — для эксперимента на внутренней мишени и для эксперимента на выведенном пучке.

Проведен первый сеанс работы с новым стендовым источником тяжелых ионов «Крион-6Т» в составе ускорительного комплекса. Оптимизировались режимы работы источника и ускорителя ЛУ-20 для получения ионов нескольких сортов. Ускоренные и выведенные пучки ядер аргона использовались для проведения физических экспериментов.

В 2013 г. на циклотроне У-400М введен в действие новый испытательный стенд для тестирования радиационной стойкости электронных приборов на пучках тяжелых ионов с энергией 14–42 МэВ/нуклон. Новая установка существенно расширяет энергетический диапазон пучков, необходимых для данных исследований. Диапазон энергий выше 10 МэВ/нуклон значительно увеличивает возможности моделирования воздействия тяжелоионной компоненты космического излучения и позволяет проводить испытания электронных компонент без вскрытия корпусов как в вакууме, так и в атмосфере.

- *Skuratov V. A., Teterev Yu. G., Mitrofanov S. V., Kalagin I. V., Gulbekyan G. G., Anashin V. S., Emeliyanov V. V.* High Energy Ion Beam Line for SEE Testing at U400M FLNR JINR Cyclotron // 2013 Single-Event Effects (SEE) Symp. and Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD) Meetings, 9–12 Apr. 2013, La Jolla, California, USA.

Создан прибор новой конструкции — лазерный детектор углового колебания поверхности Земли, на котором достигнуто разрешение  $5 \cdot 10^{-9}$  рад. Этот результат является принципиально важным, поскольку открывает новые возможности прецизионного исследования угловых колебаний поверхностей. Детектор может дать начало новому поколению инструментов для решения многих фундаментальных проблем науки и техники. Ключевая идея конструкции лазерного детектора — это использование вектора гравитации в качестве

высокостабильного опорного направления, гарантирующего горизонтальность поверхностного слоя жидкости, отражающей лазерный луч.

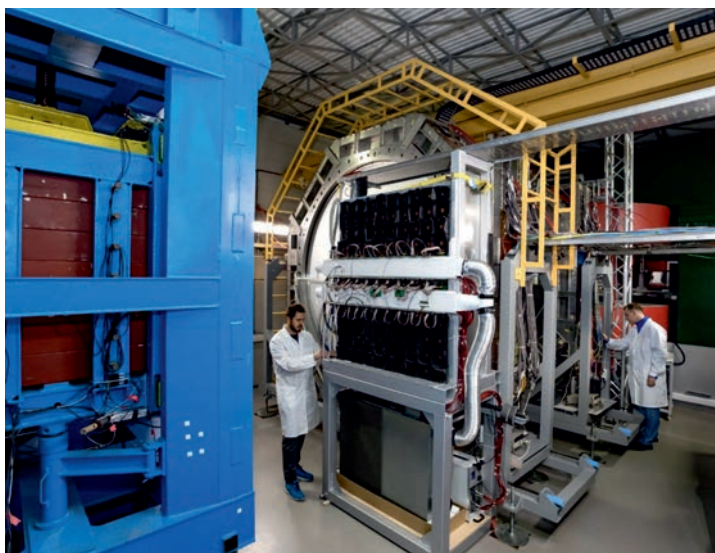
Получен патент РФ на изобретение прецизионного лазерного инклинометра. Результатом применения прецизионного лазерного инклинометра является улучшение стабилизации положения крупномасштабных промышленных или научно-исследовательских комплексов, таких как современные телескопические системы и др., в условиях сейсмических шумов земного и индустриального происхождения, а также регистрация поверхностных сейсмических волн.

- *Batusov V., Budagov J., Lyablin M.* A Laser Sensor of a Seismic Slope of the Earth Surface // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, Iss. 1. P. 43–48.
- *Budagov J., Lyablin M., Shirkov G.* The Search for and Registration of Superweak Angular Ground Motions. JINR Preprint E18-2013-107. Dubna, 2013.
- Устройство для измерения угла наклона / Будагов Ю. А. (РФ), Ляблин М. В. (РФ). Патент 2510488 РФ. Опубл. 27.03.2014. Бюл. № 9.



## ФИЗИКА ЧАСТИЦ

В 2019 г. 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, включающая 240 физиков и инженеров из 21 института из 11 стран, в том числе Германии, Франции, США и Израиля. Коллаборацией разработан и применен новый экспериментальный метод изучения внутренней структуры атомного ядра и нейтронных звезд в эксперименте  $BM@N$ . Эксперимент, впервые зарегистрировавший все продукты реакции при выбивании нуклонов и пар нуклонов из атомных ядер, открыл новые перспективы исследования структуры ядра, в том числе короткоживущих и богатых нейтронами ядер. Полученная информация о формировании и свойствах пар нуклонов в ядерном веществе, обогащенном нейтронами, послужит прочной основой для понимания свойств плотной холодной богатой нейтронами материи в нейтронных звездах.



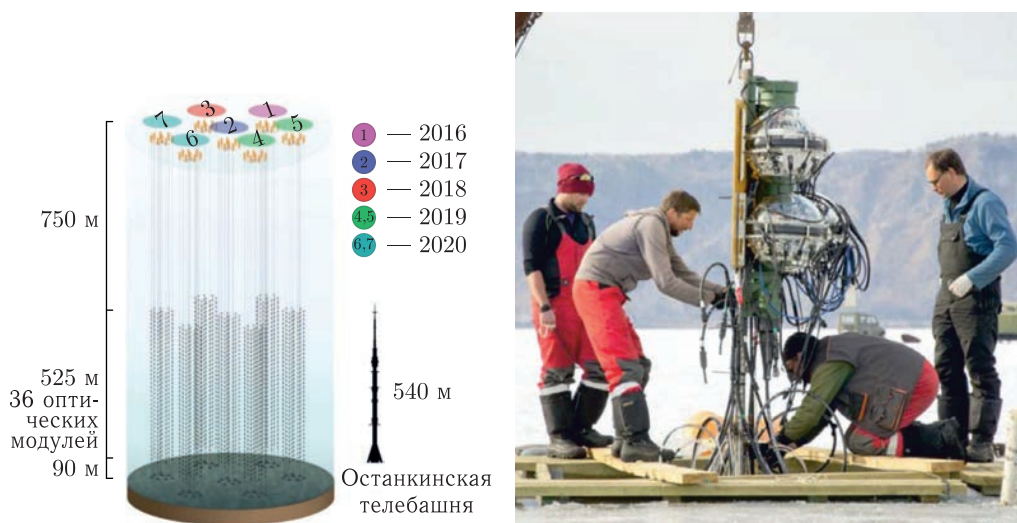
Экспериментальная установка  $BM@N$

- *BM@N Collab. (Short Range Correlations). The Transparent Nucleus: Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam // Nature Phys. (accepted in 2020).*
- *Kapishin M. (BM@N Collab.). First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. "Strangeness in Quark Matter" (SQM-2019), Bari, Italy.*



В период 2015–2020 гг. развернуты и введены в эксплуатацию 7 кластеров создаваемого совместно с учеными ИЯИ РАН (Троицк) на оз. Байкал глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба «Байкал-ГВД». С вводом седьмого кластера эффективный объем телескопа достиг значения  $0,35 \text{ км}^3$  в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы, что составляет около 85 % эффективного объема антарктического детектора IceCube.

Предварительный анализ данных, накопленных в течение 2015, 2016, 2018 и 2019 гг., позволил выделить семь каскадных событий с энерговыделением более 100 ТэВ, где поток астрофизических нейтрино превалирует над фоном атмосферных нейтрино.



Монтаж гирлянды оптических модулей перед погружением в Байкал



Оптические модули для проекта «Байкал-ГВД»

- *Aurorin A. D. et al.* Status of the Baikal-GVD Experiment — 2017 // Proc. of the 35th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC-2017). July 10–20 2017, Bexco, Busan, Korea.
- *Домогацкий Г. В.* Глубоководный нейтринный телескоп — Baikal-GVD // 36-я Всерос. конф. по космическим лучам, 28 сент. – 2 окт. 2020 г., НИИЯФ МГУ, online; <https://events.sinp.msu.ru/event/3/sessions/22/#20200930>.
- *Safronov G. B.* Status of Baikal-GVD: Results of Track Reconstruction // 40th Intern. Conf. on High Energy Physics, ICHEP2020, 28 July – 6 Aug. 2020, online; <https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3813595/>.

Нейтринный детектор DANSS, созданный физиками ОИЯИ совместно с коллегами из ИТЭФ (Москва) и установленный на Калининской АЭС, исправно регистрирует около 4000 реакторных антинейтрино в сутки при фоне, не превышающем 2–3% (на сегодня лучшее в мире значение).

В 2018 г. завершен анализ первой части экспериментальных данных, на основе которого получено наиболее строгое модельно-независимое ограничение на существование стерильных нейтрино. Набор данных и их детальный анализ продолжаются.



Установка DANSS на Калининской атомной электростанции (Россия)

- *Alekseev I., Belov V., Brudanin V. et al.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // Phys. Lett. B. 2018. V. 787. P. 56–63; arXiv:1804.04046 [hep-ex].

Группой ОИЯИ в составе коллаборации Daya Bay после обновления энергетической модели эксперимента были уточнены значения осцилляционных параметров  $\theta_{13}$  и  $\Delta m_{ee}^2$ :  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,084 \pm 0,005$ ,  $\Delta m_{ee}^2 = (2,44 \pm 0,11) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$ . На основе данных, набранных только на ближних детекторах, в эксперименте Daya Bay были измерены поток и спектр реакторных электронных антинейтрино. Как и в других реакторных экспериментах, в Daya Bay наблюдается общий дефицит потока антинейтрино 5,4% относительно модели спектров антинейтрино Huber + Mueller.

- *An F. P. et al. (Daya Bay Collab.).* New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115, No. 11. P. 111802.
- *An F. P. et al. (Daya Bay Collab.).* Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 061801.

В 2014 г. на детекторе Borexino (Гран-Сассо, Италия) при участии физиков ОИЯИ измерен поток солнечных нейтрино из  $pp$ -реакции в режиме реального времени. Результат находится в хорошем согласии с предсказаниями стандартной модели Солнца, что подтверждает стационарность Солнца на временной шкале в сотни тысяч лет: нейтрино дают картину энерговыделения в настоящем, солнечная светимость соответствует энерговыделению в далеком прошлом, так как фотоны из центра Солнца выходят на поверхность за счет медленного процесса диффузии, занимающего сотни тысяч лет. Вместе с предыдущими измерениями солнечных нейтрино из реакций  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$  и  $pp$ , измерение завершило изучение нейтринных потоков из цепи реакций, начинающихся с  $pp$ -реакции.

В 2015 г. опубликованы новые результаты по измерению потока геонейтрино, осуществленного на статистике 2056 сут: наблюдаемый сигнал от геонейтрино находился в согласии с ожидаемым для большинства геофизических моделей. Вероятность отсутствия вклада от геонейтрино в наблюдаемом спектре ничтожно мала и составляет  $3,6 \cdot 10^{-9}$ . При этом впервые в истории наблюдения геонейтрино с определенной долей вероятности (98 %) можно утверждать, что геонейтринный сигнал имеет ненулевой вклад от мантии.

- *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* Neutrinos from the Primary Proton-Proton Fusion Process // *Nature.* 2014. V. 512. P. 383–386.
- *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* Final Results of Borexino Phase-I on Low-Energy Solar Neutrino Spectroscopy // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 112007.
- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.).* Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 92. P. 031101.

В рамках эксперимента NOvA были измерены следующие параметры осцилляций:  $\sin^2 \theta_{23} = 0,51 \pm 0,10$ ,  $\Delta m_{32}^2 = (2,37_{-0,15}^{+0,16}) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  (NH),  $\Delta m_{32}^2 = (-2,40_{-0,17}^{+0,14}) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  (IH). Создан стенд для проверки и измерения параметров электроники, а также введен в эксплуатацию центр удаленного контроля (ROC-Dubna), позволяющий контролировать работу и управлять экспериментом из Дубны. Был проведен анализ систематических ошибок эксперимента, а также разработано программное обеспечение для регистрации в детекторе сигнала от сверхновой.

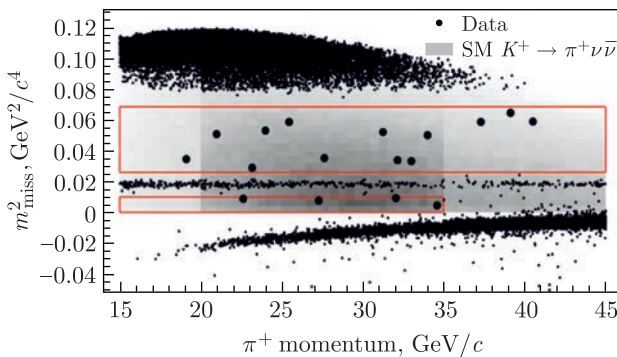
- *Sanchez M.* Results and Prospects from the NOvA Experiment // NuFACT Workshop in Rio de Janeiro. Aug. 2015.

В эксперименте OPERA коллаборация, продолжая анализ данных, набор которых закончился в конце 2012 г., обнаружила пятое событие взаимодействия  $\tau$ -нейтрино. С учетом ожидаемого фона в 0,25 события статистическая

значимость свидетельства нейтринных осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  составила  $5,1\sigma$ . Таким образом, главная задача эксперимента — доказательство существования этого типа осцилляций, ответственных за дефицит атмосферных мюонных нейтрино, путем прямого обнаружения  $\tau$ -нейтрино в пучке — успешно выполнена.

- *Agafonova N. et al.* Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115, No. 12. P. 121802.

В 2013 г. при определяющем вкладе сотрудников ОИЯИ в ходе эксперимента NA48/2 (SPS, ЦЕРН) получено первое экспериментальное наблюдение нового канала распада  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^\pm e^+ e^-$ . Измерена ширина и изучены динамические свойства редкого распада  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  на основе рекордной статистики — 149 событий-кандидатов с фоном в  $15,5 \pm 0,7$  событий. В 2015 г. проведен анализ рекордно большого количества распадов нейтральных пионов  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  ( $1,69 \cdot 10^7$  событий), рожденных в распадах заряженных каонов с импульсом  $p = 60$  ГэВ/с. В результате получено статистически наиболее строгое ограничение на величину параметра смешивания «темного фотона»  $\varepsilon^2$  в области его возможной массы  $9 < m_{A'} < 70$  МэВ/с<sup>2</sup>, исключающее объяснение аномального магнитного момента мюона с помощью гипотезы о влиянии «темного фотона». В 2016 г. завершена обработка первых данных, полученных в эксперименте. В рамках поиска «новой» физики в редких распадах каонов обнаружено 17 кандидатов в сверхредкий распад заряженного каона  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  при ожидаемом фоне 7 событий. Это позволило сделать лучшую в мире оценку относительной вероятности распада  $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0^{+0,4}_{-3,5} \pm 0,3_{\text{сист.}}) \cdot 10^{-11}$ , что согласуется с предсказанием Стандартной модели.



События-кандидаты в сверхредкий распад (в рамке) и фоновые события в переменных измеренного импульса заряженного пиона и квадрата недостающей массы, связанной с нейтрино

- *Madigozhin D. (NA48/2 and NA62 Collab.)*. Probing Nonperturbative QCD with  $K_{e4}$  and  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  Decays from the NA48/2 and NA62 Experiments // *Proc. of XXI Intern. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects*, Marseille, France, Apr. 22–26, 2013. 132; [http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/132/DIS\\_2013\\_132.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/132/DIS_2013_132.pdf).
- *Madigozhin D. (NA48/2 Collab.)*. High Precision Measurement of the Form Factors of the Semileptonic Decays  $K^\pm \rightarrow \pi^0 l^\pm \nu$  ( $K_{l3}$ ) // *Proc. of XXI*

Intern. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Marseille, France, Apr. 22–26, 2013. 135; [http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/135/DIS\\_2013\\_135.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/135/DIS_2013_135.pdf).

- *Batley J. R. et al. (NA48/1 Collab.)*. A New Measurement of the  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  Decay at the NA48/2 Experiment. CERN-PH-EP-2013-197.
- *Batley J. R. et al. (NA48/2 Collab.)*. Search for the Dark Photon in  $\pi^0$  Decays // Phys. Lett. B. 2015. V. 746. P. 178.
- *Marchevski R. (NA62 Collab.)*. New Result on the Search for the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  Decay at the NA62 Experiment at CERN // ICHEP-2020, 28 July – 7 Aug. 2020, Prague.

В 2015 г. впервые на ЛHC был исследован распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ , а также измерено отношение вероятностей распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$ . Мезоны  $J/\psi X$  и  $\psi(2S)X$  восстанавливаются в распадах на мюонную пару, в то время как распад  $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$  используется для восстановления  $\Lambda^0$ -бариона. Измеренное значение отношения вероятностей распадов  $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0) = 0,501 \pm 0,033(\text{стат.}) \pm 0,016(\text{сист.}) \pm \pm 0,011(B)$  согласуется с отношением вероятностей распада для  $B$ -мезонов, измеренным в пределах 0,5–0,8. Единственное теоретическое предсказание для отношения рассматриваемых распадов ( $0,8 \pm 0,1$ ) превышает измеренное значение.

- *Gladilin L., Lyubushkin V. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Branching Ratio  $\Gamma(\Lambda^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$  with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2015. V. 751. P. 63–80.

В 2014 г. при участии ученых из ОИЯИ осуществлялся поиск резонансного рождения бозонов  $Z^*$  в протон-протонных столкновениях на ЛHC (ЦЕРН) в дилептонном канале. В рамках этой задачи осуществлено моделирование событий рождения бозонов  $Z^*$ , выработаны критерии отбора реконструированных установкой ATLAS событий с распадом  $Z^*$  в пару лептон–антилептон, предложены критерии, позволяющие отличить события рождения  $Z^*$  от событий рождения других типов нейтральных бозонов ( $Z', G^*$  и т. п.).

Экспериментальный поиск резонанса  $Z^*$  был проведен на основе анализа  $\sim 25 \text{ фб}^{-1}$  данных по протон-протонным столкновениям с энергией с.ц.м. 7–8 ТэВ. Сделан вывод о согласии наблюдаемых данных с предсказанием Стандартной модели, получены новые ограничения на сечения рождения и массу бозона  $Z^*$ : новый экспериментальный верхний предел массы  $Z^*$  составляет 2,85 ТэВ.

- *Yeletsikh I. V. et al.* Search for  $Z^*$  Boson at ATLAS Detector // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 252.
- *Yeletsikh I. V. (ATLAS Collab.)*. Search for High-Mass Dilepton Resonances in  $21 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  with the ATLAS Experiment // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 052005; arXiv: 1405.4123.

В 2014 г. группой ОИЯИ в эксперименте CMS (ЛHC, ЦЕРН) были завершены обработка и анализ данных сеансов 2011–2012 гг. для процессов

Дрелла–Яна с рождением пар мюонов. Были подтверждены предсказания Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц (СМ) в новой области энергий и выполнены поиски сигналов физики за рамками СМ, в частности, существенно увеличен нижний предел на массу новых калибровочных бозонов (до  $\sim 2,7$  ТэВ). Продолжалось изучение свойств бозона Хиггса. Уточнена масса и другие его характеристики, позволившие сделать вывод о непротиворечивости открытого бозона бозону Хиггса СМ. Поиски редких распадов бозона Хиггса дали отрицательный результат.

- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Measurement of the Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // JHEP. 2013. V. 12. P. 30; arXiv:1310.7291.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Forward–Backward Asymmetry of Drell–Yan Lepton Pairs in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Lett. B. 2013. V. 718. P. 752.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Search for Microscopic Black Holes in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // JHEP. 2013. V. 07. P. 178.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Observation of a New Boson with Mass near 125 GeV in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV // JHEP. 2013. V. 06. P. 081.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Properties of the Higgs-Like Boson in the Decay  $H$  to  $ZZ$  to  $4l$  in  $pp$ -Collisions at 7 and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-002. Geneva: CERN, 2013.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.).* Combination of Standard Model Higgs Boson Searches and Measurements of the Properties of the New Boson with a Mass near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-13-005. Geneva: CERN, 2013.
- *CMS Collab.* Measurements of the Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at 8 TeV. CMS-PAS-SMP-14-003. Geneva: CERN, 2014.
- Конопляников В. Ф., Савина М. В., Шматов С. В., Шульга С. Г. Неопределенности сечения рождения процессов Дрелла–Яна при столкновении протонов на ЛHC // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(198). С. 1122–1133.
- Ланёв А. В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики // УФН. 2014. Т. 184. С. 996–1004.

В 2014 г. в эксперименте COMPASS (SPS, ЦЕРН) с участием специалистов ОИЯИ проводился методический набор данных по изучению процесса Дрелла–Яна с пучком пионов с энергией 160 ГэВ и с поляризованной водородной мишенью. В феврале и октябре 2014 г. в эксперименте COMPASS прошли испытания модулей электромагнитного калориметра ECAL0 на электронном пучке ускорительного комплекса ELSA (Бонн, Германия) и ускорителя PS (ЦЕРН, Женева). Результаты показали, что модуль калориметра и система считывания, основанная на лавинных диодах, полностью удовлетворяют требованиям, необходимым для измерений обобщенных партонных распределений.

В 2015 г. коллаборация COMPASS опубликовала результаты измерения поляризуемости пиона, полученные при определяющем вкладе ОИЯИ. В эксперименте пучок  $\pi^-$  с импульсом 190 ГэВ/с рассеивался на тонкой никелевой мишени. Значение электрической поляризуемости пиона составило  $(2,0 \pm 0,6_{\text{стат.}} \pm 0,7_{\text{сист.}}) \cdot 10^{-4}$  фм<sup>3</sup>, что находится в согласии с предсказанием



эффективной киральной теории. Точность измерения почти вдвое превосходит ранее опубликованные результаты. Этот результат является принципиально важным для проверки справедливости эффективной киральной теории.

- *COMPASS Collab.* Search for Exclusive Photoproduction of  $Z_c^\pm(3900)$  at COMPASS // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 742. P. 330.
- *COMPASS Collab.* The COMPASS Setup for Physics with Hadron Beams // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 779. P. 69.
- *Adolph C. et al. (COMPASS Collab.).* Measurement of the Charged-Pion Polarizability // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 062002.

В 2014 г. в эксперименте BES-III (ИНЕР CAS, Китай) в сотрудничестве с ОИЯИ найдены новые моды распада заряженных состояний  $Z_c^\pm$  и обнаружена нейтральная частица  $Z_c^0(4020)$ , предположительно являющаяся изоспиновым партнером заряженного состояния  $Z_c^\pm(4025)$ . Заряженный резонанс  $Z_c^\pm(4025)$  наблюдался в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z_c^\pm\pi^\pm \rightarrow D^{*\pm}D^{*0}\pi^\pm$  при энергии столкновений  $\sqrt{s} = 4,26$  ГэВ. Зафиксированы параметры этого резонанса: масса  $(4026,3 \pm 2,6)$  МэВ/ $c^2$ , ширина  $(24,8 \pm 5,6)$  МэВ/ $c^2$ , которые согласуются с параметрами резонанса  $Z_c^\pm(4020)$  распада  $Z_c^\pm(4020) \rightarrow h_c\pi^\pm$ . Еще один резонанс,  $Z_c^\pm(3885)$ , обнаружен в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z_c^\pm\pi^\pm \rightarrow (D^*D)^\pm\pi^\pm$ . Масса и ширина резонанса  $((3883,9 \pm 4,3)$  МэВ/ $c^2$  и  $(24,8 \pm 11,5)$  МэВ/ $c^2$ ) согласуются с параметрами ранее открытого резонанса  $Z_c^\pm(3900)$ , что позволяет предположить обнаружение двух мод распада одной частицы. В реакции  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0h_c$  впервые обнаружен нейтральный чармонийподобный резонанс  $Z_c^0$ , его масса  $(4023,9 \pm 4,4)$  МэВ/ $c^2$ , что позволяет предположить, что  $Z_c^0(4020)$  является нейтральным изоспиновым партнером заряженного резонанса  $Z_c^\pm(4020)$ . В эксперименте BES-III методом порогового сканирования получено значение массы тау-лептона  $M_\tau = (1776,91_{-0,18}^{+0,16})$  МэВ/ $c^2$ . Точность результата практически не уступает всем прежним измерениям.

- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 022001.
- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 132001.
- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 012001.

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Группа ОИЯИ, участвующая в ионной части программы эксперимента NA61/SHINE (SPS, ЦЕРН), ведет систематическое изучение ядро-ядерных реакций в PbPb-столкновениях и исследование реакций с ядрами средних размеров (Xe и Ar), а также легких ядер (Be).

Проведен анализ данных и получены первые предварительные результаты по столкновению  ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ , а также данные по реакциям  $p + p$  и  $p + \text{C}$  (Long Target) при 31 ГэВ/с, необходимые для нейтринного эксперимента T2K.

В 2014 г. в экспериментах на установке NA61 при активном участии физиков из ОИЯИ получены указания на существование критической точки ядерной материи. Эти данные крайне важны как для теории строения ядерной материи, так и с точки зрения дальнейших практических применений. Материя в области критической точки должна обладать уникальными свойствами, которые предстоит детально исследовать.

- *Abgral N. et al.* Pion Emission from the T2K Replica Target: Method, Results and Application // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 701. P. 99–114.
- *Stefanek G. (NA49 and NA61/SHINE Collab.)* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2014.

В 2013 г. группа ОИЯИ в эксперименте STAR на RHIC (BNL, США) активно участвовала в программе по изучению рождения адронов в AuAu-столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7, 11,5, 19,6, 27, 39$  ГэВ. Установлена зависимость отношения  $R_{CP}$  эллиптического потока для мезонов, барионов и их античастиц, отношения выходов частиц в AuAu-столкновениях от поперечного импульса и энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}}$ .

Группа ОИЯИ участвовала в анализе данных по измерению поляризации антикварков в протоне. Проведенный анализ показал наличие существенной асимметрии, указывающей на доминирование поляризации  $u$ -антикварков.

В 2015 г. представлены результаты исследований корреляционной функции системы из двух антипротонов, дающие информацию о ядерных силах между антипротонами и представляющие измерение двух ключевых параметров сильного взаимодействия — длины рассеяния ( $f_0$ ) и эффективной области взаимодействия ( $d_0$ ). Результаты имеют фундаментальное значение для понимания структуры и свойств антиядер.

- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 142301.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 34906.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 14904.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 072301.
- *STAR Collab.* Measurement of Interaction between Antiprotons // Nature. 2015. V. 527. P. 345–348.

Группа ОИЯИ в эксперименте ALICE (ЛНС, ЦЕРН) зарегистрировала данные с «minimum bias» триггером в реакции  $p$ -Pb при 5,02 ТэВ. В 2013 г. получены результаты по фемтоскопическим корреляциям в рождении пар заряженных каонов в этой реакции. Выполнен анализ чистоты выделения заряженных каонов в столкновении PbPb (2,76 ТэВ); получены результаты относительно величины  $R_{\text{inv}}$  и по рождению  $\varphi \rightarrow K^+ K^-$ .

Продолжены исследования фемтоскопических корреляций Бозе–Эйнштейна для пар заряженных  $K$ -мезонов ( $K_{\text{ch}} K_{\text{ch}}$ ), образующихся в протон-протонных столкновениях при энергии 7 ТэВ. Особенности впервые полученных результатов — резкий рост размера источника ( $R_{\text{inv}}$ ) с увеличением поперечной массы пары ( $m_T$ ) при самых малых значениях числа образующихся заряженных частиц ( $N_{\text{ch}}$ ) и обратная зависимость при больших значениях  $N_{\text{ch}}$ . Уменьшение  $R_{\text{inv}}$  с ростом  $m_T$  характерно для AA-столкновений и теоретически объясняется коллективными эффектами потоков частиц при столкновении большого количества нуклонов. Подобная картина в  $pp$ -столкновениях подтверждает предположения о возможности проявления коллективных эффектов на кварк-глюонном уровне при взаимодействии элементарных частиц с достаточно большим значением  $N_{\text{ch}}$ .

- *Abelev B. et al.* Charged Kaon Femtoscopic Correlations in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. P. 052016.
- *Abelev B. et al.* Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb–Pb Collisions at 2.76 TeV at the LHC. arXiv:1310.7808 (2013).
- *ALICE Collab.* Charged Kaon Femtoscopic Correlations in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. P. 052016.

## НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Проведенный анализ экспериментов с ультрахолодными нейтронами показывает, что физическая адсорбция наночастиц/нанокпель, левитирующих в высоковозбужденных состояниях в потенциальной яме, образованной силами Ван дер Ваальса/Казимира–Полдера (ВдВ/КП), приводит к новым эффектам на пересечении физики фундаментальных взаимодействий, нейтронов, поверхности и наночастиц. Учет взаимодействия УХН с наночастицами позволяет объяснить недавно открытый так называемый малый нагрев УХН в ловушках.

- *Несвижевский В. В., Воронин А. Ю., Ламбрехт А., Рейно С., Лычагин Е. В., Муzychка А. Ю., Стрелков А. В.* Наблюдение квантовой левитации наночастиц методом ультрахолодных нейтронов // Кристаллография. 2013. Т. 58, № 5. С. 730–736.

Проанализированы результаты измерений диффузного отражения очень холодных и холодных нейтронов от наноструктурированных отражателей. Показано, что наноструктурированные отражатели заполняют пробел в области энергий очень холодных и холодных нейтронов между эффективными отражателями, использующими нейтронно-оптический потенциал, и отражателями на основе брэгговского рассеяния и рассеяния на отдельных ядрах среды.

- *Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V. V.* Nano-Structured Reflectors for Slow Neutrons // New Developments in Low-Energy Physics Research / Eds. Tao Zoeng and Meng Ngai. NOVA Publ., 2013.

Рассмотрены особенности эффекта ускоряющегося вещества (ЭУВ) — изменения энергии нейтрона при прохождении через образец преломляющего вещества, движущегося с ускорением, в случае двоякопреломляющей среды. В этом случае у ЭУВ появляются новые свойства. В нейтронной оптике ЭУВ приводит к появлению нестационарного состояния с прецессирующим спином. При прохождении двухкомпонентного нейтрино через слой ускоряющегося вещества ЭУВ оказывает воздействие на эволюцию нейтринного состояния.

- *Франк А. И., Наумов В. А.* Взаимодействие волн с двоякопреломляющим веществом, двигающимся с ускорением // ЯФ. 2013. Т. 76. С. 1507.

В рамках изучения микробиотехнологии методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2 был определен элементный состав микробиальных образцов и оценена эффективность накопления цинка и других металлов биомассой спироулины. Полученные результаты показывают эффективность использования микроводоросли *Spirulina platensis* для извлечения цинка из сточных вод.

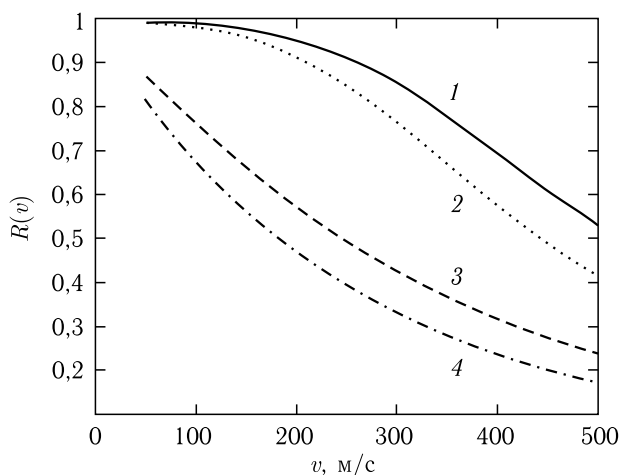
- *Zinicovscaia I., Duca Gh., Rudic V., Cepoi L., Chiriac T., Frontasyeva M. V., Pavlov S. S., Gundorina S. F. Spirulina Platensis as Biosorbent of Zinc in Water // Environ. Eng. Manag. J. 2013. V. 12, No. 6. P. 1079–1084.*

Работы по активному биомониторингу с использованием мхов-трансплантатов позволили провести изучение воздушных загрязнений в центре Белграда (Сербия), а также в одном из наиболее экологически неблагоприятных районов Греции — Великой Фракийской низменности (Аттика). Эффективность использования мхов-биомониторов в изучении атмосферных выпадений радионуклидов продемонстрирована в совместных работах с коллегами из Словакии, Белоруссии, ЮАР, Сербии и Таиланда.

- *Saitanis C. J., Frontasyeva M. V., Steinnes E., Palmer M. W., Ostrovnaya T. M., Gundorina S. F. Spatiotemporal Distribution of Airborne Elements Monitored with the Moss Bags Technique in the Great Thracian Lowland, Attica, Greece // Environ. Monit. Assess. 2013. V. 185, No. 1. P. 955–968.*

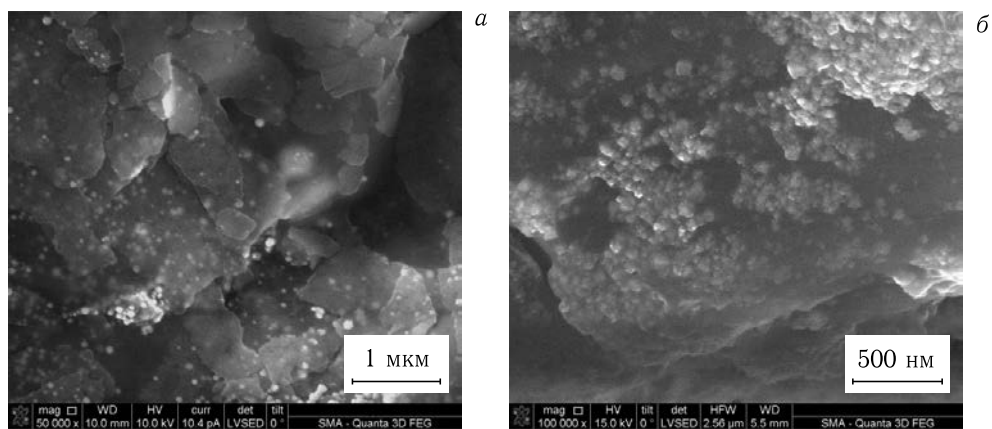
В нейтронной физике нужны отражатели как для нейтронных пучков, так и для эффективных источников нейтронов. В данной работе рассмотрены отражающие свойства материалов, состоящих из наночастиц различной формы: сферической и цилиндрической. Сплошные материалы хорошо отражают нейтронные пучки либо в очень узкой области малых энергий порядка  $\sim 10^{-7}$  эВ (скорости  $\sim 5$  м/с), либо при тепловых энергиях порядка  $\sim 0,025$  эВ (скорости  $\sim 2200$  м/с). В последнее время в нейтронной физике для биологии и индустрии оказались востребованы холодные нейтроны с энергиями  $\sim 10^{-7} - 10^{-4}$  эВ (скорости  $\sim 10 - 500$  м/с). Наноотражатели, как показано на рисунке, оказываются самыми эффективными по сравнению со всеми известными до сих пор.

Коэффициент отражения  $R(v)$  от порошка толщиной 3 см, состоящего из длинных (1) ( $a = 1000$  нм); коротких (2) ( $a = 10$  нм) наностержней с радиусом 10 нм, при параметре поглощения  $C = C_0 = 6,28 \cdot 10^{-7}$ ; 3, 4 — то же, что 1, 2, но при  $C = C_a = 5,2 \cdot 10^{-4}$



- *Игнатович В. К., Несвижевский В. В. // АЭ. 2014. Т. 116, №2. С. 100–107.*

Среди микроорганизмов цианобактерии представляют большой интерес для получения наночастиц, так как они являются потенциальными источниками новых метаболитов, имеющих большое значение в биотехнологии и промышленности. Для разработки нетоксичного, экологически чистого метода получения наночастиц серебра использовали цианобактерии *Spirulina platensis* и *Nostoc linckia*. Наночастицы серебра исследовали с помощью комплекса оптических и аналитических методов. В частности, динамику накопления серебра биомассой цианобактерий изучали методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2 ОИЯИ. Фотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, показали, что процесс образования наночастиц серебра цианобактериями размерами 10–80 нм происходит внеклеточно, что очень важно с точки зрения их дальнейшего применения. Полученную биомассу можно использовать как в промышленных, так и в медицинских целях.

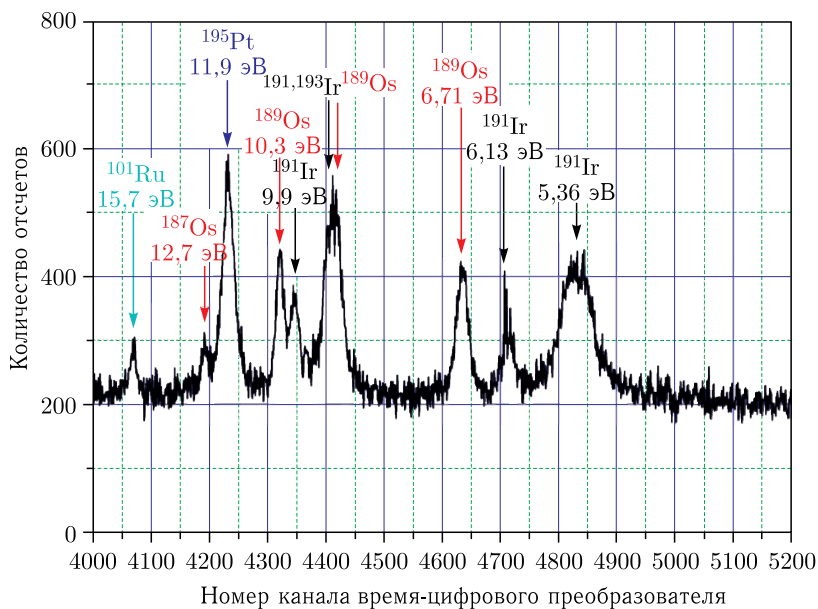


РЭМ-фотографии *Nostoc linckia* (а) и *Spirulina platensis* (б) с наночастицами серебра

- *Cepoi L., Rudi L., Chiriac T. et al. // Canadian J. Microbiol. 2014. V. 14. P. 1–9; doi: 10.1139/cjm-2014-0450.*

На импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН традиционный для спектрометрии резонансных нейтронов метод времени пролета применен для элементного и изотопного анализа образцов. Идентификация элементов и изотопов осуществляется по энергиям нейтронных резонансов в реакции радиационного захвата, а их содержание определяется по выходу гамма-квантов в наблюдаемых резонансах. За время ввода в опытную эксплуатацию первой очереди установки ИРЕН (с одной ускоряющей секцией) регулярно проводился анализ рудных проб Центральной геологической лаборатории Министерства энергетики и природных ресурсов Монголии и композитных образцов Белорусского государственного университета. Совместно с сотрудниками Государственного астрономического института им. П. К. Штейнберга МГУ проведены исследования элементного и изотопного состава объектов предположительно неземного происхождения.

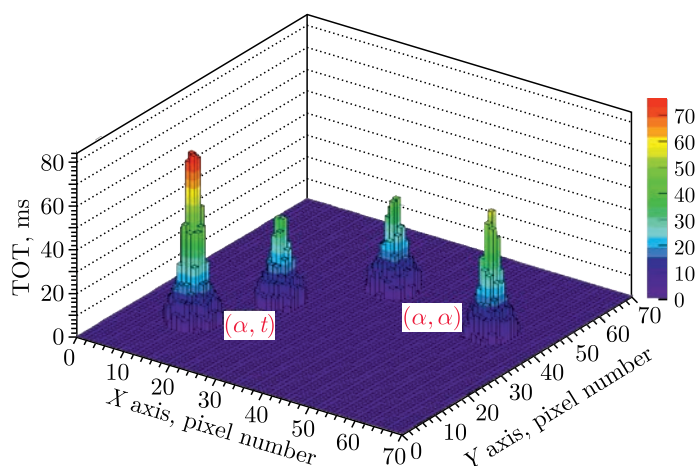




Участок времяпролетного спектра при анализе геологической пробы

- Бажажина Н. В., Мареев Ю. Д., Пикельнер Л. Б., Седышев П. В., Швецов В. Н. // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 4(195). С. 895–903.

Пиксельный кремниевый детектор Timerix, состоящий из  $256 \times 256$  пикселей размером  $55 \times 55$  мкм, использовался в комбинации с  $\Delta E$ -детектором (толщина 11 мкм) для регистрации легких заряженных частиц, испускаемых в спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ . Высокое позиционное разрешение детекторной



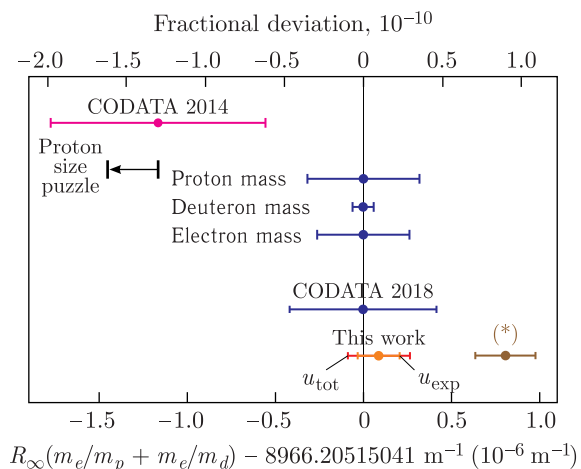
Трехмерные спектры сигналов из детектора Timerix, соответствующие парам  $\alpha-t$  (слева, энергии частиц различные) и  $\alpha-\alpha$  (справа, энергии частиц близки друг к другу)

системы позволило впервые наблюдать одновременный вылет двух заряженных частиц с малым относительным углом вылета (наблюдались пары  $\alpha$ - $\alpha$  и  $\alpha$ - $t$ ), которые приписываются распаду нестабильных частиц  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^7\text{Li}^*$ . Определены выходы этих частиц, а также угловые и энергетические распределения  $\alpha$ -частиц, образующихся в четверном делении.

- *Ahmadov G. S., Kopatch Yu. N., Telezhnikov S. A., Ahmadov F. I., Granja C., Garibov A. A., Pospisil S.* Detection of Ternary and Quaternary Fission Fragments from  ${}^{252}\text{Cf}$  with a Position-Sensitive  $\Delta E$ - $E$  Telescope Based on Silicon Detectors // *Part. Nucl., Lett.* 2015. V. 12, No. 4(195). P. 846–854.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В 2020 г. в работах по теоретической физике впервые вычислены энергии переходов в молекулярном ионе  $\text{HD}^+$  с рекордной точностью  $\sim 10^{-11}$  в рамках нерелятивистской квантовой электродинамики. Измеренные частоты ротационного перехода позволили получить наиболее точную проверку предсказаний КЭД в трехчастичном секторе на уровне  $5 \cdot 10^{-11}$ , ограниченном текущими неопределенностями фундаментальных констант. Определено значение комбинаций фундаментальных констант  $R_\infty m_e (m_p^{-1} + m_d^{-1})$  и  $m_p/m_e$  с относительной точностью  $2 \cdot 10^{-11}$ . Полученные результаты более чем в 20 раз улучшают границу для гипотетической пятой силы взаимодействия между протоном и дейтроном.



Сравнение результатов настоящей работы со значениями из других работ

- *Alighanbari S., Giri G. S., Constantin F. L., Korobov V. I., Schiller S. // Nature. 2020. V. 581. P. 152.*

В 2015 г. проводились теоретические исследования, относящиеся к созданию новых функциональных материалов и устройств с контролируруемыми квантовыми свойствами, которое в настоящее время во многом основано на идее орбитального инжиниринга в многослойных оксидных гетероструктурах. В работе показано, что эффекты межслоевого перераспределения заряда и изменения структуры лигандного окружения ионов переходных металлов обеспечивают возможность контроля последовательности орбитальных электронных уровней (орбитальной реконструкции) в объеме слоистых оксидов. На примере слоистых оксидов  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  и  $\text{Ba}_2\text{IrO}_4$  авторы впервые предложили и реализовали комбинированный количественный анализ указанных эффектов,

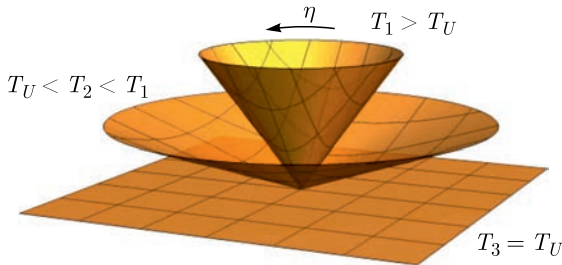
основанный на результатах измерений спектров электронного парамагнитного резонанса и квантово-химических кластерных вычислений.

- *Bogdanov N., Katukuri V., Romhanyi J., Yushankhai V., Kataev V., Buchner B., van den Brink J., Hozoi L.* // Nature Commun. 2015. V. 6. P. 7306.

Развит новый подход к теории неперенормируемых взаимодействий. Получены обобщения уравнений ренормгруппы, позволяющие суммировать ведущие асимптотики во всех порядках теории возмущений. Найдено ультрафиолетовое поведение ряда суперсимметричных, калибровочных моделей квантовой теории поля.

- *Kazakov D. I., Borlakov A. T., Tolkachev D. M., Vlasenko D. E.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 125008; JHEP. 2016. V. 161. P. 154.
- *Kazakov D. I.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 327; Phys. Lett. B. 2019. V. 797. P. 134801.

Выполнены расчеты аксиального тока и плотности энергии во вращающейся и ускоренной среде. 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; JHEP. 2019. V. 1902. P. 146

Впервые выполнен систематический расчет полного набора трехпетлевых  $\beta$ -функций Стандартной модели (СМ). Полученные результаты позволяют связать физику СМ на масштабе нескольких ТэВ и планковском масштабе. Достигнутая в настоящее время экспериментальная точность измерения параметров расчета достаточна для демонстрации самосогласованности СМ вплоть до энергий порядка  $10^{10}$  ГэВ.

Выполнен анализ стабильности вакуума Стандартной модели физики элементарных частиц. Используются ренормгрупповые уравнения на трехпетле-

вом уровне теории возмущений с учетом согласования входных параметров на двухпетлевом уровне. Вклады поправок КХД учтены на четырехпетлевом уровне. Из условия стабильности вакуума при энергиях вплоть до массы Планка с использованием современного экспериментального значения массы бозона Хиггса получено ограничение сверху на массу топ-кварка. Полученное значение массы топ-кварка согласуется с современным экспериментальным значением.

- *Bednyakov A., Pikelner A., Velizhanin V.* // JHEP. 2013. V. 1301. P. 017; Phys. Lett. B. 2013. V. 722. P. 336–340; Nucl. Phys. B. 2013. V. 875. P. 552–565; arXiv:1309.1643 [hep-ph].
- *Bednyakov A. V., Kniehl B. A., Pikelner A. F., Veretin O. L.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 201802.

При теоретическом исследовании деления тяжелых ядер обнаружено, что эволюция от одно- к трех-, а затем к двугорбому массовому и зарядовому распределениям фрагментов деления происходит при изменении массы ядра на несколько единиц. Предложенная модель предсказывает наличие симметричных и асимметричных мод деления с равной вероятностью при числе нейтронов  $N = 136$  независимо от заряда делящейся системы. Важным результатом является сохранение асимметричных форм распределения массы и заряда осколков деления при достаточно высоких энергиях возбуждения делящегося ядра.

- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Kim Youngman* // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 054602.
- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 760. P. 800.

Изучена реакция  $pep \rightarrow d + \nu_e$ , важная для понимания происхождения нейтрино, с энергией  $E_\nu = 1,442$  МэВ. Впервые скорость реакции  $pep$  и ее астрофизический фактор  $S_{pep}$  рассчитаны с учетом сильного и кулоновского взаимодействий в условиях солнечного ядра. При этом начальное состояние системы  $S_{pep}$  трактовалось как трехтельное. Рассчитанный поток нейтрино получился на 40% больше, чем в расчетах, в которых начальное состояние рассматривалось в приближении двух тел, и хорошо согласуется с экспериментальными данными коллаборацииorexino.

- *Belyaev V. B. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 035804.

Впервые построена и верифицирована коллективная модель структуры ядра, способная одновременно описывать киральные колебания и вращения атомных ядер, а также переходные режимы. Описание расщепления энергетических уровней между киральными дублетами требует выхода за рамки приближения среднего поля.

- *Jolos R. V. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 024314.

Рассчитан туннельный ток в контакте, состоящем из полуплоскостей графена и двуслойного графена, с двумя типами упаковки в двух возможных ориентациях кристаллической решетки. Обнаружено, что при встречной ориентации краем контактов типа зигзаг имеется выраженный эффект «включения/выключения» под влиянием затвора. На основе этих результатов предложена новая концепция туннельного полевого транзистора на базе графена. Основная идея состоит в использовании двух графеновых электродов с зигзагообразными краями, разделенных узкой щелью, под воздействием общего затвора. Показано, что при комнатной температуре такое устройство будет обладать ярко выраженным переключающим эффектом при низком напряжении на затворе и большим коэффициентом усиления.

- *Osipov V., Katkov V.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 053102; JETP Lett. 2013. V. 98. P. 782.

Впервые рассчитаны поправки квантовой электродинамики в порядке  $m_e\alpha^7$  для трехчастичной кулоновской системы, что привело к рекордному 10-кратному улучшению результата для энергий перехода молекулярного иона водорода и антипротонного гелия. Это позволило достичь точности  $1,5 \cdot 10^{-11}$  в определении отношений масс электрона и протона.

- *Korobov V.I., Hilico L., Karr J.-P.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 103003; Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 03251.

Новые данные для направленного потока протонов, антипротонов и заряженных пионов, полученные коллаборацией STAR для рассеяния релятивистских тяжелых ионов, были проанализированы с помощью двух взаимодополняющих подходов: транспортной модели партон-адронной струнной динамики и модели трехжидкостной гидродинамики. Особое внимание уделено изучению направленного потока антипротонов на основе баланса процессов аннигиляции протонов и антипротонов и реакций рождения пары из мезонных взаимодействий. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования указывает на существование кварк-адронного фазового перехода типа кроссовера, смягчающего уравнение состояния ядерной материи, и не дает никаких указаний на фазовый переход первого порядка.

- *Konchakovski V.P. et al.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. P. 014903.

Развит новый микроскопический термодинамически самосогласованный метод учета температурных эффектов в реакциях нейтрино и атомных ядер в коллапсирующей звездной материи. Неупругое рассеяние нейтрино на горячих ядрах изучено для температур, характерных для условий в сверхновых звездах. Показано, что наблюдаемое увеличение сечения рассеяния объясняется влиянием температуры на силу переходов Гамова–Теллера, доминирующих в процессах рассеяния нейтрино при низких энергиях.

- *Dzhioev A. A. et al.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. P. 035805.



---

Изучена инфляционная космология в теории с двумя скалярными полями, неминимально связанными со скаляром Риччи, и дополнительным членом вида  $R^2$ , нарушающим конформную инвариантность. Построены модели инфляции в режиме медленного скатывания в случае одного динамического скалярного поля и в случае двух динамических скалярных полей. Было показано, что спектральный индекс скалярной моды возмущений плотности и скалярно-тензорное отношение могут быть совместимы с последними результатами эксперимента Planck. Также было предложено обобщение модели на случай трех скалярных полей.

- *Bamba K., Odintsov S. D., Tretyakov P. V.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 344.

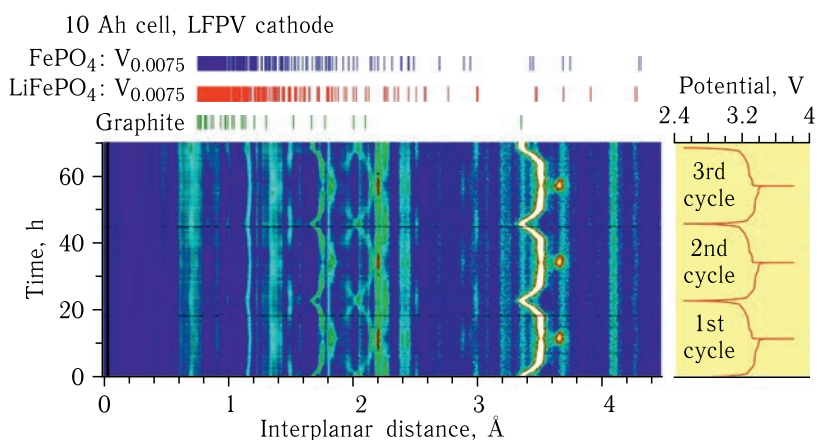
## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В 2013–2020 гг. стабильно функционировала программа пользователей комплекса спектрометров исследовательского реактора ИБР-2. Значительное количество результатов по физике конденсированных сред и материаловедению, получаемых в рамках программы пользователей, находят отражение в более чем 90 публикациях в год.

Проведено исследование кристаллической структуры и магнитных свойств несобственного мультиферроика  $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$  с 2D-магнитной треугольной решеткой методами нейтронной дифракции, рентгеновской дифракции и магнитной восприимчивости в широком диапазоне давлений и температур. Под давлением наблюдался структурный фазовый переход из тригональной в моноклинную фазу. В тригональной фазе установлено увеличение температуры Нееля с барическим коэффициентом  $0,09 \text{ ГПа}^{-1}$ . В моноклинной фазе высокого давления магнитное упорядочение не наблюдалось вплоть до  $T = 1,5 \text{ К}$ .

- *Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Lukin E. V., Dang N. T., Dubrovinsky L. S., Bykova E. A., Kamenev K. V., Liermann H.-P., Morgenroth W., Shapiro A. Ya., Savenko B. N.* Effect of High Pressure on the Crystal Structure, Magnetic, Vibrational Properties of Multiferroic  $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$  // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 87. P. 014112.

Проведены нейтронные *in situ* исследования процессов заряда-разряда коммерческих литиевых аккумуляторов с электродами из  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) и графита. Детально проанализирована стадийность процесса внедрения Li



Эволюция нейтронных дифракционных спектров полученных в эксперименте по исследованию работы электродов в аккумуляторе на основе  $\text{LiFePO}_4$  с добавкой V. Справа приведен график изменения потенциала в процессе заряда-разряда аккумулятора

в графит с последовательным образованием нескольких  $\text{LiC}_n$  фаз и обратимый переход  $\text{LiFePO}_4 \leftrightarrow \text{FePO}_4$ . Анализ изменений микроструктуры материала катода при внедрении в него ванадия (LFPV) показал значительное увеличение степени дефектности структуры, что коррелирует с лучшими электрохимическими свойствами LFPV по сравнению с LFP.

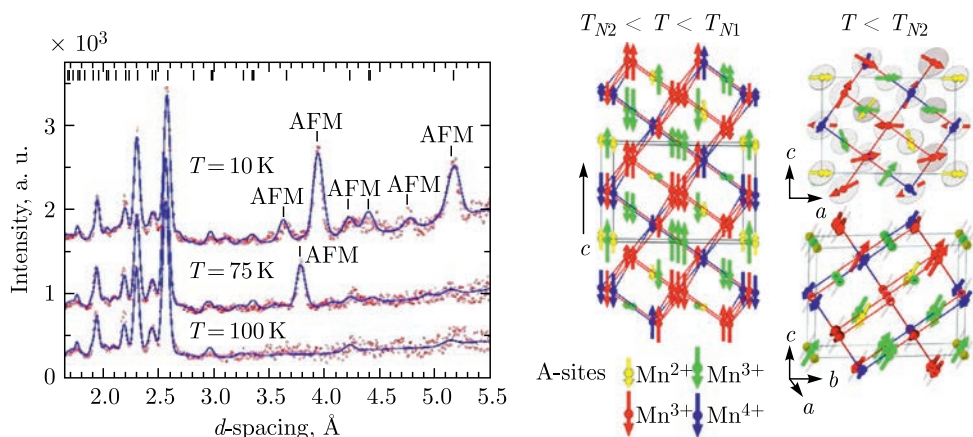
Исследование структурного поведения новых электродных материалов на основе модифицированного  $\text{LiFePO}_4$  непосредственно при заряде и разряде аккумулятора, а также в стационарных условиях было проведено на дифрактометре ФДВР реактора ИБР-2.

- *Bobrikov I. A., Balagurov A. M., Chih-Wei Hu, Chih-Hao Lee, Sangaa Deleg, Balagurov D. A.* Structural Evolution in  $\text{LiFePO}_4$ -Based Battery Materials: *In-Situ* and *Ex-Situ* Time-of-Flight Neutron Diffraction Study // *J. Power Sources*. 2014. V. 258. P. 356–364.
- *Балагуров А. М. и др.* Применение рассеяния нейтронов для анализа процессов в литий-ионных аккумуляторах // *Успехи химии*. 2014. Т. 83. С. 1120–1134.

Проведено исследование жидких дисперсий детонационных наноалмазов методом малоуглового рассеяния нейтронов с вариацией контраста. Для описания структурной организации системы предложен непрерывный пространственный переход углеродных состояний от кристаллического алмаза внутри частиц к графитоподобному состоянию на поверхности. Такой переход позволяет совместить экспериментально наблюдаемый сдвиг в средней плотности длины рассеяния частиц от плотности кристаллического алмаза.

- *Avdeev M. V., Aksenov V. L., Tomchuk O. V., Bulavin L. A., Garamus V. M., Osawa E.* The Spatial Diamond–Graphite Transition in Detonation Nanodiamond as Revealed by Small-Angle Neutron Scattering // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2013. V. 25. P. 445001.

В условиях воздействия высоких температур и давлений синтезирована новая перовскитная фаза простого бинарного оксида  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ . Проведено комплексное исследование структурных, магнитных и сегнетоэлектрических

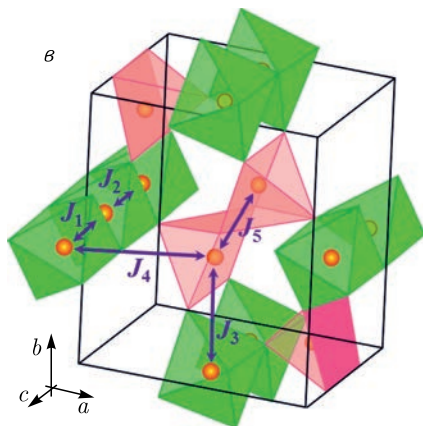
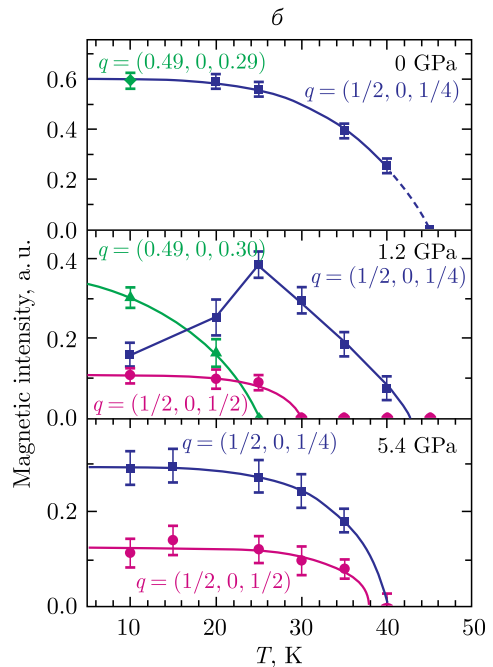
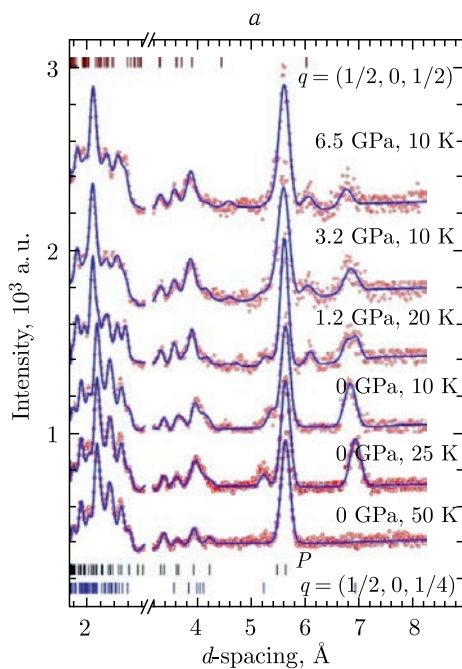


Нейтронные дифракционные спектры (слева) и симметрия модулированных магнитных структур оксида  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (справа)

свойств данного материала. Установлено существование двух сложных модулированных антиферромагнитных фаз ( $T_{N1} \approx 100$  К,  $T_{N2} \approx 50$  К), и определена их магнитная структура. В фазе низкой температуры наблюдалось появление спин-индуцированной спонтанной сегнетоэлектрической поляризации и магнитоэлектрический эффект.

- Cong J., Zhai K., Chai Y., Shang D., Khalyavin D. D., Thompson R. D., Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Abakumov A. M., Tsirlin A. A., Dubrovinsky L., Xu X., Sheng Z., Ovsyannikov S. V., Sun Y. Spin-Induced Multiferroicity in the Binary Perovskite Manganite  $Mn_2O_3$  // Nature Commun. 2018. V. 9. P. 2996.

Проведено исследование кристаллической, магнитной структуры и колебательных спектров несобственного мультиферроика  $YMn_2O_5$  с сильной



а) Нейтронные дифракционные спектры  $YMn_2O_5$ , измеренные при различных значениях давления и температуры на дифрактометре ДН-12 и обработанные по методу Ритвельда. б) Температурные зависимости интегральной интенсивности характерных магнитных пиков соразмерной и несоизмерной АФМ-фазы с вектором распространения  $q = (\sim 1/2, 0, \sim 1/4)$  и индуцированной давлением соразмерной АФМ-фазы с вектором распространения  $q = (1/2, 0, 1/2)$  при различных значениях давления. в) Структурное строение соединения  $YMn_2O_5$  и ключевые магнитные взаимодействия

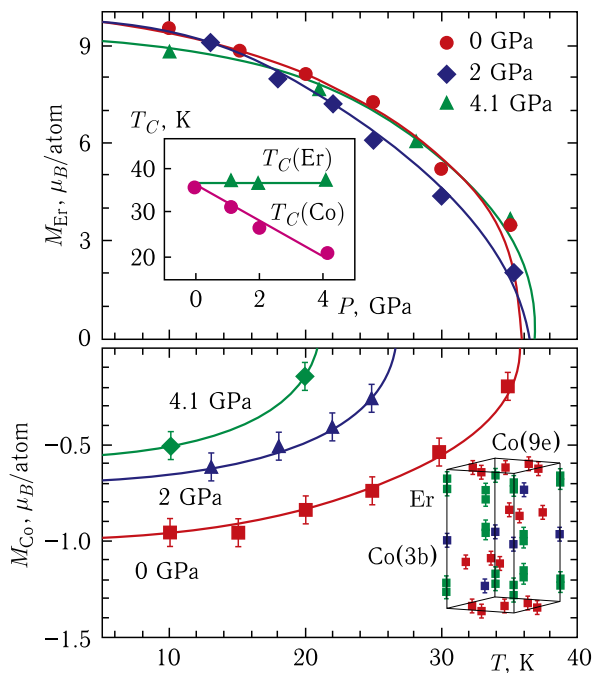
магнитоэлектрической связью методами нейтронной дифракции, рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии в диапазоне высоких давлений (0–30 ГПа) и температур (10–300 К). С повышением давления в области  $P > 1$  ГПа наблюдалось подавление соразмерной и несоизмерной антиферромагнитных (АФМ) фаз с вектором распространения  $q = (\sim 1/2, 0, \sim 1/4)$  и появление новой соразмерной АФМ-фазы с вектором распространения  $q = (1/2, 0, 1/2)$ . Такое поведение сильно контрастирует с другими системами  $\text{RMn}_2\text{O}_5$ , в которых под давлением наблюдается противоположное поведение — стабилизация соразмерной АФМ-фазы с вектором распространения  $q = (1/2, 0, 1/4)$ . В области более высоких давлений ( $P > 16$  ГПа) наблюдался структурный фазовый переход, сопровождавшийся аномалиями в барическом поведении некоторых параметров элементарной ячейки и колебательных мод. Полученные данные позволили проанализировать роль конкурирующих магнитных взаимодействий в формировании основного магнитного состояния мультиферроиков  $\text{RMn}_2\text{O}_5$ .

- *Kozlenko D. P. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. P. 134409.*

Интерметаллиды редкоземельных металлов и кобальта R–Co демонстрируют широкий спектр интересных физических явлений, перспективных для их использования в качестве материалов для постоянных магнитов, элементов устройств электроники и охлаждающей техники. Возможности управления свойствами данных материалов (например, магнитным полем) определяются корреляцией между намагниченностями подрешеток R и Co.

Выполненные на спектрометрах ИБР-2 нейтронные исследования атомной и магнитной структуры соединений  $\text{RCo}_2$  при вариации термодинамических

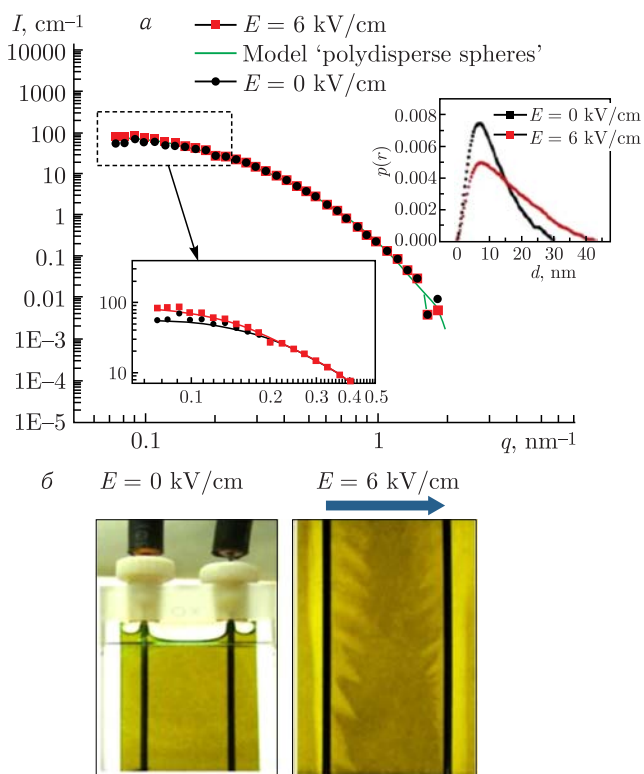
Температурные зависимости намагниченностей подрешеток Er и Co в  $\text{ErCo}_2$  при различных значениях давления, иллюстрирующие их независимое поведение. На вставках показаны барические зависимости температур Кюри подрешеток Er и Co и характер магнитного упорядочения в этих соединениях



параметров показали, что высокая степень корреляции реализуется в соединениях с внутренним магнитным полем R-подрешетки, превышающим определенное критическое значение  $H_{cr} \sim 75$  Тл, а для соединений с  $H < H_{cr}$  наблюдается несогласованное поведение намагниченностей подрешеток R и Co.

- *Burzo E. et al.* // J. Alloys and Compounds. 2014. V. 584. P. 393–401.
- *Kozlenko D. P. et al.* // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 8620.

С помощью малоуглового рассеяния нейтронов обнаружены изменения в структурной организации магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла под действием внешнего постоянного и переменного электрического поля. Показано, что при приложении постоянного электрического поля наряду с макроскопическим фазовым разделением имеет место образование агрегатов на уровне  $\sim 100$  нм с сильной зависимостью от напряженности поля.



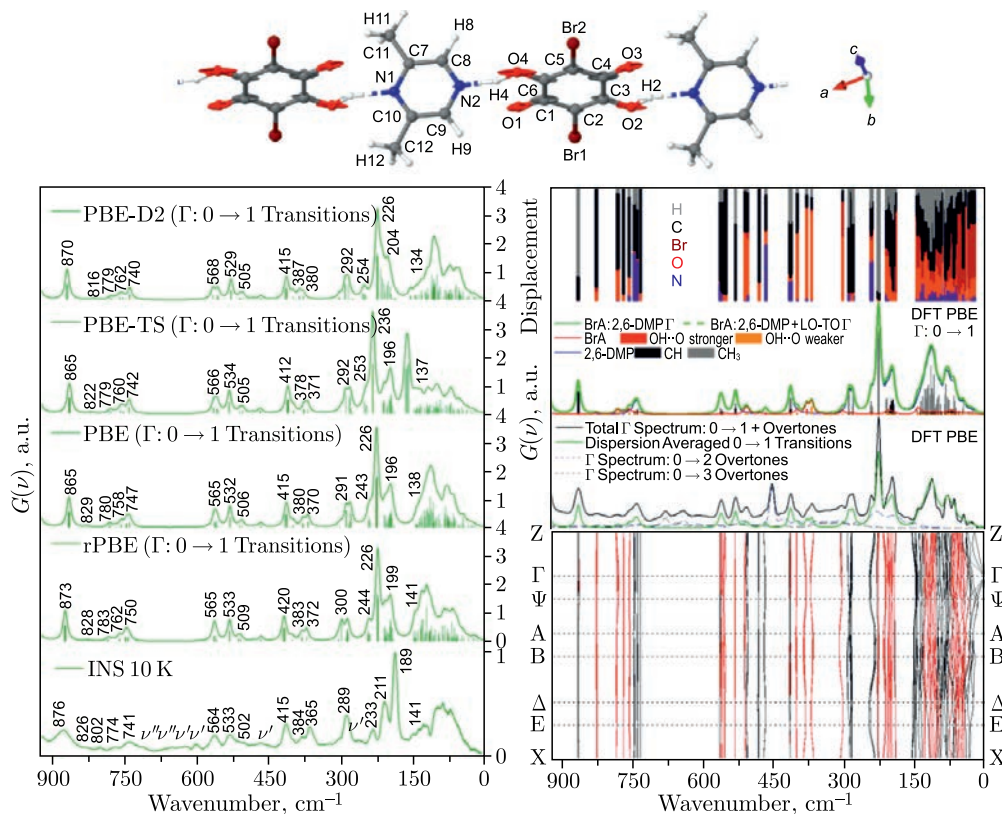
Воздействие внешнего электрического поля на структуру магнитной жидкости магнетит/олеиновая кислота/трансформаторное масло для наноуровня: малоугловое рассеяние нейтронов, концентрация магнетита 1% (а), макроуровня: визуальное наблюдение фазового расслоения в кварцевой кювете (толщина 1 мм), концентрация магнетита 0,05% (б). На вставке показаны восстановленные из кривых рассеяния корреляционные функции (в виде функций распределения парных расстояний) для жидкости в двух состояниях («без поля» и «с полем»), которые указывают на увеличение характерного размера в результате образования агрегатов при приложении поля, а также на наличие анизотропии в форме агрегатов



При выключении электрического поля система через некоторое время (порядка нескольких часов) возвращается в исходное состояние. Для переменного электрического поля показано, что при достаточно малых частотах агрегаты также образуются, однако данный процесс прекращается при превышении некоторой критической частоты. Таким образом, в дополнение к агрегационным эффектам во внешнем магнитном поле, типичным для магнитных жидкостей, обнаружена аналогичная чувствительность к электрическому полю для магнитных жидкостей на основе диэлектрических носителей, что открывает новые потенциальные возможности для регулирования свойств данных комплексных систем с использованием внешних управляющих параметров.

- *Rajnak M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. P. 073108.*

Проведено комплексное исследование кристаллической структуры и молекулярной динамики сокристалла броманилиновой кислоты: 2,6 диметилпи-



Молекулярная структура, спектры неупругого рассеяния нейтронов (НЕНА, 10 К) и расчетные колебательные спектры (для переходов  $0 \rightarrow 1$ ) BrA:2,6-DMP (1 : 1) при частоте ниже  $925 \text{ см}^{-1}$ . Также выборочно представлены рассчитанные фоновые дисперсионные кривые вместе с плотностью колебательных состояний, разложенных на парциальные плотности для каждого молекулярного фрагмента

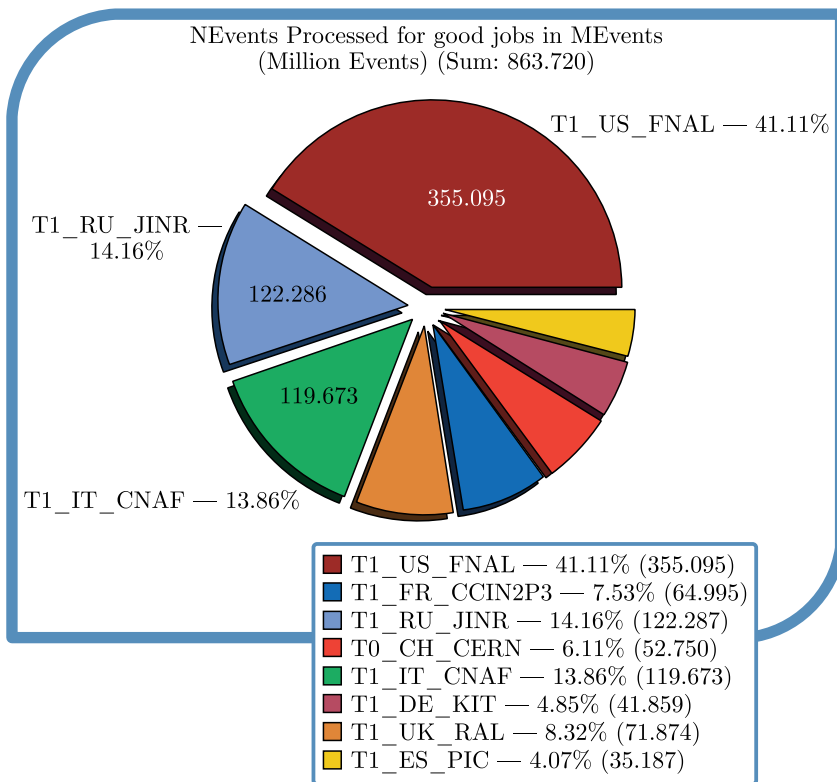
разина (ВгА:2,6-ДМР, 1 : 1) с помощью методов монокристалльной рентгеновской дифракции, нейтронной спектроскопии (спектрометр НЕРА) и комплементарных спектроскопических методов. Для интерпретации экспериментальных результатов также было проведено теоретическое моделирование. Структурный анализ показал, что исследуемая система кристаллизуется в моноклинной структуре симметрии  $P2_1/c$  с четырьмя молекулярными единицами в элементарной ячейке, которая содержит сетку антипараллельно ориентированных молекулярных цепочек с водородными связями. В ходе интермолекулярного анализа обнаружена неэквивалентность водородных связей промежуточной силы и присутствие множественных специфических межмолекулярных сил.

- *Luczyńska K. et al. // J. Phys. Chem. B. 2015. V. 119. P. 6852–6872.*



## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В 2015 г. введен в эксплуатацию центр уровня Tier-1 для эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере (ЛHC, ЦЕРН). С 2017 г. сайт Tier-1 ОИЯИ — одного из центров хранения и обработки данных эксперимента CMS на ЛHC — занимает второе место в мире; на нем обработано более 120 млн событий, что превосходит 14% от общего числа. Этот грид-компонент Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ рассматривается как прототип центра обработки и хранения данных мегапроекта NICA. Создание центра уровня Tier-1 в ОИЯИ открыло новую перспективу исследований в области аналитики больших данных.



Вклад мировых центров уровня Tier-1 в обработку экспериментальных данных CMS  
(в миллионах обработанных событий) за 2017 г.

- *Astakhov N. S. et al.* // JINR GRID TIER-1@TIER-2, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org). Proc. of the XXVI Intern. Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017), 2017.

В 2018 г. введен в эксплуатацию суперкомпьютер «Говорун» — гетерогенная вычислительная платформа, содержащая как CPU вычислительные компоненты, так и ускорители вычислений GPU NVIDIA V100 (DGX) для ресурсоемких, массивно-параллельных расчетов. Данный суперкомпьютер занимает 17-е место в мировом списке IO500 (июль 2020 г.) и является первым по скорости обработки данных среди российских суперкомпьютеров. Суперкомпьютер «Говорун» представляет собой инновационную гиперконвергентную программно-определяемую систему, обладающую уникальными свойствами по гибкости настройки под задачу пользователя, обеспечивающую максимально эффективное использование вычислительных ресурсов. Это свойство позволяет создавать высокоскоростную систему хранения и обработки данных со скоростью порядка 300 Гб/с на чтение/запись, что является чрезвычайно эффективным инструментом для обработки больших массивов данных. Результаты, полученные с использованием ресурсов суперкомпьютера «Говорун» в период с июля 2018 г. по сентябрь 2020 г., представлены в более чем 80 публикациях.



Суперкомпьютер «Говорун»

- Суперкомпьютер «Говорун»: [http://hlit.jinr.ru/about\\_govorun/](http://hlit.jinr.ru/about_govorun/).
- *Kircher M., Trinter F., Grundmann S., Vela-Perez I., Brennecke S., Eicke N., Rist J., Eckart S., Houamer S., Chuluunbaatar O., Popov Yu. et al.* // Nature Phys. 2020. V. 16. P. 756–760.

Создана имитационная модель системы хранения и обработки данных ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ). В качестве платформы для модели выбрана система GridSim. Созданная система моделирования позволяет проводить разнообразные эксперименты с исследуемым объектом, не прибегая к их физической реализации.

- *Кореньков В. В., Нечаевский А. В., Трофимов В. В.* // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 37–44.

Предложен подход к созданию облачных автономных грид-инфраструктур, предназначенных для решения различных задач в области облачных и грид-технологий, а также описана реализация такого комплекса и опыт его использования. На основе разработанного подхода создан специализированный облачный программно-аппаратный комплекс в составе ЦИВК ОИЯИ.

- *Кутровский Н. А.* // Информатизация образования и науки. 2013. № 4(20). С. 15–29.

На основе смоделированных событий, генерированных с помощью пакета GEANT3 в среде СВМ-ROOT, выполнена оценка эффективности и производительности алгоритма распознавания траекторий заряженных частиц на многоядерном сервере ОИЯИ. Алгоритм продемонстрировал высокую эффективность реконструкции треков (96–97 %) при низком уровне некорректно найденных треков (2–4 %). Достигнута высокая скорость обработки событий на одном ядре, равная в среднем 220 мс на одно центральное событие и 25 мс на одно смешанное событие. Показано, что с увеличением числа включаемых в обработку ядер практически линейно растет количество обработанных событий.

- *Кулаков И. С. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 2(179). С. 253–267.

Исследована возможность регистрации распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , рождающихся в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон на установке СВМ (GSI, Германия). Для выделения сигнальных событий в условиях доминирующего фона разработаны специальные критерии отбора и подобрана оптимальная толщина мишени. Предложена эффективная методика по определению критических границ для указанных критериев отбора. Показано, что используемые критерии позволяют надежно и с высокой скоростью осуществить набор приемлемой статистики распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ .

- *Дереновская О. Ю., Васильев Ю. О.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 5(182). С. 694–705.

Разработана новая система моделирования грид- и облачных сервисов, ориентированная на повышение эффективности разработки системы хранения и обработки данных ускорительного комплекса NICA. В системе реализован подход учета качества работы уже функционирующей системы при проектировании ее дальнейшего развития за счет объединения самой программы

моделирования с системой мониторинга реального (или модельного) грид-облачного сервиса через специальную базу данных. Приведен пример применения программы для моделирования достаточно общей облачной структуры, которая может быть использована и вне рамок физического эксперимента.

- *Кореньков В. В. и др.* // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6, № 5.

Проведен сравнительный анализ пакетов моделирования облачных инфраструктур: CloudSim, iCanCloud, CReST. Эти программные пакеты позволяют создавать модели облачных систем с определенной функциональностью и конфигурацией. Готовая модель запускается на симуляцию, в результате чего системы моделирования предоставляют статистическую информацию по наиболее важным характеристикам: время выполнения задач, жизненный цикл виртуальных машин, использование ресурсов. Анализируя эту информацию, разработчик может выявить узкие места в модели и предусмотреть пути решения проблем, проверив результат следующей итерацией симуляции.

- *Кореньков В. В., Муравьев А. Н., Нечаевский А. В.* // Системный анализ в науке и образовании. 2014. Вып. № 2.

Разработаны подходы для обеспечения интеграции контента и интероперабельности информационных систем, сопровождающих научные исследования в ОИЯИ, а именно: сервера научных документов JINR Document Server (JDS), информационно-аналитической системы «Персональная информация о сотрудниках ОИЯИ» (Personal INformation (PIN)) и системы управления научными мероприятиями Indico. Конечной целью данной разработки является комплексная автоматизация научно-исследовательской деятельности ОИЯИ на основе интернет-технологий.

- *Заикина Т. Н. и др.* // Тр. XVI Всерос. конф. RCDL-2014. Дубна, 2014. С. 349.

Разработана программа ROTNEA на языке Фортран 77 для расчета с заданной точностью собственных значений, поверхностных собственных функций и их первых производных по параметру параметрического самосопряженного двухмерного эллиптического дифференциального уравнения с условиями Дирихле и/или Неймана в конечной двумерной области. Программа вычисляет также потенциальные матричные элементы — интегралы от произведения поверхностных функций и/или первых производных от поверхностных функций по параметру. Собственные значения, зависящие от параметра и матричных элементов, вычисленные программой ROTNEA, могут быть использованы для решения с помощью программы KANTBP задач на связанные состояния и многоканальных задач рассеяния для систем связанных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

- *Gusev A. A. et al.* // Comp. Phys. Commun. 2014. V. 185. P. 2636–2654.

Проведено численное исследование комплексов локализованных структур в двух динамических системах, каждая из которых имеет множество физических приложений. Первая система описывается нелинейным уравнением Шредингера с внешней накачкой и диссипаций (NLS). Вторая — уравнением двойного синус-Гордона (2SG). Численный анализ в обоих случаях основан на продолжении соответствующих стационарных решений по параметрам и численном решении линеаризованной задачи на собственные значения для анализа устойчивости и бифуркаций. Мультисолитонные комплексы NLS исследуются для случая слабой и нулевой диссипации. Для первой системы продемонстрировано существование устойчивых и неустойчивых мультисолитонных структур в случае малой диссипации. Численные результаты, полученные на основе вышеизложенного подхода, подтверждаются прямым численным решением исходного уравнения в частных производных. Для второй системы свойства мультифлюксонных решений 2SG исследованы в зависимости от параметра второй гармоники. Показано, что учет второй гармоники приводит к изменению свойств известных решений и появлению новых сосуществующих флюксонных состояний.

- Земляная Е. В., Алексеева Н. В., Атанасова П. Х. // Вестн. РУДН. Сер.: Математика. Информатика. Физика. 2014. № 2. С. 363.

Показано, что соотношение унитарной  $U(d)$ -эквивалентности между элементами пространства  $\mathbb{R}_+$  смешанных состояний  $d$ -мерной квантовой системы определяет пространство орбит  $\mathbb{R}_+/U(d)$  и обеспечивает его описание в терминах кольца  $\mathbb{R}[\mathbb{R}_+]^{U(d)}$   $U(d)$ -инвариантных многочленов. Доказано, что полуалгебраическая структура пространства  $\mathbb{R}_+/U(d)$  полностью определяется двумя основными свойствами матриц плотности: их положительной полуопределенностью и эрмитовостью. В частности, показано, что неравенства Процессии–Шварца для элементов базиса кольца инвариантов для  $\mathbb{R}[\mathbb{R}_+]^{U(d)}$ , определяющие пространство орбит, выполняются тождественно для всех элементов  $\mathbb{R}_+$ .

- Гердт В. П., Хведелидзе А. М., Палий Ю. Г. // Зап. науч. семинаров ПОМИ. 2014. Т. 421. С. 68.

Предложен метод приближенного вычисления матричнозначных функциональных интегралов, порожденных решением уравнения Дирака. Эти интегралы определяются на одномерных непрерывных путях  $x: |s, t| \rightarrow \mathbb{R}$  и принимают значения в пространстве комплексных  $d \times d$  матриц. Матричнозначные интегралы широко используются в релятивистской квантовой механике для изучения частиц в электромагнитном поле. А именно, интегралы применяются для того, чтобы представить фундаментальное решение задачи Коши для уравнения Дирака. Предложенный метод основан на разложении функционала в ряд. Члены ряда имеют вид произведения линейных функционалов с возрастающей суммарной степенью. Развитый метод применим в случае малых и больших параметров, входящих в интеграл.

- Айрян Э. А., Малютин В. Б. // Вестн. РУДН. Сер.: Математика. Информатика. Физика. 2014. № 1. С. 43.

Программа для вычислений геометрических характеристик ядро-ядерных взаимодействий, широко применяемая на RHIC и LHC, адаптирована для экспериментов NICA/MPD и CBM. Для задания профиль-функции нуклон-нуклонных соударений используется параметризация, ранее предложенная авторами. Для определения ядерных параметров используется подход, широко известный в физике низких и промежуточных энергий. Программа расширена возможностью учета грибовского неупругого экранирования.

- Галоян А. С., Ужинский В. В. // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1. С. 231–236.

Модель микроскопического оптического потенциала (ОП) применена для анализа упругого рассеяния  $^{10,11}\text{Be}$  протонами и ядрами и анализа сечений неупругого рассеяния  $\pi$ -мезонов ядрами  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  при энергии 291 МэВ. Распределения плотности ядер  $^{10,11}\text{Be}$ , полученные в модели генераторных координат и квантовым методом Монте-Карло, использованы для расчета ОП и затем дифференциальных сечений упругого рассеяния этих ядер на протонах и ядрах  $^{12}\text{C}$ . Для анализа сечений неупругого рассеяния  $\pi$ -мезонов использовались параметры  $\pi N$ -амплитуды в ядерной среде, полученные ранее из анализа данных упругого рассеяния на тех же ядрах. Определены параметры глубины реальной и мнимой частей ОП с учетом известной зависимости объемных интегралов ОП от энергии. Полученные потенциалы можно использовать в дальнейших расчетах сечений реакций с участием этих ядер.

- Zemlyanaya E. V., Spasova K., Lukyanov K. V., Antonov A. N., Gaidarov M. K. // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 034606;
- Lukyanov V. K., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V., Ellithi A. Y., Abdul-Magead I. A. M. // Intern. J. Mod. Phys. E. 2015. V. 24, No. 4. P. 1550035;
- Лукьянов В. К., Земляная Е. В., Лукьянов К. В. // ЯФ. 2015. Т. 78, № 1. С. 147–155.

Предложен алгоритм реконструкции треков заряженных частиц на основе фильтра Калмана. Данный алгоритм применяется для решения одной из ключевых задач эксперимента CBM (GSI, Германия) — распознавания траекторий заряженных частиц и определения их параметров. В связи с тем, что в эксперименте CBM планируется полная реконструкция сигнальных событий в реальном времени эксперимента, разрабатываемые алгоритмы должны быть быстрыми, максимально использующими возможности современных многоядерных процессоров и GPU-архитектур. Расчеты проведены на высокопроизводительном сервере с двумя процессорами Intel Xeon X5660 и видеокартой Nvidia GTX GPU 480.

- Аблязимов Т. О. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 4. С. 828.
- Ablyazimov T. O., Zyzak M. V., Ivanov V. V., Kisel P. I. // Part. Nucl., Lett. 2015. V. 12, No. 3. P. 423–427.

С помощью промежуточного программного обеспечения Interware DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) были объединены вычислительные ресурсы Tier1/Tier2 ОИЯИ, суперкомпьютера «Говорун»,

облачных сред ОИЯИ и организаций его стран-участниц, кластера NICA, кластера Национального автономного университета Мексики (UNAM) и ресурсы хранения: dCache, EOS и сверхбыстрая система хранения данных Lustre. С использованием этой распределенной инфраструктуры выполняется программа Монте-Карло моделирования данных экспериментов мега-сайенс-проекта NICA.

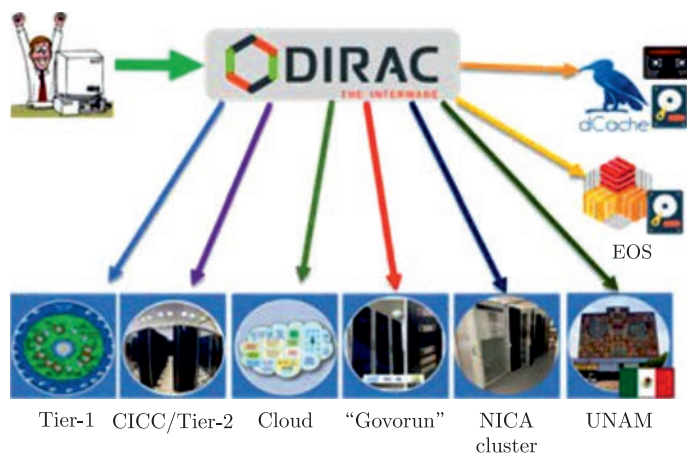
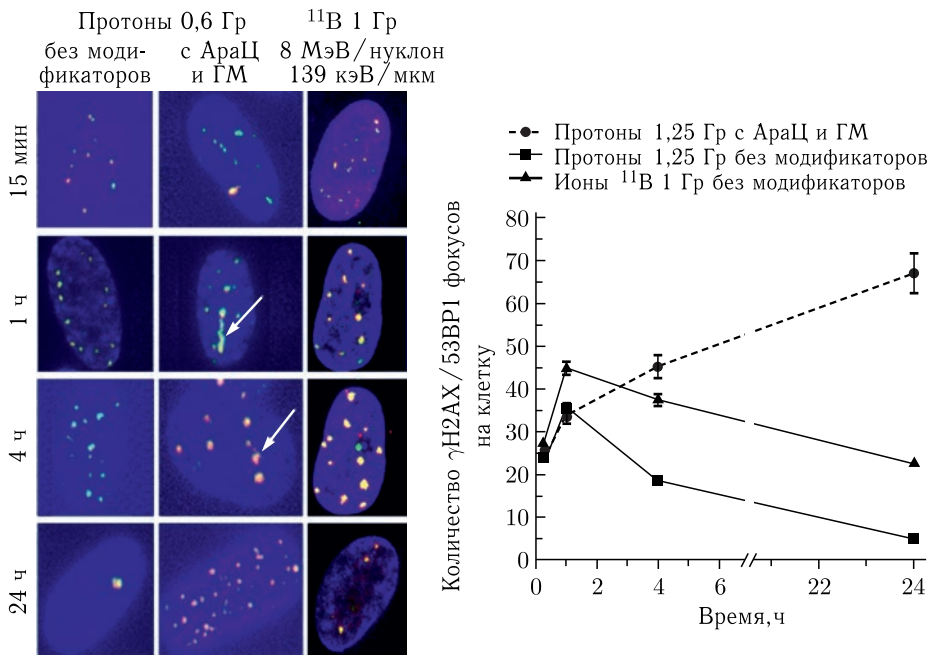


Схема интеграции географически-распределенных гетерогенных ресурсов на основе DIRAC Interware

- *Kutovskiy N. et al.* Integration of Distributed Heterogeneous Computing Resources for the MPD Experiment with DIRAC Interware // Phys. Part. Nucl. (in press).

## РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработан принципиально новый метод повышения биологической эффективности пучков протонов медицинского назначения и гамма-терапевтических установок. Подход основан на применении официального препарата — 1-β-D-арабинофуранозилцитозина, используемого в онкологической практике при лечении раковых заболеваний кроветворной системы. При введении препарата перед облучением клеток человека ионизирующими излучениями происходит трансформация однонитевых разрывов ДНК в летальные двунитевые разрывы, что обеспечивает существенное повышение биологической эффективности пучков протонов, значительно сближает области использования протонных и углеродных ускорителей для терапевтических целей.



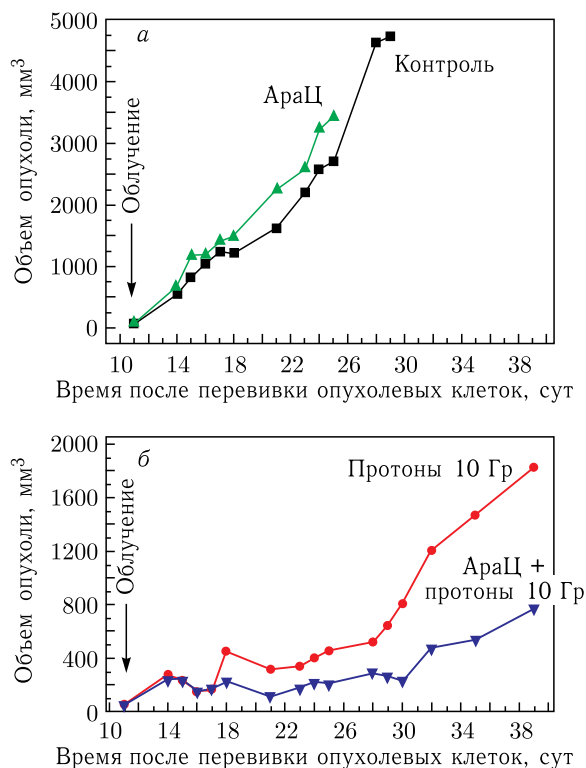
Изображения индивидуальных  $\gamma$ H2AX/53BP1 фокусов и кинетика их формирования и элиминации в ядрах клеток человека при действии протонов в пике Брэгга и ускоренных ионов бора с энергией 8 МэВ/нуклон при облучении в обычных условиях и в присутствии радиомодификатора

- Красавин Е. А., Борейко А. В., Заднепрянец М. Г., Ильина Е. В., Кожина Р. А., Кузьмина Е. А., Куликова Е. А., Смирнова Е. В., Тимошенко Г. Н., Тиунчик С. И., Чаусов В. Н. Влияние ингибиторов синтеза ДНК на биологическую



эффективность пучка протонов в модифицированном пике Брэгга // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 2. С. 181.

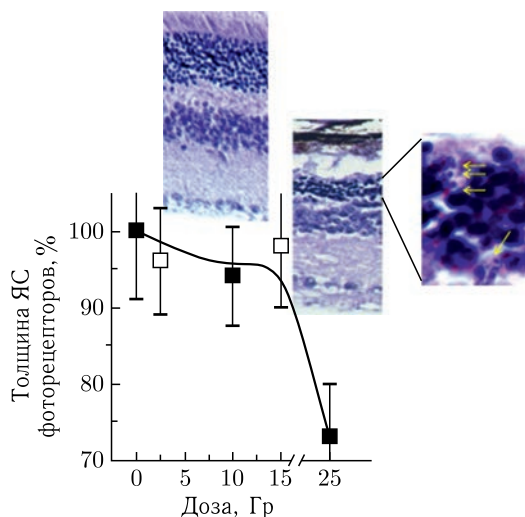
Специалистами ОИЯИ и МРНЦ им. А. Ф. Цыба проведены предклинические исследования нового метода повышения биологической эффективности протонов для лечения опухолевых заболеваний *in vivo*. Группам животных (мышам) была привита опухоль меланомы. Опухоли животных подвергались облучению протонами в пике Брэгга с предварительным введением арабинозидцитозина (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. Получен патент № 2699670 на изобретение нового метода усиления радиационного воздействия на живые клетки.



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

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

Проведены исследования действия ускоренных протонов и агента химической природы (метилнитрозомочевины) на сетчатку глаза мышей. Разработана методика визуализации глиальных клеток Мюллера (ГКМ) в срезах сетчатки глаза мышей, открывающая возможность исследования ответа этих клеток на генотоксическое воздействие. ГКМ играют ключевую роль в регенерации сетчатки глаза и являются единственными клетками в сетчатке, которые сохраняют способность к делению. Выявлено наличие генотоксического порога (плато устойчивости на кривой «доза–эффект») у сетчатки глаза мышей после воздействия ускоренными протонами и инъекции метилнитрозомочевины. Обнаружена способность сетчатки глаза к морфологическому и функциональному восстановлению после воздействия используемых в работе генотоксических агентов. Результаты данной работы имеют теоретическое и практическое значение для решения фундаментальной проблемы повреждения и восстановления терминально дифференцированных клеток и состоящих из них тканей.

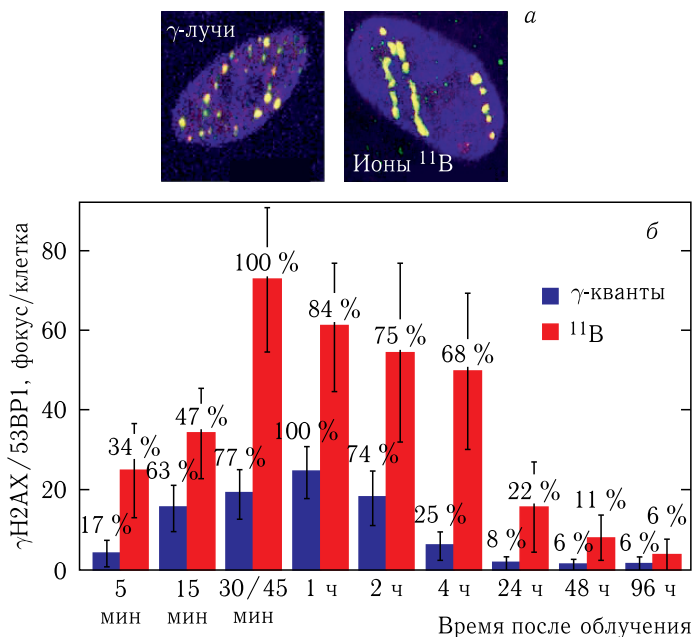


Микрофотографии срезов сетчатки глаза мышей, показывающие активацию клеток Мюллера в сетчатке после введения метилнитрозомочевины в дозе 70 мг/кг, и изменение толщины ядерного слоя (ЯС) фоторецепторов мыши в ответ на локальное облучение протонами головы мыши спустя 3 сут (■) и 30 сут (□) после облучения

- Тронов В. А., Виноградова Ю. В., Поплинская В. А., Некрасова Е. И., Островский М. А. Исследование адаптивного ответа сетчатки глаза у мышей на облучение протонами: связь с репарацией ДНК и гибелью фоторецепторных клеток // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1 (192). С. 241–255.
- Тронов В. А., Виноградова Ю. В., Поплинская В. А., Некрасова Е. И., Островский М. А. Радиационное прекондиционирование сетчатки глаза у мышей *in vivo* повышает ее устойчивость к последующему генотоксическому воздействию и стимулирует восстановление // Цитология. 2015. Т. 56, № 2. С. 119–128.
- Виноградова Ю. В. Исследование повреждения и процессов восстановления сетчатки глаза мышей после облучения ускоренными протонами и действия метилнитрозомочевины. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 24 с.

Проведено сравнительное исследование индукции и репарации кластерных двунитевых разрывов (ДР) ДНК при действии  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и уско-

ренных тяжелых ионов. Показано, что при облучении ионами  $^{11}\text{B}$  (ЛПЭ  $\sim 135$  кэВ/мкм) ДР ДНК формируются вдоль трека прохождения частицы, в то время как при  $\gamma$ -облучении повреждения равномерно распределены в ядре клетки. Действие ионов  $^{11}\text{B}$  индуцирует формирование тяжелых кластерных повреждений ДНК, репарация которых замедлена по сравнению с  $\gamma$ -облучением (рис. а). Облучение ионами  $^{11}\text{B}$  приводит к формированию в три раза большего количества фокусов  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  по сравнению с  $\gamma$ -квантами. Максимальный выход фокусов после  $\gamma$ -облучения наблюдали через 1 ч пострадиационной инкубации фибробластов, и большая часть фокусов ( $\sim 75\%$ ) элиминировалась в течение 4 ч (рис. б). В клетках, облученных ионами  $^{11}\text{B}$ , наибольший выход фокусов  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  регистрировали через 45 мин пострадиационной инкубации. В отличие от  $\gamma$ -квантов в клетках, облученных ускоренными ионами  $^{11}\text{B}$ , через 4 ч количество фокусов уменьшалось на 32%. Элиминацию 68% фокусов наблюдали только через 24 ч пострадиационной инкубации.

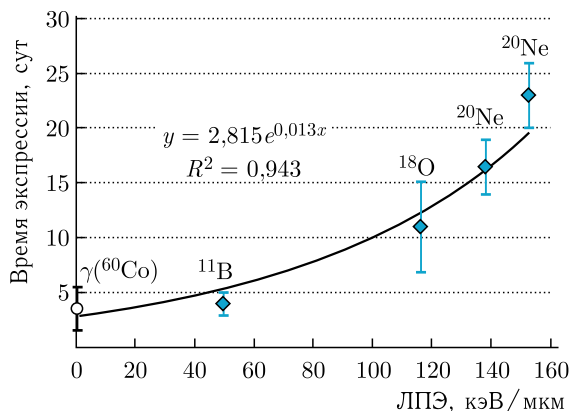


а) Визуализация ДР ДНК в ядрах фибробластов с использованием метода иммуноцитохимического окрашивания. б) Кинетика формирования и элиминации фокусов  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  (гистон  $\gamma\text{H2AX}$  и репарационный белок 53BP1 — маркеры ДР ДНК) при действии  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и ускоренных ионов  $^{11}\text{B}$

- Ježková L. et al. Function of Chromatin Structure and Dynamics in DNA Damage, Repair and Misrepair:  $\gamma$ -Rays and Protons in Action // Appl. Radiat. Isot. 2014. V. 83. P. 128–136.
- Falk M. et al. Primary and Secondary Clustering of DSB Repair Foci and Repair Kinetics Compared for  $\gamma$ -Rays, Protons of Different Energies, and High-LET  $^{20}\text{Ne}$  Ions // J. Radiat. Res. 2014. V. 55. Suppl. 1. P. i79–i80; doi: 10.1093/jrr/rrt210.

- *Falk M. et al. Chromatin Differentiation of White Blood Cells Decreases DSB Damage Induction, Prevents Functional Assembly of Repair Foci, but Has no Influence on Protrusion of Heterochromatic DSBs into the Low-Dense Chromatin // J. Radiat. Res. 2014. V. 55. Suppl. 1. P. i81–i82; doi:10.1093/jrr/rrt194.*

Проведена серия экспериментов по исследованию радиационно-индуцированного мутагенеза в клетках китайского хомячка (линия V79) после воздействия ускоренных ионов с различной ЛПЭ (50, 116, 138, 153 кэВ/мкм) и  $\gamma$ -облучения. Обнаружено, что формирование мутантных субклонов зависит от сроков высева облученных клеток («времени экспрессии» мутаций) на селективную питательную среду с 6-тиогуанином и от ЛПЭ излучений. При увеличении периода экспрессии отмечено увеличение частоты мутирования до максимального значения с последующим его снижением до спонтанного уровня. Положение этого максимума зависело от ЛПЭ ускоренных ионов.



Максимальный уровень радиационно-индуцированного мутагенеза в клетках китайского хомячка в зависимости от «времени экспрессии» и ЛПЭ ускоренных ионов

С увеличением ЛПЭ значение максимума смещается в сторону более длинного периода экспрессии. При  $\gamma$ -облучении максимальный уровень мутагенеза отмечен на 3–4-е сутки после облучения, тогда как после облучения ускоренными ионами кислорода  $^{18}\text{O}$  (ЛПЭ  $\sim 116$  кэВ/мкм) максимальный уровень мутагенеза наблюдался через 11 сут, а после облучения ускоренными ионами неона  $^{20}\text{Ne}$  (ЛПЭ  $\sim 153$  кэВ/мкм) — через 23 сут. На основании проведенных исследований можно предположить, что повышенный уровень радиационно-индуцированного мутагенеза определяется возросшей хромосомной нестабильностью популяции облученных клеток, и его проявление в разные «времена экспрессии» зависит от тяжести первоначальных повреждений.

- *Blaha P., Koshlan I. V., Koshlan N. A., Govorun R. D., Elsha D. V., Bogdanova J. V., Sidorina J. J., Krasavin E. A. Induction of HPRT Mutants in V79 Cells after Gamma and HZE Ions Irradiation at Various Expression Times // Book of Abstr. of the 15th Intern. Congress of Radiation Research. Kyoto, Japan, 25–29 May 2015.*

Продолжен анализ реакции синтеза химических соединений из формамида  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$  (продукта гидролиза  $\text{HCN}$ ) при действии излучений с разной ЛПЭ. Реакции синтеза осуществлялись при облучении ускоренными протонами и

ионами  $^{11}\text{B}$  и  $^{12}\text{C}$  в присутствии катализаторов, полученных из метеоритов различных классов. Сделан вывод о том, что в системе «формамид + вещество метеоритов + ионизирующее излучение» в заметных количествах формируются пребиотические соединения вплоть до нуклеозидов — основных фрагментов, входящих в состав РНК и ДНК. Получены представители всех классов молекул, необходимых для образования жизни на Земле: карбоновые кислоты, аминокислоты (рис. 1), сахара, нуклеиновые основания, нуклеозиды (рис. 2) и другие сложные соединения.

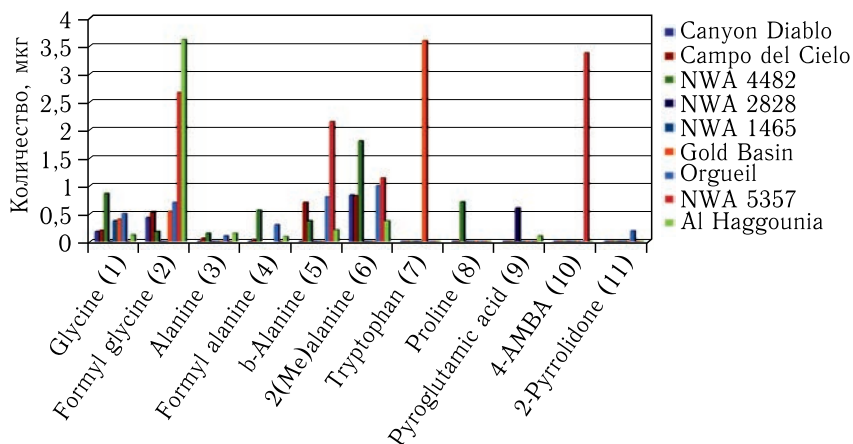


Рис. 1. Результаты по образованию аминокислот

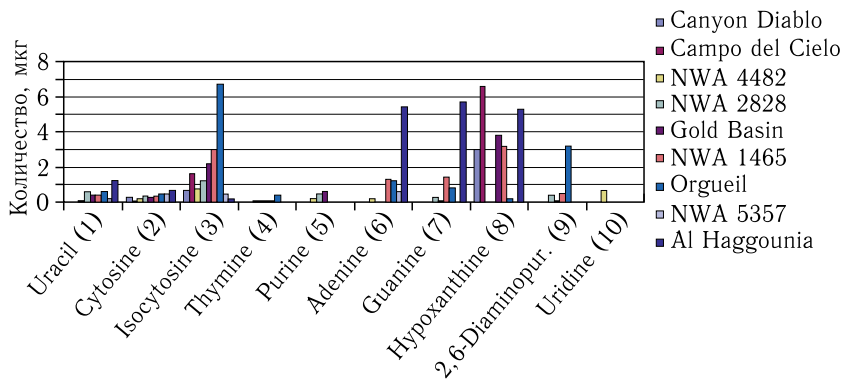


Рис. 2. Результаты по образованию нуклеиновых оснований и нуклеозидов

- *Saladino R. et al.* Meteorite-Catalyzed Syntheses of Nucleosides and of Other Prebiotic Compounds from Formamide under Proton Irradiation // J. PNAS. 2015. V. 112, No. 21. P. E2746–E2755; doi: 10.1073/pnas.1422225112.

Создан экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии на моделях планетарного грунта. Основу планетарных реголитов представляет собой массив силикатного стекла, общей массой до 35 т,

являющийся моделью абсолютно сухого грунта. Наличие в грунте воды моделируется слоями полиэтилена на разных глубинах. Для максимально возможного приближения к химическому составу марсианского реголита по Fe, Al и Si в состав массива стекла добавлены тонкие слои стали, алюминия и полихлорвинила. В целом, химический состав моделей хорошо согласуется со средним химическим составом марсианского и лунного реголита.

Исследования, проводимые на стенде, являются продолжением многолетнего цикла работ сотрудников Лаборатории радиационной биологии совместно с Лабораторией нейтронной физики и Институтом космических исследований РАН по разработке, созданию и калибровке приборов ядерной планетологии. Приборы предназначены для анализа элементного состава грунта небесных тел. Сотрудники ОИЯИ участвовали в создании ряда приборов, с помощью которых было подтверждено наличие водяного льда на Марсе и Луне, нейтронного прибора, смонтированного на борту ровера «Curiosity», а также ряда других приборов для будущих миссий Роскосмоса, NASA и ЕКА.

- *Litvak M. L. et al.* Ground Tests with Active Neutron Instrumentation for the Planetary Science Missions // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 788. P. 194–202.

Сформулированы модели трех основных механизмов восстановления повреждений ДР ДНК: негомологичного воссоединения концов, гомологичной рекомбинации и одностороннего отжига по прямым повторам. Предложенный модельный подход применен к описанию кинетики репарации ДР ДНК, индуцированных действием ионизирующих излучений в широком диапазоне значений ЛПЭ — от 0,2 до 440 кЭВ/мкм.

- *Lyashko M. S., Belov O. V., Avvakumova I. L.* Dynamic Model of DNA Double-Strand Break Repair by Non-Homologous End Joining // Book of Abstr. of the IUPAB Intern. Workshop “Computational and Theoretical Modeling of Biomolecular Interactions”. Dubna, June 3–8, 2013. P. 48–49.

Проведены расчеты по оценке энерговыделения в отдельных нейронах головного мозга грызунов при действии тяжелых заряженных частиц высоких энергий. Оценено распределение энергии и дозы в объемных моделях пирамидных нейронов области CA1 гиппокампа крыс при облучении ускоренными ионами  $^{56}\text{Fe}$  с энергией 0,3 и 1,0 ГэВ/нуклон.

- *Batmunkh M., Bayarchimeg L., Lkhagva O., Belov O.* Cluster Analysis of HZE Particle Tracks as Applied to Space Radiobiology Problems // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 7. P. 854–859.

Рассмотрено влияние неоднородностей в синаптических связях в нейронных сетях, возникающих вследствие радиационных или химических воздействий, на распространение импульсов. В результате взаимодействия импульса с неоднородностью возможны эффекты задержки, отражения, компрессии и разбиения импульса вплоть до его разрушения.

- *Бугай А. Н.* Диссипативные солитоны в нейронных сетях с локальными повреждениями // Сб. тр. XIV Всерос. шк.-семинара «Волны-2013». М.: МГУ, 2013. С. 15–16.

Методами молекулярной динамики изучены структурные и функциональные свойства фермента ДНК-фотолиазы. ДНК-фотолиаза — активируемый светом фермент, восстанавливающий индуцированный УФ-излучением циклобутан-пиримидиновый димер в поврежденной ДНК. Полученные результаты способствуют решению задачи о механизмах репарации ДНК данным ферментом.

- Душанов Э., Холмуродов Х., Ясуока К., Красавин Е. МД-исследования конформационного поведения фермента ДНК-фотолиазы // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10(6). С. 974–985.

Совместно с сотрудниками ГНЦ РФ «Институт медико-биологических проблем РАН» и Медико-технического комплекса ОИЯИ в Лаборатории радиационной биологии создано техническое устройство, позволяющее производить тотальное облучение животных протонами в расширенном пике Брэгга. На уровне целостного организма продемонстрировано повреждающее действие протонов в пике Брэгга на состояние системы кроветворения и цитогенетического аппарата клеток костного мозга, достоверно превышающее эффект пучка протонов с энергией 171 МэВ.

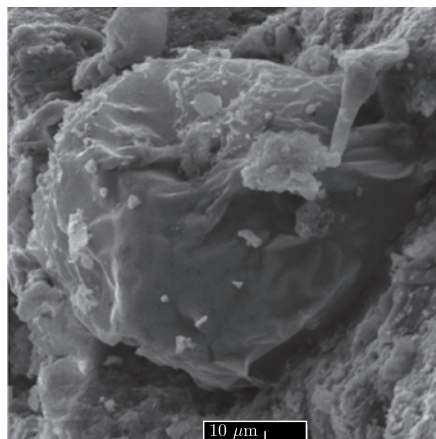
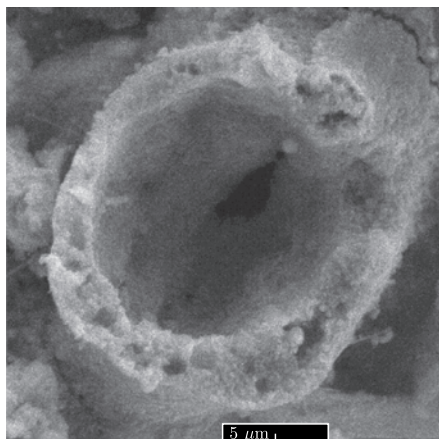
- Иванов А. А., Молоканов А. Г., Булынина Т. М., Ворожцова С. В., Абросимова А. Н., Крючкова Д. М., Северюхин Ю. С. Радиобиологические эффекты тотального облучения протонами в пике Брэгга // Междунар. научн. конф. «Радиобиологические основы лучевой терапии опухолей» памяти А. С. Саенко: Тез. докл. Москва, 19–20 нояб. 2013 г. М.: РУДН, 2013. С. 8.

Проведен анализ реакции синтеза химических соединений из формамида  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$  (продукта гидролиза  $\text{HCN}$ ) при действии ионизирующей радиации. Реакции синтеза осуществлялись при облучении протонами с энергией 165 МэВ на фазотроне ОИЯИ в присутствии катализаторов, полученных из метеоритов различных классов. На основании выполненных экспериментов сделан важный вывод о том, что в системе «формамид + вещество метеоритов + ионизирующее излучение» в заметных количествах формировались пребиотические соединения (предшественники нуклеиновых кислот, белков, метаболических циклов и метаболизма). При действии УФ и/или нагревании пребиотические соединения не образовывались. Данные исследования могут пролить свет на происхождение жизни во Вселенной.

- Саладино Р., Ботта Дж., Дельфино М., Ди Мауро Э., Капралов М. И., Красавин Е. А., Тимошенко Г. Н., Розанов А. Ю. Образование пребиотических соединений формамида при облучении частицами высоких энергий // Новости ОИЯИ. 2013. № 4. С. 16–19.

## АСТРОБИОЛОГИЯ

Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа выполнен большой цикл исследований окаменелых микроорганизмов (микрофоссилий) в метеоритах. Выпущен первый иллюстрированный атлас микрофоссилий в метеорите Оргей. Совместно с коллегами из Италии и Чехии исследовано формирование сложных пребиотических соединений при облучении протонами простых органических соединений в присутствии вещества метеоритов как катализатора. Предложен новый механизм, способствующий образованию и переработке нерастворимого органического вещества в метеоритах и в ходе пребиотических процессов.



Изображения окаменелых микроорганизмов из метеорита Оргей

- Розанов А.Ю., Хувер Р.Б., Красавин Е.А., Самылина О.С., Рюмин А.К., Капралов М.И., Сапрыкин Е.А., Афанасьева А.Н. Метеорит Оргей (атлас микрофоссилий) / Отв. ред. А. Ю. Розанов. М.: ПИН РАН, 2020. 130 с., 5 ил., 40 фототабл. На русс. и англ. яз.
- Bizzarri B. M., Manini P., Lino V., Ischia M., Kapralov M. I., Krasavin E. A., Mrazikova K., Sponer J., Sponer E., Di Mauro E., Saladino S. High-Energy Proton-Beam-Induced Polymerization/Oxygenation of Hydroxynaphthalenes on Meteorites and Nitrogen Transfer from Urea: Modeling Insoluble Organic Matter? // Chem. Eur. J. 2020. V.26. P.14919–14928; doi: 10.1002/chem.202002318.

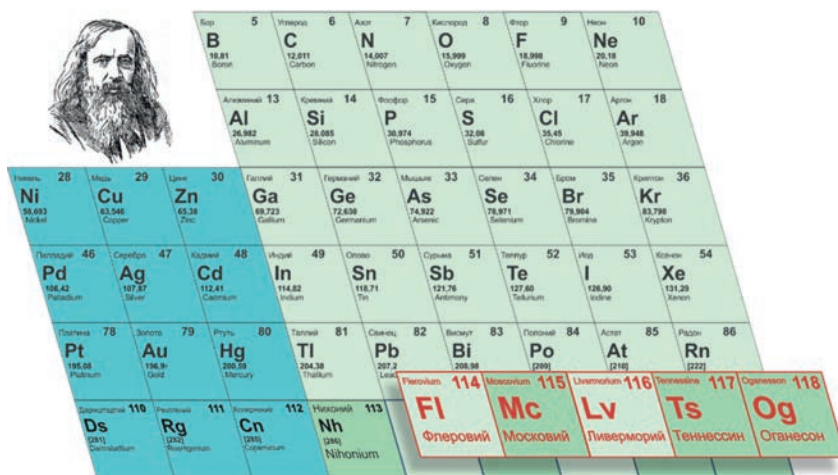


## HEAVY ION PHYSICS

A series of experiments on the synthesis of superheavy elements with atomic numbers 115, 117 and 118 of D.I. Mendeleev's Periodic Table has been completed. According to the decision of the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) dated November 28, 2016, the following names and symbols listed below have been assigned to the new elements:

- moscovium and Mc for element 115;
- tennessine and Ts for element 117;
- oganesson and Og for element 118.

The synthesis of these elements was first performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR), a recognized world leader in the field of synthesis and study of properties of superheavy nuclei. Over the past 16 years, five elements with atomic numbers 114–118 — the heaviest elements known nowadays — have been discovered at JINR. This marked the completion of the seventh period of D.I. Mendeleev's Periodic Table. On March 2, 2017, the inauguration of the names of the new synthesized at JINR elements “moscovium”, “tennessine” and “oganesson” took place. The recognition of this discovery consolidated the leading positions of JINR in the world in the synthesis of superheavy elements.



Бор 5 10,81 Boron	Углерод 6 12,011 Carbon	Азот 7 14,007 Nitrogen	Кислород 8 15,999 Oxygen	Фтор 9 18,998 Fluorine	Неон 10 20,18 Neon			
Алюминий 13 26,982 Aluminum	Силиций 14 28,085 Silicon	Фосфор 15 30,974 Phosphorus	Сера 16 32,06 Sulfur	Хлор 17 35,45 Chlorine	Аргон 18 39,948 Argon			
Никель 28 58,693 Nickel	Медь 29 63,546 Copper	Цинк 30 65,38 Zinc	Галлий 31 69,723 Gallium	Германий 32 72,630 Germanium	Мышьяк 33 74,922 Arsenic	Селен 34 78,971 Selenium	Бром 35 79,904 Bromine	Криpton 36 83,798 Krypton
Палладий 46 106,42 Palladium	Серебро 47 107,87 Silver	Кадмий 48 112,41 Cadmium	Индий 49 114,82 Indium	Олово 50 118,71 Tin	Сурьма 51 121,76 Antimony	Теллур 52 127,60 Tellurium	Йод 53 126,90 Iodine	Ксенон 54 131,29 Xenon
Платина 78 195,08 Platinum	Золото 79 196,9 Gold	Ртуть 80 200,59 Mercury	Таллий 81 204,38 Thallium	Свинец 82 207,2 Lead	Висмут 83 208,98 Bismuth	Полоний 84 [209] Polonium	Астат 85 [210] Astatine	Радон 86 [222] Radon
Дармштадт 110 [281] Darmstadtium	Роговий 111 [282] Roentgenium	Коперничев 112 [285] Copernicium	Нихоний 113 [286] Nihonium	Флеровий 114 [289] Flerovium	Московский 115 [289] Moscovium	Ливерморий 116 [289] Livermorium	Теннесси 117 [294] Tennessine	Оганesson 118 [294] Oganesson

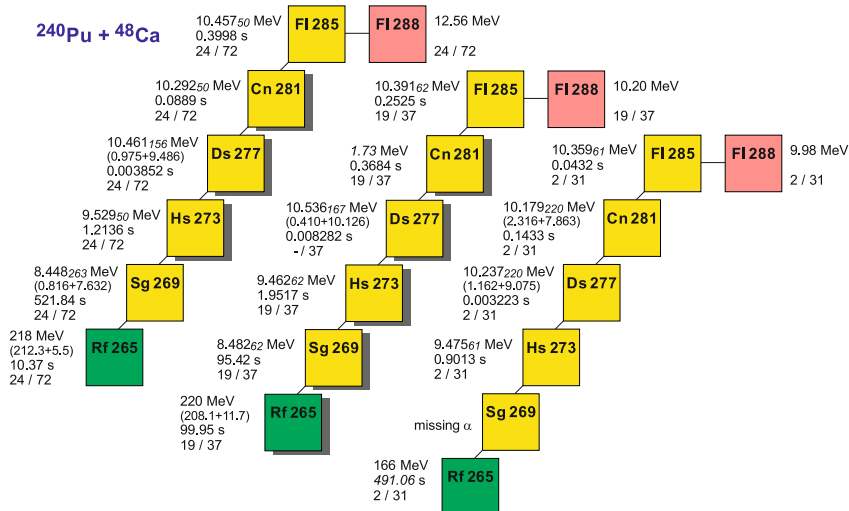
Part of D. I. Mendeleev's Periodic Table

- *Oganessian Yu. Ts., Dmitriev S. N.* Synthesis and Study of Properties of Superheavy Atoms. Factory of Superheavy Elements // Russ. Chem. Rev. 2016. V. 85. P. 901.
- *Utyonkov V., Oganessian Yu., Dmitriev S., Itkis M., Moody K., Stoyer M., Shaughnessy D., Roberto J., Rykaczewski K., Hamilton J.* The Discovery of

Elements 113 to 118 // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 131. P. 06003.

- *Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu.* Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
- IUPAC Press Release; <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>.

In 2015, experiments on the synthesis of new neutron-deficient isotopes of superheavy elements in the  $^{48}\text{Ca} + ^{239}\text{Pu}$  and  $^{48}\text{Ca} + ^{240}\text{Pu}$  fusion reactions were completed. A new  $^{284}\text{Fl}$  isotope, undergoing spontaneous fission, was produced in both reactions. Three new decay chains of the known  $^{285}\text{Fl}$  isotope were also detected. Further experimental studies on the region of unknown superheavy nuclei are planned. These superheavy nuclei are located between the isotopes of superheavy elements synthesized by “hot” fusion at JINR (Dubna) and by “cold” fusion at GSI (Germany) and RIKEN (Japan). The work is fundamental for understanding the properties of nuclei located near the borders of the island of stability of superheavy elements.



New decay chains of the  $^{285}\text{Fl}$  nucleus

- *Utyonkov V.K., Brewer N.T., Oganessian Yu. Ts., Rykaczewski K.P., Abdullin F.Sh., Dmitriev S.N., Grzywacz R.K., Itkis M.G., Miernik K., Polyakov A.N., Roberto J.B., Sagaidak R.N., Shirokovsky I.V., Shumeiko M.V., Tsyganov Yu.S., Voinov A.A., Subbotin V.G., Sukhov A.M., Sabel'nikov A.V., Vostokin G.K., Hamilton J.H., Stoyer M.A., Strauss S.Y.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. P. 034609.

In 2017, a new ACCULINNA-2 fragment separator designed for the production of radioactive ion beams was commissioned at the U-400M accelerator. The project parameters of the setup were experimentally validated: the intensities

of the beams produced in the  $^{15}\text{Ne} + \text{Be}$  fragmentation reaction are on average higher by a factor of 25 compared to those attained earlier. The separator is a basic facility for the study of light exotic nuclei near the limits of nucleon stability and it will allow the search and investigation of exotic nuclear systems, such as  $^5\text{-}^7\text{H}$ ,  $^8\text{-}^{10}\text{He}$ ,  $^{24}\text{-}^{26}\text{O}$ , etc., and of new types of radioactive decay.



ACCULINNA-2 fragment separator

- *Fomichev A. S.* Commissioning of the ACCULINNA-2 Fragment Separator and Its Day-One Experiments // 46th Meeting of the PAC for Nuclear Physics, Dubna, 15 June 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=251>.
- *Sharov P. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2017. V.96. P.025807.

## ACCELERATOR TOPICS

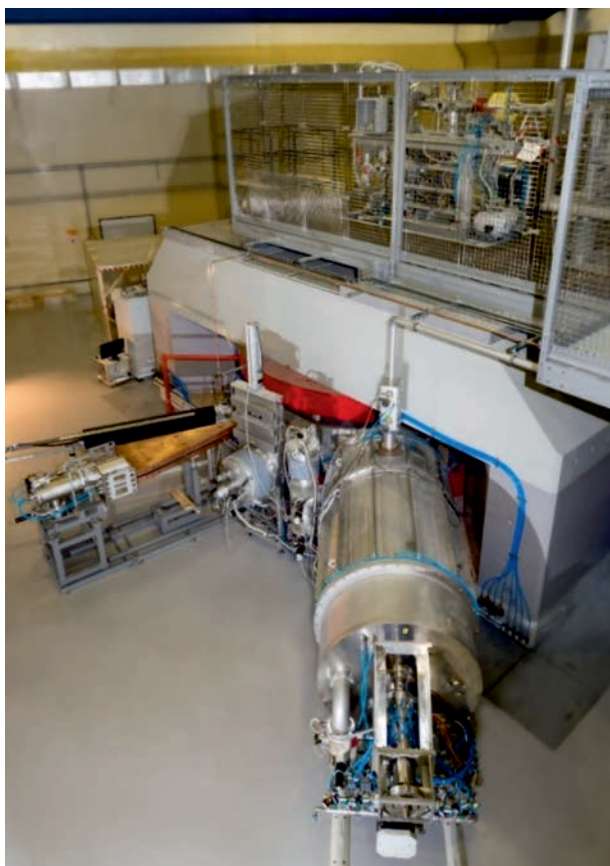
A unique accelerator complex “Factory of Superheavy Elements” (SHE Factory) was commissioned, and its basic element, the new DC-280 cyclotron, was launched. On March 25, 2019, the solemn opening of the experimental building of the SHE Factory and the launch of the new accelerator took place. At the commissioned accelerator complex, the first experiment on the synthesis of isotopes of element 115, moscovium, in the reactions of interaction of  $^{48}\text{Ca}$  and  $^{243}\text{Am}$  ions was started. This experiment gives a start to the unique JINR programme for the study of the nuclear physics and chemical properties of superheavy elements and shows the complex ready for the long-term research



Building of the SHE Factory



Gas-filled recoil separator, SHE Factory



Basic element of the SHE Factory, the DC-280 cyclotron

programme on the synthesis of elements 119 and 120 — the first elements of the 8th period of the Mendeleev Periodic Table.

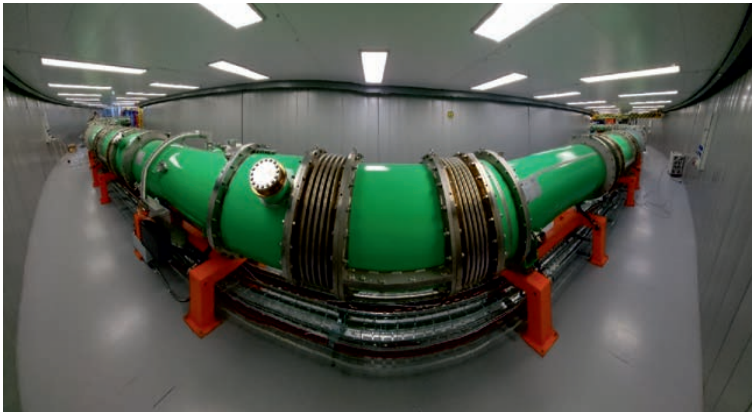
- *Dmitriev S.N., Oganessian Yu.Ts., Gulbekyan G.G., Kalagin I.V., Gikal B.N., Bogomolov S.L., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Yu., Ivanov G.N., Osipov N.F., Pashchenko S.V., Khabarov M.V., Semin V.A., Yeremin A.V., Utyonkov V.K.* SHE Factory: Cyclotron Facility for Super Heavy Elements Research // Proc. 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.
- *Oganessian Yu.Ts., Dmitriev S.N., Utyonkov V.K.* Project of Priority Experiments at SHE Factory // Proc. of the Intern. Symp. on Exotic Nuclei “EXON-2018”, Petrozavodsk, Russia, 10–15 Sept. 2018 / Eds. Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev. Singapore: World Sci., 2020. P. 431–436.



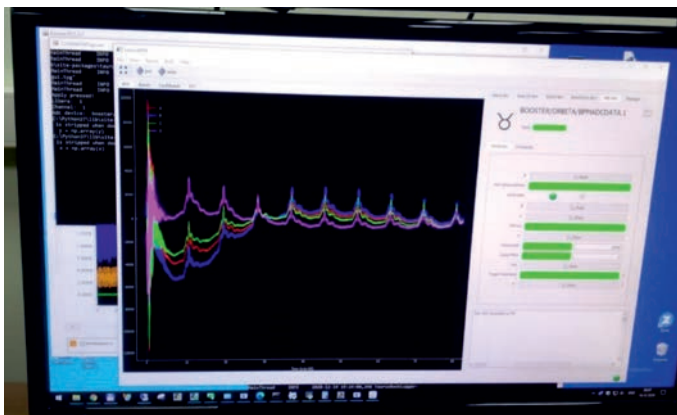
On November 20, 2020, the Prime Minister of the Russian Federation M. Mishustin made a technological launch of one of the main units of the megascience project “NICA Complex” — a superconducting booster synchrotron, the Booster.

This event was preceded by the successfully completed long and intense work on the construction and commissioning of all objects of the injection complex of the project including sources of polarized, light and heavy ions and the heavy-ion linear accelerator — the basis for obtaining the required beams and their injection into the Booster.

In strict accordance with the schedule, on December 19, 2020, single-charged helium ions were injected into the Booster and a stable circulation of the beam was obtained. The photo taken from the monitor in the control room shows 3.2 MeV/a.m.u. beam of single-charged ions of He circulating in the Booster beam pipe with intensity of  $\sim 10^9$  ions/turn. Tuning the beam acceleration mode is the final step to the physical launch of the Booster.



The Booster for the NICA research complex



Indication of a noncontact electrostatic beam detector with peaks from beam propagation at each circle

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

In 2015, a high-tech line for the assembly and cryogenic testing of superconducting magnets was commissioned. This line includes a section for producing a superconducting cable, a workshop for the windings manufacture, the magnets assembly area, measurements of the field quality, vacuum and cryogenic tests. The design of magnets was developed at JINR, and it was awarded by the Russian Federation government in 2011. The serial production of superconducting magnets for the accelerator facilities under construction of the international projects NICA (JINR) and FAIR (Germany) is brought into force.

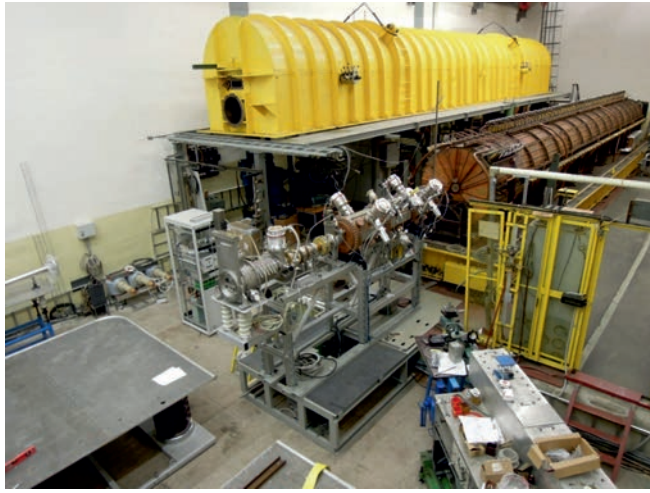


Hall of the high-tech line for the assembly and cryogenic testing of superconducting magnets for the accelerator facilities of the international projects NICA (JINR) and FAIR (Germany)

- *Kostromin S. et al.* Facility for Assembling and Serial Test of Superconducting Magnets // Proc. of IPAC2014, 2014, Dresden, Germany.
- *Nikiforov D. et al.* Cryogenic Test Facility of Superconducting Magnets for the Accelerator Complex NICA // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 507.
- *Khodzhbagiyev H. G. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Complex // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014. V. 24, No. 3.

In the framework of the NICA project, a new forinjection for the existing linear accelerator LU-20 was built. This forinjection was manufactured on the basis of the accelerator section with spatially uniform quadrupole focusing (RFQ). In 2015, it was launched with beams of deuterium and carbon from the





LU-20 forinjection during assembly



Initial part of the heavy ion linear accelerator of the NICA collider complex

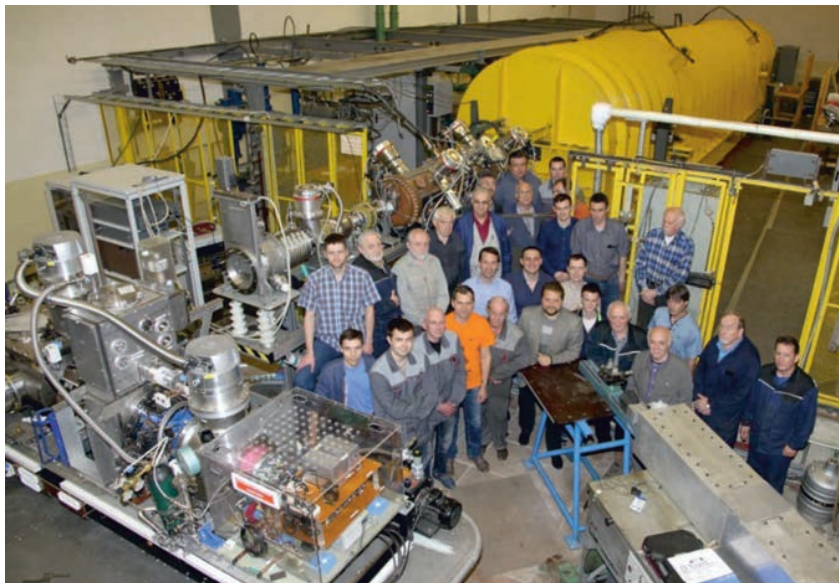
laser source. The accelerator designed jointly by ITEP and MEPHI was made at VNIITF. A high-frequency amplifier was made at ITEP. The power system of the ion source and the channel of the low-energy beam transport were designed and manufactured at JINR. The INR RAS specialists participated in manufacturing the diagnostics and management systems. A successful production and test of the RFQ section designed for acceleration of light ions is a notable achievement both for JINR and Russian accelerator science in general.

In cooperation with German company Bevattech OHG (Germany), a linear accelerator of heavy ions (down to gold) with energy of 3.2 MeV/ $n$  and curtage

up to 10 mA was created for the NICA collider injection complex. In December 2015, beams of accelerated deuterium and helium ions were obtained at the exit of the first of the three accelerating sections. In 2016, a beam with the design energy was obtained. The established linear accelerator is the first heavy ion accelerator in Russia; the high-frequency power supply system on the basis of solid-state transistor amplifiers is used for the first time. Within the framework of the wide international collaboration, a unique facility with parameters corresponding to the world level has been developed.

- *Butenko A. V., Trubnikov G. V. et al.* Commissioning of Heavy Ion Linear Accelerator (HILAC) of the NICA Project // Proc. of RUPAC2016, Saint-Petersburg, Russia.

In 2017, within the development of the megascience project NICA in Dubna, the Nuclotron run with the duration of 1008 h was performed to prepare a research programme to study the spin structure of the nucleon and polarization phenomena. For the first time, a new source of polarized particles was routinely operated and experiments were carried out with beams of polarized deuterons. The intensity of the high-polarized deuteron beams ranged from  $1 \cdot 10^8$  up to  $2 \cdot 10^9$  particles per cycle. The maximum extracted beam energy reached 5.2 GeV/u. During the session, beams of polarized protons were obtained and the possibility of their effective acceleration with an injection energy of 5 MeV into the Nuclotron was demonstrated.



The new source of polarized ions

- *Sidorin A. O.* Progress towards Realization of the Nuclotron–NICA Project // 47th Meeting of the PAC for Particle Physics, Dubna, 26 June 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=260>.

- *Kekelidze V. D.* Progress of the NICA Project // 122nd Session of the Scientific Council, Dubna, 18 Sept. 2017; <http://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=300>.

For the first time, in 2014, the double user operational mode, as a routine regime, was brought about at the Nuclotron. The circulation of the coasting (structureless) beam was realized at consequent plateaus of the magnetic field. At the first plateau the beam was used for internal target experiment; at the second plateau the slow extraction was realized.

The first operation of the new stand heavy ion source KRION-6T was performed as a part of the accelerator complex. The optimization of the source and linac LU-20 regimes was provided for generation of a few ion species. Accelerated and extracted Ar beams were delivered for users.

In 2013, a new test bench was put into operation at the U-400M cyclotron. Its purpose is to test the radiation resistance of electronics on the heavy-ion 14–42 MeV/nucleon beams. The new setup considerably expands the range of beam energy required for such experiments. The energy range exceeding 10 MeV/nucleon considerably increases the possibility of modeling the effects of heavy-ion component of cosmic rays and allows experiments on the electronic component both in vacuum and in the atmosphere without decapsulation.

- *Skuratov V. A., Teterev Yu. G., Mitrofanov S. V., Kalagin I. V., Gulbekyan G. G., Anashin V. S., Emeliyanov V. V.* High Energy Ion Beam Line for SEE Testing at U400M FLNR JINR Cyclotron // 2013 Single-Event Effects (SEE) Symp. and Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD) Meetings, 9–12 Apr. 2013, La Jolla, California, USA.

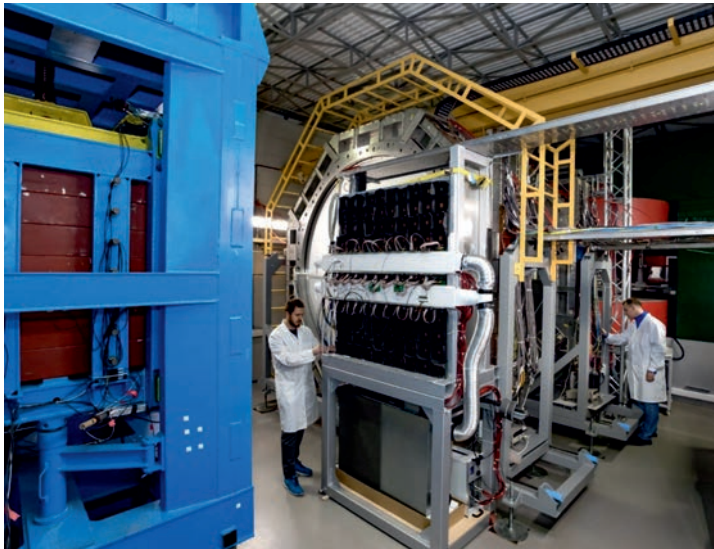
A conceptually new laser detector of ground angular motion with a resolution of  $5 \cdot 10^{-9}$  rad is developed. This achievement is of fundamental importance as it ushers in a new generation of instrumentation for the high-precision surface oscillation studies. The detector can provide fundamentally new approaches to solving numerous problems of science and technology. The key idea of this detector design is to use the gravity vector as a highly stable reference guaranteeing the horizontality of the laser-ray-reflecting liquid surface taken as a stable reference level.

The RF patent for the invention of a precision laser inclinometer was obtained. This investigation allowed an improvement in the stabilization of the position of large-scale industrial or scientific research complexes such as modern telescopic systems, etc., in conditions of seismic noise of terrestrial and industrial origin, as well as registration of surface seismic waves.

- *Batusov V., Budagov J., Lyablin M.* A Laser Sensor of a Seismic Slope of the Earth Surface // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 1. P. 43–48.
- *Budagov J., Lyablin M., Shirkov G.* The Search for and Registration of Superweak Angular Ground Motions. JINR Preprint E18-2013-107. Dubna, 2013.
- A Device to Measure Inclination Angle / Budagov J. (RU), Lyablin M. (RU). Patent for Invention RU 2510488. Publ. 27.03.2014. Bull. No. 9.

## PARTICLE PHYSICS

In 2019, the 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. The collaboration has developed and applied a new experimental method for studying the internal structure of the atomic nucleus and neutron stars in the BM@N experiment. The experiment, which was the first to register all the reaction products upon dislodging nucleons and pairs of nucleons from atomic nuclei, opened the new prospects for studying the structure of nucleus, including short-lived and neutron-rich nuclei. The information obtained on the formation and properties of nucleon pairs in neutron-rich nuclear matter will be used as a solid underpinning for understanding the properties of dense cold neutron-rich matter in neutron stars.



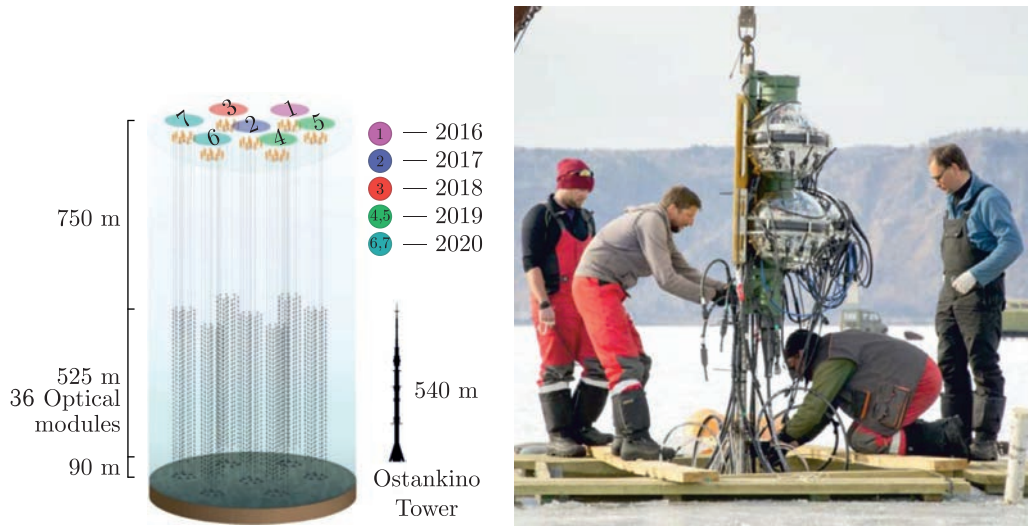
The BM@N experimental facility

- *BM@N Collab. (Short-Range Correlations)*. The Transparent Nucleus: Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam // *Nature Phys.* (in press).
- *Kapishin M. (BM@N Collab.)*. First BM@N Results // Proc. of the 18th Intern. Conf. “Strangeness in Quark Matter” (SQM-2019), Bari, Italy.



In the period 2015–2020, seven clusters of deep underwater neutrino telescope with the effective volume of about a cubic kilometer “Baikal-GVD”, created jointly with scientists from INR RAS (Troitsk) on Lake Baikal, were deployed and commissioned. With the introduction of the seventh cluster, the effective volume of the telescope reached to  $0.35 \text{ km}^3$  in the problem of registering showers from high-energy neutrinos of an astrophysical nature, which is about 85% of the effective volume of the Antarctic detector IceCube.

Preliminary analysis of accumulated data during 2015, 2016, 2018 and 2019 made it possible to select seven cascade events with an energy release of more than 100 TeV, where the stream of astrophysical neutrinos prevails over the background of atmospheric neutrinos.



The assembling of the optical modules garland before dipping it into the Baikal



Optical modules for the “Baikal-GVD” project

- *Avrorin A. D. et al.* Status of the Baikal-GDV Experiment — 2017 // Proc. of the 35th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC-2017), 10–20 July 2017, Bexco, Busan, Korea.
- *Domogatsky G. V.* Deep Underwater Neutrino Telescope — Baikal-GVD // The 36th All-Russian Conf. on Cosmic Rays, 28 Sept.–2 Oct. 2020, SINP MSU, online; <https://events.sinp.msu.ru/event/3/sessions/22/#20200930>.
- *Safronov G. B.* Status of Baikal-GVD: Results of Track Reconstruction // The 40th Intern. Conf. on High Energy Physics, ICHEP2020, 28 July–6 Aug. 2020, online; <https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3813595/>.

The DLNP JINR physicists in collaboration with ITEP (Moscow) colleagues created a neutrino detector DANSS at the Kalinin NPP. It registers about 4000 neutrinos per day with a background less than 2–3% (both values are the worldwide best now).

In 2018, analysis of the first portion of data (approximately one year of measurement) was performed and the strongest model-independent limit of the sterile neutrino existence was produced. The data acquisition and detailed analysis are in progress.



DANSS facility at the Kalinin Nuclear Power Plant (Russia)

- *Alekseev I., Belov V., Brudanin V. et al.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // Phys. Lett. B. 2018. V.787. P.56–63; arXiv:1804.04046 [hep-ex].

A JINR group within the Daya Bay collaboration clarified the values of the neutrino oscillation parameters for  $\theta_{13}$  and  $\Delta m_{ee}^2$ :  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005$ ,  $\Delta m_{ee}^2 = (2.44 \pm 0.11) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ , after updating the energy model of the experiment. Reactor antineutrino rate and spectrum shape were measured based on near detectors data. As well as other reactor experiments, Daya Bay observes overall  $\sim 5.4\%$  antineutrino flux deficit. The deficit and excess are observed in comparison with Huber–Mueller antineutrino flux mode.

- *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.).* New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 11. P. 111802.
- *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.).* Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 061801.

In 2014, the solar neutrino flux from the  $pp$  reaction was measured in real time at the Borexino detector (Gran Sasso, Italy) with the participation of JINR physicists. The result is in good agreement with the standard solar model, which confirms the Sun being in a steady state for hundreds of thousands of years: neutrinos yield the energy deposition picture at the present, the solar luminosity corresponds to the energy deposition in a far past because photons come to the surface of the Sun from its interior due to a slow diffusion process that takes hundreds of thousands of years. Together with the previous measurements of solar neutrinos from the  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ , and  $pep$  reactions, this measurement brings to the end the study of neutrino fluxes from a chain of reactions that begins with the  $pp$  reaction.

In 2015, new results on the Earth antineutrino flux measurement were published. Geoneutrino measurement is done with 2056 days of data taking. The obtained signal value is in agreement with the majority of predictions from geophysical models. The null observation of geoneutrinos with Borexino alone has a probability of  $3.6 \cdot 10^{-9}$ . A geoneutrino signal extracted for the mantle only is obtained at 98% C.L.

- *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* Neutrinos from the Primary Proton-Proton Fusion Process // Nature. 2014. V. 512. P. 383–386.
- *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* Final Results of Borexino Phase-I on Low-Energy Solar Neutrino Spectroscopy // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. 112007.
- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.).* Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // Phys. Rev. D. 2015. V. 92. P. 031101.

Within the  $\text{NO}\nu\text{A}$  experiment, the following oscillation parameters were measured:  $\sin^2 \theta_{23} = 0.51 \pm 0.10$ ,  $\Delta m_{32}^2 = (2.37^{+0.16}_{-0.15}) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  (NH),  $\Delta m_{32}^2 = (-2.40^{+0.14}_{-0.17}) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  (IH). A special test bench was constructed at JINR to measure  $\text{NO}\nu\text{A}$  electronics parameters. The Remote Operation Center (ROC-Dubna) was put in operation allowing to monitor and control the  $\text{NO}\nu\text{A}$  experiment from Dubna. The analysis of  $\text{NO}\nu\text{A}$  systematic errors was performed. Also, the software for the supernova signal analysis was developed.

- *Sanchez M.* Results and Prospects from the  $\text{NO}\nu\text{A}$  Experiment // NuFACT Workshop in Rio de Janeiro. Aug. 2015.

In the OPERA experiment, the collaboration discovered the fifth event of the tau neutrino, continuing data analysis. This data collection for analysis was completed at the end of 2012. A search of the tau neutrino interactions in the detector with a sample of two most probable target bricks per event yielded 5 events with 0.25 expected from all possible background sources. This means a discovery of the tau neutrino appearance in the CNGS beam at a confidence

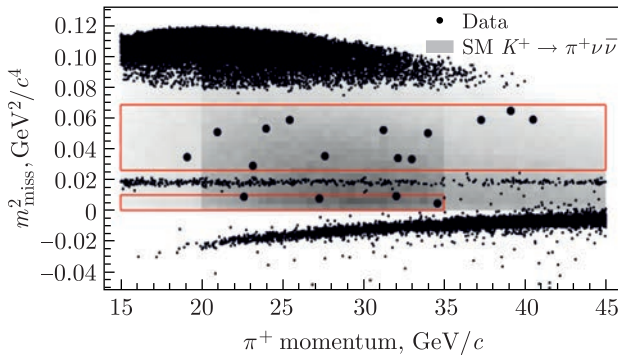


level of 5.1 standard deviations. Thus, the main goal of the experiment — to prove that this type of oscillations is the reason of the deficit of the atmospheric muon neutrino through direct observation of  $\nu_\tau$  appearance in the  $\nu_\mu$  beam — is successfully fulfilled.

- *Agafonova N. et al.* Discovery of  $\tau$  Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 12. P. 121802.

In 2013, with the determining contribution of the JINR scientists from the NA48/2 experiment (SPS, CERN) the first experimental observation was obtained of a new decay channel  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^\pm e^+ e^-$ . The  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  rare decay width was measured and its dynamic properties were studied based on the record statistics — 149 decay candidates with a background of  $(15.5 \pm 0.7)$  events. In 2015, the analysis of data of a record high number on the decay  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$  ( $1.69 \cdot 10^7$  events), caused by kaons with  $p = 60$  GeV/c decay, was performed. As a result, the strongest restriction on the value of the “dark photon” mixing parameter  $\varepsilon^2$  in the mass region  $9 < m_{A'} < 70$  MeV/c<sup>2</sup> has been obtained. This restriction excludes the possibility to explain the muon anomalous magnetic momentum by the effects related to the “dark photon”.

In 2016, the processing of the first data obtained in the experiment was completed. As part of the search for New Physics in rare kaon decays, 17 decay candidates have been discovered in  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  rare decay observed with the expected background of 7 events. This allowed to make the best estimate of the world of the relative probability of decay  $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11.0^{+4.0}_{-3.5} \pm \pm 0.3_{\text{syst}}) \cdot 10^{-11}$ , which is consistent with the prediction of the Standard Model.



Event-candidates for very rare decay (in the box) and background events in terms of the momentum of the charged pion and the square of the missing mass

- *Madigozhin D. (NA48/2 and NA62 Collab.).* Probing Nonperturbative QCD with  $K_{e4}$  and  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  Decays from the NA48/2 and NA62 Experiments // Proc. of XXI Intern. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Marseille, France, Apr. 22–26, 2013. 132; [http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/132/DIS\\_2013\\_132.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/132/DIS_2013_132.pdf).

- *Madigozhin D. (NA48/2 Collab.)*. High Precision Measurement of the Form Factors of the Semileptonic Decays  $K^\pm \rightarrow \pi^0 l^\pm \nu(K_{l3})$  // Proc. of XXI Intern. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Marseille, France, Apr. 22–26, 2013. 135; [http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/135/DIS2013\\_135.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/191/135/DIS2013_135.pdf).
- *Batley J.R. et al. (NA48/1 Collab.)*. A New Measurement of the  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma \gamma$  Decay at the NA48/2 Experiment. CERN-PH-EP-2013-197.
- *Batley J.R. et al. (NA48/2 Collab.)*. Search for the Dark Photon in  $\pi^0$  Decays // Phys. Lett. B. 2015. V. 746. P. 178.
- *Marchevski R. (NA62 Collab.)*. New Result on the Search for the  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  Decay at the NA62 Experiment at CERN // ICHEP-2020, 28 July – 7 Aug. 2020, Prague.

In 2015, for the first time, at the LHC, the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$  decay was observed and the branching ratio of the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0 \rightarrow \Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$  was measured. The  $J/\psi X$  and  $\psi(2S)X$  mesons are reconstructed in their decays to a muon pair, while the  $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$  decay is exploited for the  $\Lambda^0$  baryon reconstruction. Branching ratio was measured to be  $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0) = 0.501 \pm 0.033(\text{stat.}) \pm 0.016(\text{syst.}) \pm 0.01(B)$ . The ratio falls into the range 0.5–0.8, as found for the branching ratios of analogous  $B$  meson decays. The only available theoretical expectation for the branching ratio ( $0.8 \pm 0.1$ ) exceeds the measured value.

- *Gladilin L., Lyubushkin V. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Branching Ratio  $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$  with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2015. V. 751. P. 63–80.

In 2014, a search for resonance  $Z^*$  production in the dilepton channel in proton–proton collisions at the LHC (CERN) was proposed with the participation of the JINR scientists. In the scope of this objective,  $Z^*$ -boson production events were simulated, criteria for selection of events of the  $Z^*$  decay into a lepton–antilepton pair reconstructed at ATLAS were established, and criteria for discrimination between the  $Z^*$ -production events and events of production of other neutral bosons ( $Z'$ ,  $G^*$ , etc.) were proposed.

The experimental search for the resonance  $Z^*$  was based on the analysis of  $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$  of proton–proton collisions at a cms energy of 7 to 8 TeV. The observed data are found to agree with the Standard Model predictions, and new limits for the production cross section and mass of the  $Z^*$  boson are obtained: the new experimental upper limit for the  $Z^*$  mass is 2.85 TeV.

- *Yeletsikh I.V. et al.* Search for  $Z^*$  Boson at ATLAS Detector // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 252.
- *Yeletsikh I.V. (ATLAS Collab.)*. Search for High-Mass Dilepton Resonances in  $21 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  with the ATLAS Experiment // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 052005; arXiv: 1405.4123.

In 2014, the JINR group completed processing and analysis of the 2011 and 2012 LHC run data on the Drell–Yan process with a muon pair production in

the CMS (LHC, CERN) experiment. The predictions of the Standard Model of elementary particle interactions (SM) were proved in a new energy range. The search for signals of New Physics beyond the SM was performed as well, and the limit of new gauge boson mass was significantly extended (up to  $\sim 2.7$  TeV). The study of the Higgs boson properties was continued. The boson mass and other parameters were determined more precisely. It allowed making a conclusion about consistency of the discovered boson hypothesis to the SM Higgs boson. The search for rare decays of the Higgs boson was not successful.

- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Measurement of the Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // JHEP. 2013. V. 12. P. 30; arXiv:1310.7291.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Forward–Backward Asymmetry of Drell–Yan Lepton Pairs in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Lett. B. 2013. V. 718. P. 752.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Search for Microscopic Black Holes in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // JHEP. 2013. V. 07. P. 178.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Observation of a New Boson with Mass near 125 GeV in  $pp$ -Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV // JHEP. 2013. V. 06. P. 081.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Properties of the Higgs-Like Boson in the Decay  $H$  to  $ZZ$  to  $4l$  in  $pp$ -Collisions at 7 and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-002. Geneva: CERN, 2013.
- *CMS Collab. (Chatrchayn S. et al.)*. Combination of Standard Model Higgs Boson Searches and Measurements of the Properties of the New Boson with a Mass near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-13-005. Geneva: CERN, 2013.
- *CMS Collab.* Measurements of the Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at 8 TeV. CMS-PAS-SMP-14-003. Geneva: CERN, 2014.
- *Konoplyannikov V. F., Savina M. V., Shmatov S. V., Shulga S. G.* The Uncertainties of the Sections of the Drell–Yan Processes Birth in Proton Collisions at LHC // Part. Nucl., Lett. 2014. V. 11, No. 6(198). P. 1122–1133.
- *Lanyov A. V.* The CMS Collaboration Results: Higgs Boson and the Search for New Physics // Adv. Phys. Sci. 2014. V. 184. P. 996–1004.

In 2014, the test run on the Drell–Yan process measurements with a pion beam of 160 GeV and a hydrogen polarized target was carried out within the framework of the COMPASS (SPS, CERN) experiment. In February and October of 2014, the tests of the electromagnetic calorimeter (ECAL0) modules at an electron beam of the ELSA accelerator complex (Bonn, Germany) and at beams of the PS accelerator (CERN, Geneva) were held. The obtained results showed that the calorimeter module and the avalanche diode-based read-out system fully satisfy conditions of the future measurements of generalized parton distributions.

In 2015, the COMPASS collaboration published the results of measuring the pion polarizability obtained by defining contribution of the JINR group. In the experiment, a beam  $\pi^-$  with a momentum of 190 GeV/ $c$  scattered on a thin nickel target. The value of the electric polarizability of the pion amounted to  $(2.0 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{syst}}) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$ , which agrees with the prediction of the effective chiral theory. Measurement accuracy is about twice the previously published results. This result is fundamentally important in checking/testing the correctness of the effective chiral theory.

- *COMPASS Collab.* Search for Exclusive Photoproduction of  $Z_c^\pm(3900)$  at COMPASS // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 742. P. 330.
- *COMPASS Collab.* The COMPASS Setup for Physics with Hadron Beams // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 779. P. 69.
- *Adolph C. et al. (COMPASS Collab.)*. Measurement of the Charged-Pion Polarizability // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 062002.

In 2014, in the BES-III (IHEP CAS, China) experiment new decay modes of the charges states  $Z_c^\pm$  were found, and a neutral particle  $Z_c^0(4020)$  supposed to be an isospin partner of the charged state  $Z_c^\pm(4025)$  was observed jointly with JINR. The charged resonance  $Z_c^\pm(4025)$  was observed in the reaction  $e^+e^- \rightarrow Z_c^\pm \pi^\pm \rightarrow D^{*\pm} D^{*0} \pi^\pm$  at the collision energy  $\sqrt{s} = 4.26$  GeV. Its mass and width were found to be  $(4026.3 \pm 2.6)$  MeV/ $c^2$  and  $(24.8 \pm 5.6)$  MeV/ $c^2$ , in good agreement with the parameters of the  $Z_c^\pm(4020)$  resonance earlier observed in the decay mode  $Z_c^\pm(4020) \rightarrow h_c \pi^\pm$ . Another charged resonance  $Z_c^\pm(3885)$  was observed in the reaction  $e^+e^- \rightarrow Z_c^\pm \pi^\pm \rightarrow (D^* D)^\pm \pi^\pm$ . The mass and the width of the resonance  $((3883.9 \pm 4.3)$  MeV/ $c^2$  and  $(24.8 \pm 11.5)$  MeV/ $c^2$ ) are in good agreement with the parameters of the  $Z_c^\pm(3900)$  resonance observed earlier, which suggests that two decay modes of one particle are found. A neutral charmonium-like resonance  $Z_c^0$  was first observed in the reaction  $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \pi^0 h_c$ . The mass of the new resonance is  $(4023.9 \pm 4.4)$  MeV/ $c^2$ , which suggests that the  $Z_c^0(4020)$  is a neutral isospin partner of the charged resonance  $Z_c^\pm(4020)$ . The tau-lepton mass was measured in the BES-III experiment using the threshold scanning technique and the value  $M_\tau = (1776.91^{+0.16}_{-0.18})$  MeV/ $c^2$  was obtained. Its accuracy is almost as good as that of all previous measurements taken together.

- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 022001.
- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 132001.
- *Ablikim M. et al.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 012001.

## RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS

The JINR group involved in the ion part of the NA61/SHINE (SPS, CERN) experiment is carrying out the systematic study of nucleus–nucleus reactions occurring in Pb–Pb collisions and by investigating reactions with medium-sized nuclei (Xe and Ar) as well as with light nuclei (Be).

The data analysis was carried out, and the first preliminary results were obtained on the  ${}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$  collision as well as on the  $p+p$  and  $p+C$  (Long Target) reactions at 31 GeV/ $c$  required for the neutrino experiment T2K.

In 2014, the evidence of the existence of the critical point of nuclear matter was received within the experiments at the NA61 with the active participation of the JINR physicists. These data are highly important for the theory of nuclear matter and for their further application in practice. Matter in the critical point region must have unique properties, which should be studied in details.

- *Abgral N. et al.* Pion Emission from the T2K Replica Target: Method, Results and Application // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V.701. P.99–114.
- *Stefanek G. (NA49 and NA61/SHINE Collab.)* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2014.

The JINR group participating in the STAR at RHIC (BNL, USA) experiment was actively involved in the energy scanning programme on studying hadron production in AuAu collisions at the energies  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, 39$  GeV. It was found that  $R_{CP}$  ratio, elliptic flow for mesons, baryons and their antiparticles, ratio of particle yields in AuAu collisions depend on the transversal pulse and energy of the collision  $\sqrt{s_{NN}}$ .

The JINR group took part in the analysis of new data on measurements of antiquark polarization of the proton. The analysis demonstrated the presence of a significant asymmetry indicating the domination of the  $u$ -antiquark polarization.

In 2015, the results provided information about nuclear force between two antiprotons and presented the measurement of the two key parameters characterizing the corresponding strong interaction, namely, the scattering length ( $f_0$ ) and effective range ( $d_0$ ). This result provides a fundamental ingredient for understanding the structure of more sophisticated antinuclei and their properties.

- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 142301.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 34906.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 14904.
- *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 072301.
- *STAR Collab.* Measurement of Interaction between Antiprotons // Nature. 2015. V. 527. P. 345–348.

The JINR group in the ALICE (LHC, CERN) experiment took data with minimum bias trigger of  $p$ –Pb collisions at 5.02 TeV. In 2013, the results of

the femtoscopic correlation analysis for charged kaon pair production in  $p$ -Pb collisions at 5.02 TeV per nucleon pair were obtained. The analysis of charged kaon purity selection in Pb-Pb at 2.76 TeV was performed and the results for  $\varphi \rightarrow K^+K^-$  production were obtained.

Group of physicists from JINR has continued the investigation of femtoscopic Bose-Einstein correlations for charged kaon pairs ( $K_{\text{ch}}K_{\text{ch}}$ ) produced in proton-proton collisions at the energy of 7 TeV. The key peculiarity of the obtained results for  $K_{\text{ch}}K_{\text{ch}}$  is the sharp increase in source size ( $R_{\text{inv}}$ ) with the increase in the so-called pair transverse mass ( $m_T$ ) at the lowest number of created charged particles ( $N_{\text{ch}}$ ) and the inverse dependence at a higher  $N_{\text{ch}}$ . The decrease in  $R_{\text{inv}}$  with the increase in  $m_T$  is characteristic for  $A$ - $A$  collisions and theoretically explained by collective effects of particle flows when a big number of nucleons are collided. The same picture for  $p$ - $p$  collisions confirms some theoretical suppositions on probability of the manifestation of collective effects on the quark-gluon level in elementary particle interactions with big enough values of  $N_{\text{ch}}$ .

- *Abelev B. et al.* Charged Kaon Femtoscopic Correlations in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. P. 052016.
- *Abelev B. et al.* Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb-Pb Collisions at 2.76 TeV at the LHC. arXiv:1310.7808. 2013.
- *ALICE Collab.* Charged Kaon Femtoscopic Correlations in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV // Phys. Rev. 2013. D. V. 87. P. 052016.

## NEUTRON NUCLEAR PHYSICS

The analysis of new experiments with ultracold neutrons shows that physical adsorption of nanoparticles/nanodroplets, levitating in high-excited states in a deep and broad potential well formed by the van der Waals/Casimir–Polder (vdW/CP) forces, results in new effects at the intersection of fundamental-interaction, neutron, surface and nanoparticle physics. Accounting for the interaction of UCNs with nanoparticles explains the recently discovered intriguing small heating of UCNs in traps.

- *Nesvizhevsky V. V., Voronin A. Yu., Lambrecht A., Reynaud S., Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Strelkov A. V.* Quantum Levitation of Nanoparticles Seen with Ultracold Neutrons // *Crystallogr. Rep.* 2013. V. 58, No. 5. P. 743–748.

The results of measurements of very cold and cold neutrons diffuse reflection from nano-structured reflectors were analyzed. It was shown that nano-structured reflectors fill a gap in the energy region between efficient reflectors based on neutron-optical potential and reflectors based on Bragg scattering and scattering by individual nuclei.

- *Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V. V.* Nano-Structured Reflectors for Slow Neutrons // *New Developments in Low-Energy Physics Research / Eds.: Tao Zoeng and Meng Ngai.* NOVA Publ., 2013.

The features of the accelerating matter effect (AME) were analyzed in the case of a birefringent medium. The AME is the change of neutron energy when it passes through an accelerating sample of refractive material. In the case of a birefringent medium, there are new phenomena of AME. In neutron optics, AME leads to an unsteady state with neutron spin precession. When two-component neutrino passes through a layer of accelerating matter, the AME influences the evolution of the neutrino state.

- *Frank A. I., Naumov V. A.* Interaction of Waves with a Birefringent Medium that Moves with an Accelerating Speed // *Phys. At. Nucl.* 2013. V. 76. P. 1507.

In the framework of the biotechnology research using the neutron activation analysis method (NAA) at the IBR-2 reactor the elemental composition of microbial samples was determined, and the efficiency of accumulation of zinc and other metals by spirulina biomass was estimated. These results demonstrate the effectiveness of using microalgae *Spirulina platensis* for extracting of zinc from waste water.

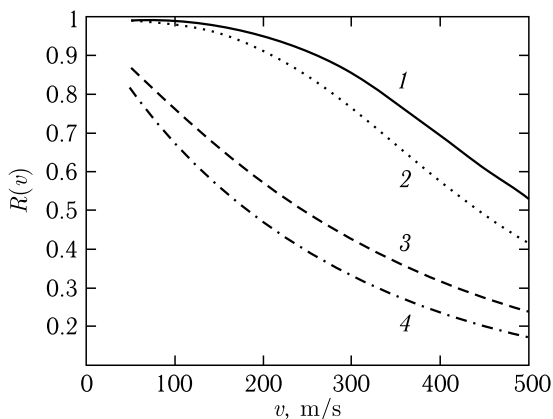
- *Zinivcovscaia I., Duca Gh., Rudic V., Cepoi L., Chiriac T., Frontasyeva M. V., Pavlov S. S., Gundorina S. F.* *Spirulina Platensis* as Biosorbent of Zinc in Water // *Environ. Eng. Manag. J.* 2013. V. 12, No. 6. P. 1079–1084.



Work on active biomonitring with moss transplants allowed a study of air pollutions in the center of Belgrade (Serbia), as well as one of the most ecologically unfavorable territories of Greece – Great Thracian Lowland (Attica). The efficiency of moss biomonitring for investigating atmospheric depositions of radionuclides was demonstrated in joint studies with Slovakia, Belarus, South Africa, Serbia and Thailand.

- *Saitanis C.J., Frontasyeva M. V., Steinnes E., Palmer M. W., Ostrovnyaya T. M., Gundorina S. F.* Spatiotemporal Distribution of Airborne Elements Monitored with the Moss Bags Technique in the Great Thracian Lowland, Attica, Greece // *Environ. Monit. Assess.* 2013. V. 185, No. 1. P. 955–968.

In neutron physics there is a need for reflectors both for neutron beams and for the effective neutron sources. This paper considers the reflective properties of materials consisting of nanoparticles of different shapes: spherical and cylindrical. Solid materials reflected neutron beams well either in a very narrow range of low energies of the order of  $\sim 10^{-7}$  eV ( $\sim 5$  m/s) or at thermal energies of the order of  $\sim 0.025$  eV ( $\sim 2200$  m/s). Recently, in neutron physics, biology and industry, cold neutrons with energies of  $\sim 10^{-7}$ – $10^{-4}$  eV ( $\sim 10$ – $500$  m/s) have been in demand. As shown in the figure, nanoreflectors are most effective in comparison with all those known hitherto.

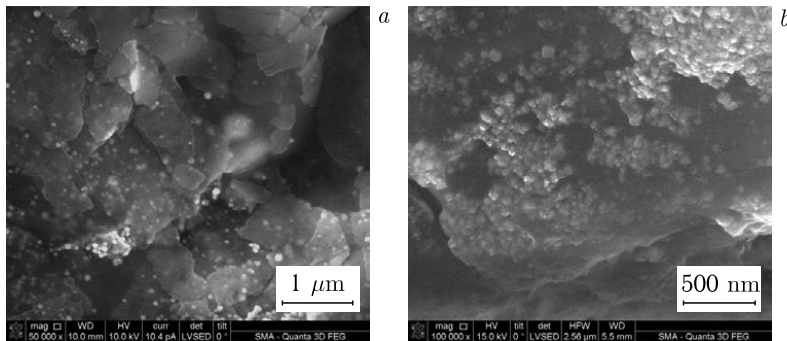


Coefficient of reflection  $R(v)$  from powder with thickness  $D = 3$  cm consisting of 1 – long ( $a = 1000$  nm); 2 – short ( $a = 10$  nm) nanorods with radius  $\rho = 10$  nm, at absorption parameter  $C = C_0 = 6.28 \cdot 10^{-7}$ ; 3, 4 – same as 1, 2, but at  $C = C_a = 5.2 \cdot 10^{-4}$

- *Ignatovich V.K., Nesvizhevsky V. V.* // *At. Energy.* 2014. V. 116, No. 2. P. 100–107.

Among all microorganisms, cyanobacteria represent great interest for the obtaining of nanoparticles, as they are potential sources of new metabolites that are of great importance in the sphere of biotechnology and industry. For the development of nontoxic, environmentally friendly method for producing silver nanoparticles, cyanobacteria *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia* have been used. Silver nanoparticles were studied using a complex of optical and analytical methods. In particular, the dynamics of silver accumulation by cyanobacteria biomass was studied by neutron activation analysis at the JINR IBR-2 reactor.

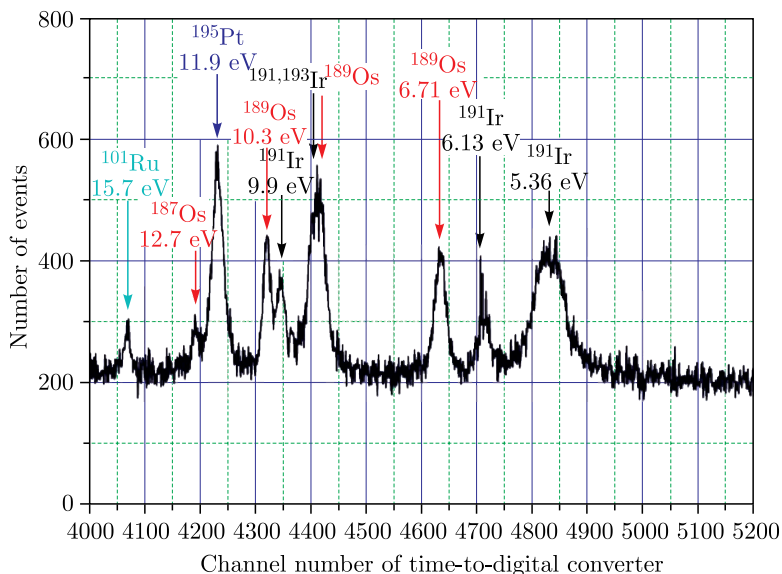
Photographs obtained using a scanning electron microscope (SEM) showed that the production of silver nanoparticles by cyanobacteria with the sizes of 10–80 nm occurs extracellularly, which is very important from the point of view of further application. The resulting biomass can be used both for industrial and medical purposes.



SEM photographs of *Nostoc linckia* (a) and *Spirulina platensis* (b) with silver nanoparticles

- Cepoi L., Rudi L., Chiriac T. et al. // Canadian J. Microbiol. 2014. V. 14. P. 1–9; doi: 10.1139/cjm-2014-0450.

At the IREN pulsed resonance neutron source, the time-of-flight technique, which is a traditional method of resonance neutron spectrometry, was applied for analysis of element and isotope composition of samples. Elements and isotopes

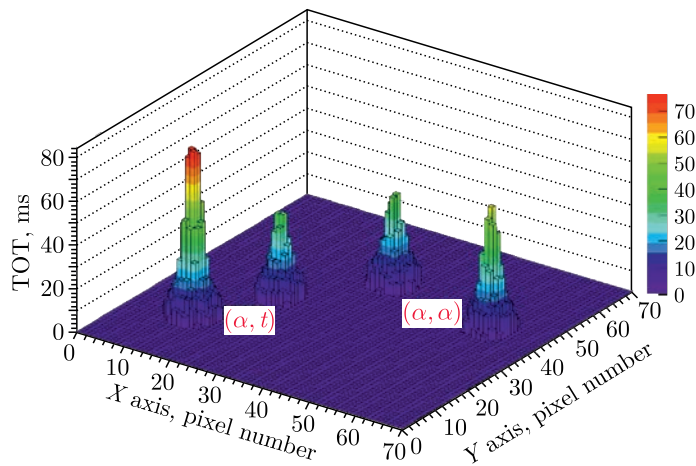


Part of the time-of-flight spectrum obtained in the measurements with a geological sample

can be identified by the energies of neutron resonances in the radiative capture reaction, and their amount is determined by the gamma-ray yield in the observed resonances. Since the start of the trial operation of the first stage of the IREN facility (with one accelerating section), the analysis of ore samples from the Central Geological Laboratory of Mongolia and composite samples from Belarusian State University was regularly carried out. In cooperation with the Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, studies of element and isotope composition of objects presumably of extraterrestrial origin were conducted.

- *Bazhazhina N. V., Mareev Y. D., Pikelner L. B., Sedyshev P. V., Shvetsov V. N. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 4. P. 578–583.*

A Timepix silicon pixel detector consisting of a matrix of  $256 \times 256$  square pixels with a pitch of  $55 \mu\text{m}$  was used in combination with the  $\Delta E$  detector (thickness  $11 \mu\text{m}$ ) to detect light charged particles emitted in the spontaneous fission of  $^{252}\text{Cf}$ . A high spatial resolution of the detector system made it possible for the first time to observe a simultaneous emission of two charged particles with a small relative emission angle ( $\alpha$ - $\alpha$  and  $\alpha$ - $t$  pairs were observed), which are attributed to the decay of unstable particles of  $^8\text{Be}$  and  $^7\text{Li}^*$ . The yields of these particles, as well as angular and energy distributions of  $\alpha$  particles produced in the quaternary fission, were determined.

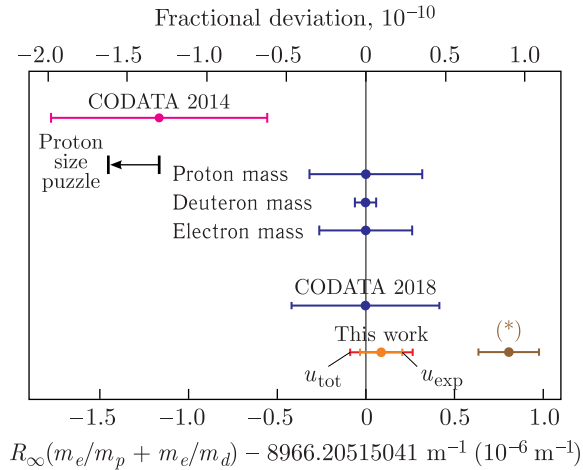


Three-dimensional spectra of signals from the Timepix detector corresponding to pairs of  $\alpha$ - $t$  (on the left, energies of the particles are different) and  $\alpha$ - $\alpha$  (on the right, energies of the particles are close to each other)

- *Ahmadov G. S., Kopatch Yu. N., Telezhnikov S. A., Ahmadov F. I., Granja C., Garibov A. A., Pospisil S. Detection of Ternary and Quaternary Fission Fragments from  $^{252}\text{Cf}$  with a Position-Sensitive  $\Delta E$ - $E$  Telescope Based on Silicon Detectors // Part. Nucl., Lett. 2015. V. 12, No. 4. P. 846–854.*

## THEORETICAL PHYSICS

In 2020, in works on theoretical physics, for the first time, the energies of transitions in the molecular ion  $\text{HD}^+$  were calculated with a record accuracy of  $\sim 10^{-11}$  in the framework of nonrelativistic quantum electrodynamics. The measured frequencies of the rotational transition made it possible to obtain the most accurate verification of QED predictions in the quantum-three-body prediction so far, at the level of  $5 \cdot 10^{-11}$ , limited by the current uncertainties of the fundamental constants. We determined the value of the fundamental constants combinations  $R_\infty m_e (m_p^{-1} + m_d^{-1})$  and  $m_p/m_e$  with a fractional uncertainty of  $2 \cdot 10^{-11}$ . These results obtained more than 20 times improve the boundary for a hypothetical fifth force between a proton and a deuteron.



Comparison of results of this work with literature values

- *Alighanbari S., Giri G. S., Constantin F. L., Korobov V. I., Schiller S. // Nature. 2020. V. 581. P. 152.*

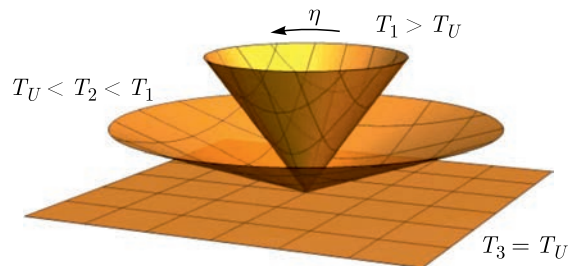
In 2015, theoretical studies were carried out related to tailoring the electronic properties of quantum materials and devices with controlled quantum properties, which is currently largely based on the idea of orbital engineering in multilayered oxide hetero-structures. It is shown that the interplay of interlayer charge imbalance and ligand distortions provides a knob for tuning the sequence of electronic levels ( $d$ -orbital reconstruction) even in intrinsically stacked oxides. Using the example of layered oxides  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  and  $\text{Ba}_2\text{IrO}_4$ , for the first time, the authors proposed and implemented a combined quantitative analysis of these effects, based on the results of measurements of electron paramagnetic resonance spectra and quantum chemical cluster calculations.

- *Bogdanov N., Katukuri V., Romhanyi J., Yushankhai V., Kataev V., Buchner B., van den Brink J., Hozoi L.* // Nature Commun. 2015. V. 6. P. 7306.

A new approach to the theory of nonrenormalized interactions is developed. Generalizations of the renormalization group equations are obtained, which make it possible to sum up the leading asymptotics in all orders of the perturbation theory. The ultraviolet behavior of a number of supersymmetric gauge models of quantum field theory is found.

- *Kazakov D.I., Borlakov A. T., Tolkachev D. M., Vlasenko D. E.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 125008.
- *Kazakov D.I.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 327; Phys. Lett. B. 2019. V. 797. P. 134801.

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; JHEP. 2019. V. 1902. P. 146.

For the first time systematic calculation of the full set of 3-loop Standard Model beta functions was performed. The result allows one to bind the SM physics at the TeV scale with the Planck scales. The current experimental accuracy of the input parameters is sufficient to demonstrate that the SM is a self-consistent model, at least up to the energy of order  $10^{10}$  GeV.

Manifestly gauge-independent analysis of the vacuum stability in the Standard Model including two-loop matching, three-loop renormalization group evolution, and pure QCD corrections through four loops is performed. All these

ingredients are exact, except that light-fermion masses are neglected. We in turn apply the criterion of nullifying the Higgs self-coupling and its beta function in the modified minimal-subtraction scheme and a recently proposed consistent method for determining the true minimum of the effective Higgs potential that also avoids gauge dependence. Exploiting our knowledge of the Higgs-boson mass, we derive an upper bound on the pole mass of the top quark by requiring the Standard Model stability all the way up to the Planck mass scale and conservatively estimate the theoretical uncertainty. This bound is compatible with the Monte Carlo mass quoted by the Particle Data Group at the  $1.3\sigma$  level.

- *Bednyakov A., Pikelner A., Velizhanin V.* // JHEP. 2013. V. 1301. P. 017; Phys. Lett. B. 2013. V. 722. P. 336–340; Nucl. Phys. B. 2013. V. 875. P. 552–565; arXiv:1309.1643 [hep-ph].
- *Bednyakov A. V., Kniehl B. A., Pikelner A. F., Veretin O. L.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 201802.

In the theoretical investigation of the heavy-nuclear fission, it was found that the evolution from a one- to three- and then two-peaked mass and charge distributions of the fission fragments occurs across several mass units. The suggested model predicts the presence of symmetric and asymmetric fission modes with equal probabilities at  $N = 136$ , regardless of the charge number of the fissioning system. The important result was the conservation of the asymmetric shapes of the mass and charge distributions of the fission fragments at high enough excitation energies of the fissioning nucleus.

- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V., Kim Youngman* // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 054602.
- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 760. P. 800.

The reaction  $pep \rightarrow d + \nu_e$ , essential in detecting monoenergetic neutrinos of  $E_\nu = 1.442$  MeV, was studied. The rate of the  $pep$  reaction and the astrophysical  $S_{pep}$  factor were calculated taking into account the Coulomb and strong interactions under conditions of the solar core. For the first time, the initial state was treated as a purely three-body state. The value of the calculated neutrino flux in the 3-body treatment appeared to be 40% larger as compared to the theoretical estimates based on the two-body treatment of the initial state and lies within the confidence interval of the Borexino collaboration data.

- *Belyaev V. B. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 035804.

For the first time, a collective model which can be applied to describe chiral vibrations and rotations of nuclei, as well as a transition between these limits, was proposed and verified. To describe the energy splitting between the chiral doublet bands, it is necessary to go beyond the mean field approximation.

- *Jolos R. V. et al.* // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 024314.

Tunnel current was calculated in a contact made of both graphene monolayers and bilayers with two possible packings and orientations of the crystal lattice. For

zigzag termination, there exists a pronounced on/off effect under the influence of the gate voltage. Based on these results, a concept for a graphene tunnel field-effect transistor was proposed. The main idea is based on the use of two graphene electrodes with zigzag termination divided by a narrow gap under the influence of the common gate. It was shown that the device will have a pronounced switching effect at low gate voltage and high on/off current ratio at room temperature.

- *Osipov V., Katkov V.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 053102; JETP Lett. 2013. V. 98. P. 782.

The quantum electrodynamics (QED) corrections at order  $m_e\alpha^7$  for a three-body Coulomb system were obtained and led to the record 10-fold improvement for the transition energies of the hydrogen molecular ion and the antiprotonic helium. This allows one to achieve a fractional precision of  $1.5 \cdot 10^{-11}$  in determination of the electron-to-proton mass ratio.

- *Korobov V.I., Hilico L., Karr J.-P.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 103003; Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 03251.

Recent STAR data for the directed flow of protons, antiprotons, and charged pions in relativistic heavy ion collisions were analyzed within the parton-hadron-string-dynamics transport model and a 3-fluid hydrodynamics approach. Special attention was paid to the description of antiproton directed flow based on the balance of proton–antiproton annihilation and the inverse processes for pair creation from multimeson interactions. Comparison of the measured data and the model results supports a crossover type of quark–hadron transition that softens the nuclear EoS but shows no indication of a first-order phase transition.

- *Konchakovski V.P., Cassing W. et al.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. P. 014903.

The novel microscopic and thermodynamically consistent approach to take into account thermal effects on the neutrino–nucleus reactions in the collapsing stellar matter was developed. Inelastic neutrino scattering off hot nuclei for temperatures relevant under supernova conditions is studied. The observed enhancement of the cross section at low neutrino energies was explained by thermal effects on the strength of Gamow–Teller transitions, which dominate the scattering process at low neutrino energies.

- *Dzhioev A. A., Vdovin A. I. et al.* // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. P. 035805.

Inflationary cosmology in a theory where there are two scalar fields which nonminimally couple to the Ricci scalar and an additional  $R^2$  term, which breaks the conformal invariance, was explored. They investigated the slow-roll inflation in the case of one dynamical scalar field and that of two dynamical scalar fields. It was explicitly demonstrated that the spectral index of scalar mode of the density perturbations and the tensor-to-scalar ratio can be consistent with the observations acquired by the recent Planck satellite. A generalization of the model with three scalar fields was proposed.

- *Bamba K., Odintsov S. D., Tretyakov P. V.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 344.

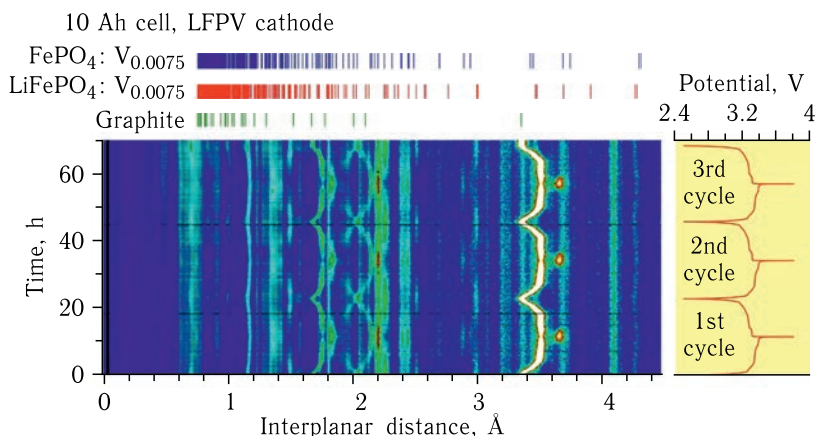
## CONDENSED MATTER PHYSICS

In 2013–2020, the user programme of the spectrometers complex of the IBR-2 research reactor has been functioning stably. A significant number of the results in condensed matter physics and materials science from the user programme are reflected in more than 90 publications per year.

The crystal structure and magnetic properties of improper multiferroic  $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$  with a 2D magnetic triangular lattice were studied using neutron diffraction, X-ray diffraction and magnetic susceptibility in a wide range of pressures and temperatures. Under the pressure structural phase transition from the trigonal to monoclinic phase was observed. In the trigonal phase, an increase in the Neel temperature with the pressure coefficient of  $0.09 \text{ GPa}^{-1}$  was established. In the monoclinic phase, high pressure of magnetic ordering was not observed up to  $T = 1.5 \text{ K}$ .

- *Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Lukin E. V., Dang N. T., Dubrovinsky L. S., Bykova E. A., Kamenev K. V., Liermann H.-P., Morgenroth W., Shapiro A. Ya., Savenko B. N.* Effect of High Pressure on the Crystal Structure, Magnetic, and Vibrational Properties of Multiferroic  $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$  // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 87. P. 014112.

*In situ* neutron analysis of charge–discharge processes in commercial lithium batteries with  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) and graphite electrodes was conducted. The stages of the process of Li insertion into graphite with successive formation of several  $\text{LiC}_n$  phases and reversible transition  $\text{LiFePO}_4 \leftrightarrow \text{FePO}_4$  were analyzed in detail.



Evolution of neutron diffraction spectra obtained in the experiment on the study of the electrodes work in a V-doped  $\text{LiFePO}_4$ -based battery. On the right, a graph of the potential change in the course of charging/discharging of the battery is shown



The analysis of the changes in the cathode material microstructure when doped with vanadium (LFPV) showed a considerable increase in the density of defects of the structure, which correlates with better electrochemical LFPV properties if compared to LFP.

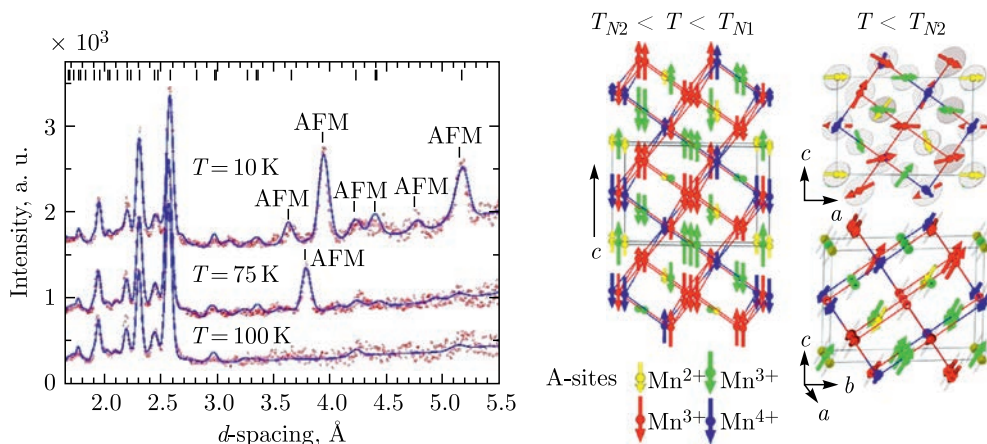
The study of the structural behavior of new electrode materials based on the modified  $\text{LiFePO}_4$  directly during charging and discharging of the battery, as well as in stationary conditions, was carried out using the HRFD diffractometer of the IBR-2 reactor.

- Bobrikov I. A., Balagurov A. M., Chih-Wei Hu, Chih-Hao Lee, Sangaa Deleg, Balagurov D. A. Structural Evolution in  $\text{LiFePO}_4$ -Based Battery Materials: *In Situ* and *Ex Situ* Time-of-Flight Neutron Diffraction Study // *J. Power Sources*. 2014. V. 258. P. 356–364.
- Balagurov A. et al. // *Usp. Khim.* 2014. V. 83. P. 1120–1134.

A study of liquid dispersions of detonation nanodiamonds by small-angle neutron scattering with contrast variation was conducted. In order to describe the structural arrangement of the system, continuous spatial transition of carbon states from the crystalline diamond within the particles to the graphite-like state on the surface was proposed. This type of transition allows combining the experimentally observed shift in the average density of particle scattering length from the density of crystalline diamond.

- Avdeev M. V., Aksenov V. L., Tomchuk O. V., Bulavin L. A., Garamus V. M., Osawa E. The Spatial Diamond–Graphite Transition in Detonation Nanodiamond as Revealed by Small-Angle Neutron Scattering // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2013. V. 25. P. 445001.

A new perovskite phase of the simple binary oxide  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  was synthesized at high pressure and high temperature conditions. A study of structural, magnetic and ferroelectric properties of this material was performed. The existence of two modulated antiferromagnetic phases ( $T_{N1} \approx 100$  K,  $T_{N2} \approx 50$  K) was

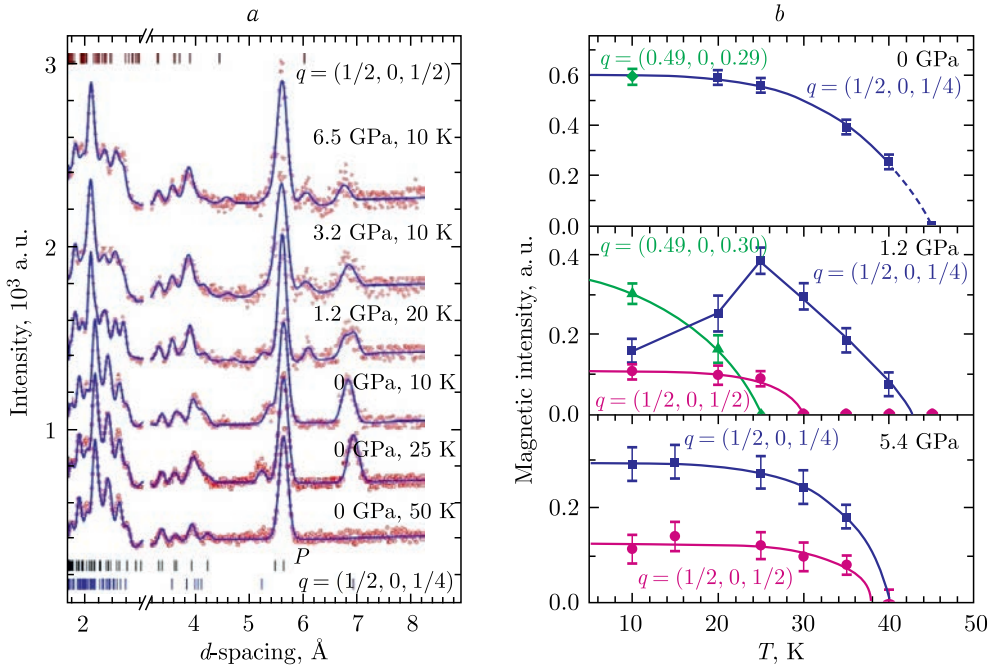


Neutron diffraction patterns (left) and spin arrangement of the modulated magnetic structures of  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  oxide (right)

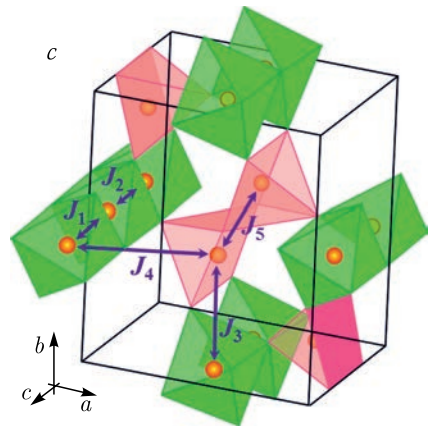
established and their magnetic structure was determined. In the low-temperature antiferromagnetic phase, emergence of the spin-induced spontaneous ferroelectric polarization was detected.

- Cong J., Zhai K., Chai Y., Shang D., Khalyavin D. D., Thompson R. D., Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Abakumov A. M., Tsirlin A. A., Dubrovinsky L., Xu X., Sheng Z., Ovsyannikov S. V., Sun Y. Spin-Induced Multiferroicity in the Binary Perovskite Manganite  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  // Nature Commun. 2018. V. 9. P. 2996.

The magnetic, structural, and vibrational properties of  $\text{YMn}_2\text{O}_5$  multiferroic with a strong magnetoelectric coupling have been studied by means of neutron,



Neutron diffraction spectra of  $\text{YMn}_2\text{O}_5$  obtained at different pressures and temperatures with the DN-12 diffractometer and treated with the Rietveld method (a). Temperature dependences of integrated intensity of magnetic characteristic peaks of commensurate AFM phases with a propagation vector  $q = (\sim 1/2, 0, \sim 1/4)$  and of pressure-induced commensurate AFM phase with a propagation vector  $q = (1/2, 0, 1/2)$  under various pressures (b). Structural configuration of  $\text{YMn}_2\text{O}_5$  and key magnetic interactions (c)

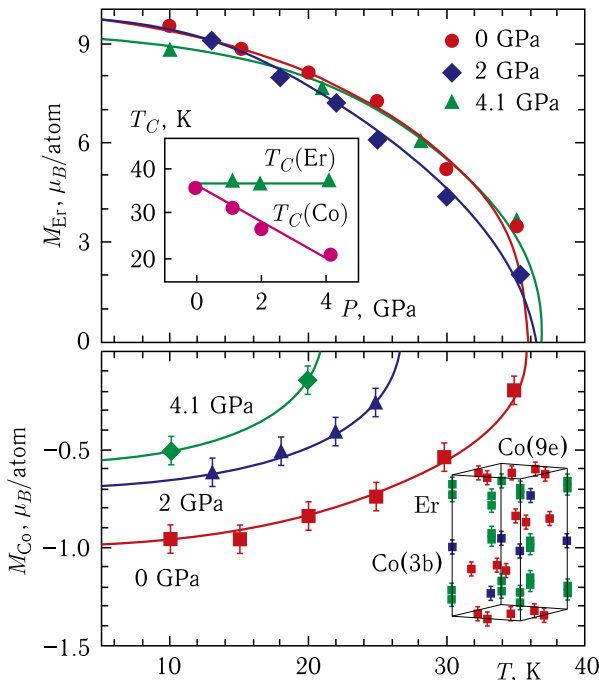


X-ray diffraction, and Raman spectroscopy at pressures up to 30 GPa in a temperature range from 10 to 300 K. The application of high pressure ( $P > 1$  GPa) resulted in a suppression of commensurate and incommensurate antiferromagnetic (AFM) phases with a propagation vector  $q = (\sim 1/2, 0, \sim 1/4)$  and appearance of a new commensurate AFM phase with  $q = (1/2, 0, 1/2)$ . This observation is in sharp contrast to a general trend towards the stabilization of the commensurate AFM phase with the propagation vector  $q = (1/2, 0, 1/4)$  found in other  $\text{RMn}_2\text{O}_5$  compounds under pressure. At higher pressures  $P > 16$  GPa, a structural phase transition accompanied by anomalies in the pressure behavior of some unit cell parameters and vibrational modes was observed. The obtained data allowed us to analyze the role of competing magnetic interactions in the formation of the magnetic ground state of  $\text{RMn}_2\text{O}_5$  multiferroics.

- Kozlenko D. P. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. P. 134409.

Intermetallic compounds of rare-earth metals and cobalt R–Co show a wide range of interesting physical phenomena that are promising for use as materials for permanent magnets, elements of the electronic device and cooling equipment. The possibility of controlling the properties of these materials (e.g., magnetic field) is determined by the correlation between the magnetization of R and Co sublattices.

Neutron studies of the atomic and magnetic structure of  $\text{RCo}_2$  compounds, performed at the IBR-2 spectrometers, at the variation of thermodynamic parameters have shown that the high degree of correlation is realized in the compounds with the inner magnetic field of R-sublattice exceeding certain critical

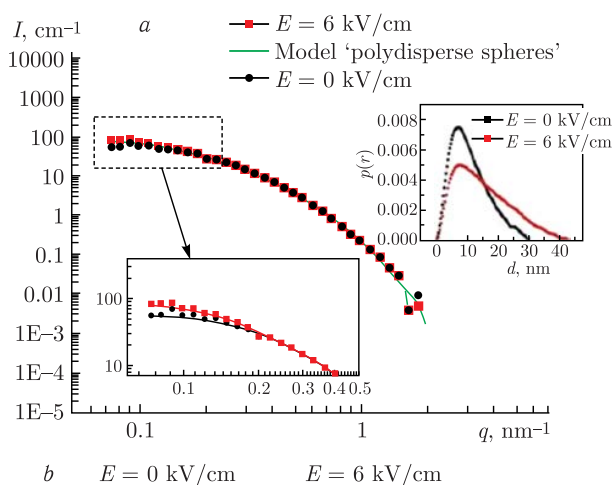


Temperature dependence of the magnetization of Er and Co sublattices in  $\text{ErCo}_2$  at different pressures illustrating their independent behavior. The inserts show pressure dependences of Curie temperatures of Er and Co sublattices and the nature of the magnetic ordering in these compounds

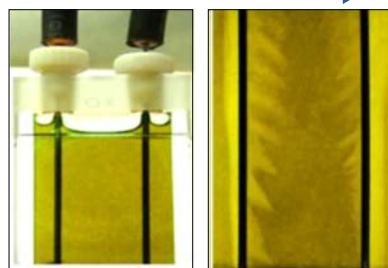
value  $H_{cr} \sim 75$  T, and for the compounds with  $H < H_{cr}$  inconsistent behavior of magnetization of R and Co sublattices is observed.

- Burzo E., Vlaic P., Kozlenko D. P. et al. // J. Alloys and Compounds. 2014. V. 584. P. 393–401.
- Kozlenko D. P., Burzo E., Vlaic P. et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 8620.

Using small-angle neutron scattering, changes in the structural organization of transformer-oil-based magnetic fluids have been observed under the action of an external DC and AC electric field. The investigations have been carried out to clarify the effect of the voltage breakdown enhancement in liquid transformers when adding nanoparticles, specifically magnetite nanoparticles stabilized by oleic acid, to a liquid carrier. It has been shown that after the application of a DC electric field along with a macroscopic phase separation the aggregation at the size level of 100 nm takes place strongly depending on the field strength.



*b*  $E = 0$  kV/cm  $E = 6$  kV/cm

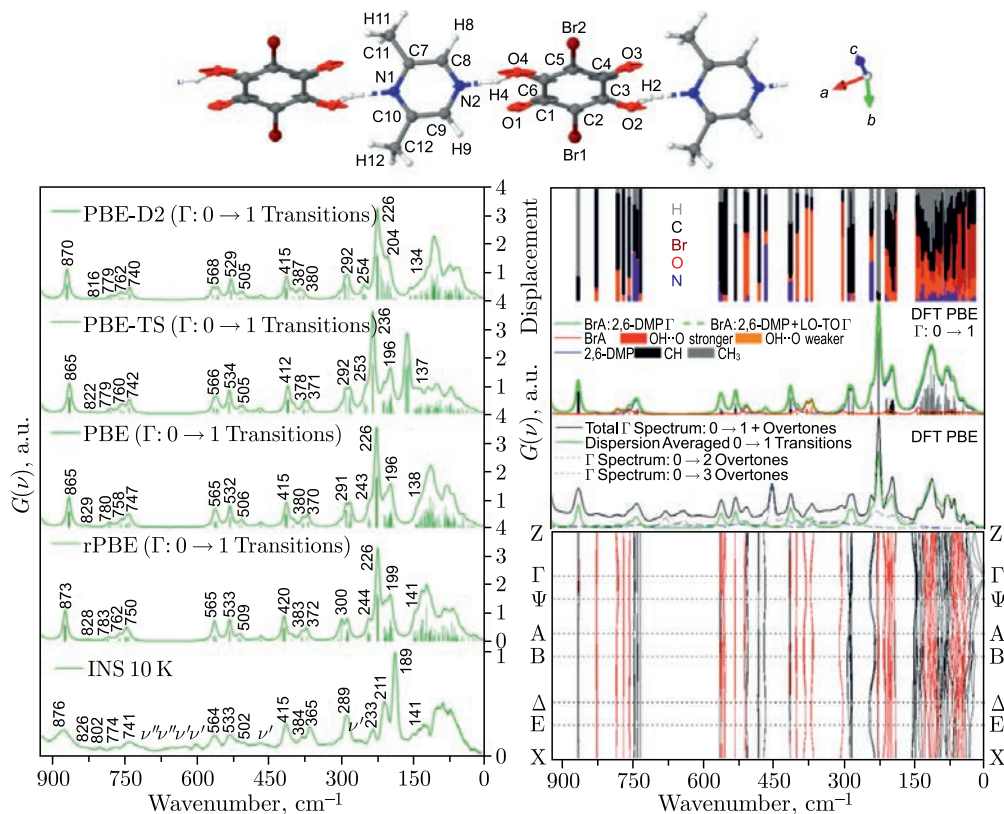


The effect of an external electric field on the structure of the magnetic fluid magnetite/oleic acid/transformer oil for (a) nanoscale: small-angle neutron scattering, magnetite concentration of 1%, and (b) macrolevel: visual observation of phase separation in a quartz cell (1 mm thick), magnetite concentration of 0.05%. The inset in (a) shows the correlation functions reconstructed from the scattering curves (in the form of pair distance distribution functions) for a fluid in two states: “without a field” and “in a field”, which point to an increase in the characteristic size as a result of aggregate formation under the applied field, as well as the presence of anisotropy in the aggregate shape

After the electric field is switched off, after a time (of the order of a few hours) the system returns to its original structural state. In the case of an AC electric field, the aggregates also appear at sufficiently low frequencies, and the process terminates when the frequency exceeds a certain critical value. Thus, in addition to the effects of aggregation in an external magnetic field, which is typical for magnetic fluids, a similar sensitivity to the electric field for magnetic fluids based on dielectric carriers has been detected, which opens up new potential possibilities for regulating the properties of these complex systems using external control parameters.

- *Rajnak M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. P. 073108.*

A comprehensive study of the crystal structure and molecular dynamics of co-crystals of bromanilic acid with 2,6-dimethylpyrazine (BrA:2,6-DMP) 1 : 1 has been carried out using the methods of single-crystal X-ray diffraction, neutron spectroscopy (NERA spectrometer), and complementary spectroscopic



Molecular structure, inelastic neutron scattering spectra (NERA 10 K) and theoretical calculated vibrational spectra (for  $0 \rightarrow 1$  transitions) of BrA:2,6-DMP (1 : 1) in the frequency range below  $925 \text{ cm}^{-1}$ . Also, calculated phonon dispersion curves along with the vibrational density of states decomposed into partial density contributions of each molecular fragment are selectively presented

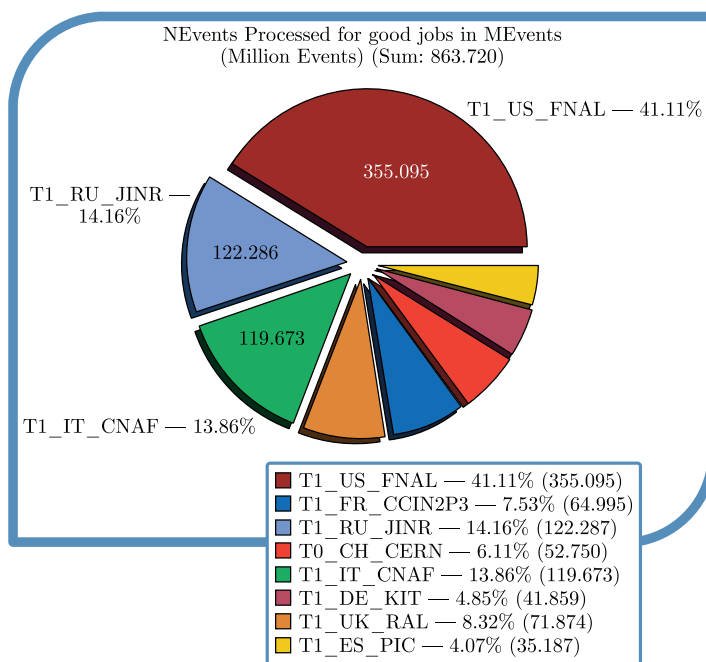
---

methods. To interpret the experimental results, theoretical calculations have been performed as well. The structural analysis has revealed that the system under study crystallizes in the monoclinic  $P2_1/c$  space group, with four molecular units per unit cell. The crystal structure can be described as an infinite net of antiparallely oriented hydrogen-bonded molecular chains. The intermolecular analysis has revealed the nonequivalency of the moderate strength hydrogen-bonding interactions and the presence of multiple specific intermolecular forces.

- *Luczyńska K. et al. // J. Phys. Chem. B. 2015. V. 119. P. 6852–6872.*

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER PHYSICS

The Tier-1 level center for the CMS experiment at the Large Hadron Collider (LHC, CERN) was put into operation in 2015. Since 2017, the JINR Tier-1 site, one of the centers of storing and processing data of the CMS experiment at the LHC, takes the second place in the world — it has processed more than 120 million events that is more than 14% of the total number. Grid component of the JINR Multifunctional Information and Computing Complex is considered as a prototype of centres of the data processing and storing system of the NICA megaproject. The creating of the center of Tier-1 level at JINR opened a new prospect of research in the field of the Big data analytics.



The contribution of the world centers of Tier-1 level in the processing of the CMS experimental data (in millions of processed events) for 2017

- *Astakhov N. S. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. No. 5. P. 714–717.
- *Astakhov N. S. et al.* // JINR GRID TIER-1@TIER-2, CEUR Workshop Proc. (CEUR-WS.org) // Proc. of the XXVI Intern. Symp. on Nuclear Electronics and Computing (NEC'2017), 2017.

In 2018, the “Govorun” supercomputer, which is a heterogeneous high-performance platform, was commissioned. The supercomputer contains



both CPU computing components and GPU computing accelerators NVIDIA V100 (DGX), which enables to carry out resource-intensive massively parallel calculations that require different types of computing architectures. The “Govorun” supercomputer takes the 17th place in the world IOP500 list (July 2020) of the most powerful supercomputers in Russia and is the first in terms of data processing speed among Russian supercomputers. The “Govorun” supercomputer is an innovative hyper-converged software-defined system with unique properties of flexibility in customization to the user task, ensuring the most efficient use of computing resources. This property allows one to create a high-speed storage and data processing system with a speed of about 300 Gb/s per read/write, which is an extremely effective tool for processing large amounts of data. The results obtained using the resources of the “Govorun” supercomputer in the period from July 2018 to September 2020 are presented in more than 80 publications, including the publication in *Nature Physics*.



The “Govorun” supercomputer

- The “Govorun” Supercomputer; [http://hlit.jinr.ru/about\\_govorun/](http://hlit.jinr.ru/about_govorun/)
- Kircher M., Trinter F., Grundmann S., Vela-Perez I., Brennecke S., Eicke N., Rist J., Eckart S., Houamer S., Chuluunbaatar O., Popov Yu. et al. // *Nature Phys.* 2020. V. 16. P. 756–760.

A simulation model of data storage and processing for the NICA accelerator complex (JINR) has been developed along the lines previously implemented in GridSim. The created simulation system allows one to perform various experiments with an object under study without its physical implementation.

- Korenkov V. V., Nechaevskiy A. V., Trofimov V. V. // *Inf. Technol. Comp. Syst.* 2013. No. 4. P. 37–44.

An approach to creating cloud autonomous Grid-infrastructures intended for solving various problems in the field of cloud and grid-technologies has been

proposed. Implementation of such a complex and its operation experience were described. On the basis of the developed approach, a specialized cloud soft- and hardware complex in the JINR CICC structure has been created.

- *Kutovsky N. A.* // Informat. Educ. Sci. 2013. No. 4(20). P. 15–29.

The efficiency and the speed of a track recognition algorithm of charged particle trajectories were assessed on a LIT-JINR multicore server based on simulated events generated with the help of the GEANT3 package in the CBM-ROOT environment. The algorithm has shown an efficiency of track reconstruction of 96–97% and a low level of incorrectly found tracks of 2–4%. A high rate of event processing on one core has been reached, amounting on average to 220 ms per one central event and to 25 ms per one mixed event. It was found that the increase in the number of the cores included in the processing resulted practically in a linear growth of the number of processed events.

- *Kulakov I. S. et al.* // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 2(179). P. 253–267.

The possibility to record  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  fissions appearing in Au–Au collisions with beam energy equal to 25 GeV/nucleon at CMB (GSI, Germany) has been analyzed. For marking signaling events under the conditions of predominant background, particular criteria have been developed, and the optimized target thickness has been chosen. An effective approach to the detection of a critical boundary to the indicated selection criteria has been suggested. It is shown that employed criteria allow realization of a number of acceptable  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  fissions statistics with high reliability and at a high rate.

- *Derenovskaya O. Yu., Vasilyev Yu. O.* // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 5(182). P. 694–705.

A new grid and cloud services simulation for the NICA accelerator complex data storage and processing system has been developed. This system is focused on improving the efficiency of the grid–cloud systems development by using work quality indicators of some real system to design and predict its evolution. For these purposes, the simulation program is combined with real monitoring system of the grid–cloud service through a special database. An example of the program usage to simulate a sufficiently general cloud structure, which can be used for more common purposes, was given.

- *Korenkov V. V. et al.* // Comp. Res. Model. 2014. V. 6, No. 5.

A comparative analysis of packages for modeling of cloud infrastructures such as CloudSim, iCanCloud, CREST has been done. These program packages allow developing the models of cloud systems with particular functionality and configuration. The model is launched for simulation, and as a result, the modeling systems provide statistical information on the most important features: execution time, virtual machine lifecycle, the use of recourses. Analyzing this information, the developer can detect bottle neck in the model and provide for solution, the realization of which allows control by means of the following simulation iteration.

- *Korenkov V. V., Muravyev A. N., Nechaevsky A. V.* // System Analysis in Science and Education. 2014. No. 2.

Approaches for content integration and interoperability of information systems, accompanying research at JINR, namely, server of scientific documents JINR Document Server (JDS), information-analytical system “Personal Information of JINR employees” (PIN) and tools for the scientific activities management Indico, have been developed. The main goal of this investigation is complete automation of research activities of JINR based on Internet technology.

- *Zaikina T.N. et al.* // Proc. of XVI All-Russian Sci. Conf. RCCL-2014, Dubna, 2014. P. 349.

A FORTRAN 77 program POTHEA is developed for calculating with a predetermined accuracy of eigenvalues, surface eigenfunctions and their first derivatives with respect to a parameter of the parametric self-adjointed 2D elliptic partial differential equation with the Dirichlet and/or Neumann-type boundary conditions in a finite two-dimensional region. The program also calculates potential matrix elements that are integrals of the products of the surface eigenfunctions and/or the first derivatives of the surface eigenfunctions with respect to a parameter. Eigenvalues and matrix elements computed by the POTHEA program can be used for solving the bound state and multichannel scattering problems for a system of the coupled second-order ordinary differential equations with the help of the KANTBP Benchmark.

- *Gusev A. A. et al.* // Comp. Phys. Commun. 2014. V. 185. P. 2636–2654.

A numerical investigation of complexes of localized states has been performed in two dynamical systems: a directly driven nonlinear Schrödinger equation (NLS) and a double sine-Gordon equation (2SG). Both systems have a wide range of physical applications. In both cases the numerical approach is based on a numerical continuation with respect to the control parameters of the quiescent (stationary) solutions and stability and bifurcation analysis of the linearized eigenvalue problem. Multisoliton complexes of the NLS equation are studied in the undamped and weak damping regimes. It has been shown that in the weak damping case the directly driven NLS equation holds stable and unstable multisoliton complexes. The obtained numerical results are confirmed by means of direct numerical simulations of the time-dependent NLS equation. The properties of the multifluxon solutions of 2SG equation are studied depending on the parameter of the second harmonic. It is shown that the second harmonic changes properties and increases the complexity of coexisting static fluxons of 2SG equation.

- *Zemlyanaya E. V., Alexeeva N. V., Atanasova P. Kh.* // Bull. of Peoples' Friendship Univ. of Russia. Ser.: Mathematics, Informatics, Physics. 2014. No. 2. P. 363.

The unitary  $U(d)$ -equivalence relation between elements of the space  $\mathbb{R}_+$  of mixed states of  $d$ -dimensional quantum system defines the orbit space  $\mathbb{R}_+/U(d)$  and provides its description in terms the ring  $\mathbb{R}[\mathbb{R}_+]^{U(d)}$  of  $U(d)$ -invariant

polynomials. It is proved that the semi-algebraic structure of  $\mathbb{R}_+/U(d)$  is determined completely by two basic properties of density matrices, their semi-positivity and hermicity. Particularly, it is shown that the Processi–Schwarz inequalities in elements of integrity basis for  $\mathbb{R}[\mathbb{R}_+]^{U(d)}$  defining the orbit space are identically satisfied for all elements of  $\mathbb{R}_+$ .

- Gerdt V., Khvedelidzhe A., Palii Yu. // J. “Notes of PDMI”. 2014. V.421. P.68–80.

Matrix-valued functional integrals generated by solutions of the Dirac equation are considered. These integrals are defined on one-dimensional continuous paths  $x: |s, t| \rightarrow \mathbb{R}$  and take values in the space of complex  $d \times d$  matrices. Matrix-valued integrals are widely used in relativistic quantum mechanics for research on particles in an electromagnetic field. Namely, the integrals are applied to represent the fundamental solution of the Cauchy problem for the Dirac equation. A method of approximate evaluation of matrix-valued integrals has been proposed. This method is based on the expansion of functional into a series. The terms of the series have a form of a product of linear functionals with increasing total power. The proposed method can be used in case of small and large parameters included in the integral.

- Ayryan E. A., Malyutin V. B. // Bull. of Peoples’ Friendship Univ. of Russia, Ser.: Mathematics, Informatics, Physics. 2014. No. 1. P. 43.

A program code widely applied at RHIC and LHC for calculations of geometrical properties of nucleus–nucleus interactions has been adapted for experiments NICA/MPD and CBM. A parameterization of  $pp$  elastic scattering amplitude earlier proposed by the authors and valid at  $E_{\text{cms}} \geq 3$  GeV is used for setting the nucleon–nucleon collision profile. An approach well known in physics of low and intermediate energies is used for determination of nuclear parameters. The code is enlarged by a possibility to account Gribov inelastic screening.

- Galoyan A. S., Uzhinsky V. V. // Part. Nucl., Lett. 2015. V. 12, No. 1. P. 231–236.

A model of microscopic optical potential (OP) has been applied to construct the pion-nucleus differential cross sections of elastic and inelastic scattering on the nuclei  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  at  $T_{\text{lab}} = 291$  MeV. The density distributions of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{11}\text{Be}$  nuclei obtained within the quantum Monte Carlo model and the generator coordinate method are used to calculate the OPs and cross sections of elastic scattering of these nuclei on protons and  $^{12}\text{C}$  at energies  $E < 100$  MeV/nucleon. The real part of the OP is calculated using the folding model with the exchange terms included, while the imaginary part of the OP that reproduces the phase of scattering is obtained in the high-energy approximation. In this hybrid model of OP, the free parameters are the depths of the real and imaginary parts obtained by fitting the experimental data. The well-known energy dependence of the volume integrals is used as a physical constraint to resolve the ambiguities of the parameter values. The potentials can be used in further calculations of cross section of the reactions with these nuclei.

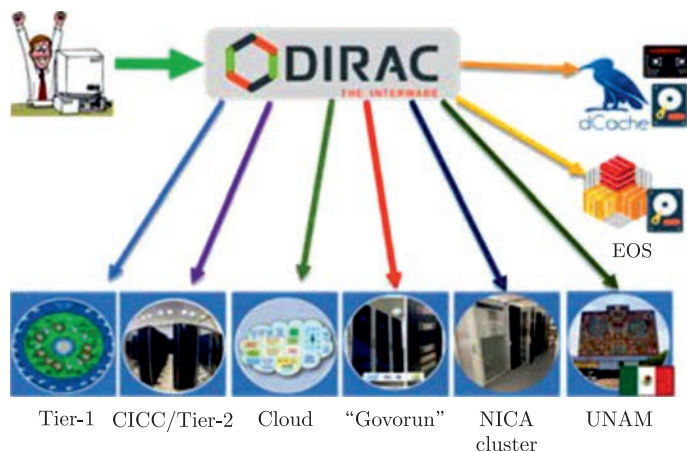
- *Zemlyanaya E. V., Spasova K., Lukyanov K. V., Antonov A. N., Gaidarov M. K.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 034606.
- *Lukyanov V. K., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V., Ellithi A. Y., Abdul-Magead I. A. M.* // Intern. J. Mod. Phys. E. 2015. V. 24, No. 4. P. 1550035.
- *Lukyanov V. K., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V.* // Yad. Fiz. 2015. V. 78, No. 1. P. 147–155.

An algorithm of the charged particle track reconstruction based on the Kalman filter has been proposed. This algorithm is used for solving one of the key tasks of the CBM experiment (GSI, Germany), i.e., recognition of the trajectories of charged particles and their parameters. Since within the CBM experiment a full reconstruction of signal events in a real-time experiment is planned, the developed algorithms should be fast and they have to use maximally the possibilities of present-day multicore processors and GPU-architectures. Computations were performed with a high-performance server with two processors Intel Xeon X5660 and card Nvidia GTX GPU 480.

- *Ablyazimov T. O. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 4. P. 828.
- *Ablyazimov T. O., Zyzak M. V., Ivanov V. V., Kisel P. I.* // Part. Nucl., Lett. 2015. V. 12, No. 3. P. 423–427.

Using the DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) Interware, the computing resources of Tier-1/Tier-2, the “Govorun” supercomputer, the computing cloud of JINR and its Member States, the NICA cluster, the cluster of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) and storage resources, namely, dCache, EOS and the Lustre ultrafast data storage system, were combined. Using this distributed infrastructure, the program of Monte Carlo data simulation for experiments of the NICA megascience project is performed.

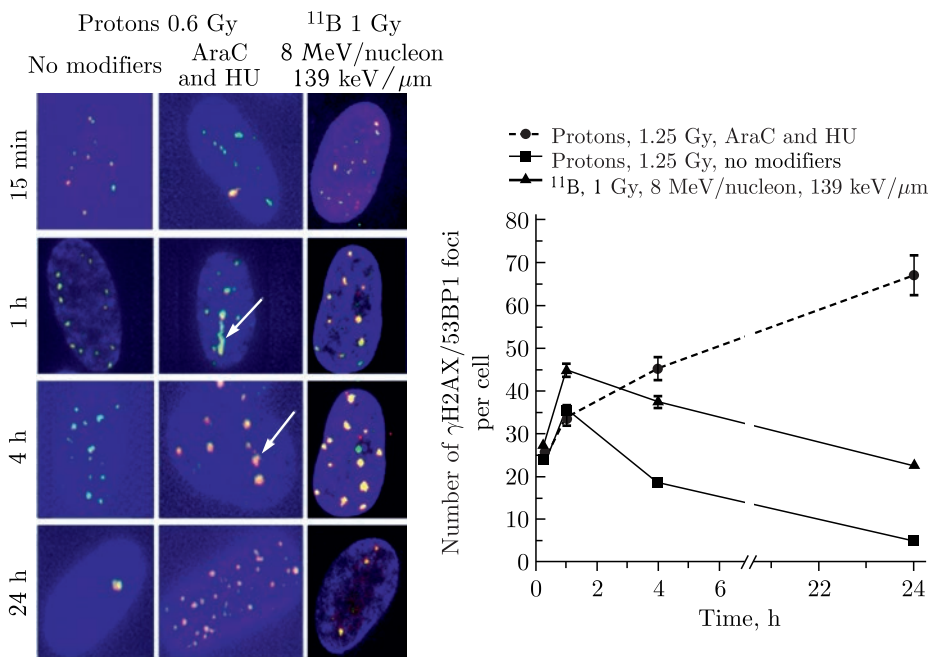
- *Kutovskiy N. et al.* Integration of Distributed Heterogeneous Computing Resources for the MPD Experiment with DIRAC Interware // Phys. Part. Nucl. (in press).



Scheme of the integration of geographically distributed heterogeneous resources based on the DIRAC Interware

## RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

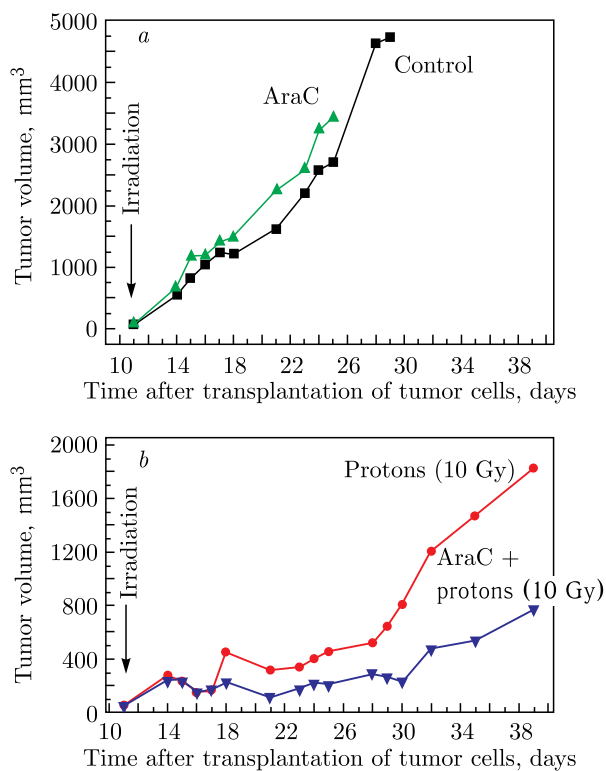
A fundamentally new technique of increasing the biological effectiveness of medical proton beams and  $\gamma$ -therapy facilities has been developed. The method allows increasing the biological effectiveness of proton exposure to that of carbon ion exposure. The approach is based on the application of the officinal preparation 1- $\beta$ -D-arabinofuranosylcytosine (AraC), which is used in oncological practice for the treatment of hematopoietic system cancer. It has been established that if the preparation is introduced before human cell exposure to ionizing radiation, DNA single-strand breaks are transformed into lethal double-strand ones. The proposed approach provides a significant increase in the biological effectiveness of proton beams and  $\gamma$ -therapy facilities, thereby bringing the areas of the therapeutic use of proton and carbon ion accelerators much closer to each other.



Images of individual  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  foci and kinetics of their formation and elimination in human cell nuclei for exposure to Bragg peak protons and 8 MeV/nucleon boron ions under normal conditions and in the presence of a radiomodifier

- Krasavin E. A., Boreyko A. V., Chausov V. N., Ilyina E. V., Kozhina R. A., Kulikova E. A., Kuzmina E. A., Smirnova E. V., Timoshenko G. N., Tiunchik S. I., Zadnepryanets M. G. The Influence of DNA Synthesis Inhibitors on the Biological Effectiveness of a Modified Bragg Peak Proton Beam // Part. Nucl., Lett. 2019. V. 16, No. 2. P. 181 (in Russian).

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.



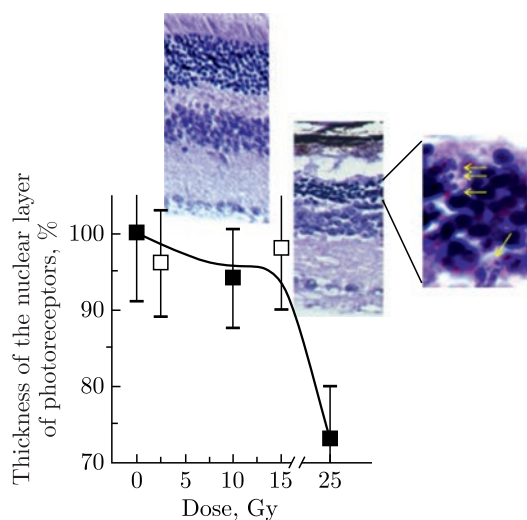
The kinetics of melanoma tumor growth in mice: a) nonexposed control animals; b) Bragg peak proton exposure at a dose of 10 Gy

- Krasavin E. A., Boreyko A. V., Zamulaeva I. A. A New Method of Increasing the Efficiency of Ionizing Radiation Action on Tumor Tissue Cells // Proc. of the 3rd Russ. Conf. with Intern. Participation "Radiobiological Basis of Radiation Therapy", JINR, Dubna, 2019. P. 84 (in Russian).

A series of studies were performed on the action of accelerated protons and the chemical agent methylnitrosourea (MNU) on the mouse retina. A technique visualizing Müller glial cells (MGC) in mouse retina sections was developed,



which makes it possible to study the response of these cells to a genotoxic exposure. MGC play the key role in retinal regeneration and are the only type of cells that retain the ability to divide. It was found that the mouse retina has a genotoxic threshold (a stability plateau on the dose–effect curve) after exposure to accelerated protons and MNU injection. The retina was shown to have a capacity for morphological and functional repair after exposure to the genotoxic agents used in this study. The results of this research are theoretically and practically important for solving the problem of the damage and repair of terminally differentiated cells and tissues made up of them.

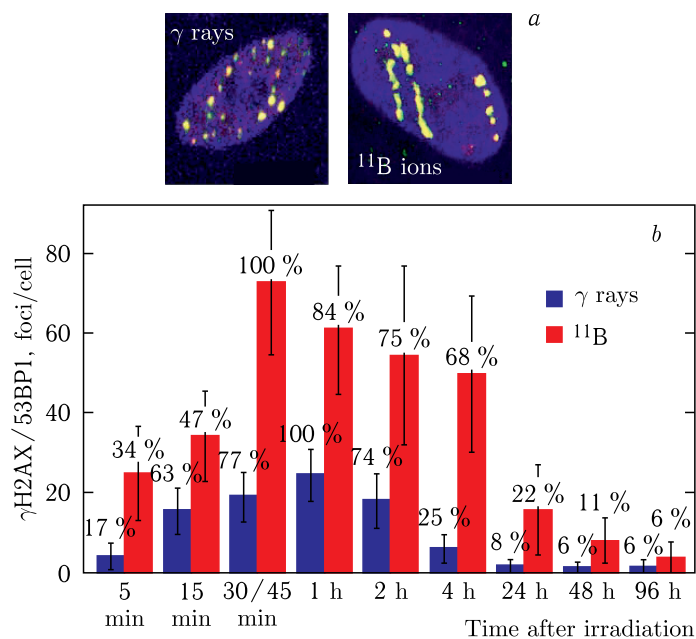


Changes in the thickness of the nuclear layer of mouse photoreceptors (expressed as percent of control) in response to a local proton irradiation of a mouse head 3 days (■) and 30 days (□) after irradiation

- *Tronov V.A., Vinogradova Yu. V., Poplinskaya V.A., Nekrasova E.I., Ostrovsky M.A.* A Study of the Mouse Retinal Adaptive Response to Proton Irradiation: Connection with DNA Repair and Photoreceptor Cell Death // *Part. Nucl., Lett.* 2015. V. 12, No. 1 (192). P. 241–255 (in Russian).
- *Tronov V.A., Vinogradova Yu. V., Poplinskaya V.A., Nekrasova E.I., Ostrovsky M.A.* *In Vivo* Radiation Preconditioning of the Mouse Retina Increases Its Resistance to a Subsequent Genotoxic Exposure and Stimulates Its Recovery // *Cytology.* 2015. V. 56, No. 2. P. 119–128 (in Russian).
- *Vinogradova Yu. V.* A Study of Mouse Retina Damage and Repair after Exposure to Accelerated Protons and Methylnitrosourea. Author's diss. abstr. M., 2015 (in Russian).

A comparative analysis was performed of the induction of clustered DNA double-strand breaks (DSBs) by  $^{60}\text{Co}$  gamma rays and accelerated heavy ions and their repair. It was shown that for  $^{11}\text{B}$  ion irradiation, DNA DSBs are formed along the particle track, while gamma-ray-induced lesions are uniformly distributed over the cell. The  $^{11}\text{B}$  ions induce heavy clustered DNA damage, the repair of which is slower than for gamma irradiation (Fig. a). The  $^{11}\text{B}$  ion irradiation results in a threefold yield of  $\gamma\text{H2AX/53BP1}$  foci compared with gamma irradiation. The highest gamma-ray-induced foci yield was observed after

1 h of post-irradiation incubation of fibroblasts, and most of the foci ( $\sim 75\%$ ) were eliminated during 4 h (Fig. b). In the cells irradiated with  $^{11}\text{B}$  ions, the highest yield of  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  foci was observed after 45 min of post-irradiation incubation. Unlike gamma rays, in the cells irradiated with  $^{11}\text{B}$  ions, 4 h after irradiation the number of foci decreased to 68%. Elimination of 68% of the foci was observed only after 24 h of post-irradiation incubation.

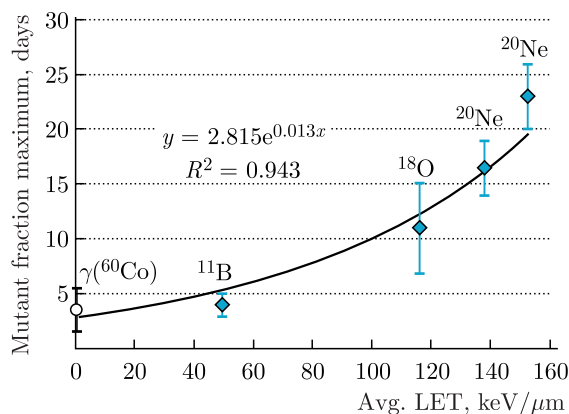


a) Visualization of DNA DSBs in fibroblast nuclei by immunocytochemical staining. b) Kinetics of the information and elimination of the  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  foci (the  $\gamma\text{H2AX}$  histone and the 53BP1 repair protein — DNA DSB markers) for  $^{60}\text{Co}$  gamma rays and accelerated  $^{11}\text{B}$  ion exposure

- Ježková L., Falk M. et al. Function of Chromatin Structure and Dynamics in DNA Damage, Repair and Misrepair:  $\gamma$ -Rays and Protons in Action // Appl. Radiat. Isot. 2014. V. 83. P. 128–136.
- Falk M., Lukasova E. et al. Primary and Secondary Clustering of DSB Repair Foci and Repair Kinetics Compared for  $\gamma$ -Rays, Protons of Different Energies, and High-LET  $^{20}\text{Ne}$  Ions // J. Radiat. Res. 2014. V. 55. Suppl. 1. P. i79–i80; doi: 10.1093/jrr/rtr210.
- Falk M., Lukasova E. et al. Chromatin Differentiation of White Blood Cells Decreases DSB Damage Induction, Prevents Functional Assembly of Repair Foci, but Has no Influence on Protrusion of Heterochromatic DSBs into the Low-Dense Chromatin // J. Radiat. Res. 2014. V. 55. Suppl. 1. P. i81–i82; doi:10.1093/jrr/rtr194.

A series of experiments were conducted to study HPRT-mutagenesis induced by accelerated ions of different linear energy transfer (LET) (50, 116, 138, and 153  $\text{keV}/\mu\text{m}$ ) and  $\gamma$  rays in V79 Chinese hamster cells. It was found that

its manifestation depends on the duration of irradiated cell seeding (mutation expression time) in a selective nutrient medium with 6-thioguanine and on radiation LET. With increasing expression time, the mutagenesis level rose up to a maximum and then decreased to the spontaneous level. The location of this maximum depended on accelerated ion LET.



The maximal level of radiation-induced mutagenesis in Chinese hamster cells depending on expression time and accelerated ion LET

With increasing LET, the maximum shifted to longer expression times. For  $\gamma$  rays, the highest mutagenesis level was observed on the 3rd–4th day after irradiation, while for accelerated  $^{18}\text{O}$  ions (LET  $\sim 116$  keV/ $\mu\text{m}$ ), 11 days after exposure, and 23 days after exposure to accelerated  $^{20}\text{Ne}$  ions (LET  $\sim 153$  keV/ $\mu\text{m}$ ). Based on this research, it is possible to assume that an increased level of radiation-induced mutagenesis is determined by higher chromosome instability of the irradiated cell population, and its manifestation at different expression times depends on initial damage severity.

- *Blaha P., Koshlan I. V., Koshlan N. A., Govorun R. D., Elsha D. V., Bogdanova J. V., Sidorina J. J., Krasavin E. A.* Induction of HPRT Mutants in V79 Cells after Gamma and HZE Ions Irradiation at Various Expression Times // Book of Abstr. of the 15th Intern. Congress of Radiation Research. Kyoto, Japan, 25–29 May 2015.

Research has been continued on the synthesis of chemical compounds from formamide  $\text{NH}_2\text{COH}$  (an HCN hydrolysis product) under exposure to radiations with different linear energy transfer. Synthesis reactions occurred under irradiation with accelerated protons and  $^{11}\text{B}$  and  $^{12}\text{C}$  ions in the presence of catalysts obtained from meteorites of different classes. Based on the performed experiments, a conclusion was made that in the system “formamide + meteorite matter + ionizing radiation” prebiotic compounds are produced in noticeable amounts up to nucleosides — the main RNA and DNA building blocks. Examples of all molecule classes necessary for the origination of life on the Earth were produced: carboxylic acids, amino acids (Fig. 1), sugars, nucleic bases, nucleosides (Fig. 2), and other complex compounds.

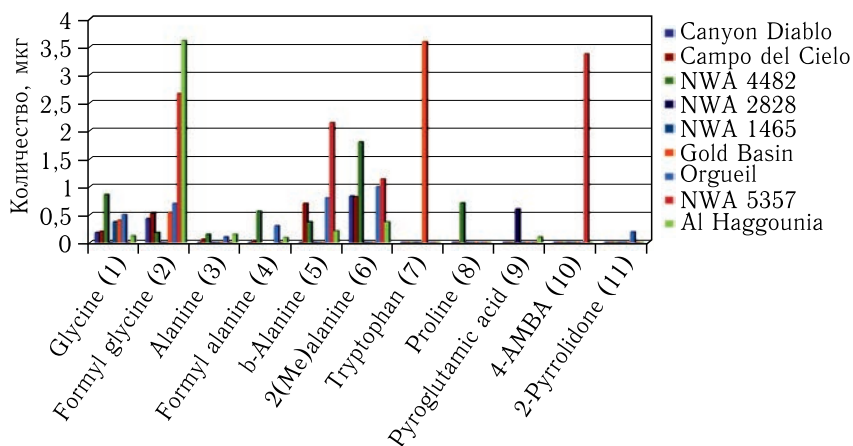


Fig. 1. Data on the production of amino acids

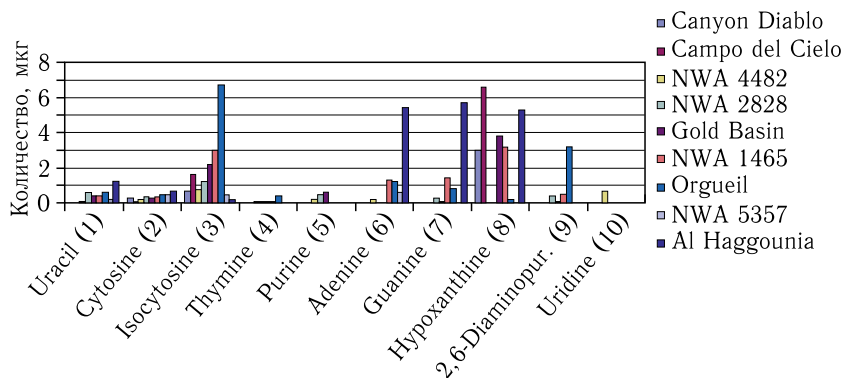


Fig. 2. Data on the production of nucleic bases and nucleosides

- *Saladino R., Carota E. et al. Meteorite-Catalyzed Syntheses of Nucleosides and of Other Prebiotic Compounds from Formamide under Proton Irradiation // J. PNAS. 2015. V. 112, No. 21. P. E2746–E2755; doi: 10.1073/pnas.1422225112.*

An experimental stand was constructed to test nuclear planetary science instruments on planetary soil models. The building hosting the stand provides a low background of scattered neutrons and allows testing instruments with different planetary soil models. Planetary regoliths are simulated by a silicate glass pack with a total weight of up to 35 tons, which is a model of an absolutely dry soil. Water presence in a soil is modeled by polyethylene layers at different depths. For the best possible approximation of the chemical composition of Martian regolith for Fe, Al, and Cl, thin layers of steel, aluminum, and polyvinyl chloride were included in the glass pack. Overall, the chemical composition of the models agrees well with the average chemical composition of Martian and Lunar regolith.

The research performed at this stand continues LRB's many-year cooperation with the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research and the RAS Institute of Space Research on the design, fabrication, and calibration of nuclear planetary science instruments for the analysis of the elemental composition of celestial body soil. In these studies, of special importance is a search for free or bound water in near-surface layers of Martian and Lunar regolith. LRB staff participated in the creation of a number of instruments with which the presence of water ice on the Mars and the Moon was confirmed, the DAN (Dynamic Albedo of Neutrons) instrument installed aboard NASA's Curiosity Mars rover and other instruments to be used in future missions of Roscosmos, NASA, and ESA.

- *Litvak M. L. et al.* Ground Tests with Active Neutron Instrumentation for the Planetary Science Missions // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 788. P. 194–202.

Models were developed of three main mechanisms of DNA DSB repair: non-homologous end joining, homologous recombination, and single-strand anneal through direct repeats. The proposed model approach was applied to the description of the repair of DNA DSBs induced by ionizing radiation in a wide LET range of 0.2–440 keV/ $\mu\text{m}$ .

- *Lyashko M. S., Belov O. V., Avvakumova I. L.* Dynamic Model of DNA Double-Strand Break Repair by Non-Homologous End Joining // Book of Abstr. of the IUPAB Intern. Workshop “Computational and Theoretical Modeling of Biomolecular Interactions”, Dubna, June 3–8, 2013. P. 48–49.

Calculations were done to evaluate energy deposition in isolated neurons of the rodent brain under exposure to high-energy heavy charged particles. Estimation was made of the dose and energy distributions in solid models of pyramidal neurons in the CA1 region of the rat hippocampus under irradiation with 0.3 and 1.0 GeV/nucleon  $^{56}\text{Fe}$  ions.

- *Batmunkh M., Bayarchimeg L., Lkhagva O., Belov O.* Cluster Analysis of HZE Particle Tracks as Applied to Space Radiobiology Problems // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 7. P. 854–859.

The influence of the heterogeneities in the synaptic links of neural networks that emerge due to radiation or chemical exposures on pulse propagation was examined. An interaction between a pulse and a heterogeneity can result in the delay, reflection, compression, and pulse splitting — down to its destruction.

- *Bugay A. N.* Dissipative Solitons in Locally Damaged Neural Networks // Proc. of XIV All-Russian Seminar School “Waves-2013”. Moscow State Univ., 2013. P. 15–16 (in Russian).

With the use of molecular dynamics methods, the structural and functional properties of the DNA photolyase enzyme were studied. DNA photolyase is a light-activated enzyme that repairs a UV-induced cyclobutane-pyrimidine dimer in damaged DNA. The obtained results facilitate solving the problem of the mechanisms of DNA repair by this enzyme.

- *Dushanov E., Kholmurodov Kh., Yasuoka K., Krasavin A. E.* Molecular Dynamics Research on the Conformational Behavior of the DNA Photolyase Enzyme // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 6. P. 974–985 (in Russian).

In cooperation with staff of the RAS Institute of Biomedical Problems and the JINR Medical and Technical Complex, an installation was made for the total irradiation of animals with extended Bragg peak protons. At the level of a whole organism, the damaging effect of extended Bragg peak protons on the hematopoietic system and the cytogenetic apparatus of bone marrow is shown, which is significantly stronger than that of the 171 MeV proton beam.

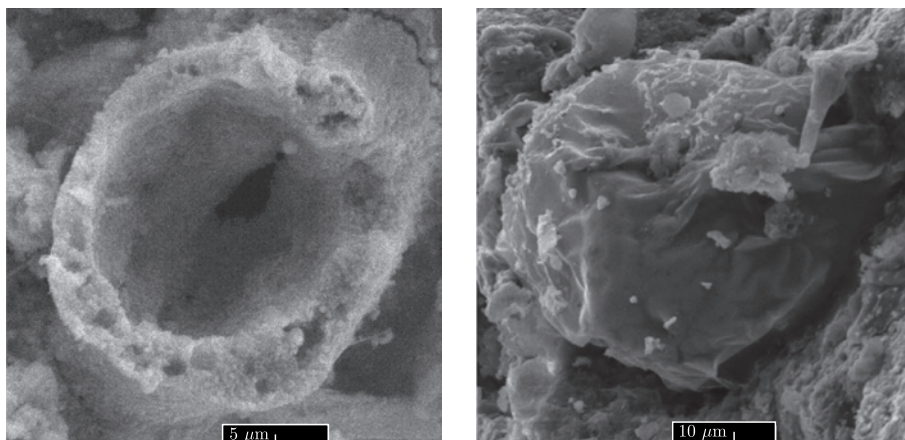
- *Ivanov A. A., Molokanov A. G., Bulynina T. M., Vorozhtsova S. V., Abrosimova A. N., Kryuchkova D. M., Severyukhin Yu. S.* Radiobiological Effects of Total Irradiation with Bragg Peak Protons // Theses of Reports to the Intern. Conf. “Radiobiological Fundamentals of the Beam Therapy of Tumors” in memory of Acad. A. S. Sayenko. M.: Peoples’ Friendship Univ. of Russia, Nov. 19–20, 2013. P. 8 (in Russian).

Reactions of chemical compound synthesis from formamide  $\text{NH}_2\text{COH}$  (an HCN hydrolysis product) under exposure to ionizing radiation were analyzed. The reactions were carried out under 165 MeV proton irradiation at the Phasotron (the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR) in the presence of different catalysts isolated from meteorites of different classes. It is remarkable that in the formamide–radiation system, prebiotic compounds (precursors of nucleic acids, proteins, metabolic cycles, and metabolism) emerged in notable amounts. Under exposure to UV and/or heating, no prebiotic compounds were produced. This research can shed light on the origin of life not only on the Earth but also in the Universe.

- *Saladino R., Botta G., Delfino M., Di Mauro E., Kapralov M. I., Krasavin E. A., Timoshenko G. N., Rozanov A. Yu.* Formation of Prebiotic Compounds of Formamide under Irradiation with High-Energy Particles // JINR News. 2013. No. 4. P. 16–19.

## ASTROBIOLOGY

A large cycle of scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive microanalysis studies of fossilized microorganisms (microfossils) in meteorites has been carried out. The first illustrated atlas of microfossils in the Orgueil meteorite has been published. In cooperation with colleagues from Italy and the Czech Republic, the formation of complex prebiotic compounds under proton irradiation of simple organic compounds in the presence of meteorite matter as a catalyst has been studied. A new mechanism has been proposed that promotes the formation and processing of insoluble organic matter in meteorites and during prebiotic processes.



Images of fossilized microorganisms in the Orgueil meteorite

- *Rozanov A. Yu., Hoover R.B., Krasavin E.A., Samylina O.S., Ryumin A.K., Kapralov M.I., Saprykin E.A., Ajanasyeva A.N.* An Atlas of Microfossils in the Orgueil Meteorite / Ed.-in-Chief A. Yu. Rozanov. M.: Paleontological Institute, Russ. Acad. Sci., 2020. 130 p. (in Russian and English).
- *Bizzarri B.M., Manini P., Lino V., Ischia M., Kapralov M.I., Krasavin E.A., Mrazikova K., Sponer J., Sponer E., Di Mauro E., Saladino S.* High-Energy Proton-Beam-Induced Polymerization/Oxygenation of Hydroxynaphthalenes on Meteorites and Nitrogen Transfer from Urea: Modeling Insoluble Organic Matter? // *Chem. Eur. J.* 2020. V.26. P.14919–14928; doi: 10.1002/chem.202002318.



## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Физика тяжелых ионов . . . . .	3
Ускорительная тематика . . . . .	6
Физика частиц . . . . .	14
Релятивистская ядерная физика . . . . .	22
Нейтронная ядерная физика . . . . .	24
Теоретическая физика . . . . .	29
Физика конденсированных сред . . . . .	34
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	41
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	48
Астробиология . . . . .	56
Heavy Ion Physics . . . . .	57
Accelerator Topics . . . . .	60
Particle Physics . . . . .	67
Relativistic Nuclear Physics . . . . .	75
Neutron Nuclear Physics . . . . .	77
Theoretical Physics . . . . .	81
Condensed Matter Physics . . . . .	85
Information Technologies and Computer Physics . . . . .	92
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	98
Astrobiology . . . . .	106

**Краткий обзор важнейших научных результатов  
Объединенного института ядерных исследований  
в 2013–2020 годах**

2021-9

Редакторы *Е. В. Калининкова, Е. И. Крупко*

Подписано в печать 19.03.2021.

Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 8,61. Уч.-изд. л. 8,82. Тираж 170 экз. Заказ № 60095

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/)