



2021-3

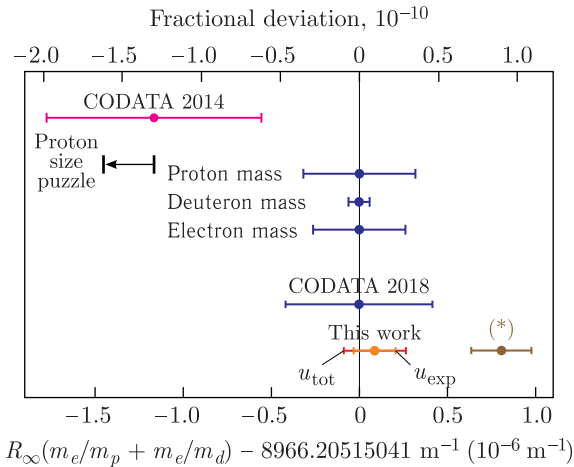
**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2020 ГОДУ**

## СОДЕРЖАНИЕ

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	6
Физика частиц . . . . .	6
Физика тяжелых ионов низких энергий . . . . .	11
Нейтронная ядерная физика . . . . .	12
Физика конденсированных сред . . . . .	15
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	20
Ускорительная тематика . . . . .	22
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	24
Образовательная деятельность . . . . .	27
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	28

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

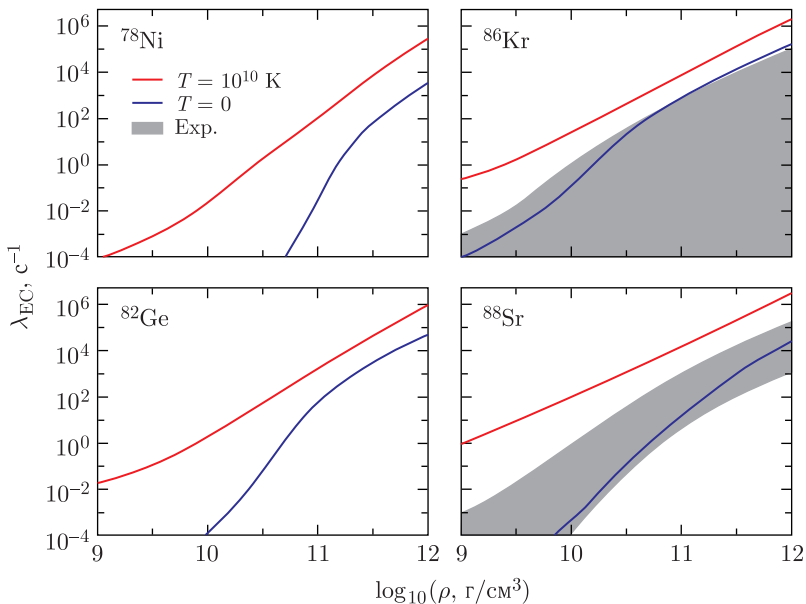
Предложена новая методика прецизионной ротационной спектроскопии для симпатически охлажденного кластера молекулярных ионов в линейной радиочастотной ловушке, которая позволяет улучшить точность измерения почти на два порядка. Измерены шесть сверхтонких компонент фундаментального ротационного перехода, что позволило получить наиболее точную проверку предсказаний квантовой электродинамики 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  $2 \cdot 10^{-11}$ . Результаты находятся в согласии со значениями, получаемыми с использованием рекомендуемых группой CODATA величин фундаментальных констант от 2018 г., но они более точны. Эти результаты являются убедительным доказательством правильности предыдущих ключевых прецизионных измерений и более чем в 20 раз улучшают границу для гипотетической пятой силы взаимодействия между протоном и дейтроном.



Сравнение полученных результатов со значениями из других работ

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

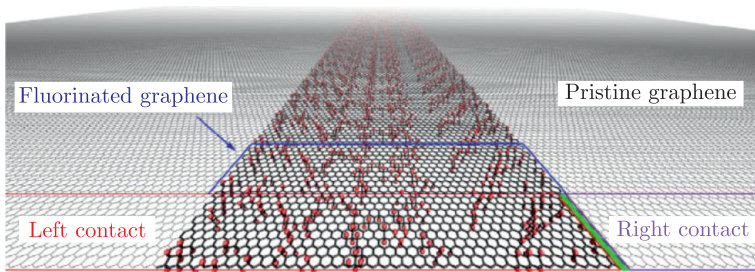
Исследовано влияние конечной температуры ( $T \approx 10^{10}$  К) ядер с близким к  $N = 50$  числом нейтронов на скорость захвата электронов в веществе кора коллапсирующей сверхновой звезды. В рамках термодинамически последовательного подхода показано, что тепловые эффекты приводят к разблокировке гамма-теллеровских (ГТ) переходов. Сравнение скоростей захвата электронов на основном состоянии ( $T = 0$ ) и на нагретых ядрах  $^{78}\text{Ni}$ ,  $^{82}\text{Ge}$ ,  $^{86}\text{Kr}$  и  $^{88}\text{Sr}$  свидетельствует о важности учета конечной температуры ядер при моделировании коллапса сверхновых. Полученные результаты способствуют разрешению вопроса о механизме взрыва коллапсирующих сверхновых.



Скорости захвата электронов как функция плотности вещества коллапсирующего кора. Скорости захвата, соответствующие экспериментальной силе ГТ-переходов, представлены с учетом экспериментальных ошибок

- *Dzhioev A. A., Langanke K., Martinez-Pinedo G., Vdovin A. I., Stoyanov Ch. // Phys. Rev. C. 2020. V. 101. P. 025805.*

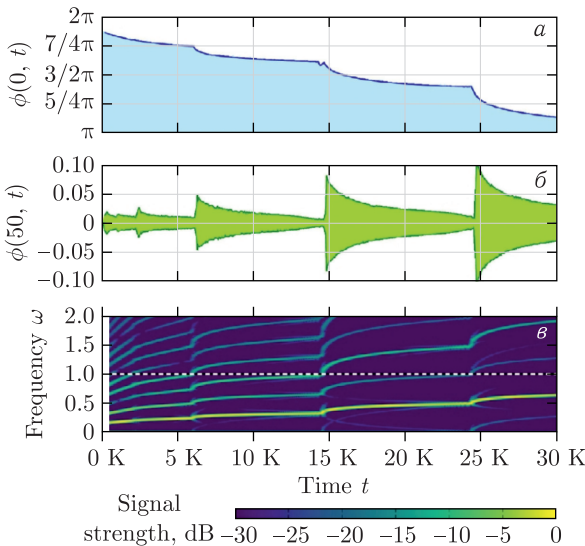
Разработан метод генерации реалистичных структур фторированного графена, базирующийся на результатах стохастических молекулярно-динамических расчетов. Электронные транспортные свойства таких структур рассчитаны в широком интер-



вале значений концентрации атомов фтора, а также при различной степени их упорядочения. Обнаружено соответствие между нерегулярностью расположения атомов фтора и электронными свойствами. Предложенное рассмотрение позволило воспроизвести два экспериментальных наблюдения в данном материале, а именно: электрон-дырочную асимметрию транспортных свойств и пик в проводимости при концентрации фтора около 10%.

- *Yamaletdinov R. D., Katkov V. L., Nikiforov Y. A., Okotrub A. V., Osipov V. A. // Adv. Theory Simul. 2020. V. 3. P. 1900199.*

Обнаружен новый эффект ступенчатого излучения в процессах распадов квазипериодических бризеров и осциллонов, про-



Спектрограмма потока излучения квазибризера в деформированной теории синус-Гордона

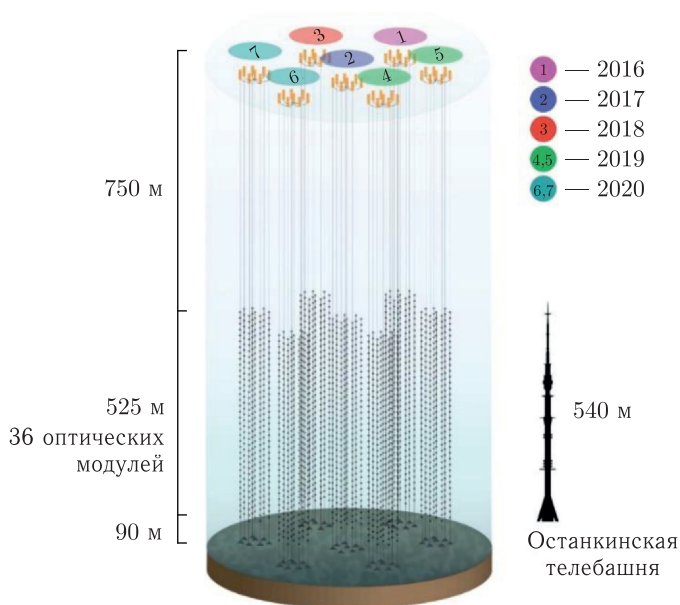
являющийся в последовательности «взрывов» потока радиации, освобождаемой в ходе динамической эволюции системы.

- Dorey P., Romanczukiewicz T., Shnir Ya. // Phys. Lett. B. 2020. V. 806. P. 135497.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### Физика частиц

Развернуты и введены в эксплуатацию 6-й и 7-й кластеры создаваемого на оз. Байкал глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. С их вводом эффективный объем телескопа достиг значения  $0,35 \text{ км}^3$  в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Установка содержит 2016 глубоководных детекторов черенковского света на основе больших фотоэлектронных умножителей и работает в режиме постоянной регистрации и накопления данных.



Получаемые данные о потоке атмосферных мюонов и нейтрино находятся в хорошем соответствии с ожидаемыми. Темп счета первых событий от нейтрино высоких энергий находится в согласии с данными о потоке астрофизических нейтрино,

полученными на антарктическом нейтринном телескопе IceCube. Совместная работа этих двух крупнейших телескопов Северного и Южного полушарий позволяет вести обзор всего неба в нейтринном излучении, осуществлять поиск астрофизических источников на всей небесной сфере. Детектор Baikal-GVD включен в международные системы многоканальных оповещений с целью поиска и последующего изучения транзитных астрофизических источников методами многоволновой и многоканальной астрономии.



Работы по монтажу гирлянды

- *Домогацкий Г. В.* Глубоководный нейтринный телескоп — Baikal-GVD // 36-я Всерос. конф. по космическим лучам, 28 сент. – 2 окт. 2020 г., НИИЯФ МГУ, онлайн; <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/>

Коллаборацией ученых в эксперименте NOνA (FNAL, США) проведен анализ данных с увеличенной интегральной экспозицией, которая теперь составляет  $13,6 \cdot 10^{20}$  POT (протонов на мишени) в пучке нейтрино и  $12,5 \cdot 10^{20}$  POT в пучке антинейтрино. Совместная интерпретация различных каналов осцилляций позволила уточнить параметры этого явления: лучшее значение подгонки лежит в точке с нормальной иерархией,

в верхнем октанте угла  $\theta_{23}$  со значением  $\sin^2 \theta_{23} = 0,57_{-0,04}^{+0,03}$ ,  $\Delta m_{32}^2 = (+2,41 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  и  $\delta_{\text{CP}} = 0,82_{-1,0}^{+0,24} \pi$ . Таким образом, по данным эксперимента NO $\nu$ A предпочтительной является комбинация осцилляционных параметров, приводящая к симметрии между нейтрино и антинейтрино, а противоположные комбинации («обратная иерархия,  $\delta_{\text{CP}} = \pi/2$ » и «нормальная иерархия,  $\delta_{\text{CP}} = 3\pi/2$ ») отвергаются на уровнях  $> 3\sigma$  и  $> 2\sigma$  соответственно.

- *Acero M. A. et al. (NO $\nu$ A Collab.). Adjusting Neutrino Interaction Models and Evaluating Uncertainties Using NO $\nu$ A Near Detector Data // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123, No. 15. P. 151803.*

В рамках проекта ATLAS на LHC при активном участии сотрудников ОИЯИ были проведены исследования по поиску распадов бозона Хиггса Стандартной модели (СМ) на  $bb$ -кварковую пару при ассоциативном рождении с  $W$ - или  $Z$ -бозоном. Проанализированы все данные, полученные в протон-протонных соударениях при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Измеренные сечения ассоциативного рождения бозона Хиггса с  $W$ - и  $Z$ -бозоном со статистической значимостью  $4,0(4,1)$  и  $5,3(5,1)\sigma$  хорошо согласуются с ожидаемыми значениями в рамках СМ.

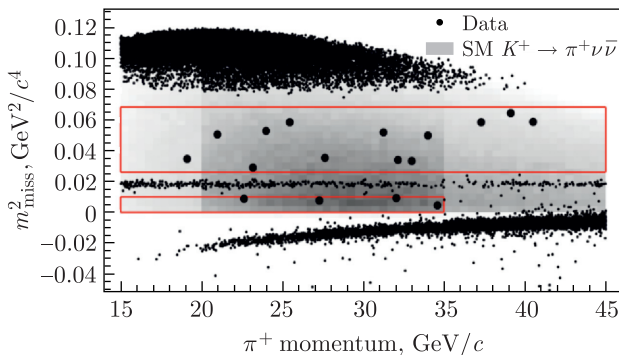
- *Aaboud M. et al. (ATLAS Collab.). Measurements of the Production Cross-Section for a  $Z$  Boson in Association with  $b$ -Jets in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2020. V. 07. P. 44.*

На ускорителе МАМI (Майнц, Германия) при активном участии сотрудников ОИЯИ выполнены первые в мире прецизионные измерения полных сечений и угловых распределений для фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне. Установлено значительное расхождение между сечениями на свободных и связанных протонах, обусловленное взаимодействием нуклонов в конечном состоянии. Это расхождение использовано для оценки сечения фоторождения нейтральных пионов на свободных нейтронах. Данные получены с использованием созданной сотрудниками ОИЯИ поляризованной протонной (дейтронной) мишени.

- *Dieterle M. et al. (A2 Collab.). Helicity-Dependent Cross Sections for the Photoproduction of  $\pi^0$  Pairs from Nucleons // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. P. 062001.*



С участием физиков ОИЯИ завершена обработка первых данных, полученных в эксперименте NA62 на SPS (ЦЕРН). 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 в 7 событий. Это позволило сделать лучшую в мире оценку относительной вероятности распада  $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11,0_{-3,5}^{+0,4} \pm 0,3_{\text{сист.}}) \cdot 10^{-11}$ , что согласуется с предсказанием Стандартной модели.



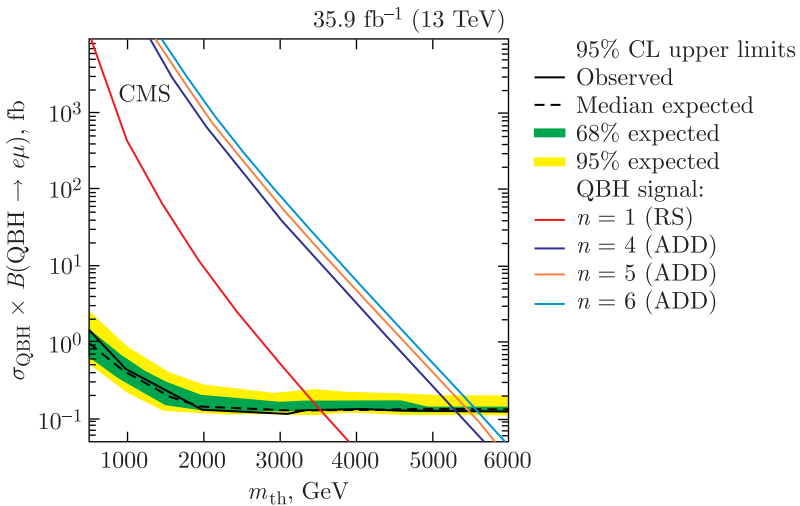
События-кандидаты в сверхредкий распад (в рамке) и фоновые события в переменных измеренного импульса заряженного пиона и квадрата недостающей массы, связанной с нейтрино

- *Marchevski R. (for the 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.

Ряд интересных результатов получен группой ОИЯИ в эксперименте ALICE на LHC (ЦЕРН). Новый анализ фемтоскопических корреляций для пар идентичных заряженных пионов и каонов в  $pp$ -столкновениях при 13 ТэВ был проведен отдельно для сферических ( $S_T > 0,7$ ) и струйных ( $S_T < 0,3$ ) событий, где  $S_T$  — поперечная сферичность события. Уменьшение радиусов источников с увеличением поперечного импульса пары наблюдалось не только для струйных, но и для сферических событий, которые демонстрируют нетривиальное поведение коллективно-подобных частиц, ожидаемое только в столкновениях тяжелых ионов с возможным образованием кварк-глюонной плазмы.

- *Malinina L. (for the ALICE Collab.).* Femtoscopic Correlations of Identical Charged Particles in  $pp$ -Collisions at LHC Energies with Event-Shape Selection // 5th Intern. Conf. on Part. Phys. and Astrophys. (ICPPA-2020), Oct. 7, 2020, MPhI, Moscow.

В эксперименте CMS на LHC с участием физиков ОИЯИ проведен обобщающий анализ результатов и перспектив поиска сигналов многомерной низкоэнергетической гравитации. Показано, что LHC достиг порога своих возможностей в наблюдении сигналов квазиклассических многомерных черных дыр RS- и ADD-типа. Однако по-прежнему остается окно для так называемых квантовых черных дыр (КЧД) с характерной экспериментальной сигнатурой нарушения аромата ( $e\mu/e\tau/\mu\tau$ ). Полученные ограничения на минимально допустимые значения массы квантовых черных дыр составляют от 3,6 до 5,6 ТэВ/ $c^2$  в зависимости от модели и числа  $n$  дополнительных измерений.

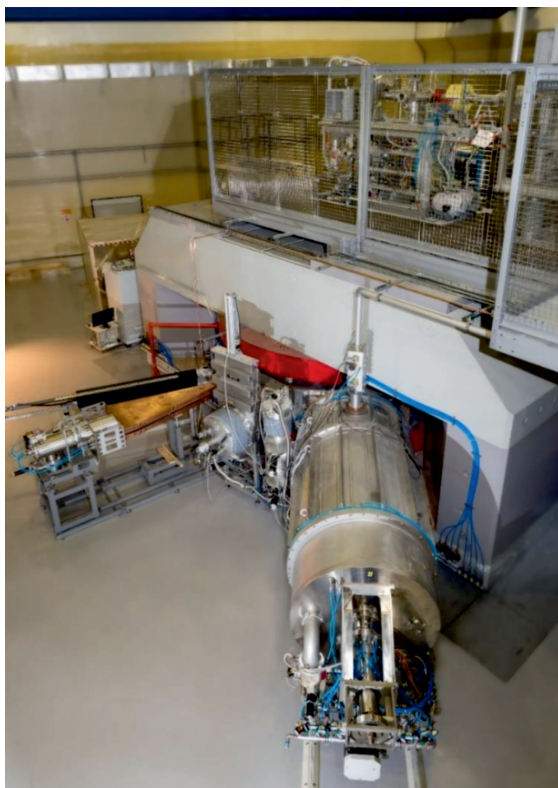


Верхние пределы при 95%-м уровне достоверности для средней величины произведения сечения сигнала и вероятности распада КЧД в  $e\mu$  как функции порогового значения массы  $m_{th}$ . Интервалы уровней достоверности 68 и 95% для медианы выделены зеленым и желтым цветом соответственно. Показаны предсказания для нескольких моделей с большим числом дополнительных пространственных измерений, в частности, для одного дополнительного измерения (RS) и для  $n = 4$ , 5 и 6 дополнительных измерений (ADD)

- Savina M. V., Seitova D. The CMS Experiment Programme on Search for Multidimensional Low-Energy Gravity at the LHC // Yad. Fiz. 2021. V. 84, No. 1.

## Физика тяжелых ионов низких энергий

На ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» успешно начат первый эксперимент по синтезу изотопов 115-го элемента (московия) в реакции взаимодействия ионов  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{243}\text{Am}$ . Этот эксперимент дает старт уникальной программе ОИЯИ по изучению ядерно-физических и химических свойств сверхтяжелых элементов, а также показывает готовность к экспериментам по синтезу новых элементов с атомными номерами 119 и 120 — первых элементов 8-го периода таблицы Д. И. Менделеева.

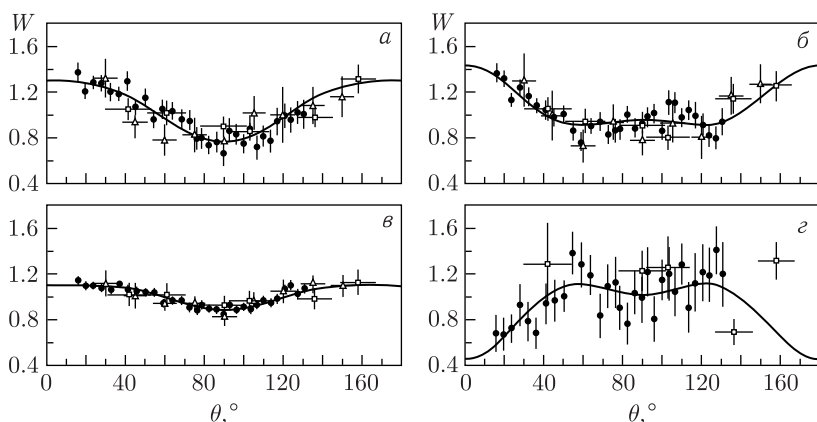


Базовая установка фабрики СТЭ — циклотрон ДЦ-280

- *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. P. 431–436 / Eds. Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev. Singapore: World Sci. Publ., 2020.

## Нейтронная ядерная физика

На установке TANGRA на основе стандартного нейтронного генератора ИНГ-27 с использованием метода меченых нейтронов проведено исследование реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах хрома и магния. Определены энергии видимых  $\gamma$ -переходов, образующихся в различных реакциях нейтронов с этими ядрами, и их парциальные сечения. Проведены анализ результатов измерения углового распределения  $\gamma$ -квантов и сравнение с результатами других опубликованных экспериментальных работ.

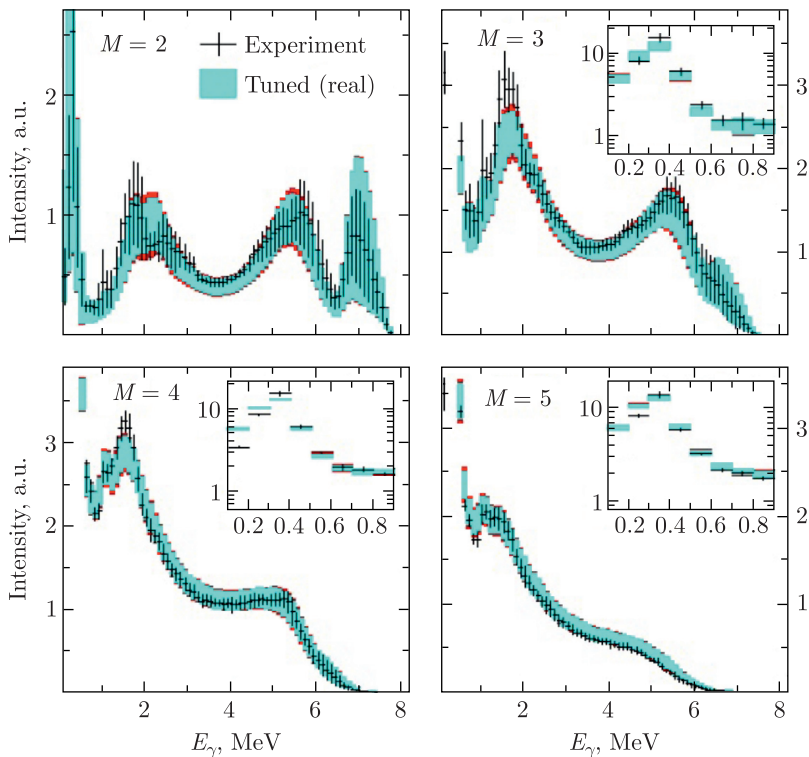


Угловые распределения  $\gamma$ -квантов для переходов в  $^{52}\text{Cr}(n, n'\gamma)^{52}\text{Cr}$   $E_\gamma = 935,5$  кэВ (а), 1333,7 кэВ (б), 1434,1 кэВ (в) и 1530,7 кэВ (г). Сплошные кривые — аппроксимация данных полиномами Лежандра

- *Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Kopatch Yu. N. et al.* Measuring the Yields and Angular Distributions of  $\gamma$  Quanta from the Interaction between 14.1 MeV Neutrons and Magnesium Nuclei // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2020. V. 84. P. 367–372.
- *Grozdanov D. N., Fedorov N. A., Kopatch Yu. N. et al.* Measurement of the Yield and Angular Distributions of Gamma Rays Originating from the Interaction of 14.1 MeV Neutrons with Chromium Nuclei // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83, No. 3. P. 384–390.

С участием физиков ОИЯИ исследованы фотонные силовые функции (ФСФ) и плотности ядерных уровней для  $^{196}\text{Pt}$  по спектрам множественности гамма-квантов каскадного распада компаунд-состояний ядра, полученных на мультidetекторной установке DANCE (LANL, США). Полученные данные являются

необходимыми величинами для расчета взаимодействия фотонов с ядрами, в частности сечений реакций. Кроме того, знания о ФСФ и плотности ядерных уровней особенно важны в ядерной астрофизике и в разработке передовых ядерных технологий.

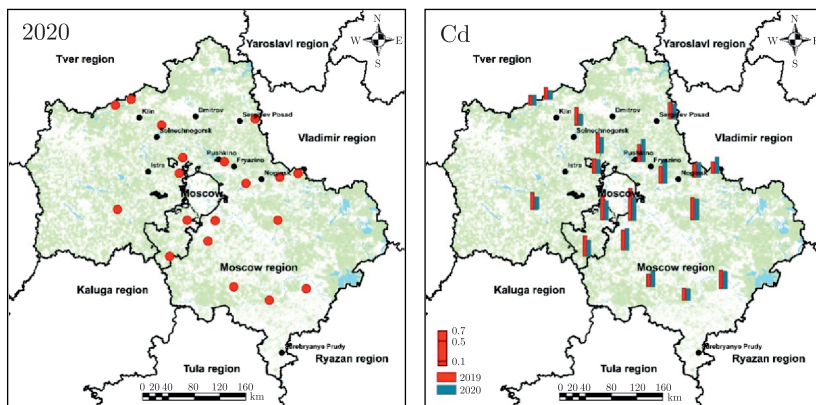


Сравнение экспериментальных данных с моделированием для резонансов со спином  $1^-$ . Черным цветом отмечены экспериментальные данные с флуктуацией по резонансам, голубой пояс — моделирование (среднее значение и стандартное отклонение)

- *Simbirtseva N., Krtička M., Casten R., Couture A., Furman W., Knapová I., O'Donnell J.M., Rusev G., Ullmann J.L., Valenta S.* Examination of Photon Strength Functions and Nuclear Level Density in  $^{196}\text{Pt}$  from the Gamma-Ray Spectra Measured at the DANCE Facility // *Phys. Rev. C.* 2020. V. 101. P.024302; <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.101.024302>.

Коронавирусная инфекция COVID-19 оказала огромное негативное влияние на здоровье людей и экономику многих стран

мира. Для оценки влияния принятых ограничительных мер на качество воздуха в Московской области в июне 2020 г. мхи вида *Pleurosium shreberi* были отобраны в 19 точках, признанных загрязненными по результатам предыдущих биомониторинговых исследований. Содержание Cd, Cr, Cu, Fe, Ni и Pb в образцах мха определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. По сравнению с данными 2019 г. содержание Cd в образцах мха снизилось на 2–46%, а содержание железа увеличилось на 3–127%. Содержание Cu, Ni и Pb во мхах снизилось на большинстве участков отбора проб, за исключением востока Московской области, где сконцентрирована значительная часть промышленных предприятий. Ограничительные меры, введенные в Московской области, привели к снижению выбросов транспортными средствами, в то время как негативное воздействие промышленного сектора на качество воздуха осталось на уровне 2019 г. или даже увеличилось.



Слева: карта пробоотбора. Справа: содержание кадмия в пробах мха в 2019 и 2020 гг.

- *Yushin N., Chaligava O., Zinicovskaia I., Vergel K., Grozdov D.* Mosses as Bioindicators of Heavy Metal Air Pollution in the Lockdown Period Adopted to Cope with the COVID-19 Pandemic // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 1194; <https://doi.org/10.3390/atmos11111194>.

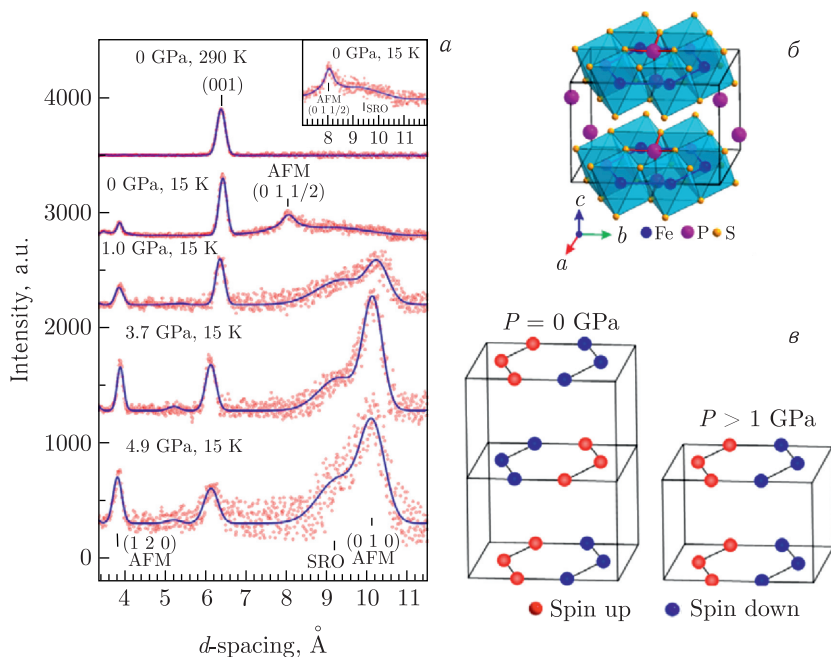
Продолжается разработка методики нейтронного резонансного анализа с целью определения элементного состава образцов. Метод является неразрушающим и основан на регистрации нейтронных резонансов при радиационном захвате, измерении

выхода продуктов реакции в этих резонансах. Чтобы проверить возможности этого метода, такие исследования были проведены в сотрудничестве с Институтом археологии РАН на импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН для боспорских статеров III–IV вв. н. э. из фанагорийского клада.

- *Sedyshev P. V., Simbirtseva N. V., Yergashov A. M., Mazhen S. T., Mareev Yu. D., Shvetsov V. N., Abramzon M. G., Saprykina I. A.* Determining the Elemental Composition of Antique Coins of Phanagorian Treasure by Neutron Spectroscopy at the Pulsed Neutron Source IREN in FLNP JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2020. V. 17. P. 389–400.

### Физика конденсированных сред

Ван-дер-ваальсовские слоистые магнитные материалы с симметрией магнитной решетки, подобной графену, демонстрируют существование магнитного упорядочения при достаточно высо-



а) Нейтронные дифракционные спектры FePS<sub>3</sub>, измеренные при различных значениях давления и температуры на дифрактометре ДН-12 и обработанные по методу Ритвельда. б) Моноклинная структура FePS<sub>3</sub> симметрии C2/m. в) Магнитная структура FePS<sub>3</sub> при нормальном и высоком давлении

ких температурах в пределе до единичного атомного слоя. Проведено исследование влияния высокого давления на атомную и магнитную структуры квазидвумерного ван-дер-ваальсовского антиферромагнетика  $\text{FePS}_3$  в широком диапазоне температур. Обнаружен изоструктурный фазовый переход в новую моноклинную модификацию при  $P = 1$  ГПа, сопровождающийся значительным изменением параметров решетки. Структурная перестройка приводит к изменению характера антиферромагнитного упорядочения с квазидвумерного (вектор распространения  $k = (0 \ 1 \ 1/2)$ ) на трехмерный ( $k = (0 \ 1 \ 0)$ ). При более высоких значениях давления  $P > 14$  ГПа в области перехода диэлектрик–металл наблюдалось подавление антиферромагнитного упорядочения и формирование фазы с ближним магнитным порядком.

- *Coak M.J., Jarvis D.M., Hamidov H., Wildes A.R., Paddison J.A.M., Liu C., Haines C.R.S., Dang N.T., Kichanov S.E., Savenko B.N., Lee S., Kratochvilova M., Klotz S., Hansen T., Kozlenko D.P., Park J.-G., Saxena S.S. Evolution of Magnetic Order in van der Waals Antiferromagnet  $\text{FePS}_3$  through Insulator–Metal Transition // Phys. Rev. X. 2020 (in press).*

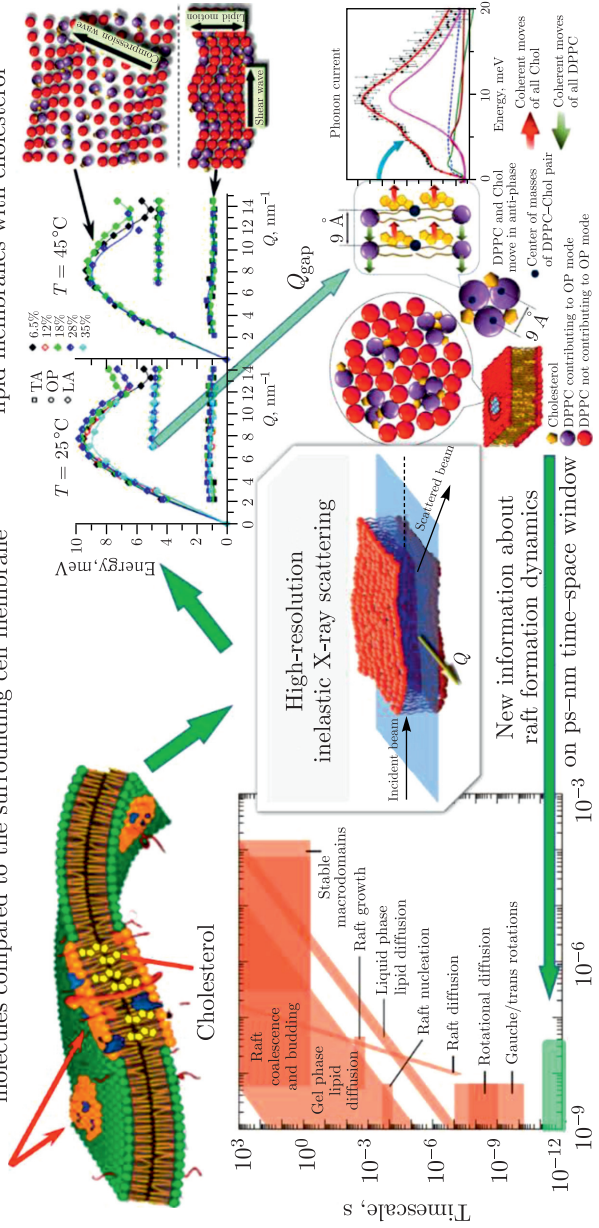
Важные механизмы регуляции процессов жизнедеятельности биологических клеток связаны со взаимодействием холестерина с липидными мембранами. Например, одним из наиболее серьезных хронических заболеваний, существенно влияющих на жизнедеятельность и продолжительность жизни человека, является атеросклероз, среди основных процессов развития которого можно выделить образование холестериновых бляшек на внутренних стенках сосудов.

Проведено исследование коллективной динамики липидных молекул с помощью метода неупругого рассеяния рентгеновского излучения с высоким разрешением по переданной энергии. Полученные дисперсионные кривые многокомпонентных мембран помимо известных акустических фононных мод содержат также новую оптическую фононную моду, связанную с существованием стабильных липидных пар, состоящих из двух разных типов липидных молекул. Наблюдаемый разрыв оптической фононной моды свидетельствует о конечном размере области существования оптических фононов. Такие области являются стабильными на пикосекундном масштабе времени, поскольку их размеры не зависят от компонентного состава мембраны. Это означает, что любой липидный рафт состоит из набора одинаковых липидных областей, число которых определяется термодинамическими параметрами мембраны. Данный результат является уникальным,



Lipid rafts — microdomains with highly ordered and tightly packed lipid molecules compared to the surrounding cell membrane

Dispersion curves of multicomponent lipid membranes with cholesterol



Схематическое изображение липидных доменов (рафтов) в мембранах, дисперсионные кривые липидных мембран, содержащих холестерин, схематическое изображение смещений структурных единиц для различных колебательных мод, иллюстрация масштабов длины и времени, соответствующих исследуемым эффектам коллективной динамики

поскольку дает представление о коллективной динамике липидных молекул на нанометровых масштабах длины и пикосекундных масштабах времени одновременно.

- *Soloviov D., Cai Y. Q., Bolmatov D., Suvorov A., Zhernenkov K., Zav'yalov D., Bosak A., Uchiyama H., Zhernenkov M.* Functional Lipid Pairs as Building Blocks of Phase-Separated Membranes // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2020. V. 117(9). P. 4749–4757.

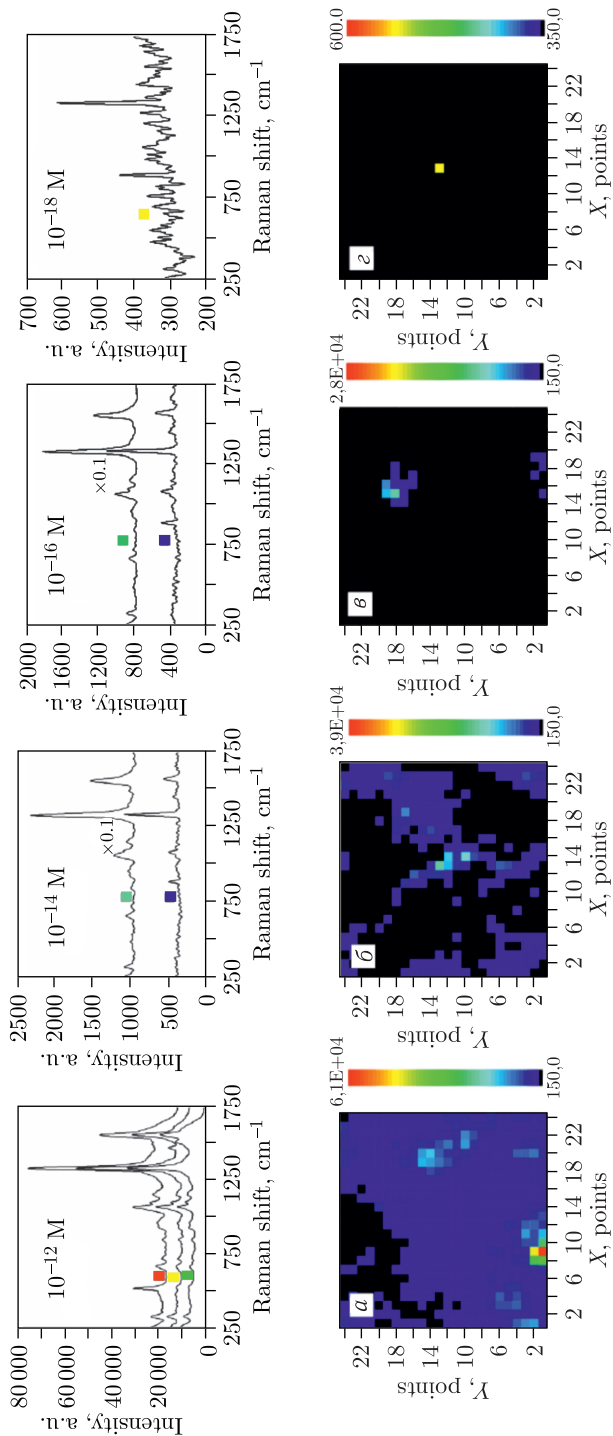
Достигнут высокочувствительный уровень регистрации спектра гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) и визуализации одиночной молекулы 5-тио-2-нитробензойной кислоты (ТНВ) из аттомолярно-концентрированного раствора 5,5'-дитиобис-[2-нитробензойной кислоты] (DTNB). В качестве ГКР-активных подложек использовались дендритные серебряные наноструктуры, на которые адсорбировались исследуемые молекулы из растворов различной концентрации.

Были зарегистрированы и обработаны ГКР-спектры и соответствующие им карты при концентрациях аналита в диапазоне от  $10^{-12}$  М до ультранизкой аттомолярной концентрации  $10^{-18}$  М (рис. 2 на с. 19), соответствующей одиночной молекуле.

- *Bandarenka H., Khinevich N., Zavatski S., Mamatkulov K., Vorobyeva M., Arzumanyan G.* 3D Silver Dendrites for Single-Molecule Imaging by Surface-Enhanced Raman Spectroscopy // ChemNanoMat. 2020; doi: 10.1002/cnma.202000521.

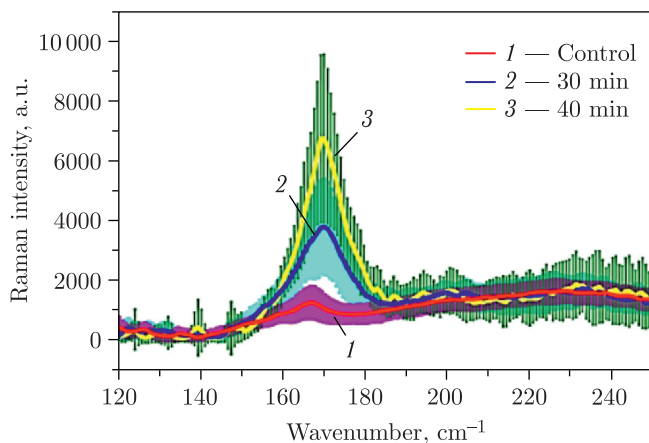
Исследование посвящено применению спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР) для распознавания нейтрофилов, трансформированных при нетозе. Известно, что в результате нетоза возникают так называемые *нейтрофильные внеклеточные ловушки* (НВЛ), которые представляют собой комплексы ДНК с нейтрофильными белками, трансформированными в процессе нетоза. Целью работы был поиск возможных спектральных маркеров в спектрах комбинационного рассеяния нейтрофилов, вызванных именно нетотическим преобразованием нейтрофилов.

На начальной стадии формирования сетей-ловушек антимикробные элементы в гранулах нейтрофильной клетки под действием специальных ферментов цитруллинируются, что указывает на начало процесса активации нетоза. Высокочувствительная рамановская спектроскопия позволила выявить в низкочастотном диапазоне спектра эволюцию (рост) пика цитруллина в течение 30–40 мин после начала воспалительного процесса, что можно классифицировать как раннюю диагностику нетоза.



Спектры ГРР (верхний ряд) и соответствующие им ГРР-карты (нижний ряд) для концентраций DTNB: а)  $10^{-12}$  M, б)  $10^{-14}$  M, в)  $10^{-16}$  M, г)  $10^{-18}$  M

Citrulline line evolution during neutrophil transformation

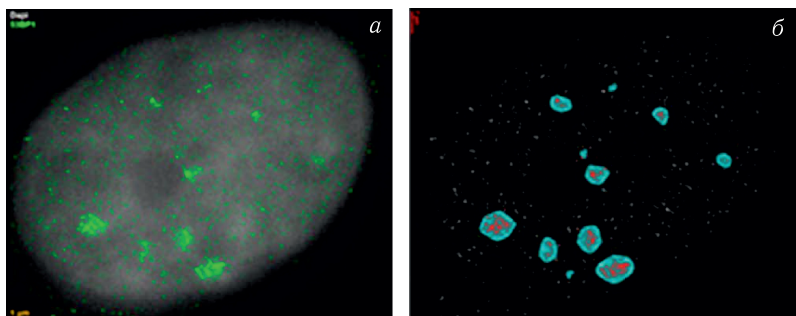


Низкочастотная область спектра комбинационного рассеяния нейтрофилов: эволюция (рост) интенсивности линии цитруллина, указывающая на преактивацию нетоза

- *Arzumanyan G., Mamatkulov K., Volkov A., Vereschagin K. et al. // J. Raman Spectroscopy. 2020. V. 1. P. 10; <https://doi.org/10.1002/jrs.5844>.*

## РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В сотрудничестве с чешскими и немецкими коллегами разработан новый метод анализа тонкой структуры кластерных повреждений ДНК со сверхвысоким разрешением. Он основан на



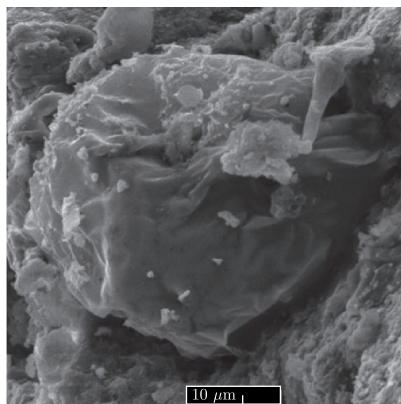
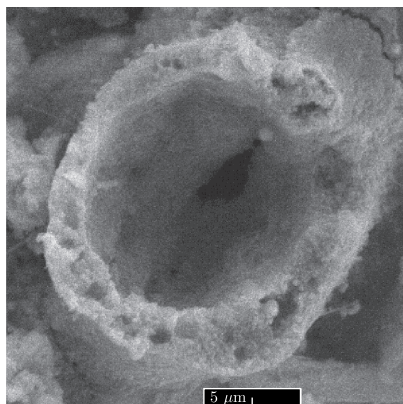
Визуализация структуры кластеров репарационных белков 53BP1 в ядрах клеток глиобластомы человека U87 через 24 ч после облучения ускоренными ионами  $^{15}\text{N}$  (энергия 13 МэВ/нуклон, доза 1,3 Гр):

а) изображения в микроскопе, б) программная постобработка

микроскопии локализации одиночных молекул. С применением данного метода изучена структура кластерных двунитевых разрывов ДНК, а также проведено сравнительное исследование кинетики их репарации в нормальных (фибробласты) и опухолевых (глиобластома U87) клетках человека при действии ускоренных многозарядных ионов азота  $^{15}\text{N}$ . Предложенный подход позволяет получить новые сведения о природе радиорезистентности ряда опухолей.

- Hausmann M., Neitzel C., Bobkova E., Nagel D., Hofmann A., Chramko T., Smirnova E., Kopečná O., Pagáčová E., Boreyko A., Krasavin E., Falkova I., Heermann D. W., Pilarczyk G., Hildenbrand G., Bestvater F., Falk M. Single Molecule Localization Microscopy Analyses of DNA-Repair Foci and Clusters Detected along Particle Damage Tracks // *Front. Phys.* 2020. V. 8. P. 578662; doi: 10.3389/fphy.2020.578662.

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., Каралов М. И., Сапрыкин Е. А., Афанасьева А. Н. Метеорит Оргей (атлас микрофосилий) / Отв. ред. А. Ю. Розанов. М.: ПИН РАН, 2020 (на русском и английском языках).
- 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.

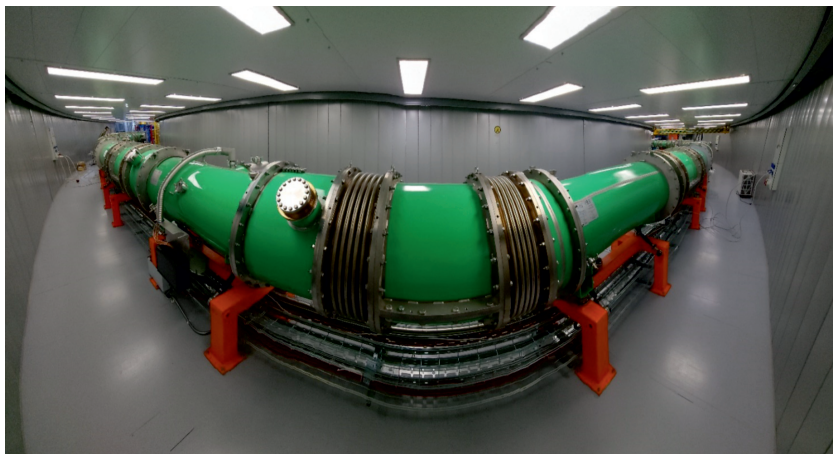
## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

20 ноября 2020 г. Председатель Правительства РФ произвел технологический пуск одного из основных блоков мегасайенс-проекта «Комплекс NICA» — сверхпроводящего бустерного синхротрона (бустера).

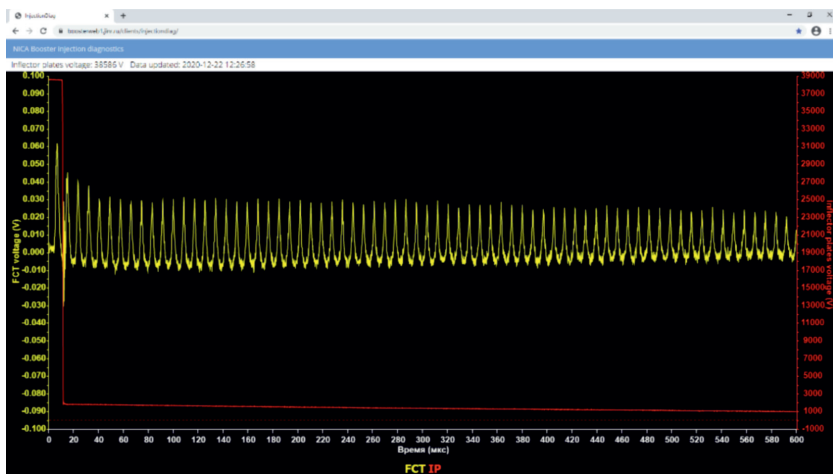
Этому событию предшествовала длительная и напряженная работа по созданию и вводу в эксплуатацию всех объектов инжекционного комплекса проекта, включая источники поляризованных, легких и тяжелых ионов и линейный ускоритель тяжелых ионов, — основы для получения требуемых пучков и их ввода в бустер. Были также изготовлены сверхпроводящие структурные магниты бустера, смонтированы и протестированы встроенные системы кольца бустера: высокочастотная ускоряющая система, система электронного охлаждения циркулирующего пучка, устройства ввода и вывода пучков. Изготовлена циклозадающая аппаратура бустера, аппаратура диагностики и термометрии, системы питания, детектирования переходов и защиты магнитно-криостатной системы.

Технологический сеанс начался с захолаживания магнитно-криостатной системы и комплексной проверки систем блокировок и защит от потери сверхпроводимости, настройки цикла магнитного поля и ускоряющей системы.

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, 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 систе-



Бустер для исследовательского комплекса NICA



Первый пик на желтой диаграмме — это ток пучка, который инжектируется в кольцо, все еще находясь в системе инжекции, до срабатывания электрического кикера (красная линия). Отношение первого пика ко второму свидетельствует о небольших потерях при инжекции

мы коррекции ведущего магнитного поля. Настройка режима ускорения пучка — завершающий шаг к физическому пуску бустера.

Достигнутый яркий результат — это завершение многолетнего этапа слаженной работы коллектива физиков-ускорительщиков и инженеров ОИЯИ в сотрудничестве с партнерами из ИЯФ

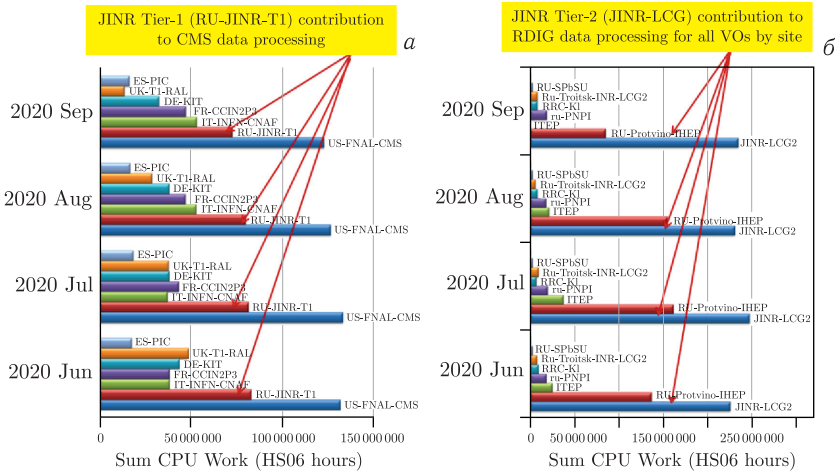
СО РАН, ИЯИ РАН, ИТЭФ, ИФВЭ НИЦ КИ и многих других российских и зарубежных организаций.

- *Emelianenko V.N. et al.* Analysis of the Results of Magnetic Measurements of the Structural Elements of the Nuclotron Booster // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 4. P. 453–455.
- *Bazanov M. et al.* Light-Ion Linear Accelerator for the NICA Project // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 4. P. 481–487.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Грид-инфраструктура ОИЯИ представлена центром уровня Tier-1 для эксперимента CMS на ЛHC (ЦЕРН) и центром уровня Tier-2, который обеспечивает обработку данных экспериментов VM@N, MPD, ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, BES, BIOMED, COMPASS, NOVA, STAR, ILC и др.

Tier-1 ОИЯИ занимает 2-е место среди других центров Tier-1 для эксперимента CMS по обеспечению обмена данными со всеми мировыми сайтами, работающими на эксперимент CMS. В 2020 г. на Tier-1 передано 13,23 ПБ данных с более чем 180 грид-сайтов и скачано более 19 ПБ данных. На Tier-1 в ОИЯИ выполняются задачи моделирования для эксперимента MPD на NICA.



Распределение по нормированному времени загрузки CPU в HS06 часах за 2020 г. для Tier-1-сайтов для эксперимента CMS (а) и Tier-2-сайтов, входящих в консорциум RDIG (б)



Грид-сайты ОИЯИ — самые производительные в консорциуме RDIG (Российский грид для интенсивных операций с данными). Более 55 % от общего процессорного времени (CPU) в RDIG использовано для вычислений на Tier-1 и Tier-2 ОИЯИ.

- *Кореньков В. В.* Тенденции и перспективы развития распределенных вычислений и аналитики больших данных для поддержки проектов класса мегасайенс // ЯФ. 2020. Т. 83, № 6. С. 534–538.

С помощью промежуточного программного обеспечения Interware DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) были объединены вычислительные ресурсы Tier-1/Tier-2, 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 моделирования Монте-Карло данных экспериментов мегасайенс-проекта NICA.

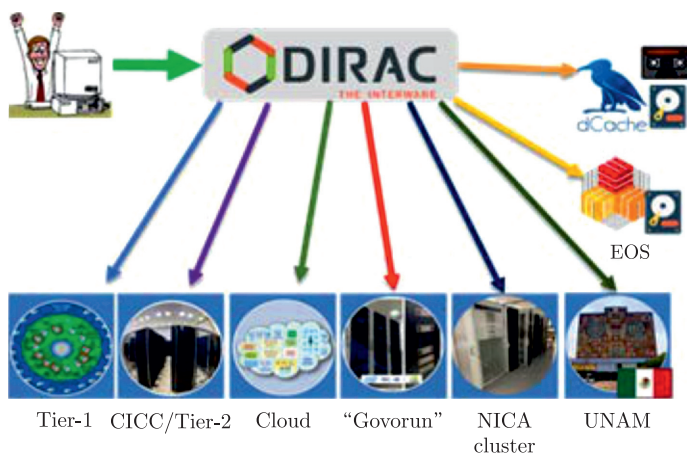


Схема интеграции географически-распределенных гетерогенных ресурсов на основе DIRAC Interware

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

Международной исследовательской группой в рамках сотрудничества ОИЯИ проведено кинематически полное экспери-

ментальное измерение характеристик комптоновского рассеяния на свободных атомах с помощью высокоэффективного метода ионной импульсной спектроскопии с холодной мишенью (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy, COLTRIMS). Теоретическое описание данного явления базируется на расчетах, проведенных на суперкомпьютере «Говорун».

- *Kircher M. et al.* Kinematically Complete Experimental Study of Compton Scattering at Helium Atoms Near the Threshold // *Nat. Phys.* 2020. V. 16. P. 756–760.

На базе платформы HUBriLIT для совместного проекта Лаборатории информационных технологий и Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ по созданию информационной системы (ИС) для анализа поведенческих и патоморфологических изменений в центральной нервной системе при исследовании воздействия ионизирующего излучения и других факторов на биологические объекты реализованы клиентская и серверная части веб-сервиса <https://bio.jinr.ru/> (единое хранилище всех экспериментальных данных), получены первые результаты улучшенного отслеживания экспериментального животного на арене тестовой установки, разработаны два способа разметки данных для апробации вариантов обучения искусственной нейронной сети. Разрабатываемая ИС базируется на методах машинного и глубокого обучения и нейросетевых подходах.

- *Kolesnikova I. et al.* Information System for Radiobiological Research // *CEUR Workshop Proc.* 2020. V. 2743. P. 1–10.
- *Bulatov A., Stadnik A., Streltsova O.* Computer Vision Algorithms for Studying the Influence of Various Factors on Biological Objects // *CEUR Workshop Proc.* 2020. V. 2743. P. 36–44.

Разработан и введен в эксплуатацию рабочий прототип геометрической базы данных (Geometry Database) для эксперимента VM@N проекта NICA, которая обеспечивает централизованное хранение геометрии VM@N, предоставление удобных средств для управления данными о геометрических модулях, сборке различных версий установки VM@N из модулей и дополнительных файлов. Разработанная информационная система включает в себя базу данных, интуитивный и компактный графический интерфейс, а также программный интерфейс в виде набора макросов. Применен опыт работы с Geometry Database для эксперимента СВМ, а улучшения графического интерфейса выполнены на основе требований пользователей VM@N.

- *Akishina E. et al.* Development of the Geometry Database for the BM@N Experiment of the NICA Project // Eur. Phys. J. Web Conf. 2020. V. 226. P. 03003–03007.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Учебный процесс и практика студентов на базовых кафедрах МГУ, МФТИ, МИФИ, государственного университета «Дубна» и университетов государств-членов ОИЯИ в 2020 г. были организованы в дистанционном режиме в целях предотвращения распространения коронавирусной инфекции COVID-19.

С сентября 2020 г. в УНЦ ОИЯИ запущена новая круглогодичная программа INTEREST (INTErnational REmote Student Training). Она позволяет студентам познакомиться с основными направлениями исследований Института, найти научного руководителя для квалификационной работы, а также в дальнейшем участвовать в очных стажировках в ОИЯИ. На каждый этап программы отводилось 4–6 недель для дистанционного выполнения проектов, предложенных сотрудниками Института, а также для лекций и экскурсий в онлайн-режиме. Участниками 1-го этапа стали 24 студента из Египта, Индии, Кубы, Польши, России, Румынии, Узбекистана, Франции и Чехии. 26 студентов из Белоруссии, Бразилии, Великобритании, Египта, Индии, Китая, Мексики, Польши, России, Румынии, Узбекистана и Украины приняли участие во 2-м этапе программы.

В онлайн-работе 5-й летней школы «Физика. Математика. Информатика» участвовали 63 школьника из Волгограда, Екатеринбурга, Краснодара, Нижнего Новгорода, Нижнего Тагила, Пензы, Уфы и еще 20 городов России. 32-я Международная (межрегиональная) компьютерная школа также работала дистанционно с участием 23 школьников из Дмитрова, Долгопрудного, Дубны и Москвы. При поддержке ОИЯИ в Дубне успешно работает Яндекс.Лицей.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении всероссийского фестиваля НАУКА 0+ в Москве и Саратове, форумов «Старт карьеры: осень» в НИЯУ МИФИ и «День карьеры МФТИ», образовательной олимпиады нового формата для студентов разных специальностей «Я — профессионал», 2-й Российско-германской научно-образовательной виртуальной выставки, организованной в рамках Российско-германского года научно-образовательных партнерств 2018–2020 гг. Сотрудники УНЦ организовали онлайн-встречу и видеоэкскурсию для участников

летней образовательной школы Governor's School for the Sciences & Engineering (GSSE) Университета Теннесси (США).

## **ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 20.12.2019 по 16.12.2020)**

- Книги — 13

Mosses as Biomonitors of Air Pollution: 2015/2016 Survey on Heavy Metals, Nitrogen and POPs in Europe and Beyond: Report of the ICP Vegetation / M. Frontasyeva, H. Harmens, A. Uzhinskiy, O. Chaligava, Yu. Aleksiyayenak, P. Jancik, P. Nekhoroshkov, D. Abdusamadzoda, M. Trinh, K. Vergel, N. Yushin, O. Culicov, I. Zinicovscaia, M. Shvetsova, S. Gundorina, T. Ostrovnyaya, [et al.]. — Dubna: JINR, 2020. — 136 p.: ill. — (JINR; 2020-11). — Bibliogr: end of papers.

Search for the Muon Charged Lepton Flavor Violation Processes at DLNP / Comp.: Yu. Budagov, V. Glagolev, Y. Davydov, P. Evtukhovich, N. Kuchinsky, N. Khomutov, I. Titkova, Z. Tsamalaidze. — Dubna: JINR, 2019. — 113 p.: ill. — (JINR; 2019-54). — Bibliogr.: p. 99–113.

The Silicon Tracking System as Part of the Hybrid Tracker of the BM@N Experiment: Technical Design Report / A. V. Baranov, D. Dementev, V. Elsha, P. I. Kharlamov, A. Kolzhvari, T. Lygdenova, M. M. Merkin, Yu. Murin, M. Protsenko, A. Sheremetev, A. Sheremeteva, N. Sukhov, M. Shitenkov, A. Voronin, A. Zinchenko, [et al.]; Eds.: D. Dementev, P. Senger. — Dubna: JINR, 2020. — 101 p.: ill. — (JINR; 2020-23). — Bibliogr.: end of papers.

Вадим Васильевич Волков: Воин. Гражданин. Ученый / Под общ. ред. Ю. Ц. Оганесяна, С. Н. Дмитриева; Ред.-сост.: Е. М. Молчанов. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 128 с.: ил.

«Дубна, мечта моя...» / Сост.: Л. Н. Орелович. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 79 с.: цв. ил.

Дубна шахматная / В. Г. Березин, С. Вокал, С. И. Кукарников, А. В. Слесаренко; Ред.: Б. М. Старченко. — Дубна: ОИЯИ, 2019. — 120 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2019-45).

Очерки по современной физике частиц / Общ. ред.: В. А. Матвеев, И. А. Голутвин; Ред.-сост.: Г. А. Козлов. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 335 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2018-50). — Библиогр. в конце статей.

Ф. Л. Шапиро: ученый и человек: книга воспоминаний / Сост.: Л. Б. Пикельнер, А. В. Стрелков. — 2-е изд. — Дубна: ОИЯИ, 2019. — 220[35] с.: ил.

*Аксенов В. Л., Тропин Т. В.* Лекции по теории конденсированного состояния: Учеб. пособие. — М.: Физ. фак. МГУ, 2020. — 442 с.: ил. — Библиогр.: с. 438–440.

*Блохинцев Д. И.* Основы квантовой механики: Учеб. пособие. — Изд. стер. — М.: URSS, 2019. — 664 с.: ил. — (Физико-математическое наследие: физика (квантовая механика)).

*Перепелкин Е. Е., Садовников Б. И., Иноземцева Н. Г.* Вычисления на графических процессорах (GPU) в задачах математической и теоретической физики. — Изд. 3-е. — М.: URSS, 2019. — 235 с.: ил. — (Классический учебник МГУ). — Библиогр.: с. 235.

*Швидкий С.* Большое в малом, миг — как вечность... — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 91 с.

*Шитов Ю. А., Бруданин В. Б., Фомина М. В.* Удивительные превращения нейтрино. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 30 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2020-21).

- Журнальные статьи — 1106
- Публикации в трудах конференций — 285
- Препринты — 21
- Авторефераты диссертаций — 10
- Всего: 1435