



**КРАТКИЙ ОБЗОР
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В 2022 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS
OBTAINED IN 2022
AT THE JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH**



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2022-65

**КРАТКИЙ ОБЗОР
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В 2022 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS
OBTAINED IN 2022
AT THE JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH**

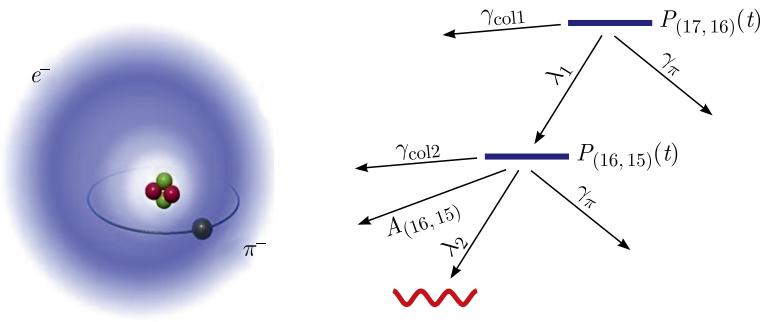
Дубна 2023

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика	3
Экспериментальная физика	6
Физика частиц	6
Физика тяжелых ионов низких энергий	12
Нейтронная ядерная физика	14
Физика конденсированных сред	15
Радиационные и радиобиологические исследования	18
Ускорительная тематика	23
Информационные технологии и вычислительная физика	24
Образовательная деятельность	27
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ	28
Theoretical Physics	30
Experimental Physics	33
Particle Physics	33
Low-Energy Heavy-Ion Physics	39
Neutron Nuclear Physics	41
Condensed Matter Physics	42
Radiation and Radiobiological Research	45
Accelerator Topics	49
Information Technology and Computer Physics	50
Educational Activities	53
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members	55

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

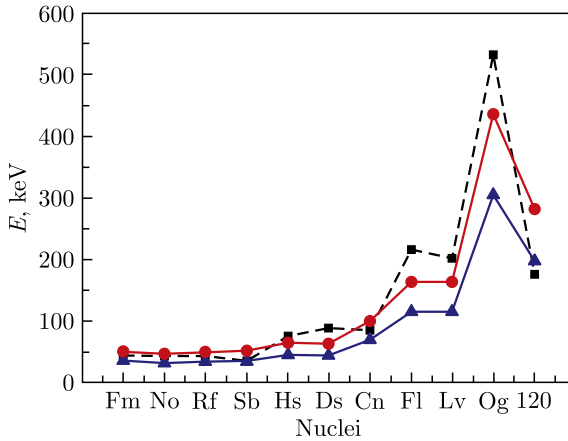
Рассчитана частота перехода $(n, l) = (17, 16) \rightarrow (16, 15)$ в пионном гелии-4 с точностью до 4 ppb (частей на миллиард), включая релятивистские и квантово-электродинамические поправки до $O(R_\infty \alpha^5)$. Новые расчеты значительно улучшают предыдущие теоретические результаты (*Hori M., Soter A., Korobov V.I. // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 042515*). Оценено влияние столкновений пионного гелия с атомами мишени на сдвиг и уширение частоты перехода. Если экспериментальные измерения достигнут уровня ~ 1 ppb, то точность определения массы пиона будет улучшена на 2–3 порядка. Столь точное значение m_π может наложить прямые экспериментальные ограничения на массу антинейтрино мюонного аромата.



Пионный гелий и диаграмма двухфотонного эксперимента по прецизионному измерению частоты перехода $(17, 16) \rightarrow (16, 15)$

- *Zhi-Da Bai, Korobov V.I., Zong-Chao Yan, Ting-Yun Shi, Zhen-Xiang Zhong // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 183001.*

На основе геометрической коллективной модели и квази-частично-фононной модели выведен микроскопический вариант феноменологического соотношения Гродзинса. Это соотношение применено для предсказания энергии возбуждения первых 2^+ состояний в ядрах с зарядом $Z \geq 100$ с целью анализа спектров α -распада. Обнаружено, что в начале цепочки изучаемых ядер при $Z = 100-110$, где квадрупольная деформация высока, энергия возбуждения первых 2^+ состояний не превышает 100 кэВ, т.е. соответствует вращательным состояниям. Затем

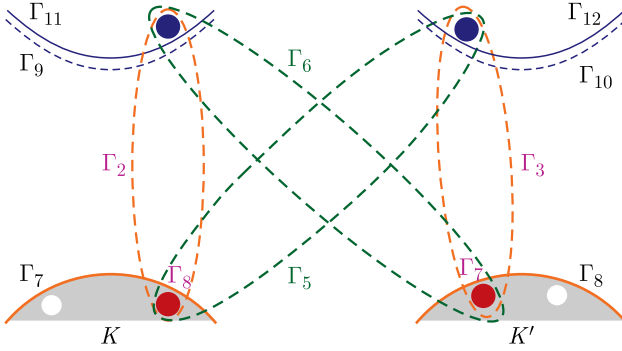


Предсказанные энергии состояний 2_1^+ для указанных ядер. Расчеты выполняются с использованием микроскопической модели (штриховая линия) и феноменологических соотношений (красная и синяя линии), которые позволяют оценить минимальные и максимально возможные значения ($E(2_1^+)_{\max}$ и $E(2_1^+)_{\min}$)

с уменьшением деформации $E(2_1^+)$ резко возрастает и достигает максимального значения в ^{284}Fl или в ^{292}Og , т. е. в ядрах с минимальными значениями β_2 .

- *Shirikova N. Yu., Sushkov A. V., Malov L. A., Kolganova E. A., Jolos R. V. // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 024309.*

Сформулирована модель, позволившая описать взаимодействия экситонов в однослойных дихалькогенидах переходных металлов (ОДПМ) с учетом как внутримолекулярных, так и межмолекулярных экситонов. Обнаружено, что корректный учет дуплетных корреляций между фермиевскими носителями заряда, составляющими два экситона, и симметрии взаимодействующих экситонов оказывает определяющее влияние на характер экситон-экситонного взаимодействия: оно является в общем отталкивающим, за исключением случая экситонов из разных долин, которые притягиваются и образуют межмолекулярный биэкситон. Тем самым выявлена физическая природа биэкситона в ОДПМ и впервые объяснен экспериментально наблюдаемый широкий разброс значений энергии биэкситона в различных ОДПМ, в том числе при их инкапсуляции. Полученные результаты представляют очевидный практический интерес для развития полупроводниковых нанотехнологий, прежде всего в оптоэлектронике.



Зонная структура однослойных дихалькогенидов вольфрама в окрестности долин K и K' и связанные с ними экситоны

- *Hoang Ngoc Cam, Nguyen Thanh Phuc, Osipov V. A. //npj 2D Mater. Appl. 2022. V. 6. P. 22.*

В последние годы произошел резкий рост интереса к калибровочным теориям высших спинов и их суперсимметричным расширениям как обеспечивающим связь между теорией суперструн и низкоэнергетическими теориями поля. Для исследования этого сложного и актуального круга вопросов в случае 4D, $N = 2$ суперсимметрии использован подход гармонического суперпространства. Рассматривается важная проблема построения взаимодействий калибровочных суперполей высших спинов с суперполями $N = 2$ материи. Впервые явно построены кубичные вершины взаимодействия калибровочных суперполей высших спинов с гипермультиплетом вне массовой поверхности. Этот результат открывает новые многообещающие перспективы применения метода гармонических суперпространств в теории высших спинов.

Минимальное взаимодействие $N = 2$ теории Янга–Миллса с суперполями гипермультиплета:

$$S_{N=2\text{SYM}} \sim \text{Tr} \int d^{(-4)}\zeta q^{+a} (D^{++} + gV^{++A}T^A) q_a^+,$$

где T^A — генераторы калибровочной группы.

Минимальное взаимодействие $N = 2$ высших спинов и гипермультиплетов:

$$S_{N=2\text{higher spins}} \sim \int d^{(-4)}\zeta q^{+a} (D^{++} + g_s \widehat{\mathcal{H}}_{(s)}^{++}) q_a^+,$$

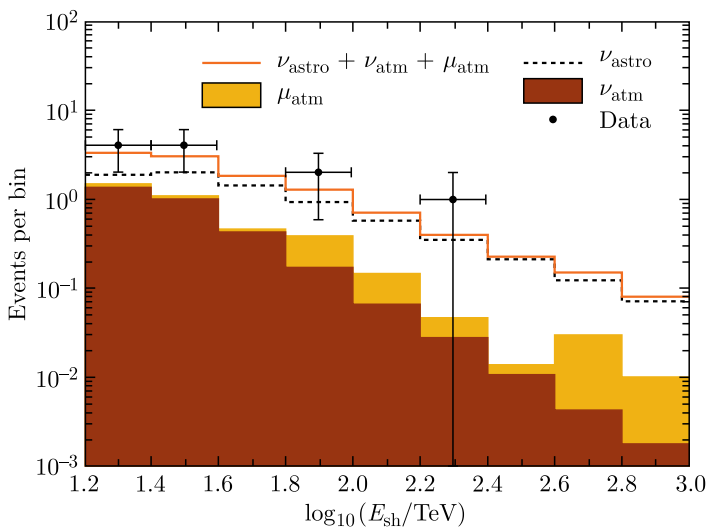
где $\hat{\mathcal{H}}_{(s)}^{++}$ — матрично-дифференциальные операторы ранга $s - 1$, s — высший спин данного калибровочного супермультиплета.

- *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Zaigraev N. M. // ЖЭФ. 2022. V. 05. P. 104.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

Физика частиц

С вводом в апреле 2022 г. двух новых кластеров рабочий объем байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD достиг значения $\approx 0,5 \text{ км}^3$ в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Детектор содержит в своем составе 10 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (2916 оптических модулей) и является крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария.



Распределения по энергии экспериментальных и теоретически ожидаемых событий в рамках анализа каскадных событий из-под горизонта: экспериментальные события — черные точки; распределение событий, ожидаемое от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, — штриховая гистограмма; фоновые события от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино — желтая и коричневая закрашенные области; суммарное число ожидаемых сигнальных и фоновых событий — оранжевая гистограмма

При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2021 гг., были выделены 11 каскадных событий с энергией свыше 15 ТэВ, инициированных нейтрино астрофизической природы, что на уровне достоверности 3σ подтверждает результаты первого наблюдения потока астрофизических нейтрино высоких энергий на антарктическом детекторе IceCube.

- *Allakhverdyan V. A. et al. (Baikal-GVD Collab.). Diffuse Neutrino Flux Measurements with the Baikal-GVD Neutrino Telescope. e-Print:2211.09447 [astro-ph.HE]; Phys. Rev. D. 2022 (направлено).*

Эксперимент ν GeN направлен на изучение свойств нейтрино с помощью энергетического реактора Калининской АЭС, что позволяет оперировать гигантским потоком антинейтрино $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Сравнение первых данных при работающем и остановленном реакторе не выявило признаков ожидаемого сигнала от когерентного рассеяния нейтрино, что позволило поставить ограничение на параметр квенчинга $k < 0,26$ (90 % С. Л.). Продолжается набор данных.

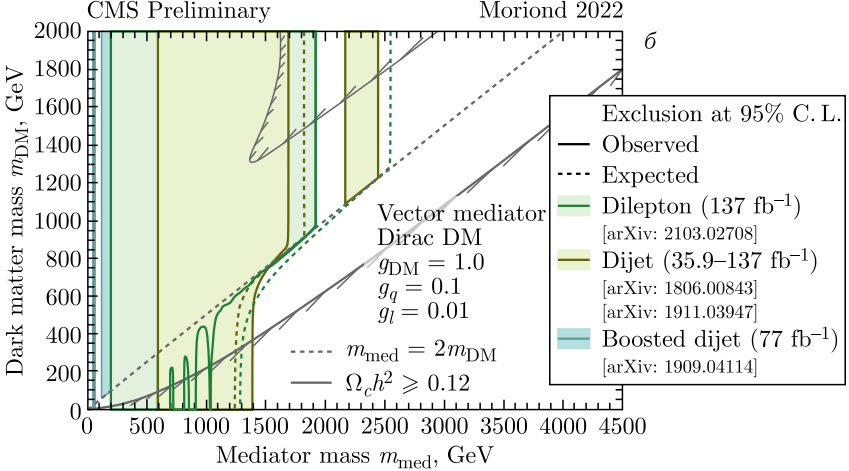
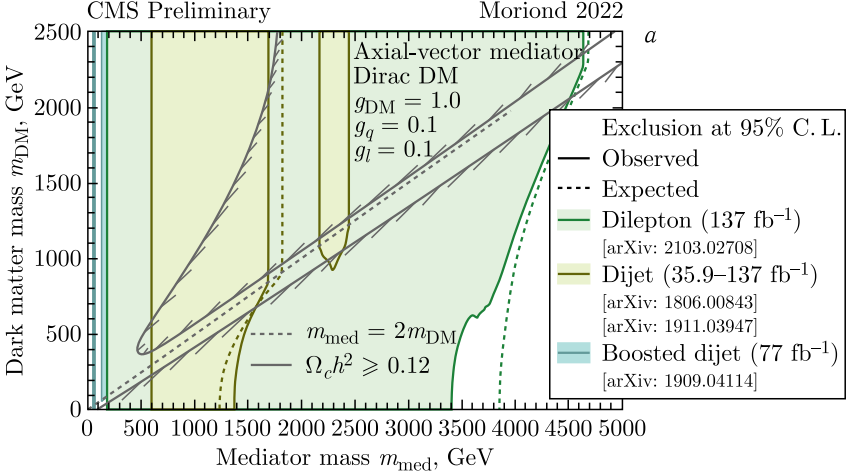
- *Alekseev I. et al. // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. P. L051101.*

В проекте ATLAS (ЦЕРН) сотрудники ОИЯИ принимали участие в поиске потенциальных *cccc*-тетракварков, распадающихся на пару чармониевых состояний в четырехмюонном конечном состоянии, с использованием данных, полученных при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ *pp*-столкновений, соответствующих интегральной светимости 139 фб^{-1} . Были обнаружены статистически значимые превышения сигнала над фоном в канале с двумя J/ψ -мезонами, согласующимся с узким резонансом при 6,9 ГэВ и более широкой структурой при более низких массах. Кроме того, обнаружено статистически значимое превышение сигнала над фоном в канале с $J/\psi + \psi(2S)$ -мезонами. Оценены соответствующие массы и ширины распадов.

- *Eletsikh I. et al. ATLAS Results on Exotic Hadronic Resonances // Proc. of the 11th Intern. Conf. on New Frontiers in Physics (ICNFP2022), OAC, Kolymbari, Crete, Greece, 30 Aug. – 11 Sept. 2022. ATLAS-CONF-2022-040.*

Физиками ОИЯИ в эксперименте CMS (ЦЕРН) проведен анализ данных сеанса ЛHC, проходившего в 2015–2018 гг. на встречных пучках протонов при энергии 13 ТэВ. В объединен-

ном канале рождения пары струй и пары лептонов установлены пределы (на уровне статистической достоверности 95 % C.L.) на массы частиц-кандидатов на роль частиц темной материи (ТМ) m_{DM} и частицы-переносчика взаимодействия с темным сектором m_{med} (см. рисунок). Рассмотрен случай упрощенного



Пределы (95 % C.L.) на массы частиц-кандидатов на роль частиц темной материи m_{DM} и частицы-переносчика взаимодействия с темным сектором m_{med} . Закрашенная область соответствует закрытым значениям масс для псевдовекторного (а) и векторного (б) переносчика. Результаты получены из данных Run-2 в объединенном канале рождения пары струй и пары лептонов

сценария ТМ с одной дираковской частицей ТМ ($g_{DM} = 1,0$) для псевдовекторного и векторного переносчиков в сценариях лептофильных ($g_q = g_l = 0,1$) и лептофобных ($g_q = 0,1$ и $g_l = 0,01$) констант связи соответственно.

Полностью выполнены запланированные на 2022 г. работы по модернизации и проверке работоспособности детекторов CMS, в частности, по созданию калориметра высокой гранулярности (HGCAL) и модернизации передней мюонной станции ME1/1.

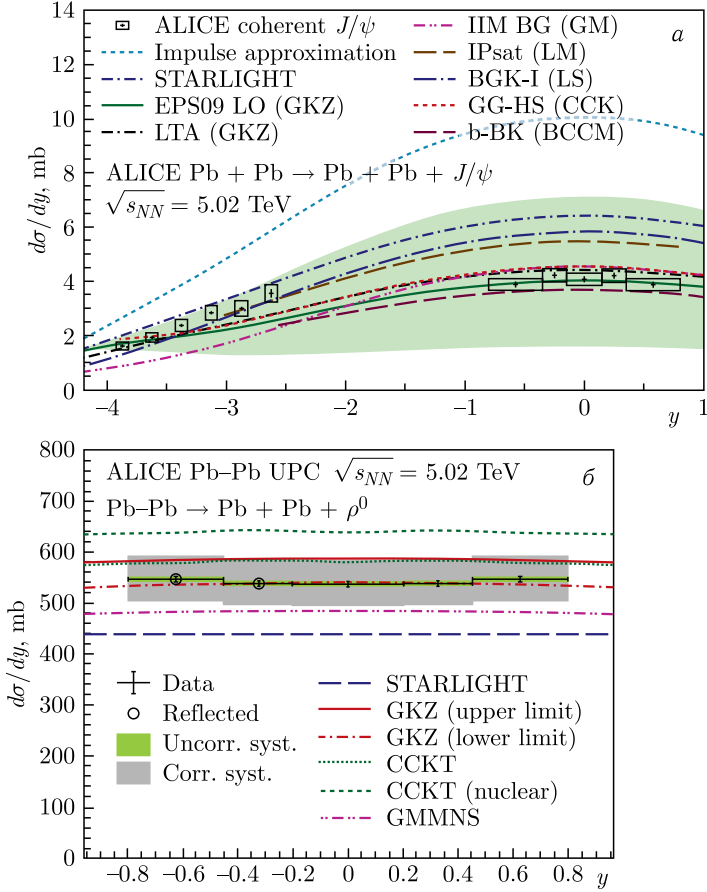
- CMS Exotica Summary plots for 13 TeV data — Moriond 2022; https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/SummaryPlotsEXO13TeV#DM_summary_plots

В эксперименте ALICE на LHC (ЦЕРН) сотрудники ОИЯИ инициировали изучение процессов фоторождения векторных мезонов в Pb–Pb- и Xe–Xe-взаимодействиях при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ и 5,44 ТэВ соответственно и впервые измерили сечения фоторождения J/ψ - и ρ^0 -мезонов. В среде GRID было проанализировано несколько миллиардов так называемых ультрапериферических столкновений ядер Pb и Xe, в которых прицельный параметр сталкивающихся ядер больше суммы их радиусов, т.е. взаимодействия нуклонов отсутствуют, а регистрируемые экспериментальной установкой частицы являются результатом взаимодействия фотонов с ядрами.

Сравнение результатов с теоретическими вычислениями показало, что модели, включающие умеренное экранирование глюонов в ядрах Pb, приемлемо согласуются с экспериментальными данными. Вычисления, проведенные без учета экранирования глюонов, равно как и модели с сильным экранированием, кардинально расходятся с данными.

Сечения когерентного рождения ρ^0 -мезонов в ультрапериферических Pb–Pb-взаимодействиях сравнивались с сечениями, полученными в моделях, основанных на различных подходах. Наилучшее согласие получено с модифицированной моделью векторной доминантности Грибова–Глаубера с учетом эффекта ядерного экранирования. Впервые измерения проведены для различных классов событий, разделенных по признаку наличия электромагнитной диссоциации ядер, сопровождающей рождение мезонов.

- ALICE Collab. Coherent J/ψ Photoproduction at Forward Rapidity in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 798. P. 134926.



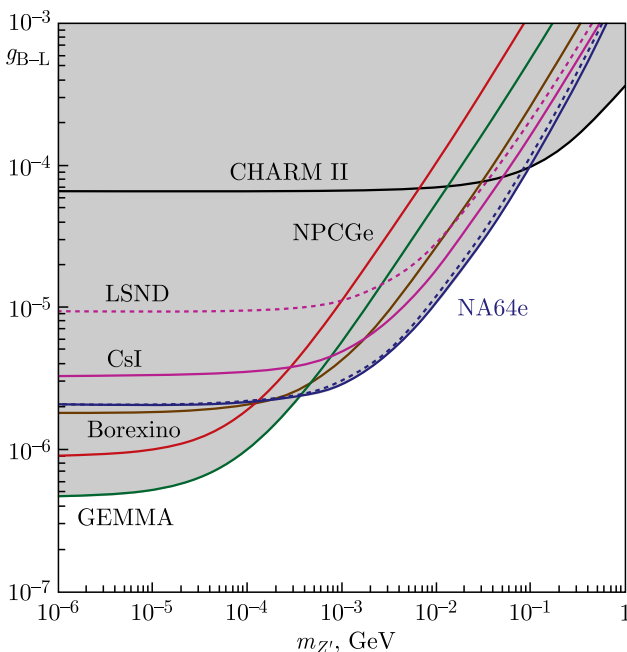
Поведение сечения когерентного фоторождения J/ψ - (а) и ρ^0 -мезона (б) в зависимости от быстроты и расчеты по различным моделям

- *ALICE Collab.* Coherent Photoproduction of ρ^0 Vector Mesons in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // JHEP. 2020. V.06. P.035.
- *ALICE Collab.* First Measurement of Coherent ρ^0 Photoproduction in Ultra-Peripheral Xe–Xe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV // Phys. Lett. B. 2021. V. 820. P. 136481.

В 2022 г. группа ОИЯИ в эксперименте NA64 (ЦЕРН) участвовала в проведении двух сеансов набора данных на ускорителе SPS с пучком мюонов с энергией 160 ГэВ и электронов с энергией 100 ГэВ. При анализе ранее зарегистрированных кол-

лаборацией данных продолжался поиск легкой темной материи и ее медиатора — темного фотона. На статистике $3,4 \cdot 10^{11}$ еот был впервые проведен поиск легкого Z' -бозона, возникающего в моделях расширения Стандартной модели, связанных с нарушением барион-лептонной симметрии. За генерацию Z' отвечает механизм темного тормозного излучения в реакции рассеяния 100-ГэВ электронов на ядерной мишени $eZ \rightarrow eZZ'$. Результат проведенного анализа на 90%-м уровне достоверности исключил данный механизм образования Z' -бозона в диапазоне масс от 1 кэВ до 1 ГэВ, существенно дополнив ранее имеющиеся ограничения, полученные в серии нейтринных экспериментов (рисунок).

- *Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.). Search for a New B–L Z' Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129, No. 16. P. 161801; e-Print: 2207.09979 [hep-ex].*



Результат NA64 по исключению на 90%-м уровне достоверности области существования Z' в модели нарушения B–L симметрии в зависимости от константы связи g_{B-L} и массы $m_{Z'}$. В сравнении с результатами нейтринных экспериментов TEXONO, GEMMA (реактор), Borexino (солнечные нейтрино), LSND и CHARM II (ускорительные эксперименты)

Новые результаты измерения осцилляций нейтрино были получены в эксперименте NOvA (США) с использованием усовершенствованных методов анализа данных и моделирования. Интерпретация этих результатов в рамках модели с тремя типами нейтрино лучше всего согласуется с нормальным порядком нейтринных масс и верхним октантом угла смешивания θ_{23} . Данные плохо соответствуют комбинациям параметров осцилляций, приводящих к большой асимметрии между электронными нейтрино и антинейтрино. Сюда входят значения фазы, нарушающей симметрию зарядовой четности (CP) вблизи $\delta_{CP} = \pi/2$, которые исключаются на уровне $> 3\sigma$ при обратном порядке нейтринных масс и $> 2\sigma$ для значения вблизи $\delta_{CP} = 3\pi/2$ при нормальном порядке.

- *Acero M. A. et al. (NOvA Collab.). Improved Measurement of Neutrino Oscillation Parameters by the NOvA Experiment // Phys. Rev. D. 2022. V. 106, No. 3. P. 032004.*

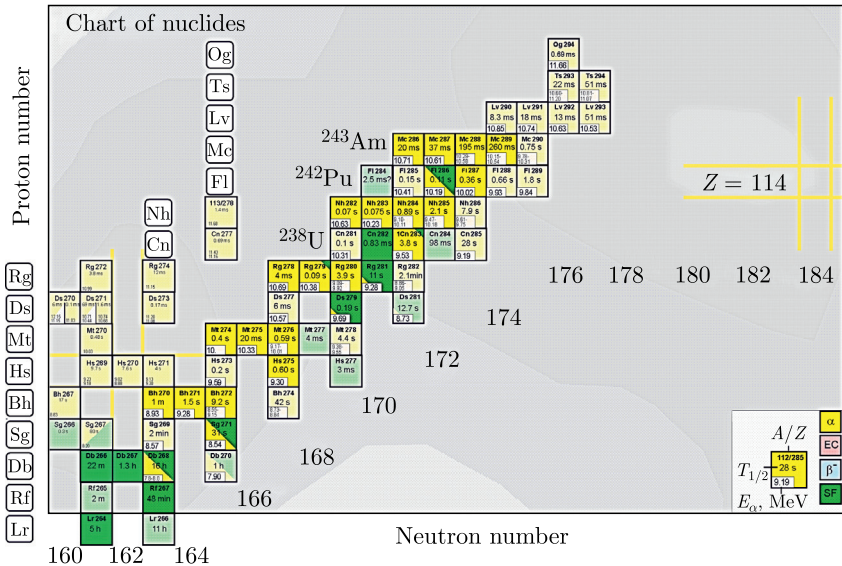
Малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр (МПЛИ), разработанный сотрудниками ОИЯИ, зарекомендовал себя как высокоточный надежный прибор для регистрации угловых колебаний поверхности Земли. Достигнутая инструментальная точность составляет 10^{-9} рад.

В течение 2022 г. собраны шесть МПЛИ. Началось размещение МПЛИ в научных центрах России и за рубежом. Два экземпляра МПЛИ установлены в зале детектора МРД будущего коллайдера NICA. Проведен мониторинг угловых микросейсм от промышленных шумов и природных явлений. Наибольшие микросейсмы достигают амплитуд 4 мкрад. Разрабатываются возможные способы подавления промышленных помех для стабилизации фокусов пучков коллайдера — введение обратных связей в систему управления магнитооптикой коллайдера и/или использование пьезостакеров.

- *Будагов Ю. А. и др. Позиционно-чувствительная регистрация пятна одномодового лазерного луча с использованием метода делительных пластинок // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 6. С. 589–615.*

Физика тяжелых ионов низких энергий

На ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» продолжены эксперименты по синтезу и исследованию свойств сверхтяжелых элементов в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$, ^{238}U ,

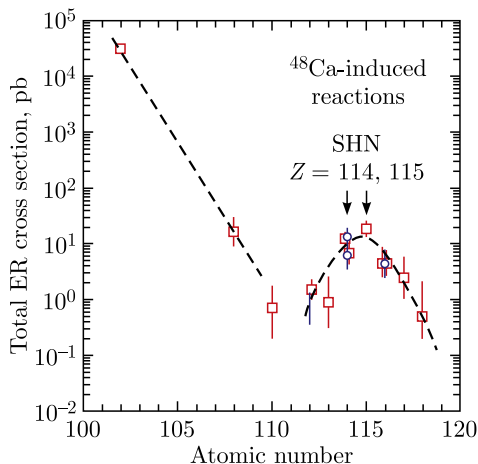


Сверхтяжелые ядра, полученные в реакции полного слияния $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, ^{242}Pu и ^{243}Am (отмечены более ярким цветом)

^{242}Pu и ^{243}Am . В результате наблюдалось рекордное для данного типа экспериментов число событий — 238 синтезированных атомов сверхтяжелых элементов. Были изучены свойства распада 33 изотопов тяжелейших элементов. Открыты 5 новых сверхтяжелых нуклидов: ^{287}Mc , ^{264}Lr , ^{276}Ds , ^{272}Hs и ^{268}Sg .

- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Ibadullayev D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. P. 024612.*
- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Kozirzhnykh N. D. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. P. L031301.*

На комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» впервые выполнен эксперимент по синтезу изотопов Ds (элемента 110) в реакции слияния $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$. Основная цель — проверка предсказываемой теорией для этой области ядер рекордно низкой стабильности относительно деления, а следовательно, и вероятности выживания возбужденного составного ядра. Синтез элемента 110 — важный этап в подготовке экспериментов по синтезу элемента 120, успех которого во многом зависит от величины барьера деления, определяющего выживаемость сверхтяжелого ядра. В результате были синтезированы шесть цепочек



Поведение сечения образования тяжелейших ядер в реакциях слияния ^{48}Ca с актинидами

распада нового изотопа, α -распад которого привел к открытию еще двух изотопов: ^{272}Hs и ^{268}Sg . Сечения реакции составили 70 фб и 0,7 пб.

- Материалы совещания по физике тяжелых ионов, Санкт-Петербург, Россия, 3–9 июля 2022 г.; <https://indico.jinr.ru/event/3105/>.

Нейтронная ядерная физика



Кийаф из некрополя «Волна 1»

Продолжаются разработка методики и применение нейтронного резонансного анализа с целью определения элементного состава образцов. Данный анализ определяет элементный и изотопный составы объектов неразрушающим образом и по всему объему образца, что делает его интересным и перспективным для исследований археологических объектов. Информация об элементном составе артефактов может помочь археологам выявить центры ремесла, уточнить датировку находок и их технологические схемы. Исследования были проведены в сотрудничестве с Институтом археологии РАН

Результаты измерений элементного состава киафа методом NRCA

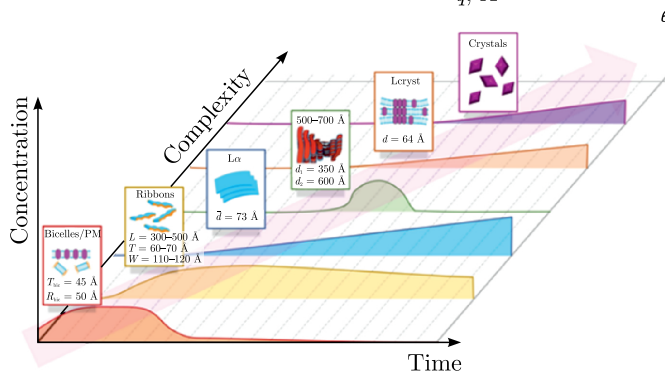
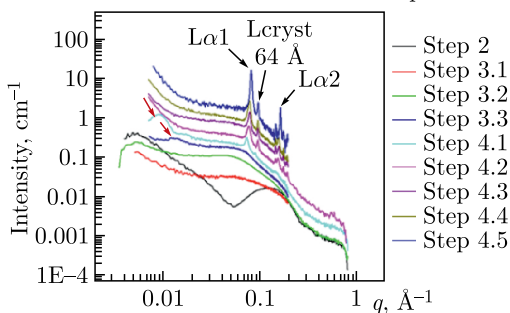
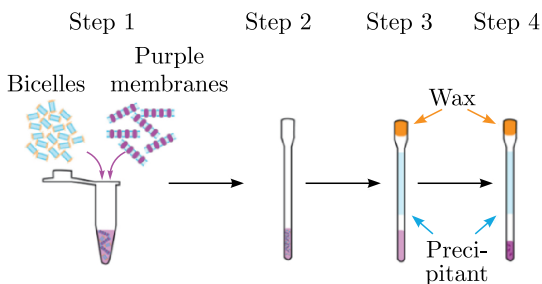
Элемент	Масса, г	Содержание, %
Cu	$59,7 \pm 3,9$	$68,8 \pm 4,5$
Sn	$5,29 \pm 0,23$	$6,10 \pm 0,26$
As	$0,1892 \pm 0,0081$	$0,2179 \pm 0,0094$
Ag	$0,0131 \pm 0,0014$	$0,0151 \pm 0,0016$

на импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН ОИЯИ для киафа из некрополя «Волна 1» на Таманском полуострове (VI–IV вв. до н. э.).

- *Simbirtseva N. V., Sedyshev P. V., Mazhen S., Yergashov A., Dmitriev A. Yu., Saprykina I. A., Mimokhod R. A.* Non-Destructive Investigation of the Kyathos (6th–4th centuries BCE) from the Necropolis Volna 1 on the Taman Peninsula by Neutron Resonance Capture and X-Ray Fluorescence Analysis // *Acta IMEKO*. 2022. V. 11, No. 3. P. 1–6;
http://dx.doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i3.1081.

Физика конденсированных сред

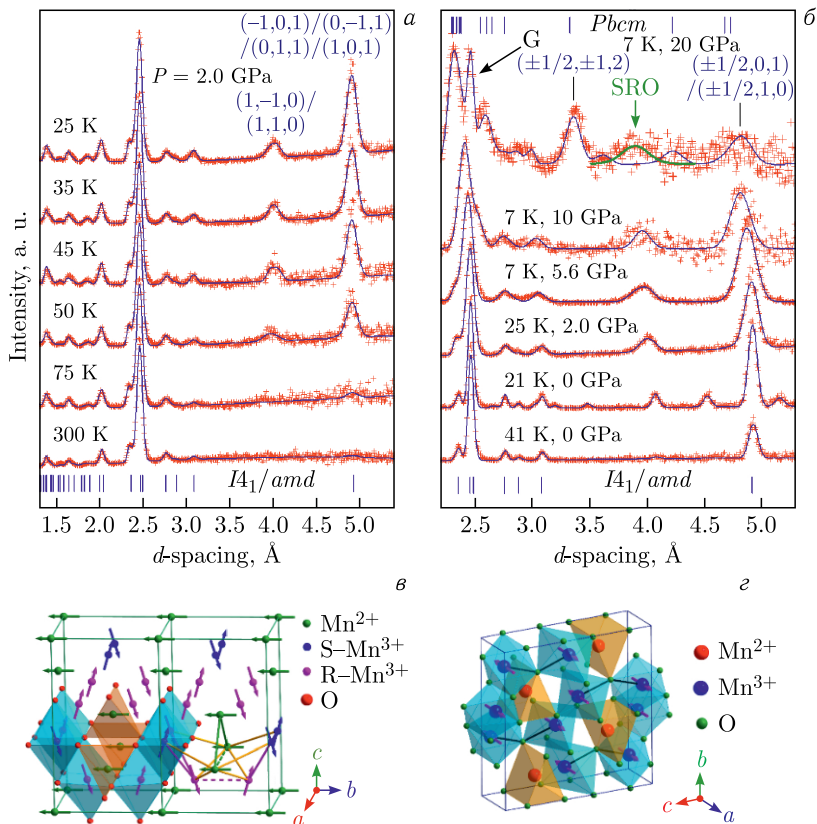
Разработана методика кристаллизации белка в капиллярах, в качестве модельного мембранного белка взят бактериородопсин из *Halobium Salinarum*. Согласно ранее существующей парадигме кристаллизация происходит в бицеллах. Однако проведенные эксперименты показали, что белок кристаллизуется после формирования гелеподобной фазы, которая является бицеллярной только на начальных этапах эксперимента, а затем формируются лентоподобные взаимосоединенные ламеллы, что помогает белку мигрировать между мембранами к месту роста кристалла. Также обнаружено формирование в процессе кристаллизации мультиламеллярной фазы Lcryst, объем которой растет пропорционально росту кристаллов (см. рисунок). Существование такой локальной ламеллярной фазы, контактирующей с поверхностью кристаллов, также помогает росту кристаллов. Полученные результаты позволяют раскрыть механизмы процесса кристаллизации мембранных белков *in meso* и создать эмпирическую основу такого типа кристаллизации в целях использования результатов в дальнейшем для рационального дизайна лекарственных средств.



- a) Схематическое представление процесса кристаллизации бактериородопсина в бицеллах в капиллярах для экспериментов МУРР (малогоугольного рентгеновского рассеяния) в режиме реального времени.
- б) Изменения спектров МУРР при различных этапах кристаллизации.
- в) Эволюция кристаллизационной системы и последовательное появление/исчезновение различных структурных элементов

- *Murugova T.N., Ivankov O.I., Ryzhykau Y.L., Soloviov D.V., Kovalev K.V., Skachkova D.V., Round A., Baeken C., Ishchenko A.V., Volkov O.A., Rogachev A.V., Vlasov A.V., Kuklin A.I., Gordeliy V.I.* Mechanisms of Membrane Protein Crystallization in "Bicelles" // *Sci. Rep.* 2022. V. 12, Iss. 1. P. 1–17.

Методом нейтронной дифракции проведено исследование кристаллической и магнитной структур Mn_3O_4 в диапазоне значений давления до 20 ГПа и температуры 15–300 К (рисунок). При давлении выше 2 ГПа наблюдались подавление низкотем-



Нейтронные дифракционные спектры Mn_3O_4 при различных значениях давления и температуры, обработанные по методу Ритвельда (а, б). Показаны экспериментальные точки и рассчитанные профили. Вертикальные штрихи внизу (а, б) и вверх (б) соответствуют рассчитанным положениям дифракционных пиков атомной структуры исходной тетрагональной фазы симметрии $I4_1/amd$ и орторомбической фазы высокого давления симметрии $Pbcm$. Вверху также приведены индексы наиболее интенсивных магнитных пиков. Схематически представлена модулированная магнитная структура, возникающая ниже $T_{N3} \sim 33$ К при атмосферном давлении, и геометрия конкурирующих магнитных взаимодействий (в), а также магнитная структура орторомбической фазы высокого давления (з)

пературных модулированных АФМ-фаз и стабилизация ферри-магнитной фазы. При этом температура магнитного упорядочения резко увеличивается с $T_{N1} \approx 43$ до 100 К в диапазоне значений давления 0–10 ГПа. Определена магнитная структура орторомбической фазы высокого давления при $P = 20$ ГПа. В этой фазе при $T_N = 275$ К формируется дальний АФМ-порядок с вектором распространения $k = (1/2, 0, 0)$ на Mn^{3+} -подрешетке, а Mn^{2+} -подрешетка остается магнитно-неупорядоченной. Таким образом, температура магнитного упорядочения под давлением увеличивается более чем в 6 раз, что является уникальным случаем среди известных магнитных материалов.

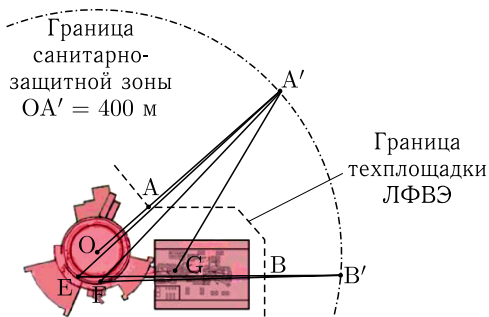
- *Kozlenko D. P., Dang N. T., Kichanov S. E., Thao L. T. P., Rutkavkas A. V., Lukin E. V., Savenko B. N., Tran N., Khan D. T., Truong-Son L. V., Khiem L. H., Lee B. W., Phan T. L., Phan N. L., Truong-Tho N., Hieu N. N., Tran T. A., Phan M. H.* High Pressure Enhanced Magnetic Ordering and Magnetostructural Coupling in the Geometrically Frustrated Spinel Mn_3O_4 // *Phys. Rev. B.* 2022. V. 105. P. 094430.

РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для ускорительного комплекса NICA определены границы санитарно-защитных зон при работе коллайдера в режиме столкновения тяжелых ионов и для дополнительного режима взаимодействия протонов высокой энергии. Выполнены расчеты по дифференциальному и полному выходу альbedo нейтронов релятивистских энергий, падающих на бетон. На основании расчетных данных предложена аппроксимация энергетической зависимости полного альbedo нейтронов в диапазоне значений энергии до 50 ГэВ (см. рисунок).

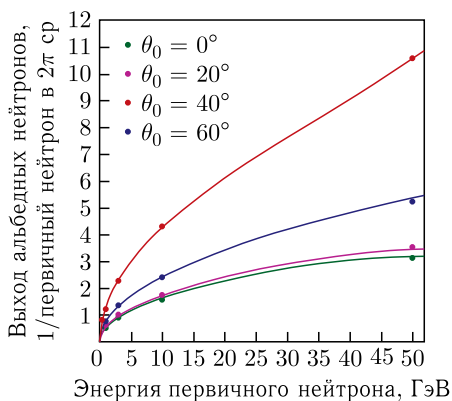
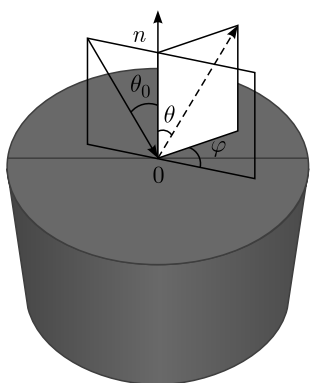
- *Butenko A. V., Gordeev I. S., Kovalenko A. D., Paraipan M., Syresin E. M., Timoshenko G. N.* Prediction of Radiation Environment around NICA Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19, No. 2. P. 98.
- *Gordeev I. S., Timoshenko G. N.* Albedo of Neutrons of Relativistic Energies // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19, No. 4. P. 402–407; doi: 10.1134/S1547477122040136.

Проведена оценка эффективности комбинированного действия $1-\beta$ -D-арабинофуранозилцитозина (АраЦ) и протонного излучения в очаговой дозе 10 Гр на рост меланомы линии В16



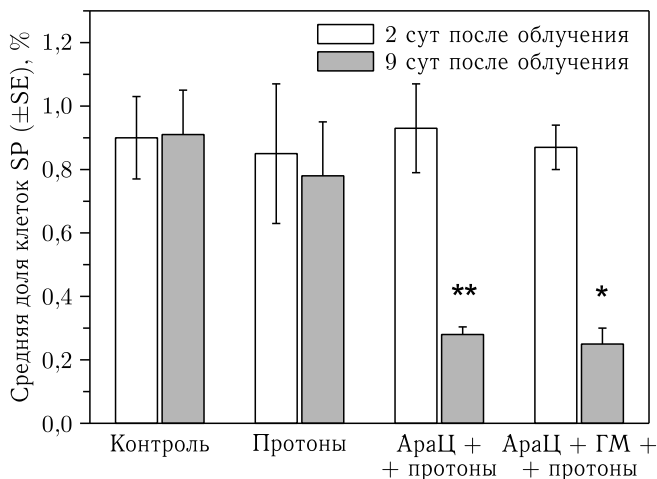
а

Источник	Точка А'	Точка В'
Режим работы коллайдера на тяжелых ионах	15,5	—
Режим работы в эксперименте VM@N в корпусе № 205	11,1	19,7
Вывод пучка протонов в коллайдер	0,6	0,7
Медленный вывод пучка протонов в корпус № 205 (средняя энергия протонов 5 ГэВ)	33,1	40,3
Испытательная зона SPD в корпусе № 205 на протонах 2 ГэВ	19,6	62,7
Испытательная зона SPD в корпусе № 205 на протонах 12 ГэВ	53,7	172,7
<i>Итого</i>	133,6	296,1



б

а) Расположение корпусов № 1 и № 205 ЛФВЭ с критическими точками А' и В' на границе санитарно-защитной зоны. В таблице указаны вклады различных источников излучения в годовые дозы нейтронов и гамма-лучей (в мкЗв) в точках А' и В' при работе комплекса НИСА.
 б) Схематическое представление геометрии расчета альbedo нейтронов и выход полного альbedo нейтронов в зависимости от угла и энергии

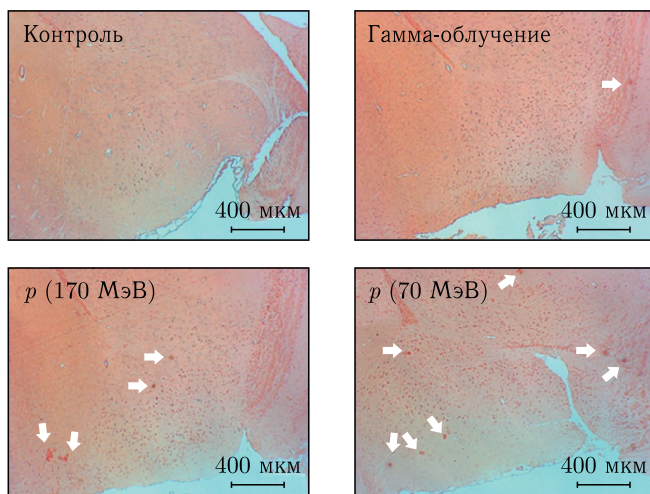
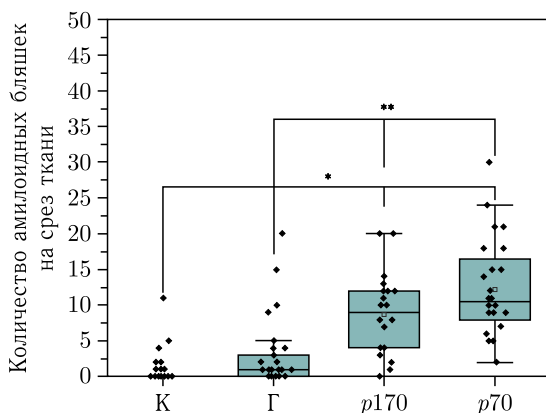


Доля ОСК (клеток SP) в первичном очаге меланомы В16 через 2 сут (белые столбцы) и 9 сут (серые столбцы) после облучения протонами и комбинированного действия: АраЦ и протонов; АраЦ, гидроксимочевины (ГМ) и протонов

и на ряд процессов, связанных с радиационным ответом опухоли *in vivo*. Установлено, что молекулярно-клеточные показатели гибели и пролиферативной активности изменялись примерно в одинаковой степени по сравнению с контролем. Однако доля опухолевых стволовых клеток (ОСК) была снижена в 3,1 раза после комбинированного воздействия по сравнению с одиночным облучением, что, возможно, объясняет эффект наибольшего торможения опухолевого роста при облучении на фоне АраЦ.

- *Zamulaeva I. A., Boreyko A. V., Bugay A. N., Kaprin A. D., Koryakin S. N., Krasavin E. A., Matchuk O. N., Mosina V. A., Selivanova E. I., Chausov V. N.* Method for Increasing the Effectiveness of Ionizing Radiation on Melanoma. Patent No. 2774032 (14.06.2022).
- *Zamulaeva I. A., Matchuk O. N., Selivanova E. I., Yakimova A. O., Mosina V. A., Koryakin S. N., Kaprin A. D., Boreyko A. V., Bugay A. N., Chausov V. N., Krasavin E. A.* Radiobiological Effects of the Combined Action of 1- β -D-Arabinofuranosylcytosine and Proton Radiation on B16 Melanoma *In Vivo* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2023. V. 20, No. 1.

Проведено сравнительное исследование нарушений поведенческих реакций и морфологических изменений в головном мозге взрослых самок крыс после облучения γ -квантами ^{60}Co и прото-



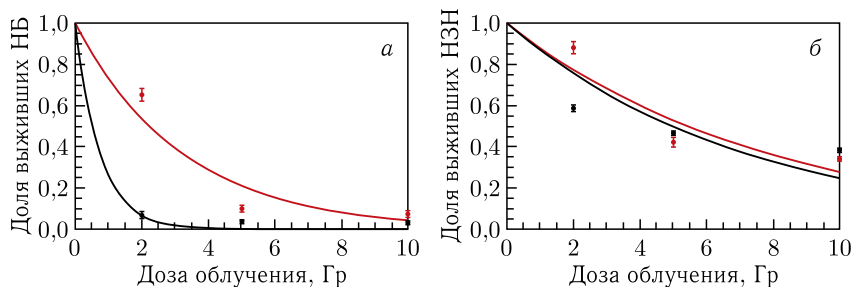
Амилоидные бляшки в переднем мозге крыс через 30 сут после облучения (отмечены белыми стрелками на срезах). К — контрольная группа, Г — гамма-облучение, $p170$ — протоны с энергией 170 МэВ, $p70$ — протоны с энергией 70 МэВ

нами различных энергий в дозе 1 Гр. Наблюдались ухудшения работы кратковременной памяти, двигательной и исследовательской активности животных. Сравнительный патоморфологический анализ возможных причин нарушения поведения выявил ранний амилоидоз, аутолиз эпендимального слоя, нейродегенеративные изменения в различных структурах головного мозга и развитие гипертрофии нейронов. Показано, что наблюдавшиеся деструктивные изменения возрастают с ростом линейной

передачи энергии частиц (ЛПЭ), составлявшей, соответственно, 0,2 кэВ/мкм (γ -кванты), 0,5 кэВ/мкм (протоны с энергией 170 МэВ) и 0,97 кэВ/мкм (протоны в пике Брэгга с энергией 70 МэВ).

- *Severyukhin Yu. S., Lalkovičová M., Utina D. M., Lyakhova K. N., Kolesnikova I. A., Ermolaeva M. E., Molokanov A. G., Gaevsky V. N., Komarov D. A., Krasavin E. A.* Comparative Analysis of Behavioral Reactions and Morphological Changes in the Rat Brain after Exposure to Ionizing Radiation with Different Physical Characteristics // *Cell. Mol. Neurobiol.* 2023. V. 43, No. 1. P. 339–353; <https://doi.org/10.1007/s10571-021-01187-z>.

Разработана математическая модель радиационно-индуцированного нарушения нейрогенеза у взрослых мышей C57BL/6J. Модель воспроизводит экспериментальные данные возрастного изменения численности нервных стволовых клеток, амплифицирующих нейрональных предшественников, нейробластов, незрелых нейронов, а также (впервые) зрелых нейронов, астроцитов и олигодендроцитов. Учет гибели клеток-предшественников и незрелых нейронов позволил оценить дефицит новообразованных зрелых нейронов, астроцитов и олигодендроцитов после облучения рентгеновскими лучами и ускоренными ионами ^{56}Fe .



Рассчитанная по модели доля выживших нейробластов (НБ) (а) и незрелых нейронов (НЗН) (б) на 21-е сутки жизни мыши (красная линия) и 60-е сутки жизни мыши (черная линия) после острого рентгеновского облучения дозами 2, 5 и 10 Гр. Красными кружками отмечены экспериментальные данные для мышей возраста 21 сут (*Rola R. et al.* 2004), черными квадратами — для мышей возраста 60 сут (*Mizumatsu S. et al.* 2003)

- *Глебов А. А., Колесникова Е. А., Бугай А. Н.* Математическая модель радиационно-индуцированного нарушения нейрогенеза // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 4. С. 338–354.

- *Syresin E. et al.* NICA Ion Collider and Plans of Its First Operations // Proc. of the 13th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC2022), Bangkok, Thailand, June 12–17, 2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

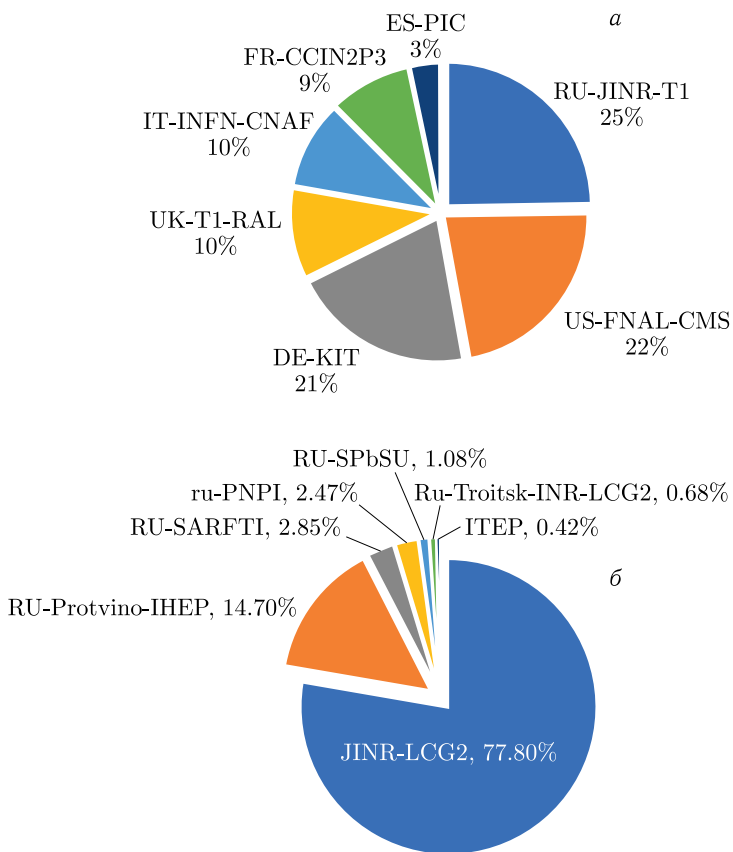
В 2022 г. проведена модернизация суперкомпьютера «Говорун»: его вычислительная мощность увеличилась на 23,5 %, что позволило достичь пиковой производительности 1,1 Пфлопс, система обработки и хранения данных расширилась на 8 ПБ. Модернизация обеспечит новые возможности для проведения более эффективных расчетов и интеллектуальной обработки больших данных в рамках различных научных экспериментов ОИЯИ, включая мегасайенс-проект NICA, и позволит выполнять масштабные исследовательские проекты в рамках Научно-исследовательской компьютерной сети (НИКС), объединяющей три центра коллективного пользования — ОИЯИ, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН и Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

- Производительность суперкомпьютера «Говорун» в ОИЯИ достигла 1,1 Пфлопс. Пресс-релиз CNews; https://www.cnews.ru/news/line/2022-11-17_proizvoditelnost_superkompyutera.

Центр Tier-1 ОИЯИ демонстрирует стабильную работу не только для эксперимента CMS, но и для MPD NICA. По производительности Tier-1 занимает первое место среди центров Tier-1 для эксперимента CMS в мире. 30 % всех задач, выполняемых на Tier-1, составляют задачи MPD. Центр уровня Tier-2 является самым продуктивным в российском консорциуме RDIG (Российский грид для интенсивной обработки данных) и используется для обработки данных экспериментов NICA, LHC, ILC, BIOMED, NOvA, а также локальными пользователями ОИЯИ (см. рисунок на с. 25).

- *Кореньков В. В.* Состояние и перспективы развития компьютерного комплекса ОИЯИ // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2022. 29–31 марта 2022 г. Дубна: ОИЯИ, 2022.

Разработана программно-аппаратная платформа на основе встраиваемых в контур управления квантовых нечетких регуляторов для решения задачи управления давлением и расходом



Распределение по нормированному времени загрузки CPU в HS06 часах за 2022 г. для Tier-1 сайтов для эксперимента CMS (а) и Tier-2 сайтов, входящих в консорциум RDIG (б)

жидкого азота сверхпроводящих магнитов криогенной системы ускорительного комплекса NICA. Многоуровневая система управления включает существующий нижний исполнительный уровень, основанный на системе Tango Controls, и новый уровень, на котором управляющие воздействия формируются с помощью квантового нечеткого регулятора. При этом обеспечиваются оптимальные параметры качества управления, такие как температура, расход азота, быстродействие, требуемый уровень давления и минимальная сложность реализации управления. Экспериментально продемонстрирована работоспособность и эффективность разработанной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпро-

водящего магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости. Проектирование квантовых нечетких регуляторов основано на квантовых информационных технологиях и осуществляется с помощью разработанного сотрудниками ОИЯИ программного инструментария QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit).

- *Бутенко А. В., Зрелов П. В., Кореньков В. В., Костромин С. А., Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Семашко С. В., Трубников Г. В., Ульянов С. В.* Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 2(247).
- *Korenkov V. V., Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V., Zrelov P. V., Zrelova D. P.* Self-Organized Intelligent Quantum Controller: Quantum Deep Learning and Quantum Genetic Algorithm — QSCOptKB™ Toolkit // Proc. the 6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics (DLCP2022), July 6–8, 2022. Dubna: JINR.

Разработана и опубликована в Библиотеке программ СРС программа KANTBP 3.1 для расчета значений энергии, матриц отражения и прохождения и соответствующих волновых функций в подходе адиабатических связанных каналов. Преимуществом этой программы по сравнению с широко используемой программой SCFULL является тщательная обработка граничных условий для решения системы связанных уравнений Шредингера, что позволяет сохранить высокую точность расчетов, учитывающих большое количество связанных каналов. Теоретические сечения, полученные программой KANTBP 3.1, хорошо описывают экспериментальные данные для различных реакций слияния и деления тяжелых ионов.

- *Chuluunbaatar O. et al.* KANTBP 3.1: A Program for Computing Energy Levels, Reflection and Transmission Matrices, and Corresponding Wave Functions in the Coupled-Channel and Adiabatic Approaches // Comp. Phys. Commun. 2022. V. 278. P. 108397.

С целью изучения ширины распада (времени жизни) элементарных частиц создан алгоритм вычисления многомерных интегралов столкновения, основанный на методе Монте-Карло, оптимизированном под данную конкретную задачу. Алгоритм применен для расчета ширины распада пиона в горячей среде,

характерной для процессов столкновения тяжелых ядер. Для этого рассмотрены все возможные реакции рассеяния пиона на пионе. Амплитуда рассеяния вычисляется в рамках модели Намбу–Иона-Лазинио. Показано, что изменение температуры среды приводит к увеличению ширины пиона (уменьшению времени жизни) до некоторого максимального значения, после чего ширина начинает падать и снова очень быстро растет при температуре, близкой к температуре фазового перехода адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. Это происходит вследствие того, что пион при такой температуре перестает быть связанным состоянием и переходит в резонансное состояние. Расчеты проводились на гетерогенном кластере ОИЯИ HybriLIT. Для оптимизации времени расчетов использованы параллельные вычисления на основе технологий OpenMP и CUDA.

- *Friesen A. V., Goderidze D., Kalinovsky Yu. L. Optimization of Monte Carlo Integration for Estimating of the Pion Damping Width // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 14, No. 19. P. 337.*

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В 2022 г. учебный процесс студентов на базовых кафедрах МГУ, МИФИ, МФТИ, государственного университета «Дубна», СПбГУ и К(П)ФУ был организован в очном режиме. Стажировки и практики в ОИЯИ прошли 342 студента из университетов государств-членов ОИЯИ.

В двух волнах онлайн-программы INTEREST 2022 г. приняли участие 80 студентов и аспирантов из Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Венгрии, Вьетнама, Германии, Греции, Египта, Индии, Ирана, Кубы, Кувейта, Мексики, Нигерии, Польши, России, Румынии, Сербии, США, Турции, Украины, ЮАР. Программа включает дистанционное выполнение научных проектов, лекции и экскурсии в онлайн-формате.

Ежегодная летняя студенческая программа ОИЯИ получила новое название START (STudent Advanced Research Training at JINR). В ней участвуют студенты со всего мира, специализирующиеся в естественных науках, инженерии и IT, заканчивающие 3-й курс бакалавриата, учащиеся магистратуры, а также аспиранты первого года. В первой сессии в программе участвовали 47 человек из Армении, Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Египта, России, Сербии, Индии, Узбекистана.

Первый этап международной студенческой практики по направлениям исследований ОИЯИ стартовал 1 марта после дли-

тельного перерыва для 24 человек, обучающихся в магистратуре и аспирантуре разных направлений, а также молодых исследователей из Арабской Республики Египет. Инициатором проведения практики стал Египет, вступивший в ряды полноправных членов ОИЯИ в ноябре 2021 г.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении Всероссийского фестиваля НАУКА 0+, фестиваля науки и технологий Geek Picnic, мероприятия «Карьерный форсаж: научные и прикладные треки Физтех», Тихоокеанского онлайн-марафона «О большой науке из первых уст» для Дальневосточного федерального университета, мастерской физики «105-й элемент» в рамках Летней школы. Для учителей физики проведена очередная международная научная школа в ОИЯИ, в которой приняли участие более 20 человек из России и Армении. В рамках профориентации для школьников были организованы: традиционный фестиваль науки «Дни физики» в Дубне, 34-я Международная компьютерная школа, вторая научная школа для слушателей детского университета при Академии научных исследований и технологий Египта, 11-й турнир по робототехнике CyberDubna-2022 Открытой Верхне-Волжской образовательной кибернетической сети, отборочный этап пятого технического хакатона «Дубна-2022», проект «Уроки настоящего» образовательного центра «Сириус», лекторий УНЦ, очные и онлайн лекции и экскурсии в лаборатории ОИЯИ.

ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 14.12.2021 по 06.12.2022)

- Книги — 12:

Intelligent Cognitive Robotics: Textbook. V. 1. Soft Computational Intelligence and Information — Thermodynamic Law of Intelligent Cognitive Control / O. Yu. Tyatyushkina, A. G. Reshetnikov, V. S. Ulyanov, S. V. Ulyanov. — М.: KURS, 2022. — 536 p.: ill. — (Quantum End-to-End IT). — Bibliogr.: end of parts.

Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G. Light Exotic Nuclei near the Boundary of Neutron Stability. — New Jersey [etc.]: World Sci., 2022. — 474 p.: ill. — Bibliogr.: end of papers.

Quantum Software Engineering Toolkit: Textbook. P. 1. Quantum Fast Search Algorithms. Quantum Simulators on Classical Computers. Quantum Control Information Models / O. V. Ivancova,

V. V. Korenkov, S. V. Ulyanov, P. V. Zrellov. — М.: KURS, 2022. — 464 p.: ill. — (Quantum End-to-End IT). — Bibliogr.: end of parts.

Zhanlav T., Chuluunbaatar O. New Developments of Newton-Type Iterations for Solving Nonlinear Problems. — М.: KURS, 2022. — 272 p.: ill. — (Science). — Bibliogr.: p. 255–267.

Бедняков В. А. Наука-защитница. — Дубна: ОИЯИ, 2022. — 251 с.: ил.

Биленький С. М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия. — М.: URSS, 2022. — 326 с.: ил. — (Классический учебник МГУ). — Библиогр.: с. 323–324.

Блохинцев Д. И. Дневники. 1955–1975 / Общ. ред.: Т. Д. Блохинцева; Ред. кол.: И. Д. Блохинцев, Н. С. Кавалерова, Е. В. Калининкова, К. Э. Козубский, С. Н. Неделько, А. А. Расторгуев. — Дубна: ОИЯИ, 2022. — 359 с.: ил. — В надзаг.: Объедин. ин-т ядер. исслед.

Интеллектуальная когнитивная робототехника: учебное пособие. Ч. 1. Технологии квантовых когнитивных вычислений / В. В. Кореньков, С. В. Ульянов, А. А. Шевченко, А. В. Шевченко. — М.: КУРС, 2022. — 556 с.: цв. ил. — (Квантовые сквозные ИТ). — Библиогр. в конце глав.

Кореньков В. В., Филозова И. А., Иванцова О. В. Технологии баз данных. Проектирование реляционных баз данных: учебное пособие. — М.: КУРС, 2022. — 127 с.: ил. — (Цифровые платформы управления данными). — Библиогр.: с. 105–107.

Тимошенко Г. Н. Радиационная защита высокоэнергетичных ускорителей. — Дубна: ОИЯИ, 2022. — 111 с.: ил. — (ОИЯИ; 2022-3).

Шабалин Е. П. На корабле своей мечты: Записки реакторщика. — Дубна: ОИЯИ, 2022. — 226, [1] с.: цв. ил.

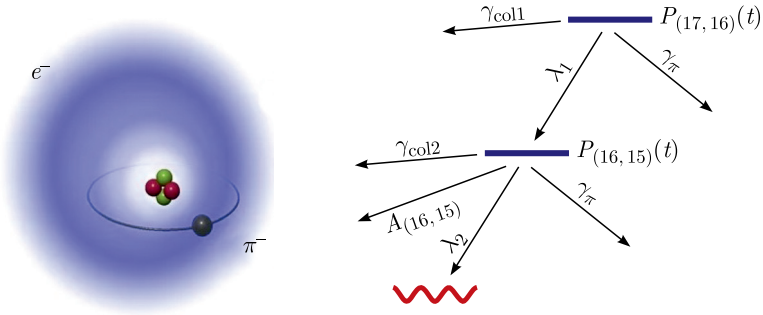
Швидкий С. Седьмое чувство: [сб. стих.] — Дубна: ОИЯИ, 2022. — 83 с.

- Журнальные статьи — 1 134
- Публикации в трудах конференций — 188
- Препринты — 28
- Авторефераты диссертаций — 18

Всего: 1 380.

THEORETICAL PHYSICS

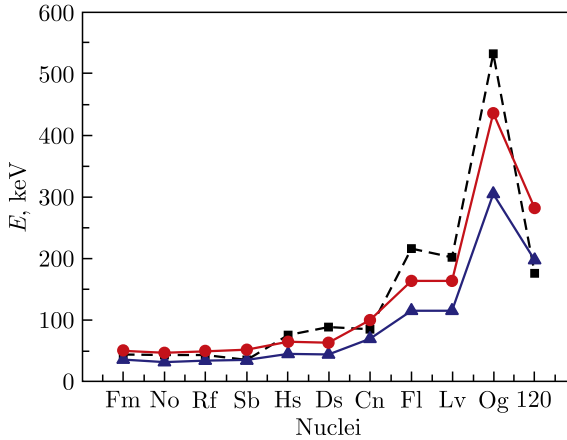
The transition frequency of $(n, l) = (17, 16) \rightarrow (16, 15)$ in pionic helium-4 is calculated to an accuracy of 4 ppb (parts per billion), including relativistic and quantum electrodynamic corrections up to $O(R_\infty\alpha^5)$. New calculations significantly improve our previous theoretical values (*Hori M., Soter A., Korobov V.I. // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 042515*). In addition, collisional effects between pionic helium and target helium on transition frequencies are estimated. Once measurements reach the ppb level, then the accuracy of determining the pionic mass will increase by 2–3 orders of magnitude. Such a high precision value of m_π can impose direct experimental constraints on the mass of the antineutrino of muon flavor.



Pionic helium and a diagram of two-photon experiment on precision measurement of the $(17, 16) \rightarrow (16, 15)$ transition frequency

- *Zhi-Da Bai, Korobov V.I., Zong-Chao Yan, Ting-Yun Shi, Zhen-Xiang Zhong // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. P. 183001.*

On the basis of the geometric collective model and the quasi-particle-phonon model, a microscopic version of the phenomenological Grodzins relation is derived. This relation is used to predict the excitation energy of the first 2^+ states in nuclei with charge $Z \geq 100$ in order to analyze the α -decay spectra. It was found that at the beginning of the chain of nuclei under study at $Z = 100-110$, where the quadrupole deformation is high, the excitation energy of the first 2^+ states does not exceed 100 keV, i.e., it corresponds



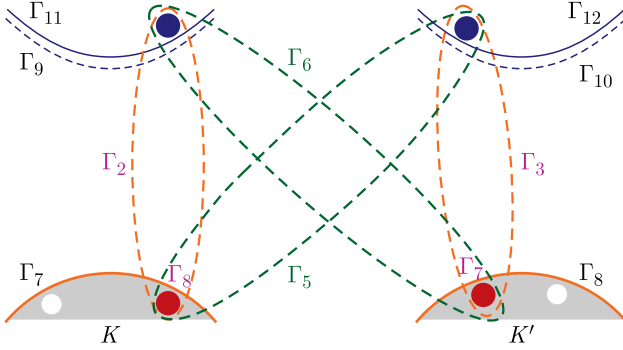
The predicted energies of the 2_1^+ states for indicated nuclei. Calculations are performed with the microscopic model (dashed line) and phenomenological relations (red and blue lines), which allow us to estimate minimal and maximal possible values ($E(2_1^+)_{\max}$ and $E(2_1^+)_{\min}$)

to rotational states. Then, with decreasing deformation, $E(2_1^+)$ increases sharply and reaches a maximum value in ^{284}Fl or ^{292}Og , i.e., in nuclei with minimal values of β_2 .

- *Shirikova N. Yu., Sushkov A. V., Malov L. A., Kolganova E. A., Jolos R. V. // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 024309.*

A model is formulated that makes it possible to describe interactions of excitons in single-layer transition metal dichalcogenides (SLTMDs) with both intravalley and intervalley excitons taken into account. It is found that the correct consideration of two-pair correlations between Fermi charge carriers constituting two excitons and the symmetry of interacting excitons has a decisive influence on the character of the exciton–exciton interaction: the interaction is generally repulsive, except the case of excitons from different valleys, which are attracted and form an intervalley biexciton. Thus, we revealed the physical nature of biexciton in SLTMDs and for the first time explained the experimentally observed wide spread of biexciton energies in various SLTMDs, including those during their encapsulation. The results obtained are of obvious practical interest for the development of semiconductor nanotechnologies, primarily in optoelectronics.

- *Hoang Ngoc Cam, Nguyen Thanh Phuc, Osipov V. A. // npj 2D Mater. Appl. 2022. V. 6. P. 22.*



Band structure of single-layer tungsten dichalcogenides at the K and K' valleys and related excitons

For the last years, there has been a vast growth of interest in higher spin gauge theories and their supersymmetric extensions as providing a bridge between superstring theory and low-energy quantum field theories. For tackling this complicated and actual problem in the case of 4D, $N = 2$ supersymmetry, the harmonic superspace approach is used. We consider an important problem of constructing couplings of higher-spin gauge superfields to matter $N = 2$ superfields. For the first time, the cubic off-shell vertices of the interaction of higher-spin gauge superfields with a hypermultiplet are explicitly constructed. It opens further promising prospects for applying the harmonic superspace method to the theory of higher spins.

Minimal coupling of $N = 2$ super Yang–Mills theory to the hypermultiplet superfields:

$$S_{N=2\text{SYM}} \sim \text{Tr} \int d^{(-4)}\zeta q^{+a} (D^{++} + gV^{++A}T^A) q_a^+,$$

T^A are gauge group generators.

Minimal interaction of higher spins with the hypermultiplet:

$$S_{N=2\text{higher spins}} \sim \int d^{(-4)}\zeta q^{+a} (D^{++} + g_s \widehat{\mathcal{H}}_{(s)}^{++}) q_a^+,$$

$\widehat{\mathcal{H}}_{(s)}^{++}$ is a matrix-differential operator of the rank $s - 1$ for the higher spin s .

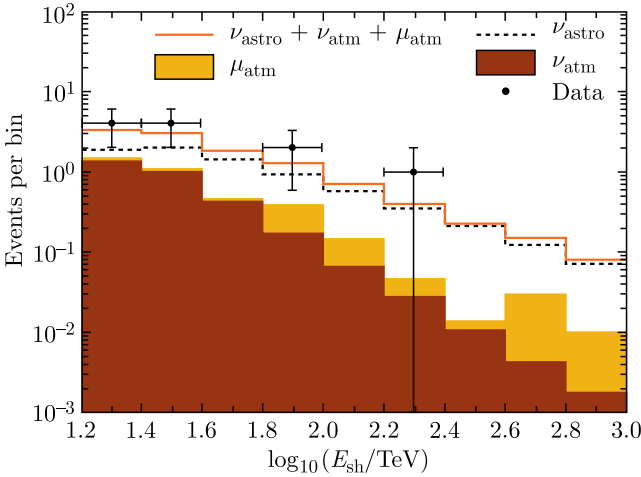
- *Buchbinder I. L., Ivanov E. A., Zaigraev N. M.* // JHEP. 2022. V. 05. P. 104.

EXPERIMENTAL PHYSICS

Particle Physics

With the commissioning of two new clusters in April 2022, the working volume of the deep-sea neutrino telescope Baikal-GVD reached a value of ≈ 0.5 cubic kilometers. The detector contains 10 clusters of deep-sea garlands of recording and control equipment (2916 optical modules) and is the largest neutrino telescope in the Northern Hemisphere.

When analyzing the data obtained during the operation of the detector in the configurations of 2018–2021, 11 cascade events with an energy of over 15 TeV, initiated by neutrinos of astrophysical nature, were selected, which at a confidence level of 3σ confirms the results of the first observation of the flux of high-energy astrophysical neutrinos on the Antarctic detector IceCube.



Energy distributions of experimental and theoretically expected events in the analysis of cascade events from under the horizon: experimental events — black dots; the distribution of events expected from the diffuse neutrino flux of astrophysical nature — dashed histogram; background events from atmospheric muons and atmospheric neutrinos — yellow and brown painted areas; the total number of expected signal and background events — an orange histogram

- *Allakhverdyan V. A. et al. (Baikal-GVD Collab.). Diffuse Neutrino Flux Measurements with the Baikal-GVD Neutrino Telescope. e-Print: 2211.09447 [astro-ph.HE]; Phys. Rev. D. 2022 (submitted).*

The ν GeN experiment is aimed to investigate neutrino properties with the help of Kalinin NPP, which allows operating an enormous antineutrino flux of $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The comparison of the first data taken with reactor off and on does not show any sign for coherent elastic neutrino–nucleus scattering and allows setting up a limit for the quenching parameter in germanium $k < 0.26$ (90% CL). The data taking continues.

- *Alekseev I. et al.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 106. P. L051101.

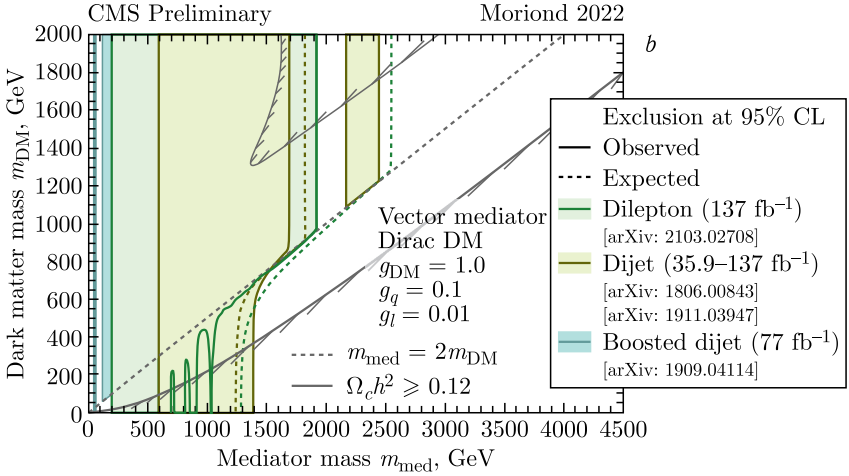
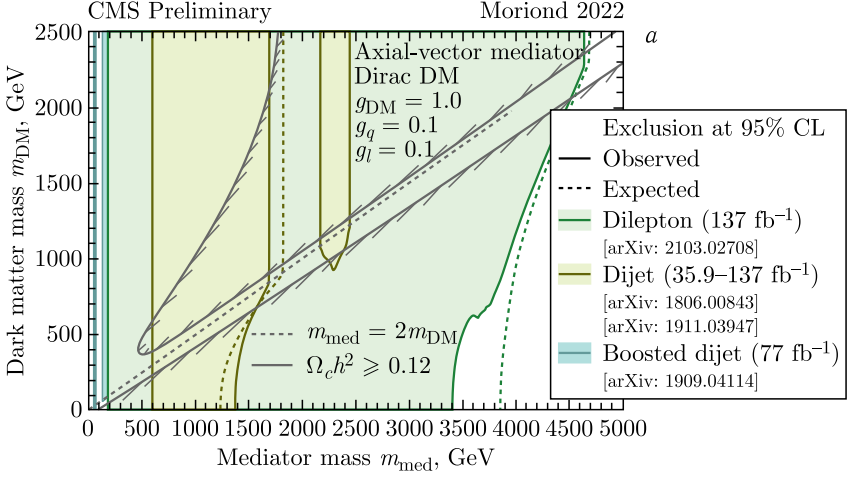
JINR employees participated in the ATLAS project (CERN) in search for potential *cccc* tetraquarks decaying into a pair of charmonium states in the four-muon final state using pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV, corresponding to an integrated luminosity of 139 fb^{-1} . Statistically significant excesses are seen in the di- J/ψ channel consistent with a narrow resonance at 6.9 GeV and a broader structure at lower mass. A statistically significant excess is also seen in the $J/\psi + \psi(2S)$ channel. The fitted masses and decay widths are reported.

- *Eletsikh I. et al.* ATLAS Results on Exotic Hadronic Resonances // Proc. of the 11th Intern. Conf. on New Frontiers in Physics (ICNFP2022), OAC, Kolymbari, Crete, Greece, 30 Aug. – 11 Sept. 2022. ATLAS-CONF-2022-040.

The JINR group taking part in the CMS experiment carried out processing and physics analysis of data collected during LHC Run-2 (2015–2018) with proton beams at an energy of 13 TeV. 95% CL observed and expected exclusions were set for combined dijet and dilepton searches in the simplified dark matter (DM) scenario. The mass limits are presented in the plane of the Dirac DM particle m_{DM} and mediator m_{med} (figure on page 35). The exclusions are computed for leptophilic scenarios with the axial-vector mediator (a universal quark coupling of $g_q = 0.1$, lepton coupling of $g_l = 0.1$, and for a DM coupling of $g_{\text{DM}} = 1.0$) and for leptophobic scenarios with the vector mediator (a universal quark coupling of $g_q = 0.1$, lepton coupling of $g_l = 0.01$, and for a DM coupling of $g_{\text{DM}} = 1.0$).

The work planned for 2022 on the upgrade and operational testing of the CMS detectors, in particular, on the construction of a High-Granularity Calorimeter (HGCAL) and the upgrade of the Forward Muon Station ME1/1, was fully completed.

- CMS Exotica Summary Plots for 13 TeV Data – Moriond 2022; https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/SummaryPlotsEXO13TeV#DM_summary_plots



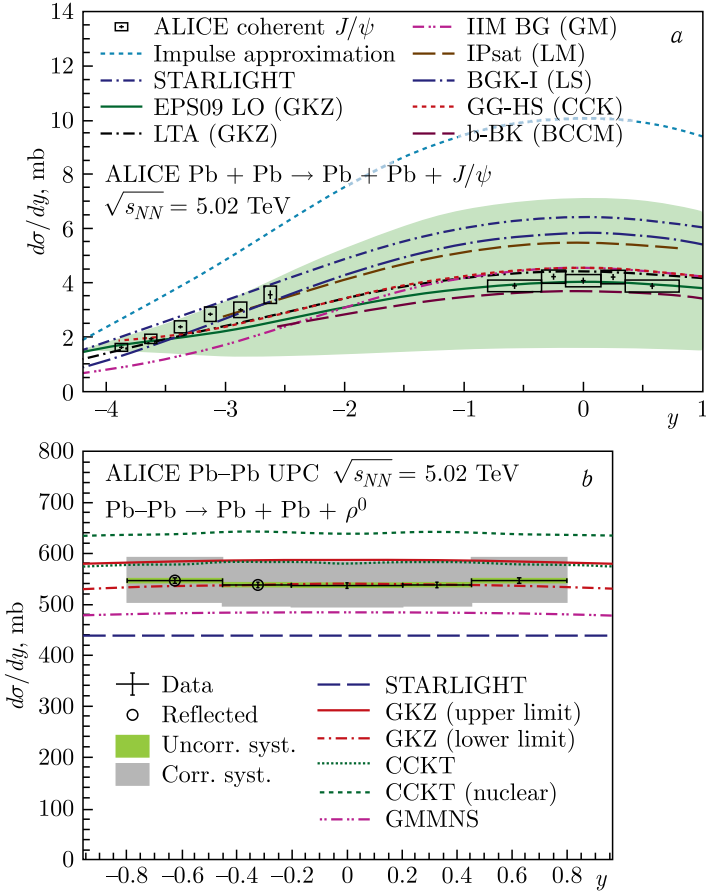
95% CL observed and expected exclusion regions in $m_{\text{med}}-m_{\text{DM}}$ plane for dijet and dilepton searches from CMS Run-2 in the axial-vector (a) and vector (b) models

In the ALICE experiment at LHC (CERN), JINR team initiated the study of photoproduction of vector mesons in Pb–Pb and Xe–Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ and 5.44 TeV, respectively. The team also measured cross sections for J/ψ and ρ^0 meson’s photoproduction for the first time. Using the GRID environment, they analyzed several billion so-called ultra-peripheral collisions of Pb and Xe nuclei, in which the impact parameter of colliding nuclei

is greater than the sum of their radii. This means that there are no nucleon interactions, and the particles recorded by the experimental facility are the result of the interaction of photons with nuclei.

Comparison of the results with theoretical calculations showed that models involving moderate gluon shadowing in Pb nuclei are acceptably consistent with experimental data. Calculations performed without taking into account gluon shadowing, as well as models with strong shadowing, differ significantly from the data.

Cross sections for the coherent production of ρ^0 mesons in ultra-peripheral Pb–Pb collisions were compared with models based on different approaches. The best agreement was obtained with



The behavior of the J/ψ photoproduction cross section (a) and ρ^0 mesons (b) depending on the rapidity, and calculations using various models

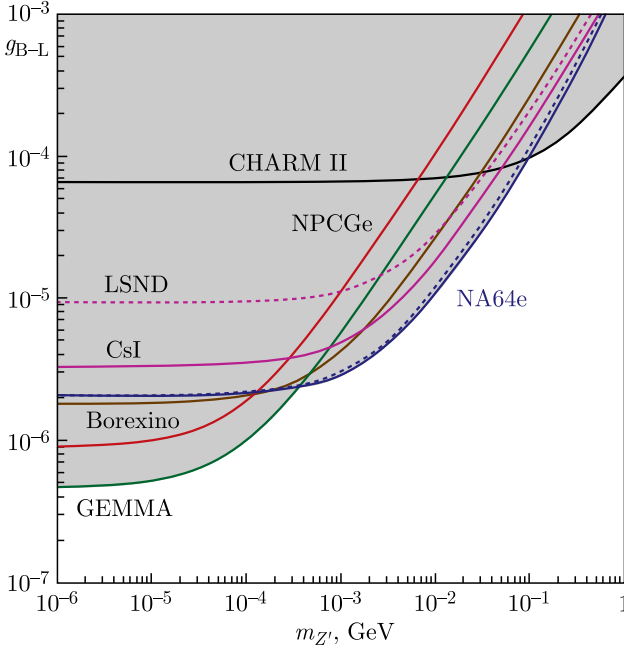
the modified Gribov–Glauber vector dominance model taking into account the nuclear shadowing. For the first time, measurements were carried out for various classes of events, separated by the presence of electromagnetic dissociation of nuclei accompanying the production of mesons.

- *ALICE Collab.* Coherent J/ψ Photoproduction at Forward Rapidity in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 798. P. 134926.
- *ALICE Collab.* Coherent Photoproduction of ρ^0 Vector Mesons in Ultra-Peripheral Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // JHEP. 2020. V. 06. P. 035.
- *ALICE Collab.* First Measurement of Coherent ρ^0 Photoproduction in Ultra-Peripheral Xe–Xe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV // Phys. Lett. B. 2021. V. 820. P. 136481.

In 2022, the JINR group taking part in the NA64 experiment participated in two data taking runs at SPS — with a 160-GeV muon beam and a 100-GeV secondary electron beam. When analyzing the previously obtained data, the Collaboration continued the search for light dark matter and its mediator, the dark photon. For the first time, the Collaboration conducted the search for a new Z' gauge boson associated with (un)broken baryon–lepton (B–L) symmetry in the keV–GeV mass range. Such a boson can be produced after the collision of 100-GeV electrons with the nuclei through the dark bremsstrahlung reaction $eZ \rightarrow eZZ'$. No signal events were found when analyzing data with $3.4 \cdot 10^{11}$ eot collected during 2016–2021 runs. This allows one to derive new constraints on the $Z' - e$ coupling strength, which for the mass range $0.3 < m_{Z'} < 100$ MeV are more stringent compared to those obtained from the neutrino–electron scattering data (figure on page 38).

- *Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.).* Search for a New B–L Z' Gauge Boson with the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129, No. 16. P. 161801; e-Print: 2207.09979 [hep-ex].

New oscillation measurements by the NOvA experiment were analyzed using improved techniques and simulations. A joint fit to the data within the 3-flavor neutrino oscillation framework continues to yield a best-fit point in the normal mass ordering and the upper octant of the θ_{23} mixing angle. The data disfavor combinations of oscillation parameters that give rise to a large



The NA64 90% CL exclusion region in the $(m_{Z'}, g_{B-L})$ plane for the unbroken and broken $U(1)_{B-L}$. Constraints from the results of neutrino–electron scattering experiments obtained with nuclear-reactor neutrinos at TEXONO and GEMMA, solar neutrinos at Borexino, and accelerator neutrino beams at LSND and CHARM II are also shown

asymmetry in the rates of electron neutrino and antineutrino appearance. This includes values of the charge parity (CP) symmetry violating phase in the vicinity of $\delta_{CP} = \pi/2$ which are excluded by $> 3\sigma$ for the inverted mass ordering, and values around $\delta_{CP} = 3\pi/2$ in the normal ordering which are disfavored at $> 2\sigma$ confidence.

- *Acero M. A. et al. (NOvA Collab.). Improved Measurement of Neutrino Oscillation Parameters by the NOvA Experiment // Phys. Rev. D. 2022. V. 106, No. 3. P.032004.*

The Compact Precision Laser Inclinometer (CPLI) developed by JINR employees has established itself as a high-precision, reliable instrument for recording the angular oscillations of the Earth’s surface. The achieved instrumental accuracy is 10^{-9} rad.

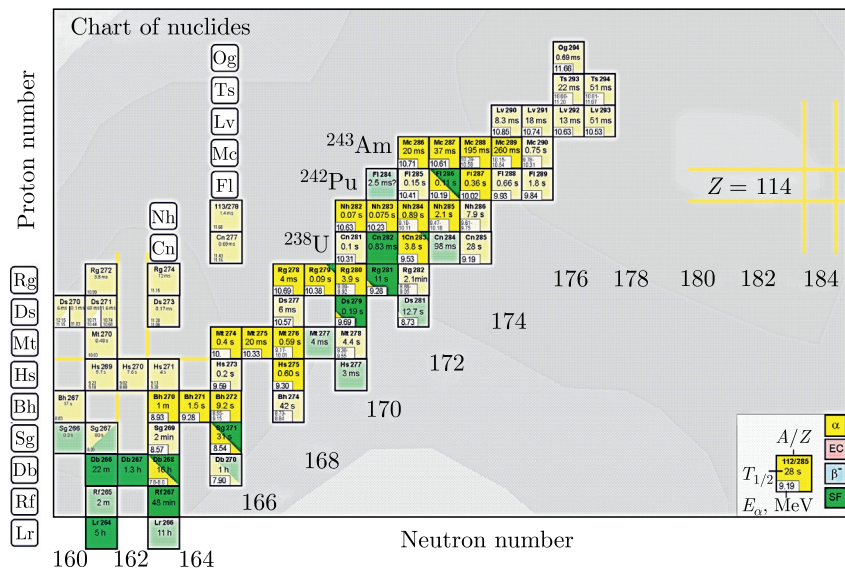
During 2022, six new-type CPLIs were created. The placement of CPLIs in scientific centres of Russia and abroad has begun. Two

units of CPLI are installed in the MPD Hall of the future NICA collider. For several months, monitoring of angular microseisms from industrial noise and natural phenomena was carried out. The largest microseisms reach amplitudes of 4 mkrad. Possible ways to suppress industrial interference to stabilize the collider beam focus are the introduction of feedback into the control system of the collider magneto-optics and/or the use of piezo stackers.

- *Budagov Yu. A. et al.* Position-Sensitive Measurements of a Single-Mode Laser Beam Spot Using the Deviding Plate Method // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 6. P. 589–615.

Low-Energy Heavy-Ion Physics

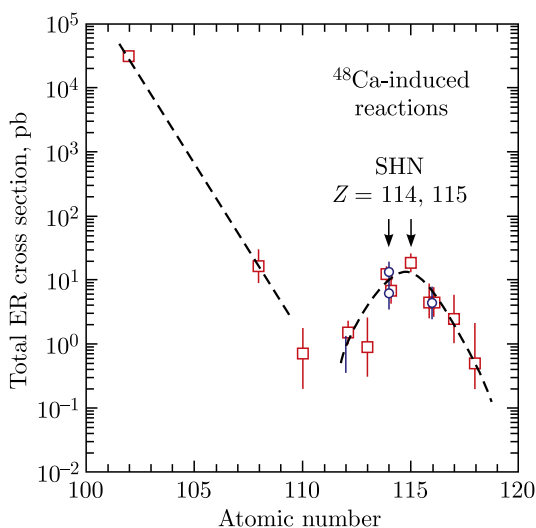
Experiments on the synthesis of superheavy elements and study of their properties in $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$, ^{238}U , ^{242}Pu , and ^{243}Am reactions have been continued at the Superheavy Element Factory acceleration complex. A record-breaking number of events for this type of experiments was observed, i.e., 238 synthesized atoms of superheavy elements. The decay properties of 33 isotopes of superheavies were studied. Five new superheavy nuclides were discovered: ^{287}Mc , ^{264}Lr , ^{276}Ds , ^{272}Hs , and ^{268}Sg .



Superheavy nuclei synthesized in complete fusion reactions $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$, ^{242}Pu , and ^{243}Am (marked with a bright colour)

- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Ibadullayev D. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. P. 024612.*
- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Kovrizhnykh N. D. // Phys. Rev. C. 2022. V. 106. P. L031301.*

An experiment on synthesizing the isotopes of element 110 (Ds) in the fusion reactions between ^{48}Ca and ^{232}Th was for the first time conducted at the Superheavy Element Factory. The major goal was to verify the record-low fission stability theoretically predicted for nuclei in this region and, consequently, the survival probability of an excited compound nucleus. The synthesis of the isotopes of element 110 is of great importance in preparing for experiments on the synthesis of element 120. The success of the experiment greatly depends on a fission barrier responsible for the survival of a superheavy nucleus. Six events of isotope formation were thus registered and resulted in the discovery of three new superheavy nuclides, i.e., ^{276}Ds , ^{272}Hs , and ^{268}Sg . The reaction cross sections were 70 fb and 0.7 pb.



The behaviour of the production cross section of the heaviest nuclei in the fusion reactions of actinide targets with ^{48}Ca beams

- Materials of the RAS Council Meeting on Heavy-Ion Physics, Saint Petersburg, Russia, July 3–9, 2022; <https://indico.jinr.ru/event/3105/>.

Neutron Nuclear Physics

The development of the method of Neutron Resonance Capture Analysis (NRCA) in order to determine the element composition of samples continues. The method is based on the registration of neutron resonances in radiative capture and the measurement of the yield of reaction products in these resonances. This analysis determines the elemental and isotope compositions of objects nondestructively and through the whole volume of the sample. All this makes it interesting and perspective for investigation of archeological artifacts. Information about the elemental composition of artifacts may help archaeologists to identify centres of craft production, clarify the dating of finds and their technological schemes. To test the capabilities of this method, such investigations were carried out in collaboration with the Institute of Archaeology of RAS at the pulsed neutron source IREN of JINR for the kyathos (6th–4th centuries BCE) from the necropolis Volna 1 on the Taman Peninsula.



The kyathos from the necropolis Volna 1

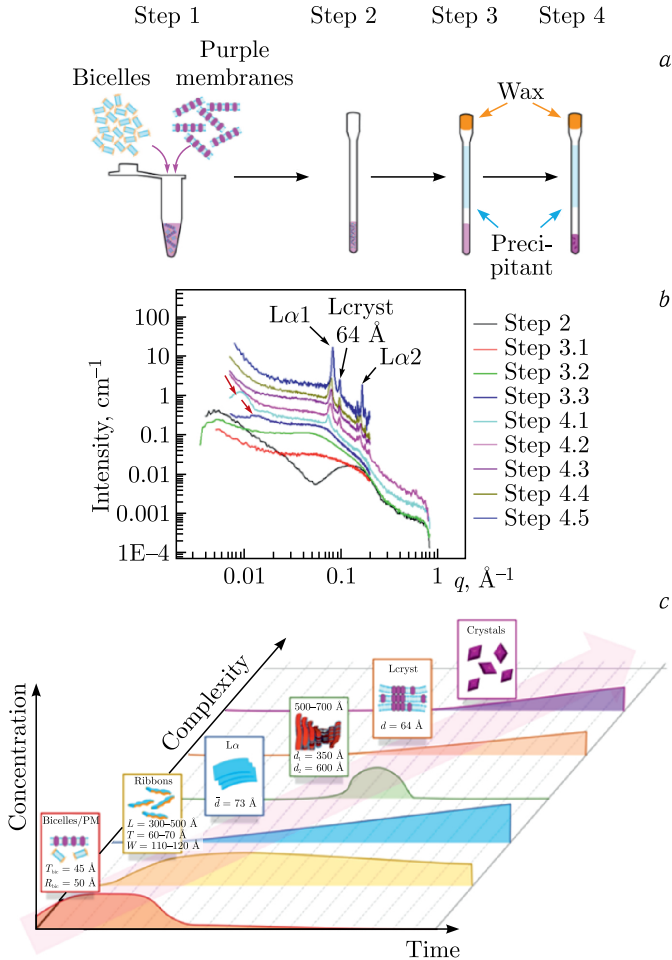
The results of measurements of the elemental composition of the kyathos by NRCA

Element	Weight, g	Percentage content, %
Cu	59.7 ± 3.9	68.8 ± 4.5
Sn	5.29 ± 0.23	6.10 ± 0.26
As	0.1892 ± 0.0081	0.2179 ± 0.0094
Ag	0.0131 ± 0.0014	0.0151 ± 0.0016

- *Simbirtseva N. V., Sedyshev P. V., Mazhen S., Yergashov A., Dmitriev A. Yu., Saprykina I. A., Mimokhod R. A.* Nondestructive Investigation of the Kyathos (6th–4th Centuries BCE) from the Necropolis Volna 1 on the Taman Peninsula by Neutron Resonance Capture and X-Ray Fluorescence Analysis // ACTA IMEKO. 2022. V. 11, No. 3. P. 1–6; http://dx.doi.org/10.21014/acta_imeko.v11i3.1081.

Condensed Matter Physics

Membrane proteins (MPs) play an essential role in living cell processes such as ion transport across the membrane, energy conversion, and signal transduction. Due to their significant role in



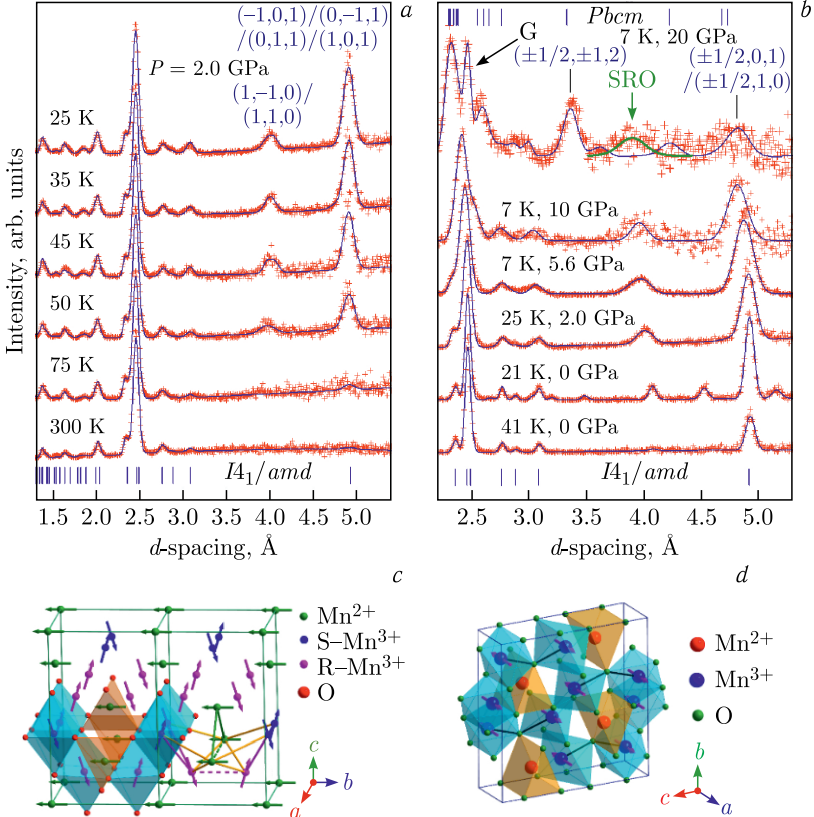
Schematic representation of the crystallization of bacteriorhodopsin in bicelles within capillaries for real-time small-angle X-ray SAXS experiments (*a*). Transformation of the SAXS curves for the crystallization system during different steps of the crystallization process (*b*). The scheme demonstrating the evolution of the crystallization matrix and consequent appearance/disappearance of various structural elements (*c*)

human physiology, membrane proteins are the targets of about 60% of currently used drugs. To reveal the mechanism of crystallization of membrane proteins, the structural rearrangements, that occur in the crystallization system during the formation and growth of protein crystals, were studied. An equivalent crystallization procedure in glass capillaries was developed and the bacteriorhodopsin from *Halobium Salinarum* was taken as a model membrane protein. In contrast to the existing paradigm, our study shows that the jelly-like state of the “bicelle” crystallization matrix, rather than the initial bicelle, is the state where crystals grow. The data suggest that this jelly-like phase is composed of interconnected ribbon-like bilayers to help proteins migrate from bilayers to the place of the crystal formation, which is a necessary condition for the crystal growth (figure on page 42). We also observed the formation of the lamellar phase connected directly with the crystal surface (Lcryst), the volume of which increases concomitantly with growing crystals. This phase might allow proteins to diffuse to the crystal surface. Our results help to shed more light on *in meso* MP crystallization making it considerably more efficient for the structure-based drug design.

- Murugova T.N., Ivankov O.I., Ryzhikau Y.L., Soloviov D.V., Kovalev K.V., Skachkova D.V., Round A., Baeken C., Ishchenko A.V., Volkov O.A., Rogachev A.V., Vlasov A.V., Kuklin A.I., Gordeliy V.I. Mechanisms of Membrane Protein Crystallization in “Bicelles” // Sci. Rep. 2022. V. 12, Is. 1. P. 1–17.

The magnetic oxide Mn_3O_4 is an unusual geometrically frustrated functional material with tetragonally distorted structure of spinel type, which demonstrates pronounced magnetocaloric, magnetoelastic and magnetodielectric effects. A presence of competing magnetic interactions combined with Jahn–Teller distortions lead to the formation of complex modulated magnetic states in this system. Crystal and magnetic structures of Mn_3O_4 have been studied by means of neutron diffraction under applied high pressures up to 20 GPa in the temperature range 15–300 K (figure on page 44). For pressures above 2 GPa, the suppression of the low-temperature modulated AFM phases and stabilization of ferromagnetic phase were revealed. Simultaneously, the magnetic ordering temperature drastically rises from $T_{N1} \approx 43$ to 100 K in the pressure range 0–10 GPa. The magnetic structure of the high-pressure orthorhombic phase was determined at $P = 20$ GPa. In this phase, at $T_N = 275$ K, the long-range AFM order with

a propagation vector $k = (1/2, 0, 0)$ is formed on the Mn^{3+} sublattice, while the Mn^{2+} sublattice remains magnetically disordered. Therefore, the magnetic ordering temperature rises in more than six times, which is a unique case among known magnetic oxides.



Neutron diffraction patterns of Mn_3O_4 measured at selected pressures and temperatures and fitted by the Rietveld method (*a*, *b*). The experimental points and calculated profiles are shown. The vertical bars below (*a*, *b*) and in the top (*b*) correspond to the calculated positions of the diffraction peaks of crystal structure of initial tetragonal phase of $I4_1/amd$ symmetry and high-pressure orthorhombic phase of $Pbcm$ symmetry. The indexes of the most intense magnetic peaks are also given in the top. A schematic representation is shown of the modulated magnetic structure formed below $T_{N3} \sim 33$ K at ambient pressure and geometry of competing magnetic interactions (*c*), as well as magnetic structure of high pressure orthorhombic phase (*d*)

- *Kozlenko D. P., Dang N. T., Kichanov S. E., Thao L. T. P., Rutkauskas A. V., Lukin E. V., Savenko B. N., Tran N., Khan D. T., Truong-Son L. V., Khiem L. H., Lee B. W., Phan T. L., Phan N. L., Truong-Tho N., Hieu N. N., Tran T. A., Phan M. H.* High-Pressure Enhanced Magnetic Ordering and Magnetostructural Coupling in the Geometrically Frustrated Spinel Mn_3O_4 // *Phys. Rev. B.* 2022. V. 105. P. 094430.

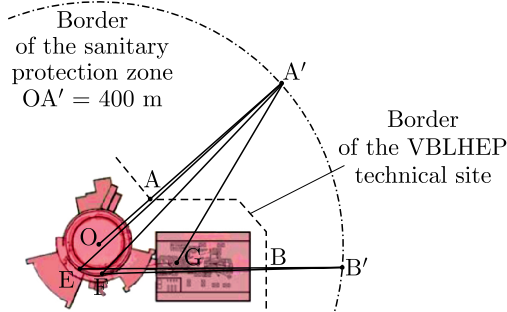
RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

For the NICA accelerator complex, the borders of the sanitary protection zones have been determined for the operation of the collider in the heavy-ion collision mode and for an additional mode of high-energy proton collision. Besides, the differential and total albedo values of relativistic neutrons incident on concrete have been calculated. Based on the data obtained, an approximation has been proposed of the energy dependence of total neutron albedo in the energy range up to 50 GeV.

- *Butenko A. V., Gordeev I. S., Kovalenko A. D., Paraipan M., Syresin E. M., Timoshenko G. N.* Prediction of Radiation Environment around NICA Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19, No. 2. P. 98.
- *Gordeev I. S., Timoshenko G. N.* Albedo of Neutrons of Relativistic Energies // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19, No. 4. P. 402–407; doi: 10.1134/S1547477122040136.

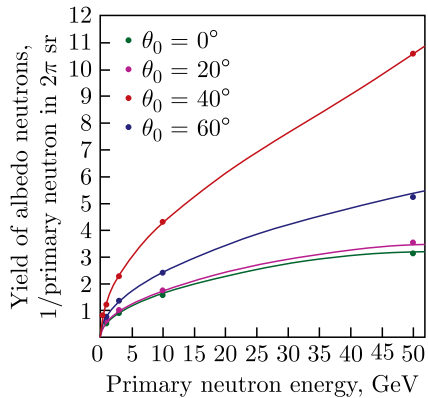
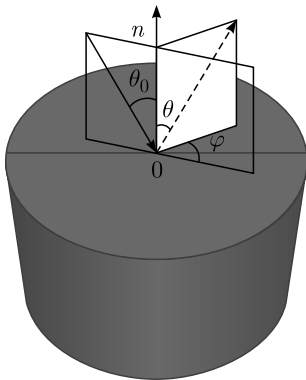
The effectiveness has been evaluated of the combined action of 1- β -D-arabinofuranosylcytosine (AraC) and proton radiation at a focal dose of 10 Gy on the growth of B16 melanoma and a number of tumor radiation response processes *in vivo*. Molecular and cellular parameters of melanoma death and proliferative activity have been found to change approximately to the same degree compared with the control. However, the fraction of cancer stem cells (CSCs) was reduced 3.1-fold after combined exposure compared with single irradiation, which may explain the greatest inhibition of tumor growth after irradiation in the presence of AraC.

- *Zamulaeva I. A., Boreyko A. V., Bugay A. N., Kaprin A. D., Koryakin S. N., Krasavin E. A., Matchuk O. N., Mosina V. A., Selivanova E. I., Chausov V. N.* Method for Increasing the Effectiveness of Ionizing Radiation on Melanoma. Patent No. 2774032 (14.06.2022).



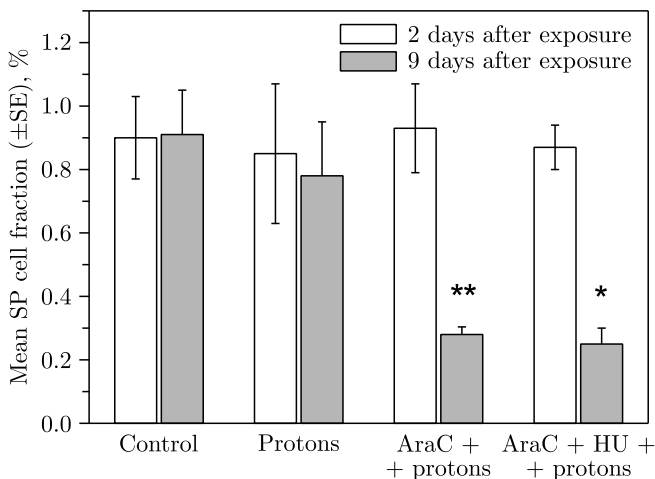
a

Source	Point A'	Point B'
Heavy-ion mode of the collider operation	15.5	—
BM&N experiment in Building 205	11.1	19.7
Section of the proton beam extraction to the collider	0.6	0.7
Section of the proton beam slow extraction to Building 205 (with average proton energy 5 GeV)	33.1	40.3
SPD testing zone in Building 205 at the 2-GeV proton beam	19.6	62.7
SPD testing zone in Building 205 at the 12-GeV proton beam	53.7	172.7
<i>Total</i>	133.6	296.1



b

a) Location of VBLHEP Buildings 1 and 205 with critical points A' and B' on the border of the sanitary protection zone. The table shows the contribution of various radiation sources to the annual doses of neutrons and gamma rays (μSv) at points A' and B' during the operation of the NICA complex. b) A schematic representation of the neutron albedo calculation geometry and total neutron albedo as a function of angle and energy

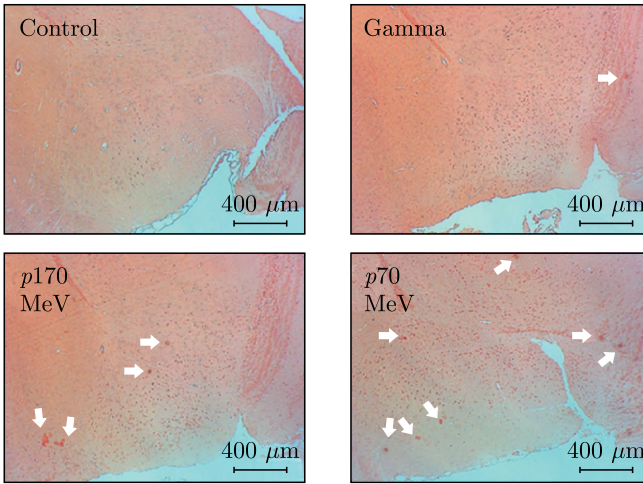
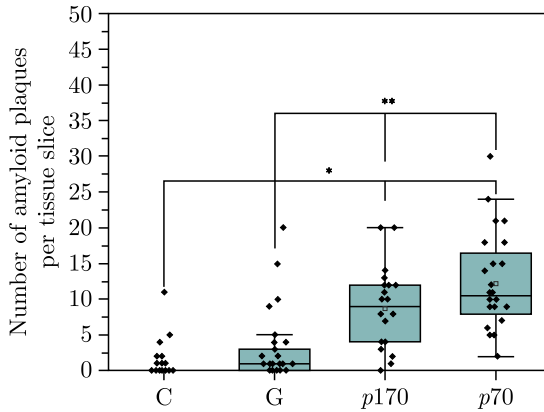


The CSC (SP cell) fraction in the primary B16 melanoma focus 2 days (white columns) and 9 days (gray columns) after proton irradiation and combined exposure: AraC and protons; AraC, hydroxyurea (HU), and protons

- *Zamulaeva I. A., Matchuk O. N., Selivanova E. I., Yakimova A. O., Mosina V. A., Koryakin S. N., Kaprin A. D., Boreyko A. V., Bugay A. N., Chausov V. N., Krasavin E. A.* Radiobiological Effects of the Combined Action of 1- β -D-arabinofuranosylcytosine and Proton Radiation on B16 Melanoma *In Vivo* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2023. V.20, No. 1.

A comparative study of behavioral disorders and morphological changes in the brain of adult female rats after irradiation with ^{60}Co γ rays and protons of different energies at a dose of 1 Gy has been carried out. Impairments of the animals' short-term memory, as well as motor and exploratory activity, have been observed. Comparative pathomorphological analysis of possible causes of behavioral disorders revealed early amyloidosis, autolysis of the ependymal layer, neurodegenerative changes in various brain structures, and the development of neuronal hypertrophy. The observed destructive changes increase with particles' LET, which was 0.2 keV/ μm (γ rays), 0.5 keV/ μm (170-MeV protons), and 0.97 keV/ μm (70-MeV Bragg peak protons).

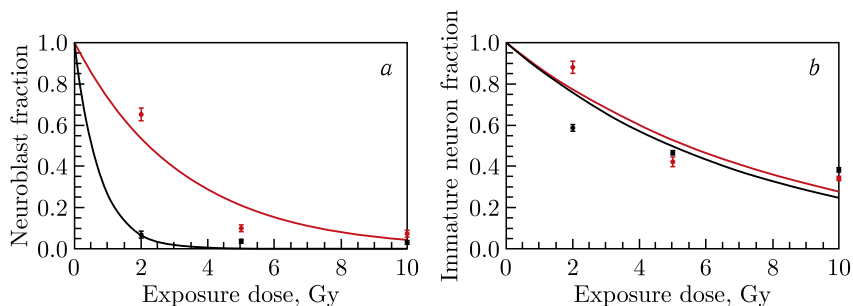
- *Severyukhin Yu. S., Lalkovičová M., Utina D. M., Lyakhova K. N., Kolesnikova I. A., Ermolaeva M. E., Molokanov A. G., Gaevsky V. N., Komarov D. A., Krasavin E. A.* Comparative Analysis of Behavioral Reactions and Morphological Changes in the Rat



Amyloid plaques in the rat forebrain 30 days after irradiation (marked with white arrows on sections). C, G, *p170*, and *p70* denote, respectively, the control group, gamma irradiation, 170-MeV protons, and 70-MeV protons

Brain after Exposure to Ionizing Radiation with Different Physical Characteristics // Cell. Mol. Neurobiol. 2023. V.43, No.1. P. 339–353; <https://doi.org/10.1007/s10571-021-01187-z>.

A mathematical model of radiation-induced impairment of neurogenesis in adult C57BL/6J mice has been developed. The model reproduces experimental data on age-related changes in the number of neural stem cells, amplifying neuronal progenitors, neuroblasts, immature neurons, and, for the first time, mature neurons, astrocytes, and oligodendrocytes. Accounting for the death



The fraction of surviving neuroblasts (a) and immature neurons (b) on the 21st and 60th day of mouse life (red and black lines, respectively) after acute X-ray irradiation at the doses of 2, 5, and 10 Gy calculated by the proposed model. Red circles indicate experimental data for 21-day old mice (Rola R. *et al.* 2004), black squares — for 60-day old mice (Mizumatsu S. *et al.* 2003)

of progenitor cells and immature neurons made it possible to assess the deficit of newly formed mature neurons, astrocytes, and oligodendrocytes after irradiation with X-rays and accelerated ^{56}Fe ions.

- Glebov A. A., Kolesnikova E. A., Bugay A. N. Mathematical Model of Radiation-Induced Violation of Neurogenesis // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 4. P. 338–354.

ACCELERATOR TOPICS

The construction of the complex of heavy-ion accelerators was completed. The complex includes an electron string ion source, a heavy-ion linear accelerator, the superconducting intermediate synchrotron Booster, the major accelerator of the NICA complex — the Nuclotron, and all the beam transport channels that connect them. In 2022, carbon, argon and xenon ion beams were accelerated at the complex. The station for irradiating microchips (SOChi — Station Of Chip Irradiation) was tested with argon beams. Experiments at fixed targets were started. During the spring commissioning run, which lasted for more than 2000 h, experiments under the SRC (Short Range Correlation) programme were performed with the carbon beam accelerated to an energy of 3 GeV/nucleon. Preparations for conducting experiments on xenon ion beams were completed. In addition to injecting ion beams of up to gold and bismuth into the collider, the complex will



The cycle of the Nuclotron magnetic field and the intensity of the xenon nuclei beam measured by a parametric current transformer while performing tuning for the BM@N experiment. The intensity of the accelerated beam is approximately 10^7 particles

provide opportunities for solutions to numerous physics and applied problems.

- *Butenko A. et al.* First Experiments with Accelerated Ion Beams in the Booster of the NICA Accelerator Complex // Proc. of the 12th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC2021), Campinas, Brazil, May 24–28, 2021.
- *Syresin E. et al.* NICA Ion Collider and Plans of Its First Operations // Proc. of the 13th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC2022), Bangkok, Thailand, June 12–17, 2022.

INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

In 2022, the “Govorun” supercomputer was modernized; the computing power of the supercomputer enhanced by 23.5%, which made it possible to reach a peak performance of 1.1 PFlops, the data processing and storage system was enlarged by 8 PB. Such a modernization will not only provide new opportunities for more efficient computing and Big Data intelligent processing within different JINR’s scientific experiments, including the NICA megascience project, but will also enable the implementation of large-scale research projects within the National Research Com-

puter Network (NIKS), which combines three Shared Use Centres (SUC), namely, the Joint Institute for Nuclear Research, the Joint Supercomputer Centre of the Russian Academy of Sciences (JSCC RAS) and Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU).

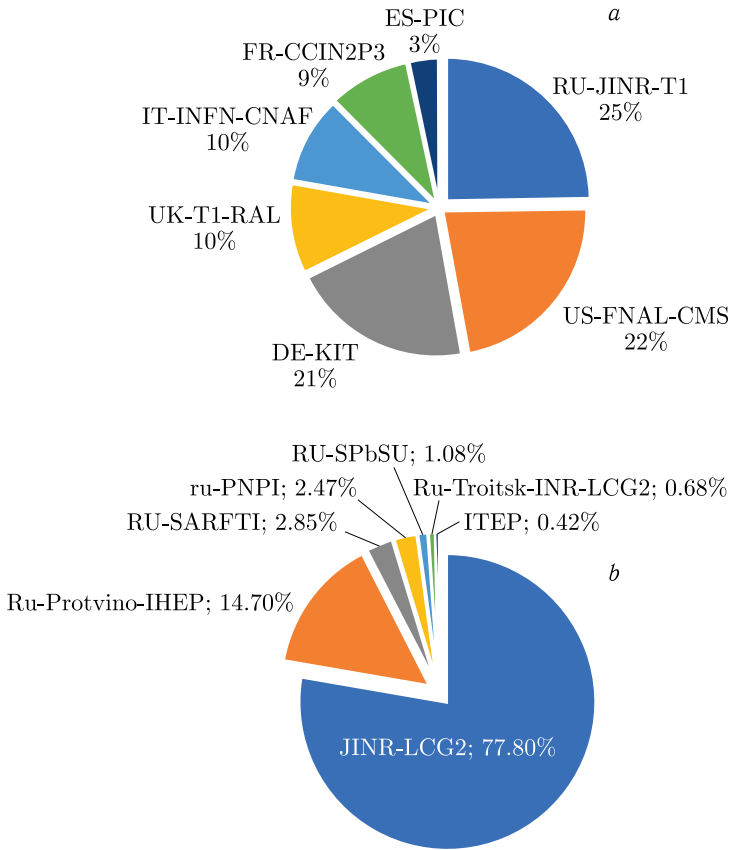
- The Performance of the “Govorun” Supercomputer at JINR Reached 1.1 PFlops. CNews Press Release; https://www.cnews.ru/news/line/2022-11-17_proizvoditelnost_superkompyutera.

The JINR Tier1 centre demonstrates stable operation not only for the CMS experiment, but also for NICA MPD. In terms of performance, Tier1 ranks first among Tier1 centres for the CMS experiment in the world. 30% of all tasks performed on Tier1 are NICA MPD tasks. The Tier2 centre is the most productive in the Russian consortium RDIG (Russian Data Intensive Grid) and is used for data processing within the NICA, LHC, ILC, BIOMED, NOvA experiments, as well as by JINR local users.

- *Korenkov V. V.* Status and Development Prospects of the JINR Computer Complex // Proc. of the 16th Intern. Conf. on Parallel Computational Technologies (PCT 2022), Dubna, Russia, March 29–31, 2022.

To solve one of the important practical problems, namely, the control of the pressure and flow of liquid nitrogen of the superconducting magnets of the cryogenic system of the NICA accelerator complex, a software and hardware platform was developed on the basis of quantum fuzzy controllers embedded into the control loop. The multilevel control system comprises the existing lower executive level on top of the Tango Controls system and a new level, at which control actions are formed using a quantum fuzzy controller. At the same time, optimal parameters of control quality, such as temperature, nitrogen consumption, speed, the required pressure level and minimal complexity of the control implementation, are provided. The operability and efficiency of the developed intelligent remote-control system for the technological process of cooling a superconducting magnet with a guaranteed achievement of a stable superconductivity zone were experimentally demonstrated. The design of quantum fuzzy controllers is based on quantum information technologies and is carried out applying the QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit) software toolkit developed by JINR MLIT specialists.

- *Butenko A. V., Zrelou P. V., Korenkov V. V., Kostromin S. A., Niki-
forov D. N., Reshetnikov A. G., Semashko S. V., Trubnikov G. V.,*



Distribution by the normalized CPU load time in HS06 hours within 2022 for: a) Tier1 sites for the CMS experiment and b) Tier2 sites being part of the RDIG consortium

Ulyanov S. V. Intelligent System for Remote Control of Liquid Nitrogen Pressure and Flow in the Cryogenic System of Superconducting Magnets: Hardware and Software Platform // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 2.

- *Korenkov V. V., Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V., Zrelov P. V., Zrelova D. P.* Self-Organized Intelligent Quantum Controller: Quantum Deep Learning and Quantum Genetic Algorithm – QSCOptKB™ Toolkit // Proc. the 6th Intern. Workshop on Deep Learning in Computational Physics (DLCP2022), Dubna, Russia, July 6–8, 2022.

The KANTBP 3.1 program for calculating energy values, reflection and transmission matrices and the corresponding wave

functions in the adiabatic coupled-channel approach was developed and published in the CPC Program Library. The advantage of this program in comparison with the widely used CCFULL program is the thorough processing of the boundary conditions to solve the system of coupled Schrödinger equations, which enables to maintain a high accuracy of computations that take into account a large number of coupled channels. Theoretical cross sections obtained with the KANTBP 3.1 program well describe experimental data for different heavy-ion fusion and fission reactions.

- *Chuluunbaatar O. et al.* KANTBP 3.1: A Program for Computing Energy Levels, Reflection and Transmission Matrices, and Corresponding Wave Functions in the Coupled-Channel and Adiabatic Approaches // *Comp. Phys. Commun.* 2022. V.278. P.108397.

To study the pion damping width (lifetime) of elementary particles, an algorithm for the calculation of multidimensional collision integrals based on the Monte Carlo method, which is optimized for the given specific task, is created. The algorithm is applied to calculate the pion damping width in hot nuclear matter, which is typical of heavy-nucleus collision processes. For this, all possible pion–pion scattering modes are taken into account. The scattering amplitude is calculated within the Nambu–Jona-Lasinio model. It is shown that a change in the medium temperature results in an increase in the pion width to a certain maximum value, after which the width starts decreasing and again very rapidly increases at a temperature close to that of the phase transition of hadronic matter to the state of quark–gluon plasma. This happens due to the fact that the pion at this temperature ceases to be a bound state and passes into a resonant state.

The calculations were performed on the HybriLIT heterogeneous cluster of the Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies. To optimize the computation time, parallel computing based on OpenMP and CUDA technologies was used.

- *Friesen A. V., Goderidze D., Kalinovsky Yu. L.* Optimization of Monte Carlo Integration for Estimating of the Pion Damping Width // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V.19, No.4. P.337.

EDUCATIONAL ACTIVITIES

In 2022, the training of students at the JINR-based departments of MSU, MEPHI, MIPT, Dubna State University, St. Petersburg State University, and K(P)FU was organized in the offline format.

The number of students from the universities of the JINR Member States who completed their internships and practices at JINR reached 342.

80 students and postgraduates from Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Cuba, Egypt, Germany, Greece, Hungary, India, Iran, Kuwait, Mexico, Nigeria, Poland, Romania, Russia, Serbia, South Africa, Turkey, Ukraine, USA, and Vietnam took part in two Waves of online INTEREST programme 2022. The programme includes remote work on research projects, lectures, and online excursions.

The JINR Summer Student Programme began to work under a new name — START (STudent Advanced Research Training at JINR). Students from all over the world specializing in science, engineering, and IT, finishing their 3rd year of the Bachelor programme, Master students, as well as postgraduates of the 1st year, are admitted for participation in START. 47 representatives of Armenia, Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Egypt, India, Russia, Serbia, and Uzbekistan attended the first session.

The 1st Stage of the International Student Practice in JINR Fields of Research started on 1 March after a long break. 24 Master and PhD students specializing in various fields, as well as young researchers from the Arab Republic of Egypt, took part in the Practice. The Practice was initiated by Egypt that had become a Member State of JINR in November 2021.

JINR UC participated in the organization and holding of the following activities: All-Russian Festival NAUKA 0+; Festival of Science and Technologies GEEK PICNIC; events “Career Boost: Scientific and Applied Tracks of Phystech”; Pacific online marathon “Big Science Firsthand” for the Far Eastern Federal University (FEFU); physics workshop “Element 105” as part of the “Summer School”. Another International Scientific School for Physics Teachers was held at JINR, and more than 20 people from Russia and Armenia took part in the event. As part of career guidance for schoolchildren, the following events were organized: Annual Science Festival “Physics Days” in Dubna; 34th International Computer School (ICS); 2nd Scientific School for Students of the Children’s University at the Egyptian Academy of Scientific Research and Technology; 11th CyberDubna-2022 Robotics Tournament of the Open Upper-Volga Educational Cybernetic Network; qualifying stage of the 5th Technical Hackathon “Dubna-2022”; participation in the project “Lessons of the Present” of the Educational Centre “Sirius”; UC Lectorium; offline and online lectures and excursions to the JINR Laboratories.

GENERAL DATA
ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS
BY JINR STAFF MEMBERS
(from 14.12.2021 to 06.12.2022)

• Books — 12:

Intelligent Cognitive Robotics: Textbook. V. I. Soft Computational Intelligence and Information — Thermodynamic Law of Intelligent Cognitive Control / O. Yu. Tyatyushkina, A. G. Reshetnikov, V. S. Ulyanov, S. V. Ulyanov. — M.: KURS, 2022. — 536 p.: ill. — (Quantum End-to-End IT). — Bibliogr.: end of parts.

Penionzhkeovich Yu. E., Kalpakchieva R. G. Light Exotic Nuclei near the Boundary of Neutron Stability. — New Jersey [etc.]: World Sci., 2022. — 474 p.: ill. — Bibliogr.: end of papers.

Quantum Software Engineering Toolkit: Textbook. P. 1. Quantum Fast Search Algorithms. Quantum Simulators on Classical Computers. Quantum Control Information Models / O. V. Ivancova, V. V. Korenkov, S. V. Ulyanov, P. V. Zrelov. — M.: KURS, 2022. — 464 p.: ill. — (Quantum End-to-End IT). — Bibliogr.: end of parts.

Zhanlav T., Chuluunbaatar O. New Developments of Newton-Type Iterations for Solving Nonlinear Problems. — M.: KURS, 2022. — 272 p.: ill. — (Science). — Bibliogr.: p. 255–267.

Bednyakov V. A. Science as a Protectress / Ed.: E. V. Kalinikova. — Dubna: JINR, 2022. — 251 p.: ill.

Bilenky S. M. Introduction to Feynman Diagrams and Physics of Electroweak Interaction. — M.: URSS, 2022. — 326 p.: ill. — (MSU classical textbook). — Bibliogr.: p. 323–324.

Blokhintsev D. I. Diaries. 1955–1975 / General ed.: T. D. Blokhintseva; Edit. Board: I. D. Blokhintsev, N. S. Kavalerova, E. V. Kalinnikova, K. Eh. Kozubsky, S. N. Nedelko, A. A. Rastorguev. — Dubna: JINR, 2022. — 359 p.: ill. — Heading: Joint Institute for Nuclear Research.

Intellectual Cognitive Robotics: Study Guide. P. 1. Technologies of Quantum Cognitive Calculations / V. V. Korenkov, S. V. Ulyanov, A. A. Shevchenko, A. V. Shevchenko. — M.: KURS, 2022. — 556 p.: col. ill. — (Quantum Software Engineering Toolkit). — Bibliogr.: end of chapter.

Korenkov V. V., Filozova I. A., Ivantsova O. V. Technologies of Data Bases. Designing of Relational Data Bases: Study guide. — M.: KURS, 2022. — 127 p.: ill. — (Digital Management Platforms). — Bibliogr.: p. 105–107.

Timoshenko G.N. Radiation Protection of High Energy Accelerators. — Dubna: JINR, 2022. — 111 p.: ill. — (JINR; 2022-3).

Shabalin E.P. On Board the Ship of Your Dream: Memoirs of a Nuclear Reactor Specialist. — Dubna: JINR, 2022. — 226, [1] p.: col. ill.

Shvidkij S. The Seventh Sense: [a collection of poems]. — Dubna: JINR, 2022. — 83 p.

- Journal papers — 1134
- Publications in Proceedings — 188
- Preprints — 28
- Abstracts of theses — 18

Total: 1380.

Дизайн обложки *И. Ю. Щербаковой*

Редакторы: *В. В. Булатова, Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 1.02.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,89. Тираж 170 экз. Заказ 60595.

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

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/

