

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2023 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2023  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2023 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2023  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна 2024

ISBN 978-5-9530-0610-1

© Объединенный институт  
ядерных исследований, 2024

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Получено обобщенно-ренормгрупповое уравнение, суммирующее все главные логарифмы, для эффективного потенциала в скалярной теории с произвольной формой потенциала. Уравнение было применено к инфляционной космологии в аттракторной T-модели с медленным скатыванием: показано сохранение асимптотического поведения соответствующих эффективных потенциалов, вычислены космологические наблюдаемые, обнаружено спонтанное нарушение симметрии в эффективном потенциале вследствие квантовых поправок (механизм Коулмана–Вайнберга).

- *Kazakov D. I., Tolkachev D. M., Iakhibbaev R. M.* // J. High Energy Phys. 2023. V. 4. P. 128; J. Cosmol. Astropart. Phys. 2023. V. 9. P. 49.

Предложен новый механизм, в котором неполное слияние рассматривается как очень асимметричное по массе квазиделение двойной ядерной системы, образующейся при захвате налетающего ядра ядром-мишенью. Показано, что неполное слияние происходит из-за сильного увеличения внутреннего барьера слияния по степеням свободы передачи массы и заряда, что препятствует полному слиянию в очень асимметричных системах, в результате возрастает вероятность образования  $\alpha$ -частиц. Центробежная сила вызывает разрушение этой асимметричной системы (например, с  $\alpha$ -частицей). Остаточное ядро, образующееся при неполном слиянии, нагрето меньше, чем составное ядро, образующееся при полном слиянии. Предложенный механизм открывает возможности для получения новых изотопов в реакциях неполного слияния.

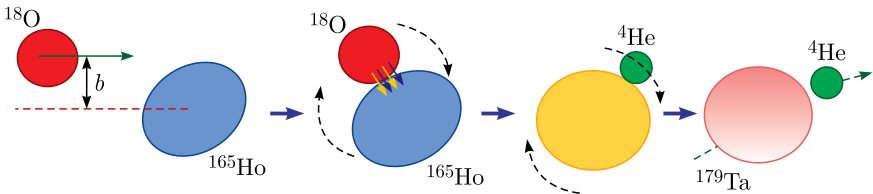


Схема механизма неполного слияния в виде сильно асимметричного квазиделения в случае реакции  $^{18}\text{O} + ^{93}\text{Nb}$

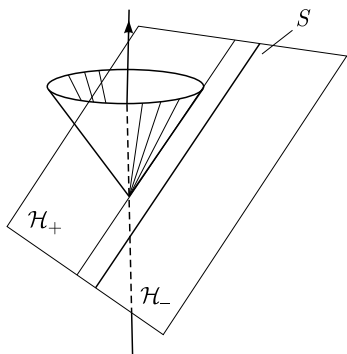
- *Nasirov A. K., Kayumov B. M., Ganiev O. K., Yuldasheva G. A.* // Phys. Lett. B. 2023. V. 842. P. 137976.



Построена функция  $J_r$ , связанная с обобщением матрицы слияния квантовой модели Лиувилля на случай парафермионной модели с центральным зарядом  $c = \frac{3r}{r+2} + \frac{6}{r}(b+b^{-1})^2$ . При  $r = 1$  и  $r = 2$  возникают обычная и суперсимметричная теории Лиувилля. Свойства симметрии функции  $J_2$  позволили решить проблему эквивалентности разных параметризаций матрицы слияния суперсимметричной теории, долгое время остававшуюся открытой.

- *Apresyan E., Sarkissian G., Spiridonov V. P.* // Nucl. Phys. B. 2023. V. 990. P. 116170.

Исследованы эффекты электродинамики в пространстве-времени с нулевой космической струной. Рассмотрены случаи, когда горизонт струны пересекает точечный источник с электрическим зарядом или источник с магнитным моментом. Показано, что



Точечный источник пересекает горизонт струны  $\mathcal{H}_+$ .  $S$  — мировая поверхность струны

нулевые струны возмущают электромагнитное поле источника и индуцируют электромагнитные всплески. Получено аналитическое приближение для асимптотики электромагнитных волн на нулевой бесконечности будущего, вычислен поток излучения для источников обоих типов. Оценки показывают, что пиковая мощность излучения может быть весьма велика для нулевых струн, движущихся вблизи пульсаров, и еще больше для магнетаров. В гравитации показано, что возмущение гравитационного поля

массивных источников, вызванное нулевыми космическими струнами, излучается в виде гравитационных всплесков. Нулевая космическая струна и точечная масса вместе порождают пространство, геометрия которого вблизи нулевой бесконечности будущего позволяет отнести его к классу так называемых полиоднородных пространств.

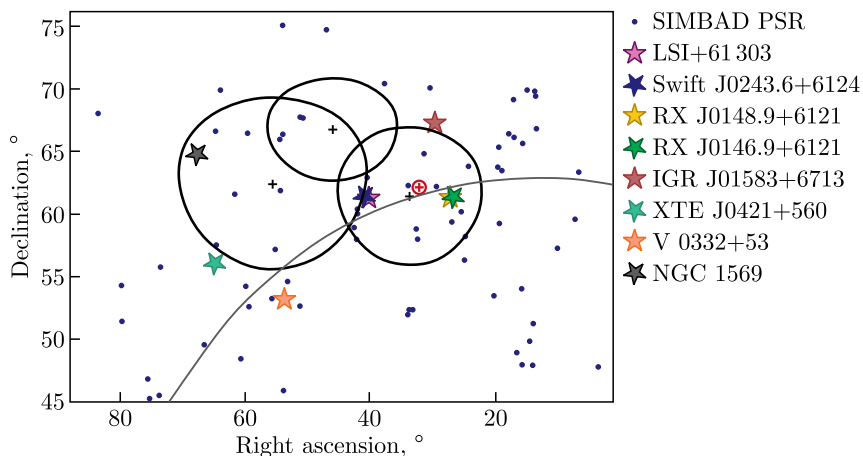
- *Fursaev D. V., Pirozhenko I. G.* // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. P. 025018; arXiv:2309.01272 [gr-qc]. 2023.
- *Fursaev D. V., Davydov E. A., Pirozhenko I. G., Tainov V. A.* arXiv: 2311.01863 [gr-qc]. 2023.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

## Физика частиц

С вводом в апреле 2023 г. двух новых кластеров рабочий объем байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил значение  $0,5 \text{ км}^3$  в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Детектор содержит в своем составе 12 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (3456 оптических модулей) и сохраняет позицию крупнейшего нейтринного телескопа Северного полушария.

В ходе анализа данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018–2022 гг., исследованы корреляции с радиояркими блазарами каскадных событий с энергиями, превышающими 100 ТэВ. Несмотря на то, что в текущем наборе данных не обнаружено статистически значимых эффектов, анализ указывает на ряд возможных ассоциаций как с экстрагалактическими, так и с галактическими источниками. В частности, представлен анализ наблюдаемого триплета нейтринных кандидатов в галактической плоскости, исследована его потенциальная связь с определенными галактическими источниками, рассмотрено совпадение направлений прихода каскадных событий с несколькими яркими блазарами.



Три каскадных события Baikal-GVD с высокой энергией: GVD190216CA, GVD190604CA и GVD210716CA — вблизи галактической плоскости (серая линия) и ошибки определения их направлений (черные линии). Точка статистически наиболее значимого превышения потока IceCube над изотропным в Северном полушарии показана красным плюсом

- *Allakhverdyan V. A. et al. (Baikal-GVD Collab.), Kosogorov N. A., Kovalev Y. Y., Lipunova G. V., Plavin A. V., Semikoz D. V., Troitsky S. V. et al.* Search for Directional Associations between Baikal Gigaton Volume Detector Neutrino-Induced Cascades and High-Energy Astrophysical Sources // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2023. V. 526, No. 1. P. 942–951; e-Print:2307.07327.

На Калининской АЭС проводятся два эксперимента, направленных на исследование фундаментальных свойств нейтрино:  $\nu\text{GeN}$  и DANSS.

В эксперименте  $\nu\text{GeN}$  сравнение данных, набранных при работающем и остановленном реакторе (154 и 39 сут соответственно), не выявило признаков ожидаемого сигнала от когерентного рассеяния нейтрино. Это позволило поставить ограничение на параметр ионизационных потерь в германии (квенчинг) на уровне  $k < 0,23$  (уровень достоверности 90%) [1, 2].

В настоящее время имеется ряд свидетельств в пользу существования гипотетического стерильного нейтрино, в частности, в экспериментах «Нейтрино-4» и BEST (ИЯИ, Баксан, Россия). В ходе анализа данных детектора DANSS было установлено, что отношение наблюдаемой скорости абсолютного счета антинейтрино к предсказанной на основе модели Хубера и Мюллера составляет  $0,98 \pm 0,04$ . Установлены пределы в пространстве параметров гипотетического стерильного нейтрино. В частности, для больших ( $\gtrsim 10 \text{ эВ}^2$ ) значений параметра  $\Delta m_{41}^2$  исключаются значения  $\sin^2 2\theta_{ee} > 0,26$  на 90%-м уровне достоверности. Использование абсолютных скоростей счета детектора DANSS позволило исключить наилучшую точку  $\Delta m_{41}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{ee} = 0,36$ , полученную в эксперименте «Нейтрино-4». Кроме того, исключается практически вся область допустимых параметров, полученных в эксперименте BEST [3].

1. *Lubashevskiy A.* Search for the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering and Other Rare Processes in  $\nu\text{GeN}$  Experiment at Kalinin Nuclear Power Plant // *Proc. of the 29th Intern. Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2023)*, Zhuhai, China, 3–8 July 2023.
2. *Лубашевский А.В.* Результаты эксперимента  $\nu\text{GeN}$  по поиску когерентного рассеяния реакторных антинейтрино и других редких процессов // 73-я Междунар. конф. по ядерной физике «Ядро-2023», Саров, Россия, 9–13 окт. 2023 г.
3. *Skrobova N.* Measurements of the Absolute Reactor Antineutrino Energy Spectrum Dependence on the Fuel Composition // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86. P. 544–550.

В Китае продолжается сборка крупнейшего детектора реакторных антинейтрино JUNO. На сегодня установлены более половины из запланированных 18 000 фотоумножителей (ФЭУ) диаметром 20 дюймов и 25 000 ФЭУ диаметром 3 дюйма. Для этих фотоумножителей предусмотрено высоковольтное питание с использованием 20 000 специализированных модулей, разработанных и произведенных в ОИЯИ, включая их тестирование и пусконаладку. Завершение сборки и начало заполнения детектора жидким сцинтиллятором запланированы на весну 2024 г.

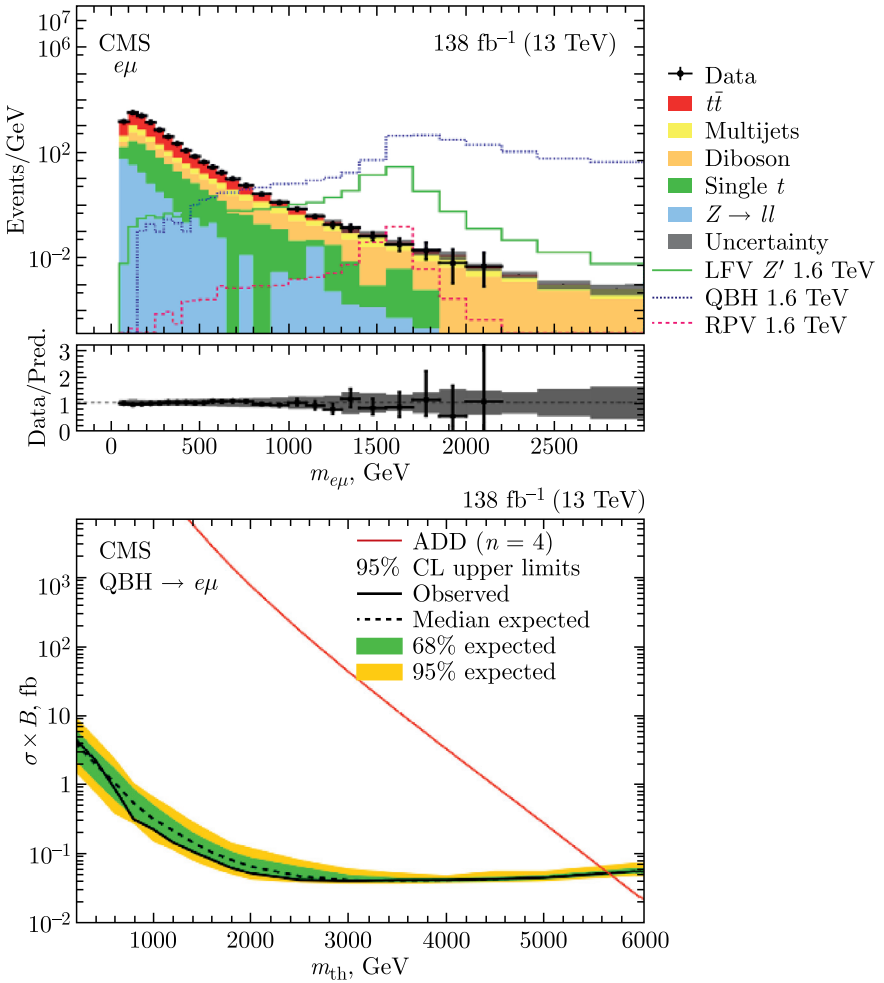
Параллельно ведутся работы по подготовке к сборке и установке детектора топ-трекер. Разработанное в ОИЯИ программное обеспечение для сбора данных детектора проходит отладку на прототипе топ-трекера в IPHC (Страсбург, Франция). В рамках проекта изготовлена станция для массового тестирования 4100 матриц кремниевых фотоумножителей, включающих 130 тыс. индивидуальных ФЭУ. Проведено тестирование более половины матриц.

- *Abusleme A. et al. (JUNO Collab.). The JUNO Experiment Top Tracker // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1057. P. 168680.*

В рамках проекта BESIII (Пекин, КНР) сотрудниками ОИЯИ проведена проверка CP-нарушения в парах  $\Xi^0 - \bar{\Xi}^0$ . Процесс  $J/\psi \rightarrow \Xi^0 \bar{\Xi}^0$  и последующие распады были исследованы на  $(10\,087 \pm \pm 44) \cdot 10^6$  событий  $J/\psi$ , набранных в эксперименте. Параметры распада  $\Xi^0$  ( $\alpha_{\Xi}, \varphi_{\Xi}$ ) и  $\bar{\Xi}^0$  ( $\alpha_{\bar{\Xi}}, \varphi_{\bar{\Xi}}$ ) были одновременно измерены с беспрецедентной точностью. Получены наиболее точные значения наблюдаемых  $A_{CP}^{\Xi}$  и  $\Delta\varphi_{CP}^{\Xi}$  для CP-нарушения в распаде  $\Xi^0$ . Впервые определены слабая и сильная разности фаз  $\xi_P - \xi_S$  и  $\delta_P - \delta_S$ , что является наиболее точным результатом для любого слабораспадающегося бариона.

- *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.). Tests of CP Symmetry in Entangled  $\Xi^0 - \bar{\Xi}^0$  Pairs // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. P. L031106.*

Группа ОИЯИ в эксперименте CMS (ЦЕРН, Женева) участвовала в наборе данных при энергии ЛHC  $\sqrt{s} = 13,6$  ТэВ и поиске сигналов физики за рамками Стандартной модели в каналах с ожидаемым нарушением лептонной универсальности: при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ исследованы спектры инвариантных масс  $ee, \mu\mu, e\mu, e\tau$  и  $\mu\tau$ . Получены уникальные ограничения на параметры различных моделей новой физики. ОИЯИ также участвует в создании калориметра с высокой гранулярностью и в модернизации мюонной системы для работы в условиях высокой светимости HL-LHC.



Вверху: распределение событий по инвариантной массе пары лептонов  $e\mu$  при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ и интегральной светимости  $138 \text{ фб}^{-1}$ . Внизу: верхний предел на уровне достоверности 95% на сечение образования и распада на пару  $e\mu$  квантовой черной дыры (сценарий с числом дополнительных измерений  $n = 4$ )

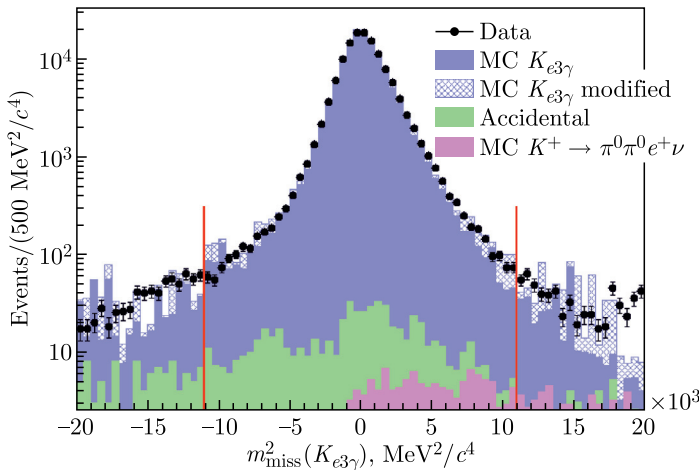
- *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.). Search for Heavy Resonances and Quantum Black Holes in  $e\mu$ ,  $e\tau$ , and  $\mu\tau$  Final States in Proton–Proton Collisions at 13 TeV // J. High Energy Phys. 2023. V. 5. P. 227.*

С участием группы ОИЯИ в эксперименте NA64 на установке SPS в ЦЕРН на статистике  $9,37 \cdot 10^{11}$  еот взаимодействий элек-

тронов с энергией 100 ГэВ с активной мишенью, набранной в ходе сеансов 2016–2022 гг., было впервые проведено исследование наиболее интересной области параметров моделей скалярной и фермионной термальной темной материи с субгэвной массой (LDM), рожденной медиатором — новым векторным бозоном — темным фотоном  $A'$ . Сигналов образования темной материи не обнаружено, что позволило установить более точные пределы на взаимодействия  $A'$  с фотонами для области масс  $m_{A'} \lesssim 0,35$  ГэВ, а также исключить сценарии скалярной и майорановской LDM в области параметров константы взаимодействия  $\chi - A'$ , ограниченной сверху  $\alpha_D \leq 0,1$ , и области масс частиц темной материи  $0,001 \lesssim m_\chi \lesssim 0,1$  ГэВ при условии  $3m_\chi \leq m_{A'}$ .

- *Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.). Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 161801.*
- *Peshekhonov D. The NA64 Experiment — Search for Hidden Sector at CERN SPS // 21st Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics, Moscow, 2023.*

В эксперименте NA62 в ЦЕРН на ускорителе SPS физики ОИЯИ завершили исследование радиационного распада  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  на статистике из  $1,3 \cdot 10^5$  кандидатов с фоном менее 1%, набранной в 2017–2018 гг. Измерения относительной вероятно-

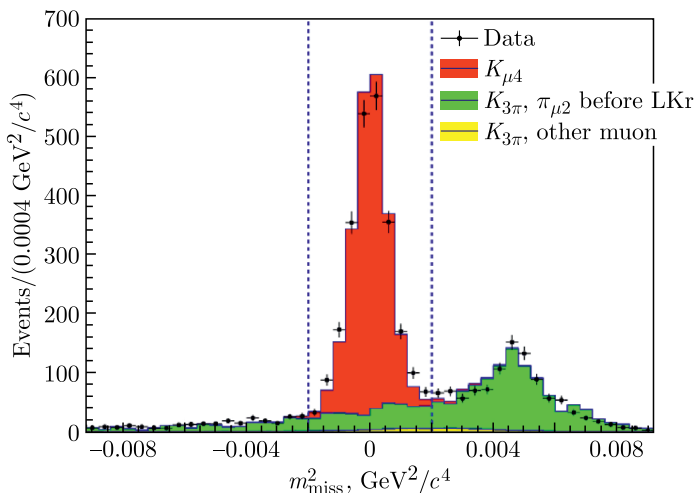


Распределение квадрата недостающей массы комбинаций зарегистрированных частиц  $\pi^0 e^+ \gamma$  для отобранных экспериментальных событий (точки), а также для ожидаемого сигнала и фона (гистограммы)

сти этого распада в трех ограниченных кинематических областях были выполнены с относительной точностью в пределах 1%, что улучшило существующие результаты более чем в два раза. Исследована асимметрия этого распада, которая может быть связана с Т-нарушением, но доказательств ее существования в рамках достигнутой точности обнаружено не было.

- *Gil E. C. et al. (NA62 Collab.). A Study of the  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  Decay // J. High Energy Phys. 2023. V. 9. P. 40; e-Print: 2304.12271 [hep-ex].*

Группа ОИЯИ в эксперименте NA48/2 (ЦЕРН) выполнила поиск редкого распада  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ , предсказанного теоретически, но сложного для наблюдения из-за высокого фона от цепи распадов  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^\pm$ . На основе экспериментальной выборки из 2437 кандидатов, собранной в 2003–2004 гг., с фоном в 15% впервые наблюден распад  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ . Измеренная относительная вероятность распада в кинематической области квадрата массы дилептона выше  $0,03 \text{ ГэВ}^2/c^4$  составляет  $(0,65 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$ . Экстраполяция на полное кинематическое пространство с использованием конкретной модели привела к значению  $(3,45 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$ , что согласуется с предсказаниями киральной теории возмущений.



Распределение квадрата недостающей массы для отобранных экспериментальных событий (маркеры), смоделированные вклады фона и сигнала (гистограммы). Вертикальные линии показывают область сигнала

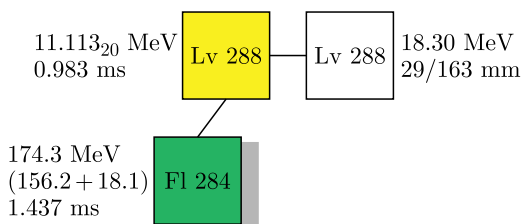


- *Batley J.R. et al. (NA48/2 Collab.). First Observation and Study of the  $K^{\pm} \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^{\pm} \nu$  Decay // J. High Energy Phys. (in press); e-Print:2310.20295 [hep-ex].*

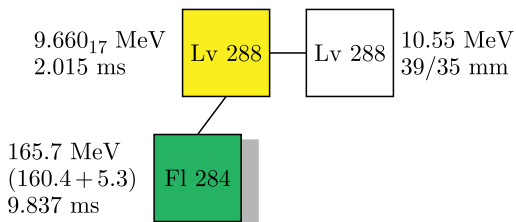
### Физика тяжелых ионов низких энергий

На ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» впервые выполнен эксперимент по синтезу изотопов 116-го элемента в реакции  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$ . Целью эксперимента являлось измерение фактора падения сечения при переходе от реакций с пучком  $^{48}\text{Ca}$  к более тяжелому пучку  $^{54}\text{Cr}$ , а также получение стабильно высокого тока пучка  $^{54}\text{Cr}$ . Было зарегистрировано 2 события образования нового изотопа 116-го элемента —  $^{288}\text{Lv}$ . Обработка экспериментальных данных продолжается.

Oct. 12, 21:56



Oct. 26, 05:38

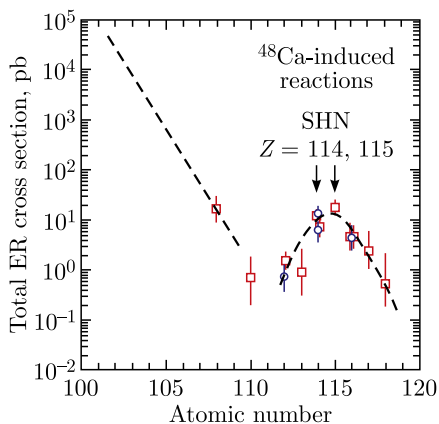


Зарегистрированные цепочки распада нового изотопа  $^{288}\text{Lv}$ , синтезированного в реакции полного слияния  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$

- *Dmitriev S., Utyonkov V., Oganessian Yu. // Proc. of the 7th Intern. Conf. on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN23), Huizhou, China, 12–17 Nov. 2023; <https://indico.impcas.ac.cn/event/31/>.*

На ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» впервые выполнены эксперименты по синтезу изотопов Ds — элемента 110 — в реакциях слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ , а также изотопов  $^{116}\text{Lv}$  в реакции  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$ . Важный результат этих экспериментов — измерение фактора падения сечения при

переходе от реакций с пучком  $^{48}\text{Ca}$  к более тяжелому пучку  $^{54}\text{Cr}$ , а также получение стабильно высокого тока пучка  $^{54}\text{Cr}$ . Была показана возможность проведения экспериментов при экстремально низком сечении — 70 фб. Открыты пять новых сверхтяжелых нуклидов:  $^{288}\text{Lv}$ ,  $^{275,276}\text{Ds}$ ,  $^{272}\text{Hs}$  и  $^{268}\text{Sg}$ . Выполненные исследования имеют принципиальное значение для постановки экспериментов по синтезу новых элементов Периодической таблицы Д. И. Менделеева.

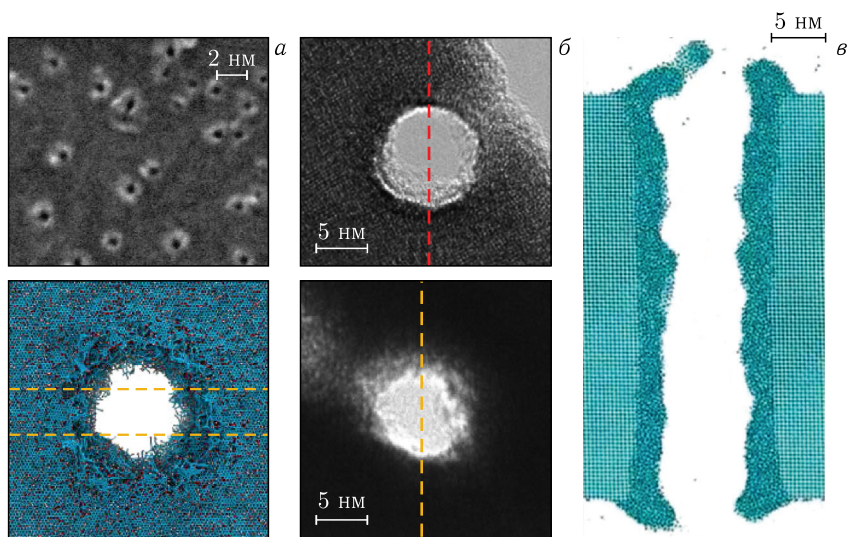


Поведение сечения образования тяжелейших ядер в реакциях слияния  $^{48}\text{Ca}$  с актинидами

- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Shumeiko M. V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. P. 024611.

В результате исследований радиационно-стимулированного изменения свойств наноразмерных материалов показано, что облучение ускоренными тяжелыми ионами может формировать наноканалы в оксиде графена, а также приводить к частичному восстановлению структуры на периферии трека иона.

С использованием комбинированного подхода на основе численных и экспериментальных методов установлено, что размеры и морфология каналов могут прецизионно контролироваться с помощью изменения параметров облучения (энергии и массы частиц) и исходного состояния образца. Аналогичные нанопоры могут быть сформированы также и в образцах оксида вольфрама толщиной до 100 нм. Подобные мембранные структуры с порами нанометрового размера интересны для биологических приложений, таких как молекулярная сепарация, секвенирование ДНК, сенсорика и др.

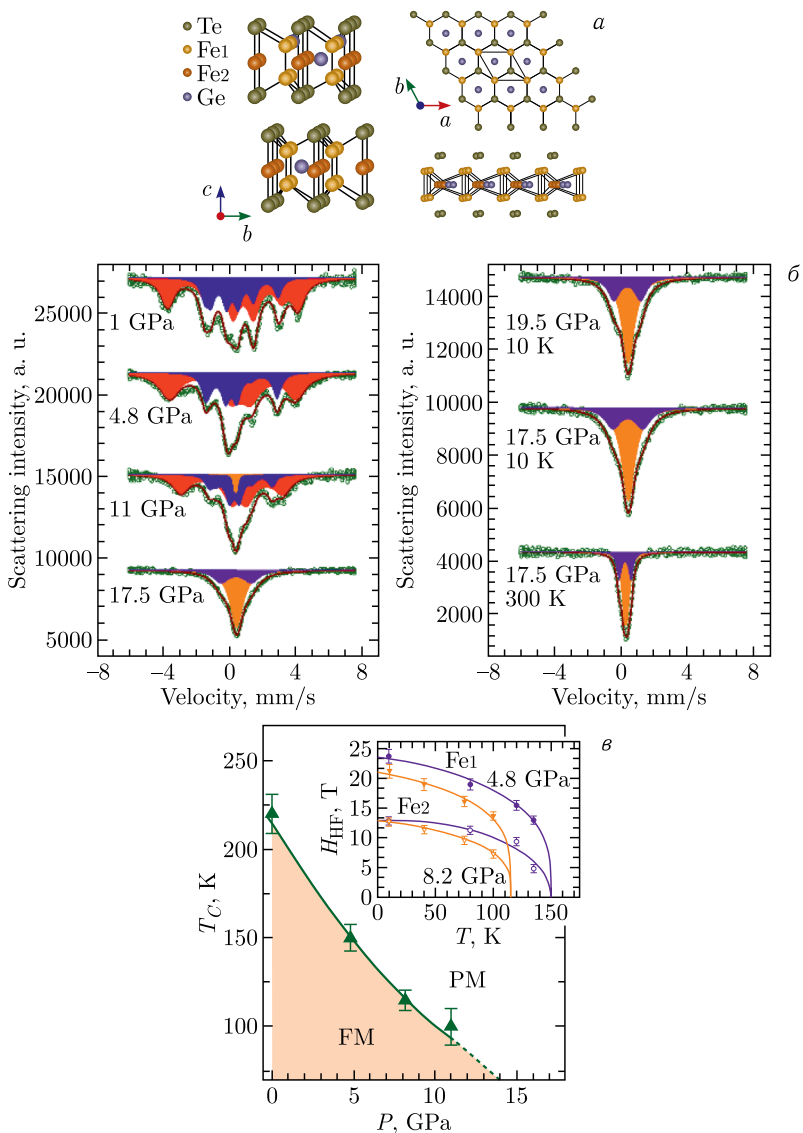


а) Нанопоры в оксиде графена после облучения: эксперимент и моделирование; б) наноканалы в  $\text{WO}_3$  после облучения; в) результат моделирования нанопор в  $\text{WO}_3$

- *Olejniczak A., Rymzhanov R. A.* From Nanohole to Ultralong Straight Nanochannel Fabrication in Graphene Oxide with Swift Heavy Ions // *Nat. Commun.* 2023. V. 14. P. 889.
- *Xu L., Rymzhanov R. A., Zhai P., Zhang S., Hu P., Meng X., Zeng J., Sun Y., Liu J.* Direct Fabrication of Sub-10 nm Nanopores in  $\text{WO}_3$  Nanosheets Using Single Swift Heavy Ions // *Nano Lett.* 2023. V. 23. P. 4502–4509.

### Физика конденсированных сред

Открытие графена инициировало активный поиск двумерных магнитных материалов с похожей структурой и необычными свойствами. Такими являются слоистые двумерные ван-дер-ваальсовы магнитные системы, демонстрирующие широкие возможности контроля и управления магнитными свойствами вплоть до предела монослоя. Особый интерес представляет материал  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  (FGT) — зонный ферромагнетик с высокой температурой Кюри  $T_C \sim 220$  К. При изменении термодинамических параметров в нем наблюдается ряд новых необычных явлений. Низкоразмерная природа FGT предполагает возможность реализации квантовых критических явлений. Для их поиска проведено исследование магнитных и структурных свойств методами синхротронной мессбауэровской



Гексагональная кристаллическая структура  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  (а); синхротронные мессбауэровские спектры, измеренные при различных значениях температуры и давления (б); зависимость температуры Кюри от давления и температурные зависимости сверхтонких магнитных полей при различном давлении (вставка) (в)

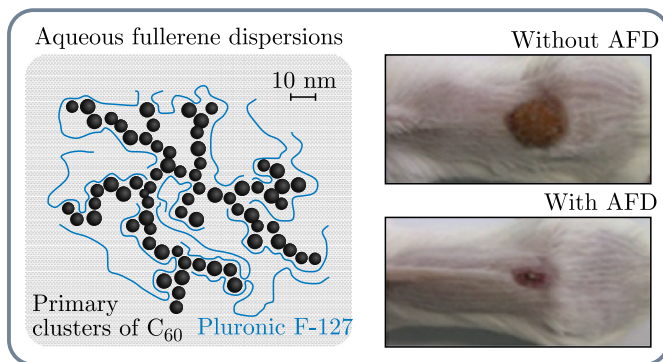
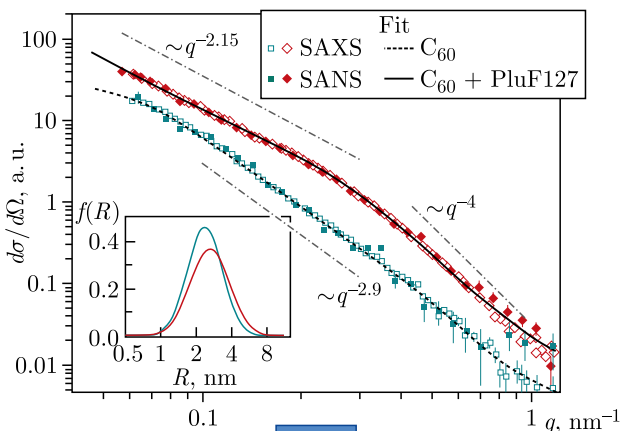
спектроскопии, рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии в диапазоне значений давления 0–20 ГПа и температуры

10–290 К, а также теоретические DFT-расчеты. Обнаружено быстрое подавление ферромагнитного порядка и появление парамагнитного состояния в области давления выше  $P_{PM} \sim 15$  ГПа (рисунок). Также при  $P_C \sim 7$  ГПа наблюдалось аномальное поведение структурных параметров и колебательных мод, связанное с изоструктурным фазовым переходом. Полученные результаты указывают, что высокое давление является движущей силой магнитных квантовых критических явлений в слоистых ван-дер-ваальсовых системах.

- *Dang N. T., Kozlenko D. P., Lis O. N., Kichanov S. E., Lukin E. V., Golosova N. O., Savenko B. N., Duong D.-L., Phan T.-L., Tran T. A., Phan M. H.* High Pressure-Driven Magnetic Disorder and Structural Transformation in  $Fe_3GeTe_2$ : Emergence of a Magnetic Quantum Critical Point // *Adv. Sci.* 2023. V. 10. P. 2206842.

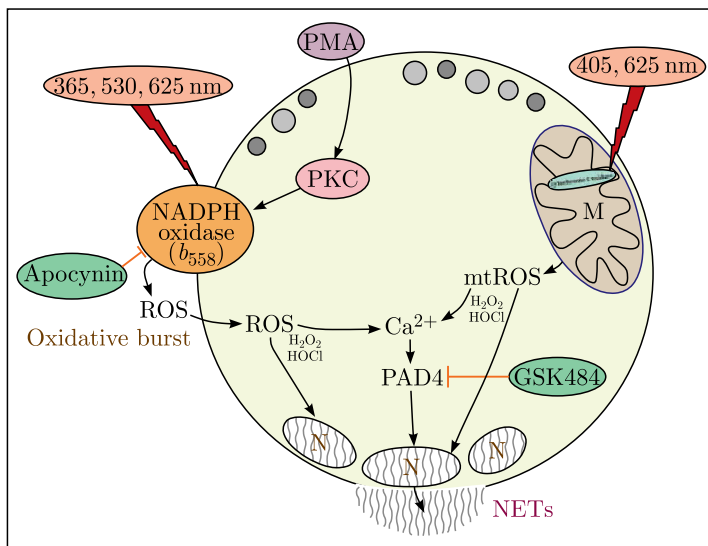
Фуллерены (аллотропная форма углерода наряду с графитом и алмазом) проявляют биологическую активность и применяются в различных медицинских приложениях. Однако они нерастворимы в воде, поэтому могут помещаться в жидкие биологические среды только в виде коллоидных дисперсий, в том числе с использованием дополнительных биосовместимых компонентов. В ЛНФ исследована структура таких дисперсий, произведенных в НИЦ «Институт иммунологии ФМБА России» (Москва) и предназначенных для изучения ранозаживляющего действия фуллерена  $C_{60}$ . Для улучшения стабильности растворов в них добавлялось поверхностно-активное вещество Pluronic F-127. Использовались широкие возможности ЛНФ, включая малоугловое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов, динамическое светорассеяние, оптическая спектроскопия и др. В результате экспериментов удалось определить особенности структурной организации молекул  $C_{60}$  в кластеры при взаимодействии с ПАВ (см. рисунок на с. 16). Данные дисперсии использовались в качестве регенерирующего компонента лечебной мази. Эксперименты на мышах демонстрируют конкурирующие показатели с такими известными коммерческими препаратами, как Бепантен и Дексапантенол. В то же время в препарате на основе фуллеренов отсутствуют побочные эффекты, такие как гемолитическая активность и токсичность.

- *Shershakova N. N., Andreev S. M., Tomchuk A. A., Makarova E. A., Nikonova A. A., Turetskiy E. A., Petukhova O. A., Kamyshnikov O. Y., Ivankov O. I., Kyzyma O. A., Tomchuk O. V., Avdeev M. V., Dvornikov A. S., Kudlay D. A., Khaitov M. R.* Wound Healing Activity of Aqueous Dispersion of Fullerene  $C_{60}$  Produced by “Green Technology” // *Nanomed.: Nanotechnol. Biol. Med.* 2023. V. 47. P. 102619.



Вверху — пример данных SAXS/SANS водных дисперсий фуллерена  $C_{60}$  с добавлением Pluronic F-127. Внизу — схематическая структура дисперсий на основе данных SAXS, SANS, DLS, UV-Vis с иллюстрацией ранозаживляющего действия фуллерена в экспериментах *in vivo*

Методами рамановской спектроскопии и флуоресцентной микроскопии исследована программируемая клеточная гибель — нетоз — под действием как УФ, так и видимого излучения (фотонетоз). Впервые было обнаружено фотоактивирующее влияние не только ультрафиолета, но и видимого света (от синего до красного) в процессе фотонетоза — одного из клеточных механизмов борьбы организма с микробной инвазией. Была также выдвинута гипотеза о первичных фотоакцепторах в клетках нейтрофилов, запускающих всю последующую фотобиологическую цепочку процессов, приводящую к образованию внеклеточных ловушек нейтрофилов (ВЛН).



Схематичное представление сигнальных путей фотоиндуцированного нетоза

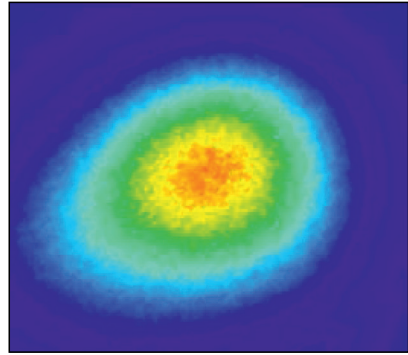
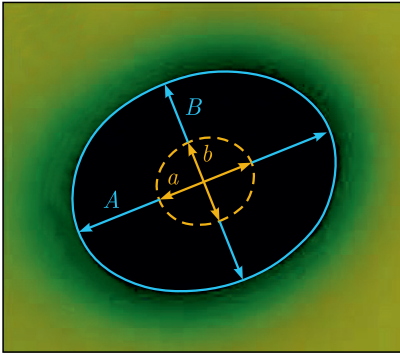
Высококчувствительный рамановский микроспектрометр КАРС позволил зарегистрировать образования различных активных форм кислорода (АФК) в ходе окислительного стресса в клетках нейтрофилов на начальной стадии фотоактивации. Флуоресцентная микроскопия использовалась для визуализации и количественной оценки как интактных клеток, так и образовавшихся ВЛН. Понимание сигнальных путей и механизмов высвобождения ВЛН под воздействием УФ и видимого света важно для контроля последствий повреждающего действия электромагнитного излучения.

- *Arzumanyan G., Mamatkulov K., Arynbeke Ye., Zakrytnaya D., Jevremović A., Vorobjeva N.* Radiation from UV-A to Red Light Induces ROS-Dependent Release of Neutrophil Extracellular Traps // *Intern. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. P. 5770; doi.org/10.3390/ijms24065770.

## РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На ускорительном комплексе NICA стал доступен пучок ионов высоких энергий (3,8 ГэВ/нуклон), предназначенный для решения прикладных задач в области радиационного материаловедения, тестирования защитных свойств новых композитных материалов, космических исследований, радиационной модификации свойств



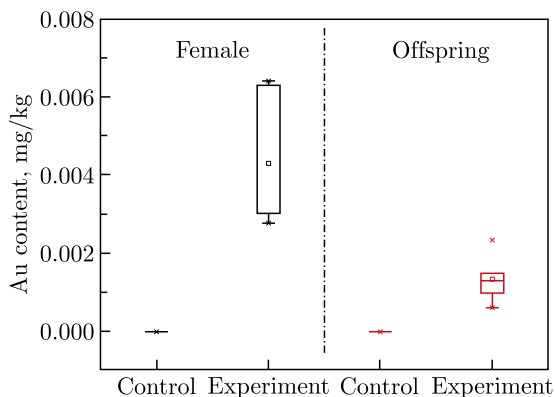


След пучка  $^{124}\text{Xe}^{54+}$  с энергией 3,8 ГэВ/нуклон на радиохромной пленке (слева) и профиль пучка (справа) на детекторе OCTAVIUS 1500XDR ( $A = 34,2$  мм,  $B = 29,3$  мм; равномерная область:  $a = 12$  мм,  $b = 9$  мм)

высокотемпературных сверхпроводников. Реализована уникальная возможность длительного (до нескольких месяцев) облучения образцов. Проведены первые эксперименты по программе работ научной коллаборации ARIADNA, созданной при комплексе NICA для достижения результатов в различных областях прикладных исследований.

- *Belov O. V. (on behalf of ARIADNA Collab.). Applied Research at NICA Facility // IUPAP Conf. “Heaviest Nuclei and Atoms”, Yerevan, Armenia, 25–30 Apr. 2023.*

Впервые исследованы последствия влияния на потомство мышей наночастиц золота, поступивших из организма матери в пренатальный период и в период лактации. Потомство тестировали в водном лабиринте Морриса и приподнятом Т-лабиринте. Золото, обнаруженное с помощью нейтронно-активационного анализа, присутствовало во всех исследованных органах подопытных самок и их потомства, при этом самое высокое содержание золота — в почках и печени. Содержание золота в печени и крови потомства было ниже, чем у самок, что указывает на относительно низкую скорость передачи наночастиц потомству. Накопление золота в мозге было самым низким среди анализируемых органов как у самок, так и у потомства (рисунок), что можно объяснить химической инертностью золота. Никаких значительных различий в пространственной ориентации и памяти между подопытными и контрольными потомками обнаружено не было. Тем не менее подопытные молодые мыши демонстрировали повышенный уровень тревожности в приподнятом Т-лабиринте. Таким образом,



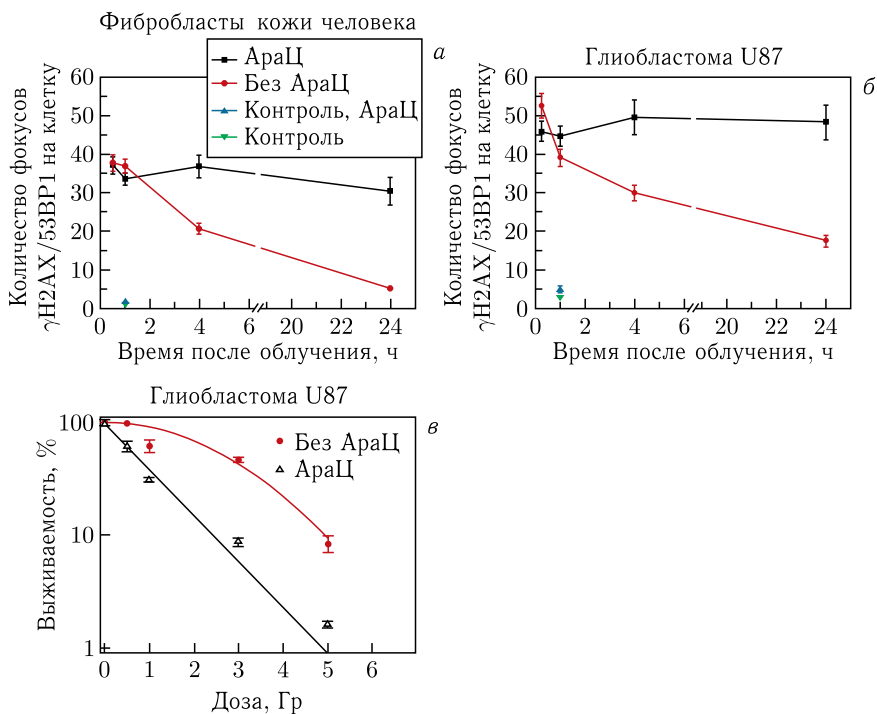
Содержание золота в мозге самок и их потомства, подвергнувшегося воздействию наночастиц золота во время пренатального и раннего постнатального развития

наночастицы золота влияли на эмоциональное состояние мышей, подвергшихся их воздействию во время пренатального и раннего постнатального развития, но не на их когнитивные способности.

- *Iulieva A. L., Petritskaya E. N., Rogatkin D. A., Zinicovscaia I., Yushin N., Grozdov D.* Impact of Chronic Oral Administration of Gold Nanoparticles on Cognitive Abilities of Mice // *Intern. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. P. 8962; <https://doi.org/10.3390/ijms24108962>.

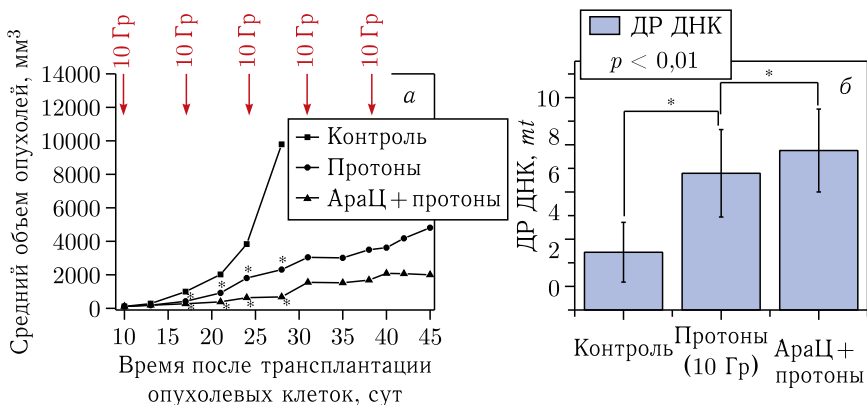
Исследовано модифицирующее влияние ингибитора репаративного синтеза ДНК — арабинозидцитозина (АраЦ) — на формирование радиационно-индуцированных двунитевых разрывов (ДР) ДНК в нормальных и опухолевых клетках *in vitro*. Показано, что при облучении протонами в присутствии АраЦ количество ДР ДНК увеличивается со временем пострадиационной инкубации вплоть до 24 ч в 6 и в 3 раза в ядрах фибробластов и глиобластомы соответственно, по сравнению с количеством ДР ДНК в клетках без ингибитора. Величина фактора изменения дозы по критерию летального действия протонов на клетки глиобластомы в присутствии АраЦ составляет 1,75, что свидетельствует о значительном радиосенсибилизирующем эффекте действия АраЦ на клетки глиобластомы U87 (см. рисунок на с. 20).

- *Борейко А. В., Заднепрянец М. Г., Чаусов В. Н., Храшко Т. С., Кожина Р. А., Кузьмина Е. А., Тиунчик С. И., Красавин Е. А.* Комбинированное действие ингибиторов синтеза ДНК и ускоренных протонов на клетки злокачественных опухолей // *Письма в ЭЧАЯ.* 2023. Т. 20, № 4(249). С. 698–708.



а) Кинетика формирования и элиминации фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 в ядрах клеток фибробластов кожи человека, облученных протонами в дозе 1,25 Гр в обычных условиях (●) и в присутствии АраЦ (■). б) Кинетика формирования и элиминации фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 в ядрах клеток глиобластомы U87, облученных протонами в дозе 1,25 Гр в обычных условиях (●) и в присутствии АраЦ (■). в) Выживаемость клеток глиобластомы U87 при облучении протонами в расширенном пике Брэгга в условиях влияния АраЦ (20 мкмоль)

Исследованы закономерности и молекулярно-клеточные механизмы комбинированного действия АраЦ и фракционированного протонного излучения на мышиную меланому линии В16 *in vivo*. Средний объем опухолей при комбинированном воздействии по сравнению с облучением протонами без модификатора снижался в 1,7–3,4 раза в разные сроки наблюдения ( $p < 0,05$ ). На молекулярном уровне показано, что количество двунитевых разрывов ДНК через 2 сут после завершения сеансов облучения в опухолевых клетках достоверно превышает уровень двунитевых разрывов ДНК при радиационном воздействии без модификатора. Показано, что введение АраЦ усиливает противоопухолевое действие протонного излучения путем реализации нескольких механизмов, среди



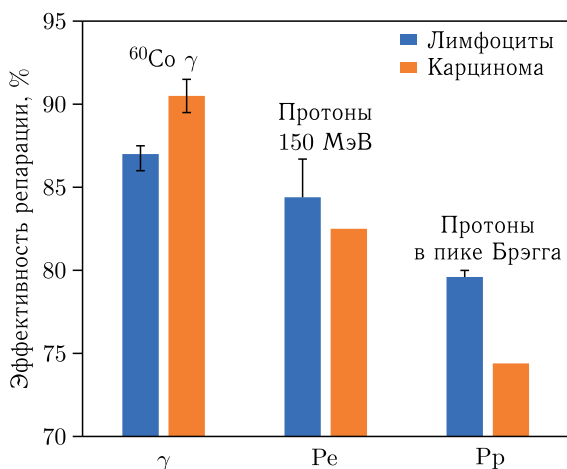
а) Изменение размеров первичного очага меланомы В16 в разные сроки после облучения протонами и комбинированного действия протонного излучения на фоне АраЦ в сравнении с контролем. Сеансы облучения в дозе 10 Гр отмечены вертикальными стрелками. \* —  $p < 0,001$  по сравнению с контролем. б) Количество двунитевых разрывов ДНК в первичном очаге мышиной меланомы В16 через 2 сут после облучения протонами и комбинированного воздействия АраЦ и протонов в дозе 10 Гр

которых уменьшение количества опухолевых стволовых клеток, угнетение пролиферации клеток и ангиогенеза в опухоли на фоне изменения иммунного ответа в первичном очаге и его инфильтрации лимфоцитами.

- *Матчук О.Н., Борейко А.В., Бугай А.Н., Замулаева И.А., Каприн А.Д., Корякин С.Н., Красавин Е.А., Мосина В.А., Селиванова Е.И., Соловьев А.Н., Чаусов В.Н., Якимова А.О.* Способ повышения эффективности действия протонной терапии на стволовые клетки меланомы. Патент № 2798733 (23.06.2023, бюл. № 18).
- *Борейко А.В., Заднепрянец М.Г., Чаусов В.Н., Храшко Т.С., Кожина Р.А., Кузьмина Е.А., Тиунчик С.И., Красавин Е.А.* Комбинированное действие ингибиторов синтеза ДНК и ускоренных протонов на клетки злокачественных опухолей // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 698–708.
- *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 the Combined Action of 1- $\beta$ -D-Arabinofuranosylcytosine and Proton Radiation on B16 Melanoma *In Vivo* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 1. P. 63–75.
- *Замулаева И.А., Селиванова Е.И., Матчук О.Н., Якимова А.О., Мосина В.А., Корякин С.Н., Борейко А.В., Красавин Е.А.* Повы-

шение чувствительности меланомы линии В16 к фракционированному воздействию протонного излучения с помощью 1-В-Д-арабинофуранозилцитозина // Сб. тез. VI Междунар. форума онкологии и радиотерапии. М., 2023. С. 54–55.

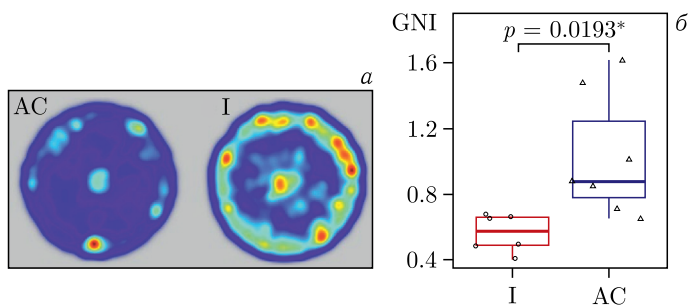
Выполнен анализ формирования хромосомных aberrаций в клетках карциномы человека линии Cal51 и нормальных лимфоцитов периферической крови человека при облучении фотонами и протонами (150 МэВ и в пике Брэгга) с использованием метафазного метода. Методом преждевременной конденсации хроматина оценена доля успешно восстановленных разрывов хроматина через 12 ч после облучения. При действии гамма-квантов в опухолевых клетках выявлена более эффективная репарация разрывов хроматина по сравнению с нормальными клетками, чем при облучении протонами. Данный результат может указывать на предпочтительность применения пучков протонов в лучевой терапии карциномы молочной железы.



Эффективность репарации разрывов хроматина в нормальных лимфоцитах человека и клетках карциномы линии Cal51

- *Kowalska A., Nasonova E., Kutsalo P., Czernski K.* Chromosomal Radiosensitivity of Human Breast Carcinoma Cells and Blood Lymphocytes Following Photon and Proton Exposures // *Radiat. Environ. Biophys.* 2023. V. 62. P. 151–160.

Исследовано влияние гамма-квантов  $^{60}\text{Co}$  в дозе 2 Гр на поведенческие реакции, иммуногематологический статус и морфофункциональные изменения нейронов в центральной нервной системе



а) Тепловая карта движения в «Открытом поле» (анализ видеотрекинга Noldus Etho Vision software). б) Глиально-нейрональный индекс облученных мышей по сравнению с возрастными контрольными мышами. Число животных: I — облученные ( $n = 10$ ); AC — контроль ( $n = 10$ ).  
\* — статистическая значимость при  $p < 0,05$

семимесячных мышей линии ICR. Выявлены различия в поведении облученных животных с использованием тест-системы «Открытое поле», выраженные в увеличении числа стоек и изменении стратегии двигательной активности. После облучения наблюдалось развитие лейкопении и уменьшение глионейронального индекса в паренхиме головного мозга мышей.

- *Kolesnikova I. A., Lalkovičova M., Severyukhin Y. S., Golikova K. N., Utina D. M., Pronskikh E. V., Despotović S. Z., Gaevsky V. N., Pirić D., Masnikosa R., Budennaya N. N.* The Effects of Whole Body Gamma Irradiation on Mice, Age-Related Behavioral, and Pathophysiological Changes // *Cell. Mol. Neurobiol.* 2023. V. 43(7). P. 3723–3741.

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

Завершен важнейший этап проекта класса мегасайенс NICA, реализуемого в рамках национального проекта «Наука», — запущен в эксплуатацию инжекционный комплекс коллайдера, включающий в свой состав уникальные установки, не имеющие аналогов в мире: криогенный источник и линейный ускоритель тяжелых ионов, криогенные синхротроны бустер и нуклотрон, а также систему каналов транспортировки пучков. Удалось получить требуемые параметры и обеспечить стабильную работу комплекса в течение 4 мес. При этом впервые в России введена в строй и испытана в действии установка электронного охлаждения ионных пучков, позволившая удвоить количество частиц, ускоренных в нуклотроне. Сеанс показал высокую работоспособность инжек-

ционного комплекса и подтвердил правильность конструктивных решений, принятых для его сооружения.

Продолжается монтаж коллайдера NICA и инфраструктурных сооружений комплекса.

В рамках международной коллаборации, представленной 15 научными центрами РФ и ряда других стран, начаты исследования на пучке тяжелых ионов комплекса с использованием уникальной исследовательской установки VM@N (барионная материя на нуклотроне). Зарегистрировано более полумиллиарда столкновений ионов ксенона с ядерной мишенью. Идет анализ накопленных данных.

- *Брызгунов М.И., Бублей А.В., Лебедев В.А., Мешков И.Н., Осипов К.Г., Пархомчук В.В., Прокофьевичев Ю.В., Рева В.Б., Сергеев А.С., Семёнов С.В., Тимонин Р.В., Шпаков В.С.* Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA // Тр. XXVIII Рос. конф. по ускорителям заряженных частиц (RuPAC 2023), Новосибирск, 11–15 сент. 2023 г.

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА**

В 2023 г. состоялось расширение GPU-компонента суперкомпьютера «Говорун», что позволило достигнуть пиковой производительности 1,7 Пфлопс для операций с двойной точностью. GPU-компонент дает пользователям СК «Говорун» возможность использовать алгоритмы машинного и глубокого обучения для решения задач с помощью нейросетевого подхода: обрабатывать данные экспериментов в радиобиологических исследованиях, распознавать треки частиц в экспериментах на ускорительном комплексе NICA, а также проводить квантовые расчеты путем моделирования квантовых вычислений.

- *Podgajny D.* Govorun Supercomputer for JINR Tasks // 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education” (GRID’2023), Dubna, Russia, 3–7 July 2023.

8-й физический сеанс VM@N стал первым в ОИЯИ, когда вся вычислительная инфраструктура, объединенная платформой DIRAC, использовалась для полной реконструкции необработанных экспериментальных данных. Во время сеанса было получено около 550 млн событий, записанных в 31 306 файлов общим размером более 430 ТБ. В обработке использовались сайты Tier-1,



Tier-2, кластер NICA и суперкомпьютер «Говорун», при этом файлы большого размера (16–250 ГБ) могли быть обработаны только на СК «Говорун». В ходе обработки данных были разработаны новые методы и подходы к использованию платформы DIRAC. Применяемые методы позволили получить детальную информацию о функционировании и возможностях распределенной вычислительной системы. Благодаря полученным результатам значительно сокращается время на подготовку и запуск новых задач, связанных с интенсивной обработкой данных.

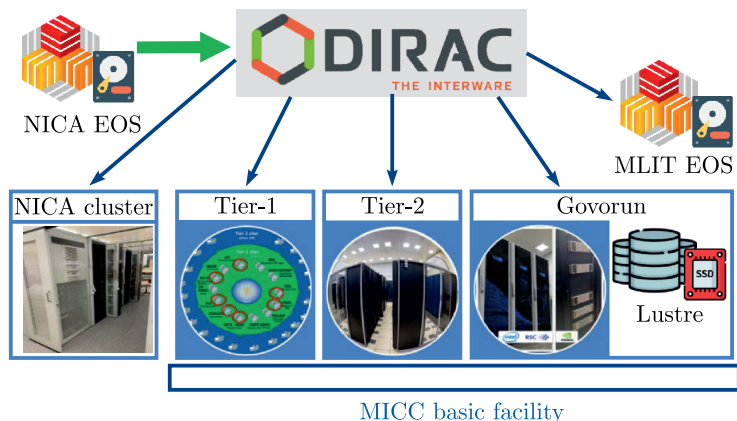
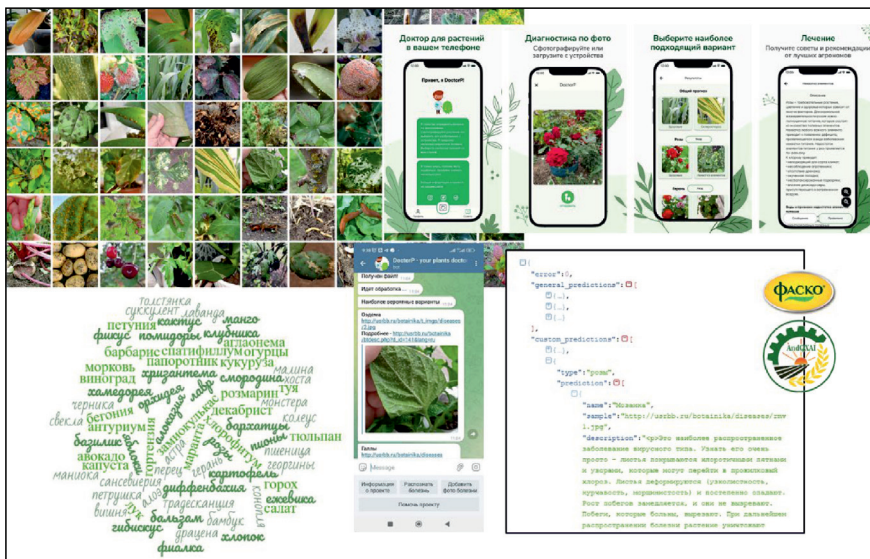


Схема интеграции географически распределенных гетерогенных ресурсов на основе DIRAC, используемых в обработке данных 8-го сеанса ВМ@N

- *Pelevanuk I., Gertsenberger K.* ВМ@N Run 8 Data Reconstruction on a Distributed Infrastructure with DIRAC // 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education” (GRID’2023), Dubna, Russia, 3–7 July 2023.
- *Pelevanuk I., Gertsenberger K.* ВМ@N Mass Data Production on Distributed Infrastructure for Run 8 Using DIRAC // 10th Collab. Meeting of the ВМ@N Experiment at the NICA Facility, St. Petersburg, Russia, 14–19 May 2023.

В ОИЯИ развивается платформа и мобильное приложение (DoctorP) для распознавания болезней растений и вредителей. Доступны как общая модель, способная распознавать 68 классов болезней, так и специализированные модели для 29 декоративных и сельскохозяйственных культур. С начала 2023 г. платформой было обработано более 70 тыс. запросов пользователей. Чтобы получить прогноз и рекомендации по лечению от опытных агрономов, нужно просто отправить фотографию, на которой будет

видна проблема. Доступ к платформе могут получить сторонние приложения и сервисы. Этой возможностью уже воспользовались компании «Гарден ритейл сервис» (ранее «Фаско») и Андижанский институт сельского хозяйства и агротехники (Узбекистан).



Примеры интерфейсов платформы DoctorP

- *Ужинский А. В.* Искусственный интеллект в сельском хозяйстве // Открытые системы. 2023. № 3. С. 20–23.
- *Uzhinskiy A.* Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture // Applied Math. 2023. V. 3. P. 799–813; <https://doi.org/10.3390/appliedmath3040043>.

Разработан и зарегистрирован в Росреестре программ для ЭВМ программный комплекс для создания цифровых двойников (ЦД) распределенных центров сбора, хранения и обработки данных (РЦОД). Уникальность данной программы в том, что создаваемые с ее помощью ЦД эффективно отслеживают работу РЦОД с точки зрения потоков данных и связанных с ними задач. Программный комплекс по созданию ЦД пока не имеет аналогов. Цифровой двойник РЦОД — это виртуальная копия центра обработки данных, которая показывает, как он работает при любых возможных сценариях. Такие двойники можно использовать при построении, эксплуатации и модернизации вычислительных архитектур различного рода РЦОД.

- *Кореньков В. В., Пряхина Д. И., Трофимов В. В.* Программный комплекс для создания цифровых двойников распределенных центров сбора, хранения и обработки данных // Росреестр программ для ЭВМ. № 2023667305.

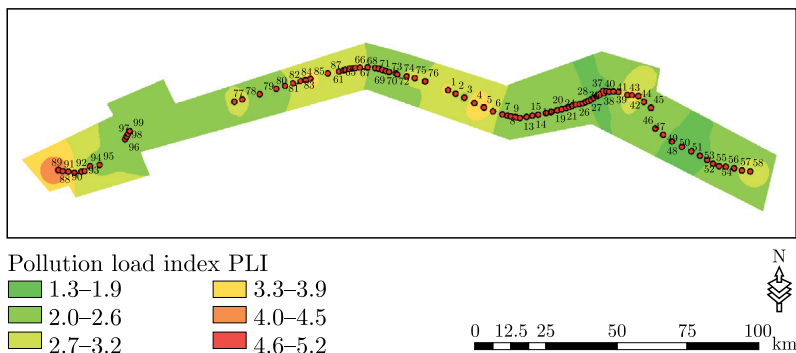
Представлен обзор работ, посвященных моделированию процесса гидратации электрона на основе развитого авторами подхода в рамках динамической модели полярона. Рассмотрены работы, отражающие развитие теоретических и экспериментальных исследований в задаче гидратации электрона. Сформулированы математические постановки задач, построены вычислительные схемы, созданы комплексы проблемно-ориентированных программ с применением технологии параллельного программирования MPI. Приведены результаты численного моделирования и расчета наблюдаемых физических характеристик изучаемого процесса гидратации электронов. Согласие полученных численных результатов с соответствующими экспериментальными данными подтверждает адекватность разработанных подходов и перспективность их дальнейшего использования и развития.

- *Лажно В. Д., Амирханов И. В., Волохова А. В., Земляная Е. В., Пузынин И. В., Пузынина Т. П., Рихвицкий В. С., Башашин М. В.* Динамическая модель полярона для исследования процесса гидратации электрона // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54, вып. 5. С. 1076–1105.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В рамках текущего сотрудничества между Академией научных исследований и технологий (ASRT, Египет) и ОИЯИ была проведена работа с целью получения всесторонней картины по оценке экологической ситуации в Египте с использованием образцов почвы и донных отложений из реки Нил и дельты, прибрежных районов Средиземного и Красного морей. Характеристика образцов была дана с использованием двух аналитических методов: нейтронно-активационного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Характеристика проб с точки зрения загрязнения показала, что оно неравномерно, некоторые участки относительно более загрязнены, чем другие, но в целом не представляют существенного риска для человека и окружающей среды. Тем не менее настоятельно рекомендуется постоянный мониторинг ввиду возможных изменений в будущем.



Пространственное распределение индекса нагрузки загрязнения по прибрежным районам Средиземного моря

- *Badawy W.M., Dmitriev A. Y., El Samman H., El-TaHER A., Blokhin M.G., Rammah Y.S., Madkour H.A., Salama S., Budnitskiy S.Y.* Elemental Composition and Metal Pollution in Egyptian Red Sea Mangrove Sediments: Characterization and Origin // *Mar. Pollut. Bull.* 2024. V. 198. P. 115830; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115830>.
- *Badawy W., Elsenbawy A., Dmitriev A., El Samman H., Shcheglov A., El-Gamal A., Kamel N.H.M., Mekewi M.* Characterization of Major and Trace Elements in Coastal Sediments along the Egyptian Mediterranean Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2022. V. 177. P. 113526; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113526>.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В 2023 г. был организован учебный процесс для студентов базовых кафедр МГУ, МИФИ, МФТИ, государственного университета «Дубна», СПбГУ и К(П)ФУ. Стажировки и практики в ОИЯИ прошли 270 студентов из университетов государств-членов ОИЯИ.

В двух этапах онлайн-программы INTEREST 2023 г. приняли участие 70 студентов и аспирантов из Армении, Белоруссии, Бразилии, Великобритании, Венгрии, Вьетнама, Египта, Индии, Кубы, Мексики, России, Саудовской Аравии, Сербии и Узбекистана. Программа включает дистанционное выполнение научных проектов, лекции и экскурсии в онлайн-формате.

В ежегодной студенческой программе ОИЯИ START — Student Advanced Research Training at JINR — участвовали 62 студента

из университетов Армении, Белоруссии, Великобритании, Египта, Индии, Кубы, Кувейта, Мексики, России, Узбекистана и Франции. В течение двух месяцев они очно выполняли исследовательские проекты под руководством сотрудников ОИЯИ.

В международных практиках для студентов из университетов Египта и ЮАР приняли участие 50 человек.

Участниками научных школ ОИЯИ для учителей в 2023 г. стали 14 преподавателей из Камчатского края, 12 — из Москвы, 20 педагогов из 18 регионов России и Армении.

В 2023 г. в ОИЯИ прошли стажировки «Опыт ОИЯИ для стран-участниц и государств-партнеров», в которых участвовали 36 руководителей и ведущих экспертов из университетов и научных центров Вьетнама, Египта, Пакистана, России, Туниса и ЮАР.

Расширилась партнерская сеть информационных центров ОИЯИ. Новые инфоцентры открыты в Иркутском государственном университете, при Агентстве по атомной энергии арабских стран (Тунис), в Институте ядерной физики Республики Казахстан (Алматы).

Школы-интенсивы по физике кварк-глюонной материи проведены в Дубне для 70 студентов из МФТИ, МГУ, ВГУ, БГУ, ТГУ, ДВФУ. В июле в летней научной школе-интенсиве «Физика и техника ускорителей», организованной совместно ОИЯИ и Томским политехническим университетом (ТПУ), приняли участие 32 студента инженерно-физических специальностей технических университетов стран-участниц ОИЯИ.

УНЦ участвовал в организации и проведении: Всероссийского фестиваля НАУКА 0+, мероприятия «Карьерный форсаж» в МФТИ, форума «Карьера физика» в СПбГУ, мастерской физики «105-й элемент» в рамках летней школы.

Для профориентации школьников были организованы: традиционный фестиваль науки «Дни физики» в Дубне, 35-я Международная компьютерная школа (МКШ), 3-я научная школа для слушателей детского университета при Академии научных исследований и технологий Египта, турнир по робототехнике CyberDubna-2023 Открытой Верхне-Волжской образовательной кибернетической сети, отборочный этап технического хакатона «Дубна-2023», лекторий УНЦ, очные и онлайн-лекции и экскурсии для инфоцентров ДВФУ, КамГУ, ТПУ, СОГУ, САФУ, а также для групп школьников из Дубны, Москвы, Новгорода, Солнечногорска, Твери и др.

## ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 07.12.2022 по 12.12.2023)

- Книги — 7:

*Агапов А. В., Борисевич И. В., Бугай А. Н., Гавриш Ю. Н., Гикал Б. Н., Дмитриев С. Н., Калинин И. В., Карамышева Г. А., Костромин С. А., Красавин Е. А., Ларионова И. И., Мицын Г. В., Осина Ю. К., Ратманов М. А., Скворцова В. И., Столыпина Л. Ю., Трубников Г. В., Туренко О. Ю., Ширков Г. Д., Ширков С. Г., Яковенко С. Л., Яковлева Т. В.* Концепция разработки и создания научно-клинического центра протонной терапии на основе сверхпроводящего протонного циклотрона МСC-230 в г. Дубне. — Дубна: ОИЯИ, 2023. — 20 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2023-42). — Библиогр.: с. 20. [http://www1.jinr.ru/Books/Proton\\_therap.pdf](http://www1.jinr.ru/Books/Proton_therap.pdf).

*Авдеев М. В.* Введение в малоугловое рассеяние нейтронов: Учеб. пособие. — М.: Физ. фак. МГУ, 2023. — 282 с.: ил. — Библиогр.: с. 282.

*Аксенов В. Л., Балагуров А. М.* Основы нейтронографии: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2023. — 583 с.: цв. ил. — (Классический университетский учебник). — Библиогр. в конце частей.

*Комаров В. И.* К 110-летию со дня рождения Б. М. Понтекерво. — Дубна: ОИЯИ, 2023. — 24 с. — (ОИЯИ; P1-2023-39).

*Садыгов З. Я.* Физика твердотельных фотоэлектронных умножителей: К 40-летию научной деятельности автора по разработке полупроводниковых лавинных фотоприемников. — Дубна: ОИЯИ, 2023. — 153 с. — (ОИЯИ; 2023-8). — Библиогр. в конце глав.

*Швидкий С.* Все в мире изменчиво — вечно: [сб. стихов]. — Дубна: ОИЯИ, 2023. — 81 с.

*Inozemtsev V. I.* Integrable Many-Particle Systems. — New Jersey [etc.]: World Sci., 2023. — XI, 268 p.

- Журнальные статьи — 1 170
- Публикации в трудах конференций — 324
- Препринты — 37
- Авторефераты диссертаций — 28

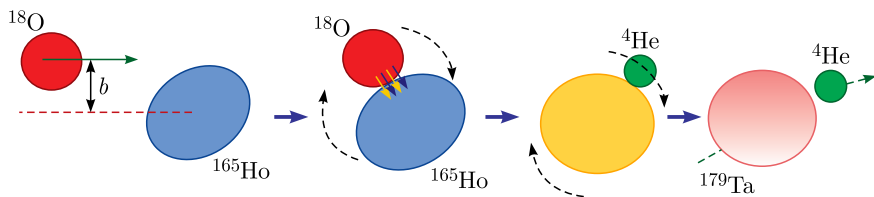
Всего: 1 566

## THEORETICAL PHYSICS

A generalized renormalization group equation summing up all leading logarithms is obtained for the effective potential in the scalar theory with an arbitrary form of the potential. The equation was applied to inflationary cosmology in the slow-roll attractor T-model: conservation of the asymptotic behavior of the corresponding effective potentials was shown, cosmological observables were calculated, and spontaneous symmetry breaking in the effective potential due to quantum corrections was discovered (Coleman–Weinberg mechanism).

- *Kazakov D. I., Tolkachev D. M., Iakhibbaev R. M. // J. High Energy Phys. 2023. V.04. P. 128; J. Cosmol. Astropart. Phys. 2023. V.09. P. 049.*

The new mechanism of incomplete fusion was explored as a very mass-asymmetric quasi-fission of a dinuclear system formed in the entrance reaction channel. It was shown that the incomplete fusion occurs due to the strong increase in the intrinsic fusion barrier along mass and charge transfer degrees of freedom causing a hindrance of complete fusion in very asymmetric systems; as a result, the  $\alpha$ -particle formation probability increases. The centrifugal force causes a breakup of that asymmetric system (for example, with  $\alpha$  particle). The residue nucleus formed in the incomplete fusion is less heated than the compound nucleus formed in the complete fusion. The suggested mechanism can be useful to produce new isotopes in incomplete fusion reactions.



The sketch of the incomplete fusion mechanism as a very asymmetric quasi-fission in the case of the  $^{18}\text{O} + ^{93}\text{Nb}$  reaction

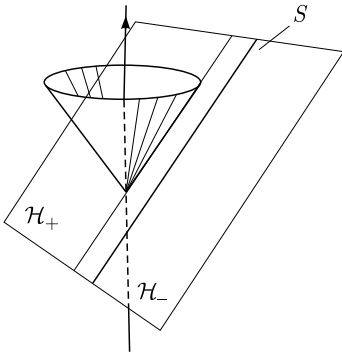
- *Nasirov A. K., Kayumov B. M., Ganiev O. K., Yuldasheva G. A. // Phys. Lett. B. 2023. V. 842. P. 137976.*



A function  $J_r$  is constructed related to the generalization of the fusion matrix of the quantum Liouville model to the case of parafermionic model corresponding to the central charge  $c = \frac{3r}{r+2} + \frac{6}{r}(b+b^{-1})^2$ . For  $r = 1$  and  $r = 2$ , one gets the ordinary and supersymmetric Liouville theories. The symmetry properties of the function  $J_2$  allowed the authors to solve the problem of equivalency of different fusion matrix parametrizations of the supersymmetric theory, which has been open for a long time.

- *Apresyan E., Sarkissian G., Spiridonov V. P.* // Nucl. Phys. B. 2023. V. 990. P. 116170.

Electrodynamics in space-time with a straight null cosmic string was studied. Two kinds of point-like sources crossing the string horizon were considered: sources with an electric charge and sources with a magnetic moment. It was shown that null cosmic strings disturb electric fields of charged sources and produce electromagnetic (EM) pulses. An analytic approximation was developed for the asymptotics of EM waves at future null infinity, and radiation fluxes for sources of both types were calculated. The estimates show that the peak power of the radiation can be quite large for null strings moving near pulsars and considerably large in the case of magnetars.



Electric or magnetic source crosses the string horizon  $\mathcal{H}_+$ .  $S$  is the world surface of the string

horizon were considered: sources with an electric charge and sources with a magnetic moment. It was shown that null cosmic strings disturb electric fields of charged sources and produce electromagnetic (EM) pulses. An analytic approximation was developed for the asymptotics of EM waves at future null infinity, and radiation fluxes for sources of both types were calculated. The estimates show that the peak power of the radiation can be quite large for null strings moving near pulsars and considerably large in the case of

magnetars. In gravity, it was shown that perturbations of gravitational fields of massive sources caused by null cosmic strings are radiated away in the form of gravitational wave pulses. Near the future null infinity the resulting geometry, sourced by the string and point-like mass, belongs to the class of so-called polyhomogeneous space-times.

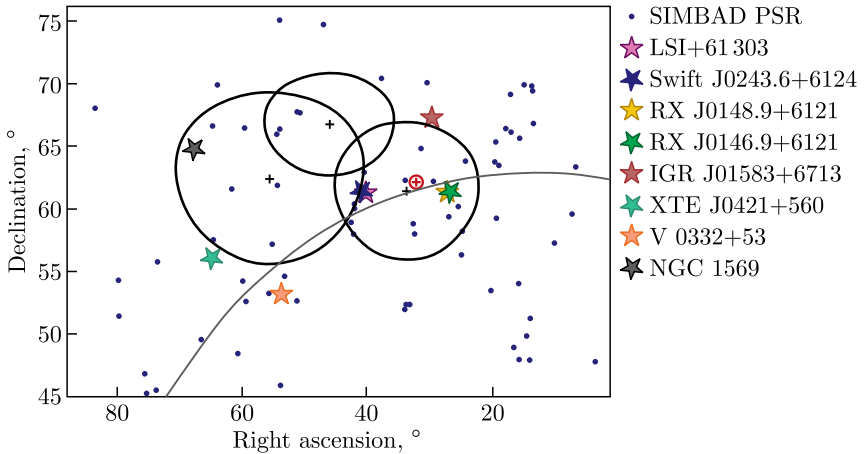
- *Fursaev D. V., Pirozhenko I. G.* // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. P. 025018; arXiv:2309.01272 [gr-qc]. 2023.
- *Fursaev D. V., Davydov E. A., Pirozhenko I. G., Tainov V. A.* arXiv: 2311.01863 [gr-qc]. 2023.

# EXPERIMENTAL PHYSICS

## Particle Physics

With the commissioning of two new clusters in April 2023, the working volume of the Baikal-GVD Deep-Water Neutrino Telescope exceeded the value of  $\approx 0.5 \text{ km}^3$  for the objective of detecting events from high-energy neutrinos (over 100 TeV). The detector contains 12 clusters of deep-water strings of recording and control equipment (3456 optical modules) and remains the largest neutrino telescope in the Northern Hemisphere.

In the analysis of the data obtained during the detector's operation in the 2018–2022 configurations, correlations with radio-bright blazars of cascading events with energies exceeding 100 TeV were investigated. Although no statistically significant effects have been found on the current dataset, the analysis points to a number of possible associations with both extragalactic and galactic sources. In particular, the analysis of the observed triplet of neutrino candidates in the galactic plane is presented. Its potential connection with certain galactic sources has been investigated, and the coincidence of the directions of arrival of cascading events with several bright blazars has been considered.



Three Baikal-GVD cascading high-energy events GVD190216CA, GVD190604CA and GVD210716CA near the galactic plane (gray line) and errors in determining their directions (black lines). The point of statistically most significant excess of the IceCube flux over the isotropic one in the Northern Hemisphere is shown as a red plus

- *Allakhverdyan V. A. et al. (Baikal-GVD Collab.), Kosogorov N. A., Kovalev Y. Y., Lipunova G. V., Plavin A. V., Semikoz D. V., Troitsky S. V. et al.* Search for Directional Associations between Baikal Gigaton Volume Detector Neutrino-Induced Cascades and High-Energy Astrophysical Sources. e-Print:2307.07327; Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2023. V. 526, No. 1. P. 942–951.

Two experiments are being conducted at the Kalinin NPP aimed at studying the fundamental properties of neutrinos:  $\nu$ GeN and DANSS.

In the  $\nu$ GeN experiment, a comparison of the data collected while the reactor was ON and OFF (154 and 39 days, respectively) did not revealed signs of the expected signal from coherent neutrino scattering. This made it possible to impose a limit of an important parameter of ionization losses in germanium (quenching) at the level of  $k < 0.23$  (90% CL) [1, 2].

At present there are a few indications of existence of the hypothetical sterile neutrino, e.g., in the Neutrino-4 and BEST experiments (INR, Baksan, Russia). The analysis of the DANSS detector data revealed that the ratio of the observed absolute antineutrino counting rate to the one predicted within the Huber–Müller model was  $0.98 \pm 0.04$ . Limits were established in the parameter space of the hypothetical sterile neutrino. In particular, for large ( $\gtrsim 10$  eV<sup>2</sup>) values of the parameter  $\Delta m_{41}^2$ , the values  $\sin^2 2\theta_{ee} > 0.26$  are excluded at the 90% confidence level. The use of the absolute DANSS counting rates allowed excluding the best point  $\Delta m_{41}^2 = 7.3$  eV<sup>2</sup>,  $\sin^2 2\theta_{ee} = 0.36$  obtained in the Neutrino-4 experiment. In addition, the almost entire region of allowable parameters obtained in the BEST experiment was eliminated [3].

1. *Lubashevskiy A.* Search for the Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering and Other Rare Processes in  $\nu$ GeN Experiment at Kalinin Nuclear Power Plant // Proc. of the 29th Intern. Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2023), Zhuhai, China, 3–8 July 2023.

2. *Lubashevskiy A. V.* Results of the  $\nu$ GeN Experiment to Search for Coherent Scattering of Reactor Neutrinos and Other Rare Processes // 73rd Intern. Conf. on Nuclear Physics “Nucleus-2023”, Sarov, Russia, 9–13 Oct. 2023 (in Russian).

3. *Skrobova N.* Measurements of the Absolute Reactor Antineutrino Energy Spectrum Dependence on the Fuel Composition // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86. P. 544–550.

Assembly of the largest reactor antineutrino detector JUNO continues in China. To date, more than half of the planned 18 000 photomultiplier tubes (PMTs) with a diameter of 20 in. and 25 000

PMTs with a diameter of 3 in. have been installed. High-voltage power supply for these photomultiplier tubes is provided using 20 000 dedicated modules developed and manufactured by JINR, including their testing and commissioning. The completion of the assembly and the start of filling the detector with liquid scintillator are scheduled for spring 2024.

In parallel, work preparation for the assembly and installation of the Top Tracker (TT) is underway. The software for data collection from the detector, also developed by JINR, is currently being debugged on the TT prototype at IPHC (Strasbourg, France). As part of the project, a station for mass testing of 4100 silicon photomultiplier matrices, including 130 000 individual PMTs, has been manufactured. Testing of more than half of the matrices has been conducted, and a publication in JINST is being prepared.

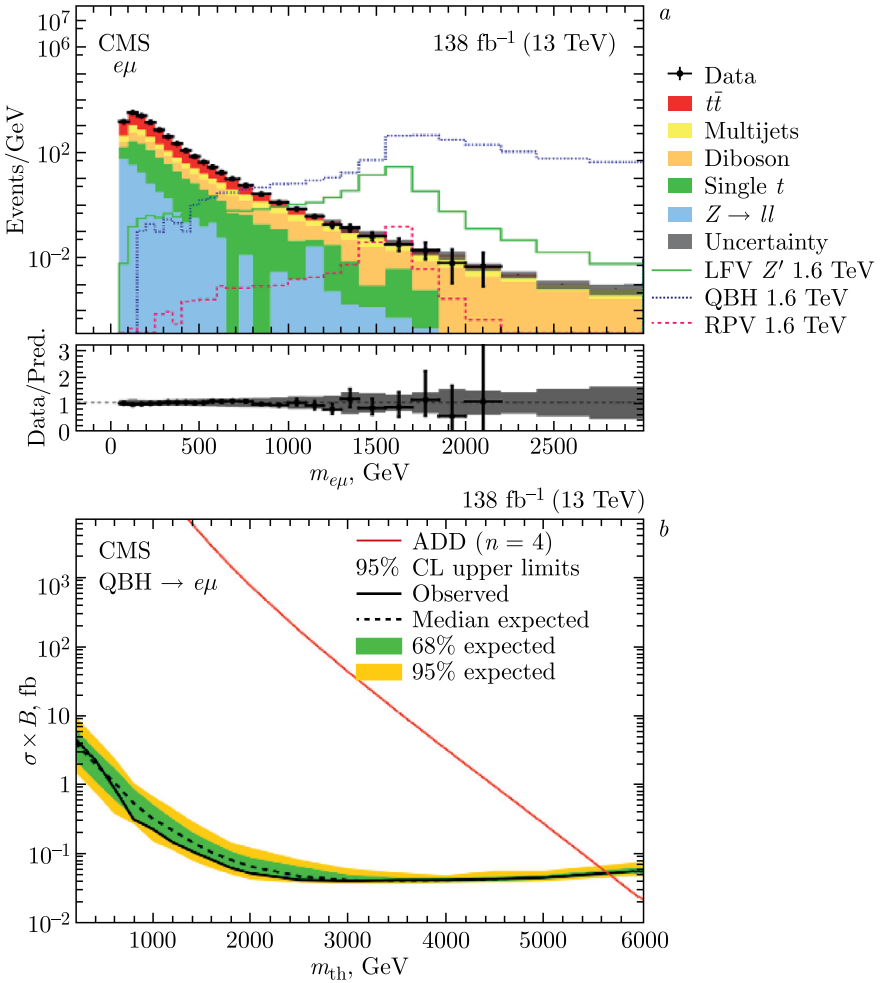
- *Abusleme A. et al. (JUNO Collab.).* The JUNO Experiment Top Tracker // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1057. P. 168680.

Within the BESIII (Beijing, China) project, the tests of CP symmetry in entangled  $\Xi^0$ -anti- $\Xi^0$  pairs were carried out. The  $J/\psi \rightarrow \Xi^0 \bar{\Xi}^0$  process and subsequent decays are investigated using  $(10087 \pm 44) \cdot 10^6 J/\psi$  events collected at the BESIII experiment. The decay parameters  $\alpha_{\Xi}$ ,  $\varphi_{\Xi}$  of  $\Xi^0$  and anti- $\Xi^0$  are simultaneously measured with unprecedented accuracies. The most precise values for CP asymmetry observables  $A_{CP}^{\Xi}$  and  $\Delta\varphi_{CP}^{\Xi}$  of  $\Xi^0$  decay are obtained. For the first time, the weak and strong phase differences  $\xi_P - \xi_S$  and  $\delta_P - \delta_S$  are determined, which are the most precise results for any weakly decaying baryon.

- *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.).* Tests of CP Symmetry in Entangled  $\Xi^0$ - $\bar{\Xi}^0$  Pairs // Phys. Rev. D. 2023. V. 108. P. L031106.

The JINR group in the CMS experiment has participated in data taking at the LHC energy  $\sqrt{s} = 13.6$  TeV. A search is performed for signals from physics beyond the Standard Model in channels with the expected violation of lepton universality: the spectra of invariant masses  $ee$ ,  $\mu\mu$ ,  $e\mu$ ,  $e\tau$ , and  $\mu\tau$  were studied at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Unique upper limits on the parameters of models of new physics were obtained. JINR is also contributing to the construction of a high-granularity calorimeter and to the upgrade of the muon system for operation under high-luminosity conditions of the HL-LHC.

- *Tumasyan A. et al. (CMS Collab.).* Search for Heavy Resonances and Quantum Black Holes in  $e\mu$ ,  $e\tau$ , and  $\mu\tau$  Final States in Proton-Proton Collisions at 13 TeV // J. High Energy Phys. 2023. V. 05. P. 227.



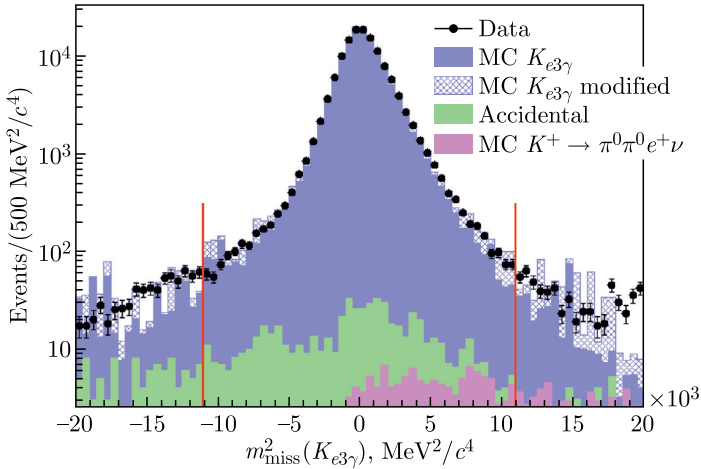
a) Invariant mass distribution for the  $e\mu$  channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV and an integrated luminosity of  $138 \text{ fb}^{-1}$ . b) 95% CL upper limits on the product of the cross section and the branching fraction for quantum black hole production in an ADD model with  $n = 4$  extra dimensions, in the  $e\mu$  channel

Dataset of  $9.37 \cdot 10^{11}$  eot interactions of electrons with an energy of 100 GeV with an active target in the NA64 experiment at the SPS facility at CERN, collected during 2016–2022 runs, was explored. The most interesting region of the parameters of the models of scalar and fermion thermal dark matter with sub-GeV mass (LDM), generated by a mediator — a new vector boson, called the dark photon  $A'$ , was investigated for the first time. No dark matter formation signals

were detected. This allowed us to establish more precise limits on the interactions of  $A'$  with photons for the mass region  $m_{A'} \lesssim 0.35$  GeV, as well as to exclude the scalar and Majorana LDM scenarios in the region of the parameters of interaction constant  $\chi - A' \alpha_D \leq 0.1$  and the dark matter particle mass region  $0.001 \lesssim m_\chi \lesssim 0.1$  GeV, provided  $3m_\chi \leq m_{A'}$ .

- *Andreev Yu. M. et al. (NA64 Collab.). Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. P. 161801.*
- *Peshekhonov D. The NA64 Experiment — Search for Hidden Sector at CERN SPS // 21st Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics, Moscow, 2023.*

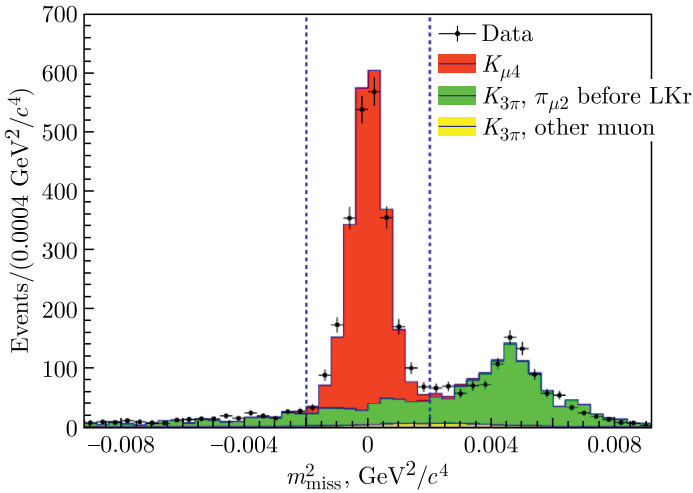
In the NA62 experiment at CERN at the SPS accelerator, JINR physicists completed a study of the radiative decay of  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  using the statistics of  $1.3 \cdot 10^5$  candidates with a background of less than 1%, collected in 2017–2018. The relative probability of this decay in three limited kinematic regions was measured with relative accuracy within one percent, which improved existing results more than twofold. The asymmetry of this decay, which may be associated with T violation, was investigated, but no evidence of its existence was found within the achieved accuracy.



Distribution of the squared missing mass of combinations of detected particles  $\pi^0 e^+ \gamma$  for selected experimental events (dots), as well as for the expected signal and background (histograms)

- *Gil E. C. et al. (NA62 Collab.). A Study of the  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  Decay.* E-Print: 2304.12271 [hep-ex]; J. High Energy Phys. 2023. V.09. P.040.

The JINR group in the NA48/2 experiment (CERN) performed the search for the rare decay  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$ , which was predicted theoretically, but was difficult to observe due to the high background from the decay chain  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^\pm$ . Based on an experimental sample of 2437 candidates collected in 2003–2004, with a background of 15%, the decay  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$  was observed for the first time. The measured relative decay probability in the kinematic region of the squared dilepton mass above  $0.03 \text{ GeV}^2/c^4$  amounts to  $(0.65 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$ . Extrapolation to the full kinematic space using a specific model resulted in a value of  $(3.45 \pm 0.16) \cdot 10^{-6}$ , which is consistent with the predictions of chiral perturbation theory.



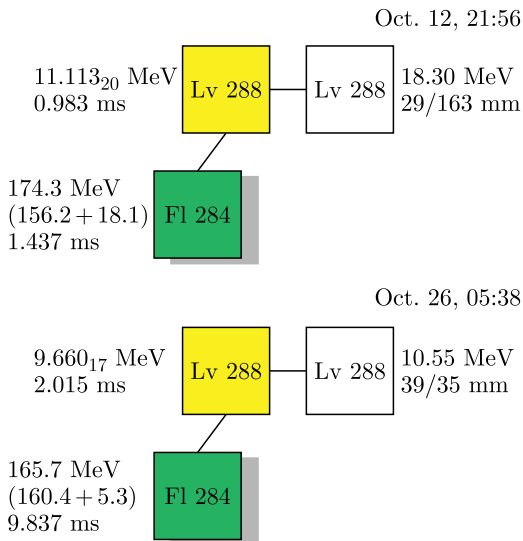
Distribution of the squared missing mass for selected experimental events (markers), simulated background and signal contributions (histograms). The vertical lines indicate the signal area

- *Batley J.R. et al. (NA48/2 Collab.). First Observation and Study of the  $K^\pm \rightarrow \pi^0 \pi^0 \mu^\pm \nu$  Decay.* E-Print:2310.20295 [hep-ex]; J. High Energy Phys. (in press).

## Low-Energy Heavy-Ion Physics

An experiment on the synthesis of the isotopes of element 116 in the  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$  reaction was conducted for the first time at the

accelerator complex Superheavy Element Factory. The experiment was aimed at measuring the cross section reduction factor upon passing from reactions with the  $^{48}\text{Ca}$  beam to those with a heavier  $^{54}\text{Cr}$  beam, while maintaining high  $^{54}\text{Cr}$  beam currents. Two synthesis events of a new isotope of element 116,  $^{288}\text{Lv}$ , were detected. The experimental data are processed.

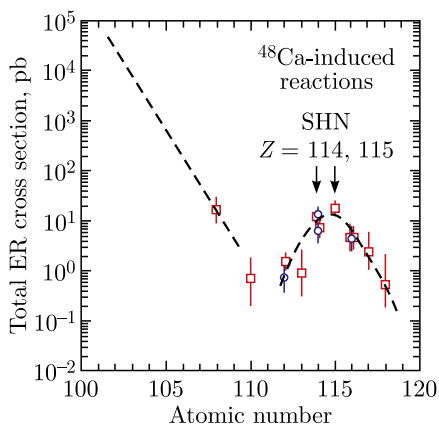


Registered decay chains of the new isotope  $^{288}\text{Lv}$  synthesized in the complete fusion reaction  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$

- *Dmitriev S., Utyonkov V., Oganessian Yu.* // Proc. of the 7th Intern. Conf. on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN23), Huizhou, China, Nov. 12–17, 2023; <https://indico.impcas.ac.cn/event/31/>.

For the first time, experiments on the synthesis of isotopes of Ds, element 110, in reactions  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$  and isotopes of  $^{116}\text{Lv}$  in reactions  $^{54}\text{Cr} + ^{238}\text{U}$  were conducted at the accelerator complex Superheavy Element Factory. The important result of these experiments is the change of the fall factor of the cross section in transition from reactions with the  $^{48}\text{Ca}$  beams to the heavier  $^{54}\text{Cr}$  beam and the acquisition of the stable high current of the  $^{54}\text{Cr}$  beam. A possibility to conduct experiments at extremely low cross section, 70 fb, was shown. Five new superheavy nuclides were discovered:  $^{288}\text{Lv}$ ,  $^{275,276}\text{Ds}$ ,  $^{272}\text{Hs}$  and  $^{268}\text{Sg}$ . The conducted research is important





The behavior of the production cross section of heaviest nuclei in fusion reactions of  $^{48}\text{Ca}$  with actinides

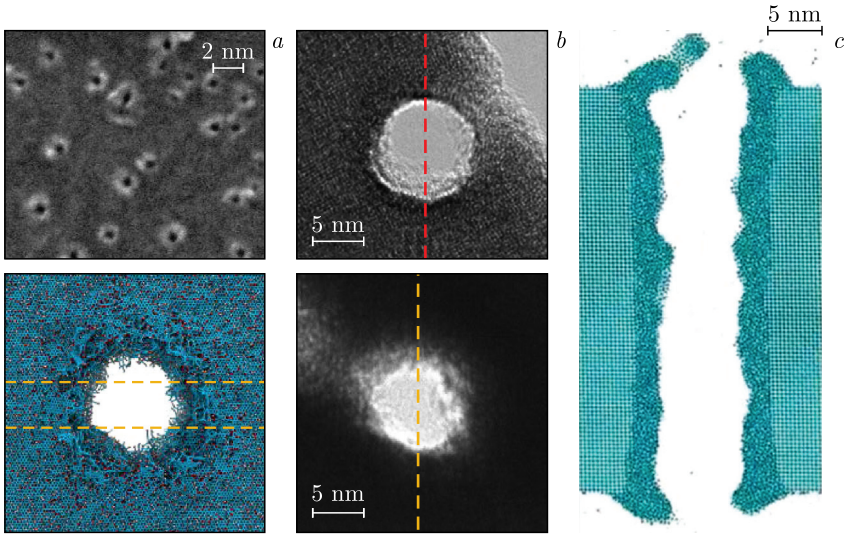
for experiments on the synthesis of new elements of the Mendeleev Periodic Table.

- *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Shumeiko M. V.* // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. P. 024611.

The studies of the radiation-induced changes of the properties of nano-sized materials showed that swift heavy-ion irradiation can lead to the formation of nanochannels in graphene oxide, as well as to the partial structural recovery at the track periphery.

Using a comprehensive approach based on numerical and experimental methods, it was found that channel sizes and morphology can be precisely controlled by varying the parameters of irradiation (particle energy and mass) and the initial sample. Similar nanopores can also be formed in tungsten oxide samples with thicknesses of up to 100 nm. Membrane structures with nanometer-sized pores offer promising potential in biological applications, such as molecular separation, DNA sequencing, sensorics, etc.

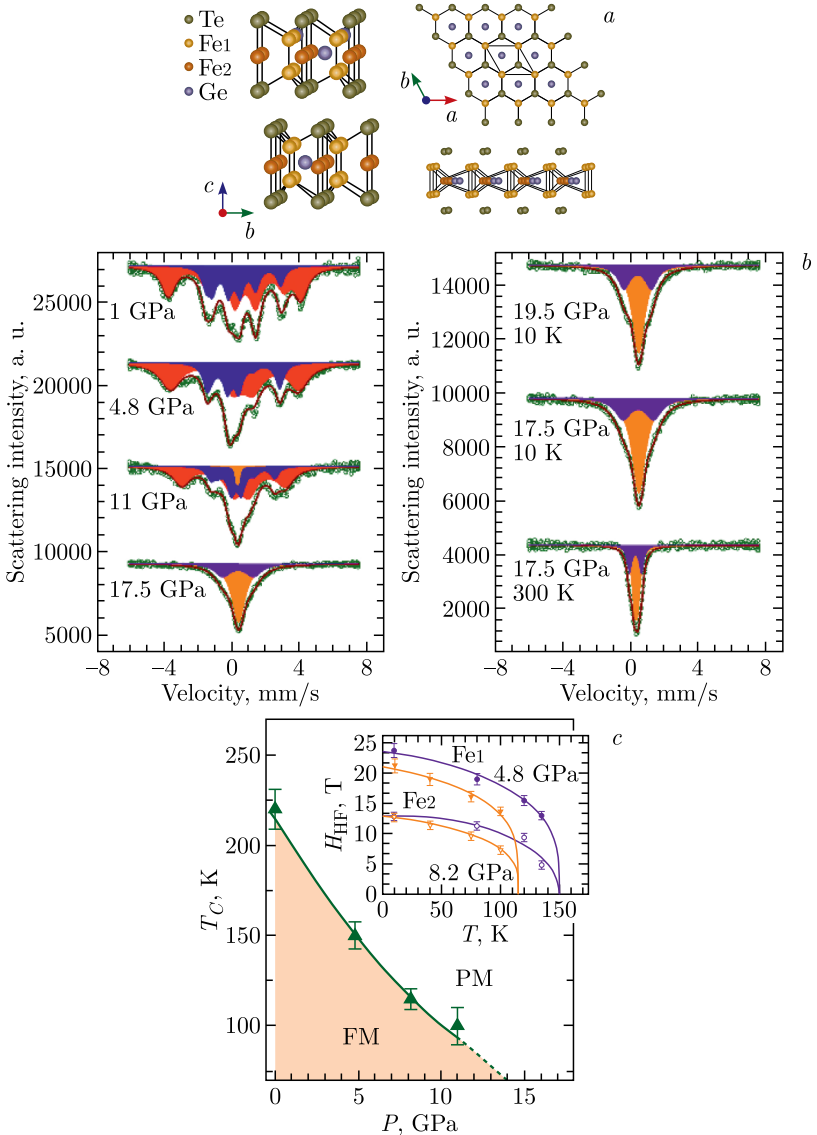
- *Olejniczak A., Rymzhanov R. A.* From Nanohole to Ultralong Straight Nanochannel Fabrication in Graphene Oxide with Swift Heavy Ions // Nat. Commun. 2023. V. 14. P. 889.
- *Xu L., Rymzhanov R. A., Zhai P., Zhang S., Hu P., Meng X., Zeng J., Sun Y., Liu J.* Direct Fabrication of Sub-10 nm Nanopores in  $\text{WO}_3$  Nanosheets Using Single Swift Heavy Ions // Nano Lett. 2023. V. 23. P. 4502–4509.



a) Nanopores in graphene oxide after irradiation: experiment and modeling. b) Nanochannels in  $\text{WO}_3$  following irradiation. c) Result of nanopore modeling in  $\text{WO}_3$

## Condensed Matter Physics

The discovery of graphene initiated an extensive search for structurally similar 2D magnetic materials with challenging physical properties. The promising materials are layered 2D van der Waals (vdW) magnetic systems, demonstrating unprecedented opportunities for control of physical properties down to the monolayer limit and emerging physical phenomena. The low-dimensional nature of vdW materials implies possible realization of quantum critical phenomena in some of these systems. Nevertheless, direct experimental observations in this area were not yet reported. In order to search for signatures of quantum critical behavior in vdW materials, we have studied the  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  (FGT) system, possessing itinerant ferromagnetism (FM) with a high Curie temperature of  $T_C \sim 220$  K, by means of synchrotron Mössbauer source spectroscopy, X-ray powder diffraction, Raman spectroscopy in the pressure range 0–20 GPa and temperature range 10–290 K, and coupled with density functional theory calculations. A rapid suppression of ferromagnetic ordering and the emergence of paramagnetic ground state when pressure exceeds a critical value,  $P_{PM} \sim 15$  GPa, were revealed. In addition, at  $P_C \sim 7$  GPa anomalous behavior of structural parameters



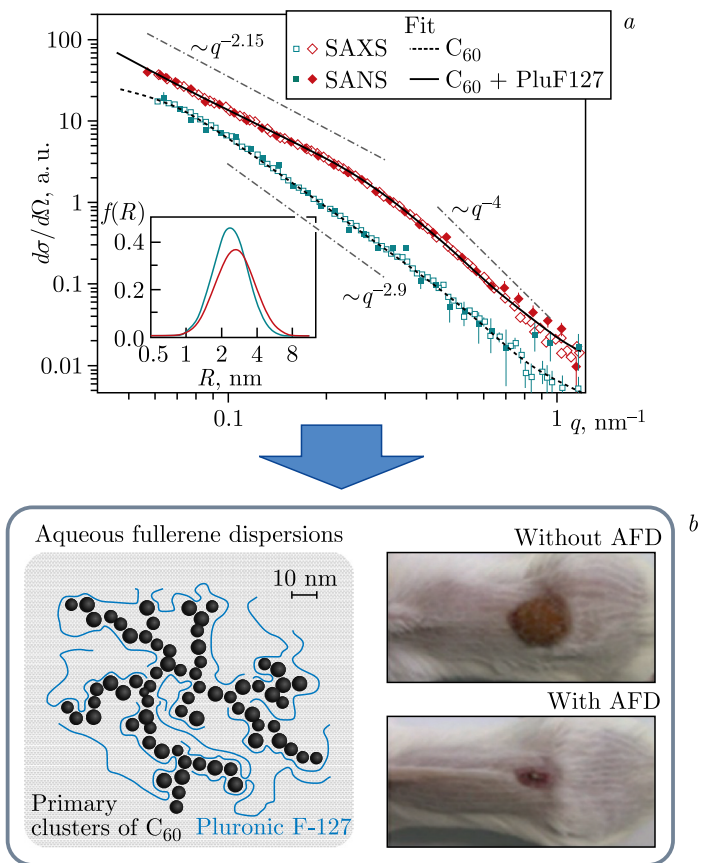
a) Hexagonal crystal structure of  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ . b) Synchrotron Mössbauer spectra measured at selected pressures and temperatures. c) Pressure dependence of Curie temperature and temperature dependences of hyperfine magnetic fields at high pressures (inset)

associated with a phase transformation was found. This observation points to a possible realization of the magnetic quantum critical point

in FGT material and highlights the pressure as a driving force for quantum criticality in layered vdW magnetic systems.

- Dang N. T., Kozlenko D. P., Lis O. N., Kichanov S. E., Lukin E. V., Golosova N. O., Savenko B. N., Duong D.-L., Phan T.-L., Tran T. A., Phan M. H. High Pressure-Driven Magnetic Disorder and Structural Transformation in Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>: Emergence of a Magnetic Quantum Critical Point // Adv. Sci. 2023. V. 10. P. 2206842.

Fullerenes (allotropes of carbon along with graphite and diamond) demonstrate biological activity and are used in various medical applications. However, due to insolubility in water they may be placed



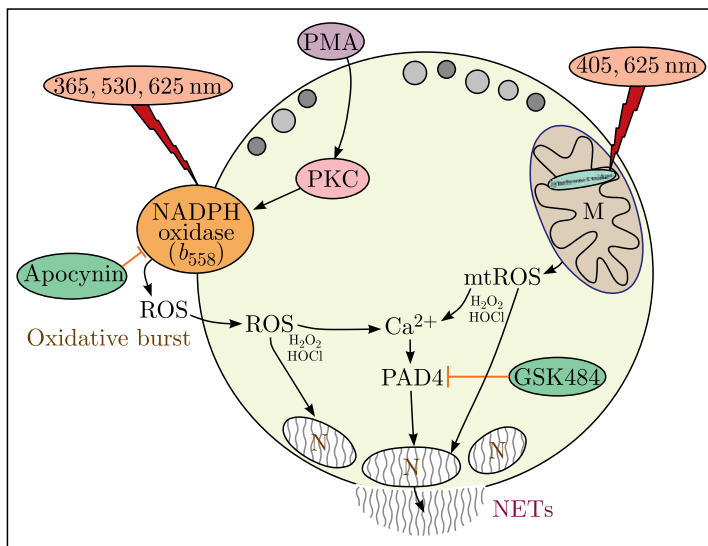
*a*) SAXS/SANS curves of aqueous fullerene C<sub>60</sub> dispersions with addition of Pluronic F-127. *b*) Schematic structure of dispersions derived from a combination of SAXS, SANS, DLS, UV-Vis data with illustration of wound healing activity *in vivo* experiments

in liquid biological media only in the form of colloid dispersions, in particular, prepared with additional biological components. The structure of aqueous fullerene C<sub>60</sub> dispersions (AFD) synthesized in NRC “Institute of Immunology FMBA of Russia” (Moscow), was studied at FLNP by various methods, including small-angle X-ray and neutron scattering (SAXS/SANS), dynamic light scattering (DLS), ultra-violet and visible light spectroscopy (UV-Vis). The objective was to understand how fullerene molecules are grouped in clusters after they are placed in water and stabilized by biocompatible surfactant (Pluronic F-127). This information is of great importance when employing their wound healing activity as a main regenerative component in the healing ointment. Experiments on mice showed that the efficiency of the AFD-based ointment designed in NRC II FMBA is competitive with commercial drugs such as Bepanthen and Dexapanthenol together with the absence of hemolytic activity and toxicity.

- *Shershakova N. N., Andreev S. M., Tomchuk A. A., Makarova E. A., Nikonova A. A., Turetskiy E. A., Petukhova O. A., Kamyshnikov O. Y., Ivankov O. I., Kyzyma O. A., Tomchuk O. V., Avdeev M. V., Dvornikov A. S., Kudlay D. A., Khaitov M. R.* Wound Healing Activity of Aqueous Dispersion of Fullerene C<sub>60</sub> Produced by “Green Technology” // *Nanomed.: Nanotechnol. Biol. Med.* 2023. V.47. P.102619.

Programmed cell death — netosis, under the influence of both UV and visible radiation (photonetosis), was studied by Raman spectroscopy and fluorescence microscopy. For the first time, the photoactivating influence of not only ultraviolet light, but also visible light (from blue to red) was discovered in the process of photonetosis, one of the cellular mechanisms of the organism’s fight against microbial invasion. The work also put forward a hypothesis about primary photoacceptors in neutrophil cells, which trigger the entire subsequent photobiological chain of processes leading to the formation of neutrophils extracellular traps (NETs).

The highly sensitive Raman microspectrometer “CARS” made it possible to register the formation of various reactive oxygen species (ROS) during oxidative stress in neutrophil cells at the initial stage of photoactivation. Fluorescence microscopy was used to visualize and quantify both intact cells and formed NETs. Understanding the signaling pathways and mechanisms of NETs release under the influence of UV and visible light is important for controlling the effects of the damaging effects of electromagnetic radiation.



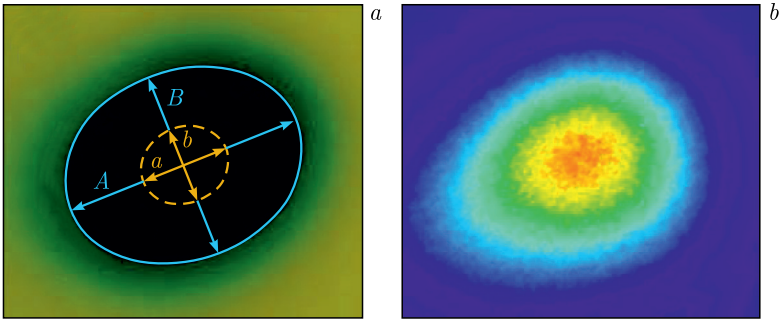
Schematic representation of the signaling pathways of photoinduced netosis

- Arzumanyan G., Mamatkulov K., Arynbeke Ye., Zakrytnaya D., Jevremović A., Vorobjeva N. Radiation from UV-A to Red Light Induces ROS-Dependent Release of Neutrophil Extracellular Traps // Intern. J. Mol. Sci. 2023. V.24. P.5770; doi.org/10.3390/ijms24065770.

## RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

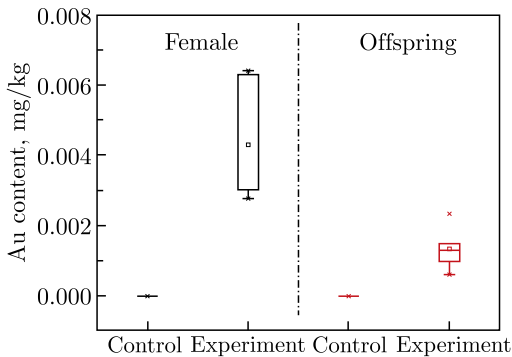
At the NICA accelerator complex, a high-energy (3.8 GeV/nucleon) ion beam became available, which now can be used for solving applied problems in the field of radiation materials science, testing the protective properties of new composite materials, space research, and radiation modification of the properties of high-temperature superconductors. A unique opportunity was implemented for long-term irradiation of samples — up to several months. The first experiments were carried out within the work programme of the ARIADNA scientific collaboration, created at the NICA complex in order to unite the efforts of organizations to achieve results in various fields of applied research using advanced radiation technologies.

- Belov O. V. (on behalf of ARIADNA Collab.). Applied Research at NICA Facility // IUPAP Conf. “Heaviest Nuclei and Atoms”, Yerevan, Armenia, 25–30 Apr. 2023.



Trace of a  $^{124}\text{Xe}^{54+}$  beam with an energy of 3.8 GeV/nucleon on radiochromic film (a) and beam profile (b) on the OCTAVIUS 1500XDR detector ( $A = 34.2$  mm,  $B = 29.3$  mm; uniform region:  $a = 12$  mm,  $b = 9$  mm)

For the first time the effect of gold nanoparticles received from the mother's body during the prenatal and lactation periods on offspring was investigated. Offspring were tested in the Morris water maze (MWM) and in the elevated Plus-maze. Gold, measured using neutron activation analysis, was present in all examined organs of experimental females and their offspring. The highest gold content was found in the kidneys, followed by the liver, which suggests that in case of prolonged exposure excretion of AuNPs was done by the kidneys. In contrast, the liver eliminated AuNPs from the bloodstream and accumulated them. The content of gold in the offspring's liver and blood was lower than in the mother's, indicating a relatively low rate of AuNPs' transfer to offspring. Accumulation of gold in the brain was the lowest among analyzed organs both in females and in offspring, which could be attributed to the chemical inertness of gold. No significant differences in spatial

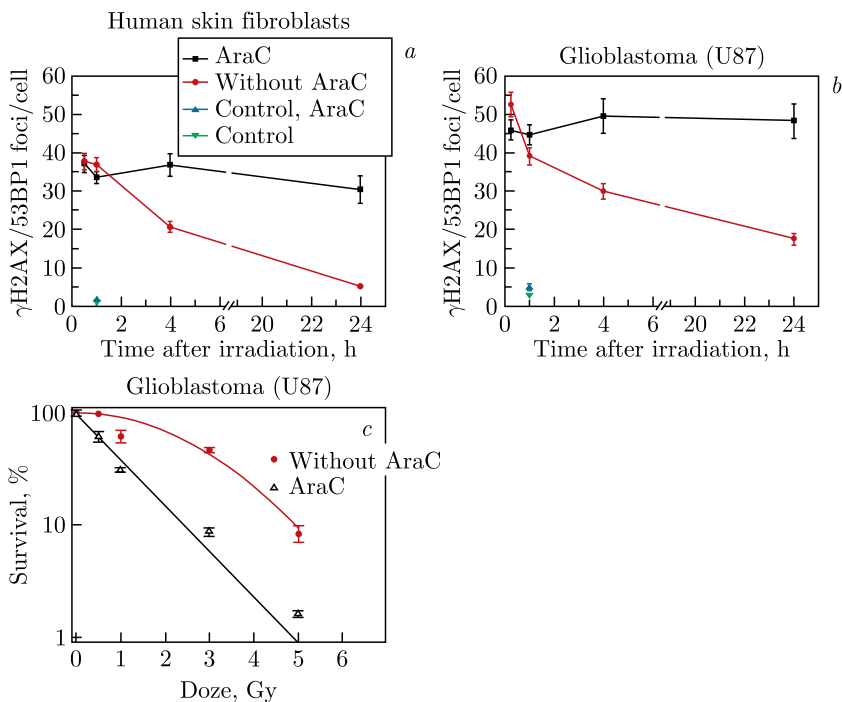


The content of gold in the brain of females and their offspring exposed to gold nanoparticles during prenatal and early postnatal development

orientation and memory were found between experimental and control offspring in MWM. Still, the experimental young mice demonstrated increased anxiety levels in an elevated Plus-shaped maze. Thus, the AuNPs influenced the emotional state of mice that were exposed to nanoparticles during prenatal and early postnatal development, but not their cognitive abilities.

- *Iulieva A.L., Petritskaya E.N., Rogatkin D.A., Zinicovskaia I., Yushin N., Grozdov D.* Impact of Chronic Oral Administration of Gold Nanoparticles on Cognitive Abilities of Mice // *Intern. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. P. 8962; <https://doi.org/10.3390/ijms24108962>.

The modifying effect of the DNA repair synthesis inhibitor, cytosine arabinoside (AraC), on the formation of radiation-induced DNA double-strand breaks (DSBs) in normal and tumor cells *in vitro*



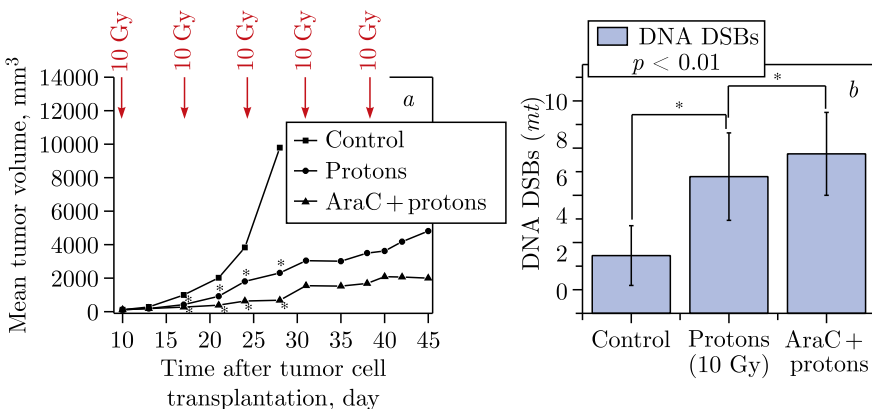
a) Formation and elimination kinetics of  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci in the nuclei of human skin fibroblasts irradiated with protons at a dose of 1.25 Gy under normal conditions (●) and in the presence of AraC (■). b) Formation and elimination kinetics of  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci in the nuclei of U87 glioblastoma cells irradiated with protons at a dose of 1.25 Gy under normal conditions (●) and in the presence of AraC (■). c) Survival of U87 glioblastoma cells after irradiation with spread-out Bragg peak protons in the presence of AraC (20  $\mu$ M)



was studied. It has been shown that after irradiation with protons in the presence of AraC, the number of DNA DSBs increases with post-irradiation incubation time during up to 24 hours by 6 and 3 times in fibroblast and glioblastoma nuclei, respectively, compared with the number of DNA DSBs in cells without an inhibitor. The dose change factor by the criterion of the lethal effect of protons on glioblastoma cells in the presence of AraC is 1.75, which indicates a significant radiosensitizing effect of AraC on U87 glioblastoma cells.

- Boreyko A. V., Zadneprianets M. G., Chausov V. N., Hramco T. S., Kozhina R. A., Kuzmina E. A., Tiounchik S. I., Krasavin E. A. Combined Action of DNA Synthesis Inhibitors and Accelerated Protons on Malignant Tumor Cells // Part. Nucl., Lett. 2023. V. 20, No. 4 (249). P. 698–708 (in Russian).

The molecular cellular mechanisms of the combined effect of AraC and fractionated proton exposure on the B16 mouse melanoma cell line were studied *in vivo*. After combined exposure, compared with proton irradiation without a modifier, the mean volume of tumors decreased by 1.7–3.4 times at different observation periods ( $p < 0.05$ ). At the molecular level, it has been shown that the number of DNA DSBs in tumor cells two days after completion of irradiation sessions significantly exceeds the level of DNA DSBs after radiation

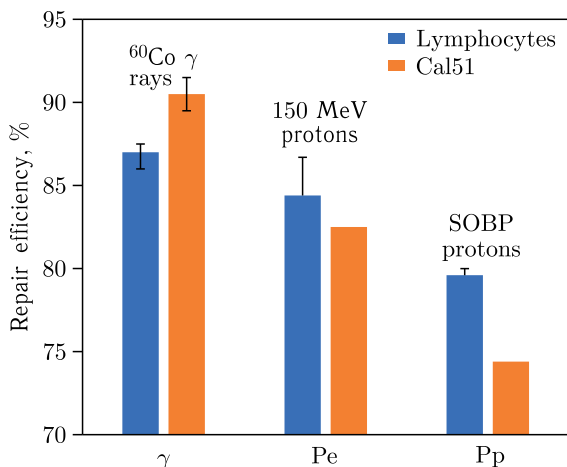


a) Changes in the size of the primary B16 melanoma focus at different times after proton irradiation alone and proton irradiation in the presence of AraC in comparison with the control. 10 Gy exposure sessions are marked with vertical arrows. \* —  $p < 0.001$  compared with the control. b) Number of DNA DSBs in the primary focus of the B16 murine melanoma two days after irradiation with protons and combined exposure to AraC and protons at a dose of 10 Gy

exposure without a modifier. It has been shown that the introduction of AraC enhances the antitumor effect of proton radiation through several mechanisms, including a decrease in the number of cancer stem cells and inhibition of cell proliferation and angiogenesis in the tumor against the background of changes in the immune response in the primary focus and its infiltration by lymphocytes.

- *Matchuk O.N., Boreyko A.V., Bugay A.N., Chausov V.N., Kaprin A.D., Koryakin S.N., Krasavin E.A., Mosina V.A., Selivanova E.I., Solovyov A.N., Yakimova A.O., Zamulaeva I.A.* A Method for Increasing the Effectiveness of Proton Therapy on Melanoma Stem Cells // Patent RU 2798733, Russia's Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). 23 June 2023, Bull. No. 18 (in Russian).
- *Boreyko A.V., Zadneprianec M.G., Chausov V.N., Hramco T.S., Kozhina R.A., Kuzmina E.A., Tiounchik S.I., Krasavin E.A.* Combined Action of DNA Synthesis Inhibitors and Accelerated Protons on Malignant Tumor Cells // Part. Nucl., Lett. 2023. V. 20, No. 4 (249). P. 698–708 (in Russian).
- *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- $\beta$ -D-Arabinofuranosylcytosine and Proton Radiation on B16 Melanoma *In Vivo* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 1. P. 63–75.
- *Zamulaeva I.A., Selivanova E.I., Matchuk O.N., Yakimova A.O., Mosina V.A., Koryakin S.N., Boreyko A.V., Krasavin E.A.* Increasing B16 Melanoma Sensitivity to Fractionated Proton Exposure Using 1- $\beta$ -D-Arabinofuranosylcytosine // Book of Abstracts of the 6th Intern. Forum on Oncology and Radiotherapy, Moscow, 2023. P. 54–55 (in Russian).

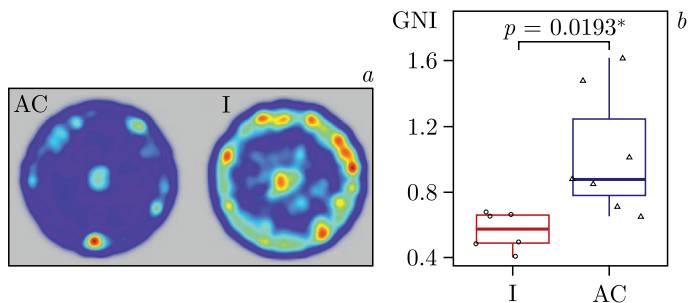
A metaphase analysis was performed of chromosomal aberration formation in human Cal51 carcinoma cells and normal human peripheral blood lymphocytes after irradiation with photons and protons (150 MeV and Bragg peak). Using the method of premature chromosome condensation, the proportion of successfully repaired chromatin breaks was assessed 12 hours after irradiation. After exposure to  $\gamma$  rays, a more effective repair of chromatin breaks was observed in tumor cells compared with normal cells than after proton irradiation. This result may indicate the preference for the use of proton beams in radiation therapy for breast carcinoma.



Effectiveness of chromatin break repair in normal human lymphocytes and Cal51 carcinoma cells

- *Kowalska A., Nasonova E., Kutsalo P., Czerski K.* Chromosomal Radiosensitivity of Human Breast Carcinoma Cells and Blood Lymphocytes Following Photon and Proton Exposures // *Radiat. Environ. Biophys.* 2023. V. 62. P. 151–160.

The effect was studied of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  rays at a dose of 2 Gy on behavioral reactions, immunohematological status, and morphofunctional changes in neurons of the central nervous system of seven-month-old ICR mice. Using an open field test system, differences were revealed in the behavior of irradiated animals, expressed in an increase in the number of rearings and a change



a) A thermal map of movements in the open field test. I: irradiated animals (the number of animals  $n = 10$ ); AC: control animals ( $n = 10$ ) (Noldus EthoVision software). b) The glial neuronal index of irradiated mice compared with that of aged control mice. I: irradiated animals ( $n = 10$ ); AC: control animals ( $n = 10$ ). \* — statistical significance at  $p < 0.05$

in the strategy of motor activity. After irradiation, leukopenia development and a decrease in the glioneuronal index in the brain parenchyma of mice were observed.

- *Kolesnikova I.A., Lalkovičova M., Severyukhin Y.S., Golikova K.N., Utina D.M., Pronskikh E.V., Despotović S.Z., Gaevsky V.N., Pirić D., Masnikosa R., Budennaya N.N.* The Effects of Whole Body Gamma Irradiation on Mice, Age-Related Behavioral and Pathophysiological Changes // *Cell. Mol. Neurobiol.* 2023. V. 43(7). P. 3723–3741.

## ACCELERATOR TOPICS

A most important stage of the megascience project NICA, which is implemented in the framework of the national project “Science”, has been completed — the injector complex of the NICA collider has been put into operation. It includes unique facilities that have no analogues in the world: a cryogenic source and a linear accelerator of heavy ions, the cryogenic synchrotrons Booster and Nuclotron, and a system of channels of the beam transportation. It became possible to obtain the necessary parameters and provide the stable operation of the complex in 4 months. For the first time in Russia, a facility of electron cooling of ion beams was put into operation and tested, which made it possible to double the number of particles accelerated in the Nuclotron. The session showed high efficiency of the injector complex and confirmed the correctness of constructive decisions taken for its construction.

The assembling of the NICA collider and infrastructure constructions of the complex is continued.

In the framework of the international collaboration represented by 15 scientific centres of RF and a number of other countries, studies were started at the beam of heavy ions of the complex with the use of the unique research facility BM@N (Baryonic Matter at the Nuclotron). More than a half billion collisions of xenon ions with a nuclear target were recorded. The accumulated data are being analyzed.

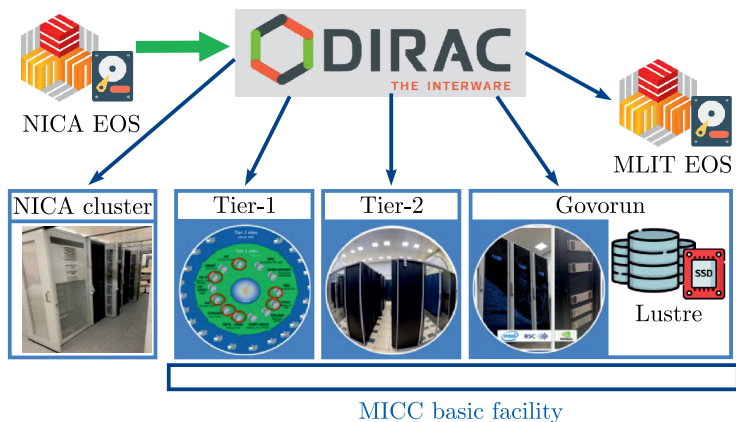
- *Bryzgunov M.I., Bublei A.V., Lebedev V.A., Meshkov I.N., Osipov K.G., Parkhomchuk V.V., Prokofiev Yu. V., Reva V.B., Sergeev A.S., Semenov S.V., Timonin R.V., Shpakov V.S.* First Experiments on Electron Cooling of Ions in the Booster of NICA // *Proc. of the XXVIII Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2023)*, Novosibirsk, Russia, 11–15 Sept. 2023.

## INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

In 2023, the GPU component of the Govorun supercomputer was expanded, which enabled a peak performance of 1.7 PFlops to be reached. The GPU component gives users of the Govorun supercomputer the opportunity to employ machine and deep learning algorithms to solve tasks with the help of the neural network approach, namely, to process experimental data of radiobiological studies, to detect particle tracks in the experiments at the NICA accelerator complex and perform quantum computing using quantum computing simulators.

- *Podgajny D.* Govorun Supercomputer for JINR Tasks // 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education” (GRID’2023), Dubna, Russia, 3–7 July 2023.

The 8th BM@N physics run was the first time at JINR when the entire computing infrastructure, integrated by the DIRAC platform, was used for the complete reconstruction of raw experimental data. During the session, there were received about 550 million events, which were written in 31 306 files with a total size of more than 430 TB. Tier1, Tier2, the NICA cluster and the Govorun supercomputer were used in processing; meanwhile, large files (16–250 GB) could only be processed on the Govorun supercomputer. During data processing, new methods and approaches to using the DIRAC platform were developed. The applied methods provided detailed information on the functioning and capabilities of the distri-

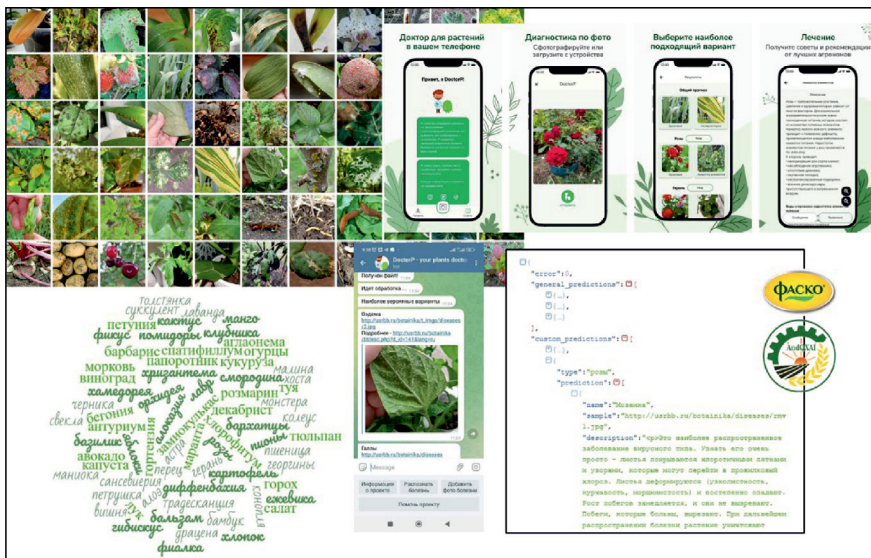


Scheme for the DIRAC-based integration of geographically distributed heterogeneous resources used in BM@N Run 8 data processing

buted computing system. Thanks to the results, the time for preparing and launching new tasks related to intensive data processing was significantly reduced.

- *Pelevanuk I., Gertsenberger K.* BM@N Run 8 Data Reconstruction on a Distributed Infrastructure with DIRAC // 10th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education” (GRID’2023), Dubna, Russia, 3–7 July 2023.
- *Pelevanuk I., Gertsenberger K.* BM@N Mass Data Production on Distributed Infrastructure for Run 8 Using DIRAC // 10th Collab. Meeting of the BM@N Experiment at the NICA Facility, St. Petersburg, Russia, 14–19 May 2023.

The platform and a mobile application (DoctorP) for detecting plant diseases and pests are under development at JINR. Both a general model capable of detecting 68 disease classes and specialized models for 29 ornamental and agricultural crops are available. Since the beginning of 2023, the platform has processed over 70 000 user requests. To obtain a prediction and treatment recommendations from experienced agronomists, one just needs to send a photo showing the problem. The platform can be accessed by third-party applications and services. Garden Retail Service (formerly Fasko) and the Andijan



Examples of DoctorP platform interfaces

Institute of Agriculture and Agrotechnologies (Uzbekistan) have already taken advantage of this opportunity.

- *Uzhinskiy A.* Artificial Intelligence in Agriculture // Open Systems. 2023. No. 3. P. 20–23 (in Russian).
- *Uzhinskiy A.* Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture // AppliedMath. 2023. V. 3. P. 799–813; <https://doi.org/10.3390/appliedmath3040043>.

A software complex for creating digital twins of distributed data acquisition, storage and processing centres (DDPCs) was developed and registered in the Register of Russian Computer Programs. The uniqueness of this program is that the digital twins created with its help effectively monitor the DDPC functioning in terms of data flows and related tasks. The software complex for creating digital twins has no analogues yet. A DDPC digital twin is a virtual copy of a data centre that demonstrates how it operates under any possible scenario. Such twins can be employed in the construction, operation and enhancement of computing architectures of various DDPC types.

- *Korenkov V., Priakhina D., Trofimov V.* Software Complex for Creating Digital Twins of Distributed Data Acquisition, Storage and Processing Centres // Register of Russian Computer Programs. No. 2023667305.

An overview of studies devoted to simulating the process of electron hydration based on the approach developed by the authors within the dynamic polaron model is presented. Papers on theoretical and experimental research in the problem of electron hydration are reviewed. Mathematical formulations of problems and computational schemes were developed, and complexes of problem-oriented programs were created using MPI parallel programming technology. The results of the numerical simulation and calculation of the observed physical characteristics of the electron hydration process under study are delivered. The agreement between the obtained numerical results and the corresponding experimental data confirms the adequacy of the elaborated approaches and the prospects for their further use and development.

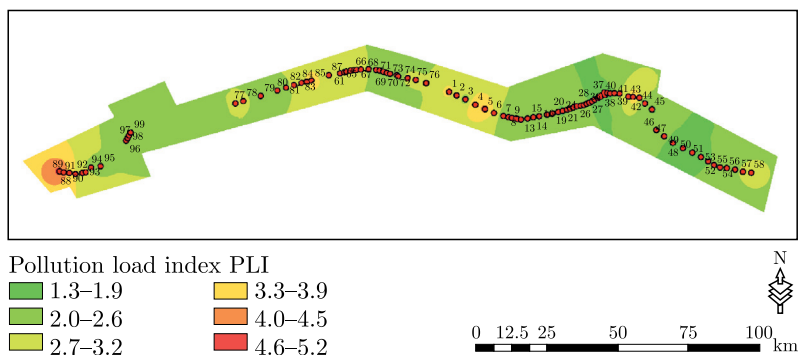
- *Lakhno V., Amir Khanov I., Volokhova A., Zemlyanaya E., Puzynin I., Puzynina T., Rikhvitsky V., Bashashin M.* Dynamic Polaron Model for the Study of the Electron Hydration Process // Part. Nucl. 2023. V. 54, No. 5. P. 1076–1105 (in Russian).

## ECOLOGICAL RESEARCH

Within the framework of the current collaboration between the Academy of Scientific Research and Technology (ASRT, Egypt) and JINR, the present work was conducted to give a comprehensive picture on the assessment of the ecological situation in Egypt using soil and sediments samples from Nile River and delta, the coastal areas of the Mediterranean and Red Seas. The characterization of the samples was given using two analytical techniques: neutron activation analysis (NAA) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

The characterization of the samples in terms of pollution revealed that this is not uniform and that some sites are relatively more polluted than others, but overall do not pose a significant risk to humans and the environment. Nevertheless, continuous monitoring is highly recommended in view of possible future changes.

- *Badawy W.M., Dmitriev A.Y., El Samman H., El-Taher A., Blokhin M.G., Rammah Y.S., Madkour H.A., Salama S., Budnitskiy S.Y.* Elemental Composition and Metal Pollution in Egyptian Red Sea Mangrove Sediments: Characterization and Origin // *Mar. Pollut. Bull.* 2024. V. 198. P. 115830; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115830>.
- *Badawy W., Elsenbawy A., Dmitriev A., El Samman H., Shcheglov A., El-Gamal A., Kamel N.H.M., Mekewi M.* Characterization of Major and Trace Elements in Coastal Sediments along the Egyptian Mediterranean Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2022. V. 177. P. 113526; <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113526>.



Spatial distribution of pollution load index (PLI) along the coastal areas of the Mediterranean Sea



## EDUCATIONAL ACTIVITIES

In 2023, training was organized for students at the JINR-based departments of MSU, MEPHI, MIPT, Dubna State University, St. Petersburg State University, and K(P)FU. The number of students from the universities of the JINR Member States who completed their internships and practices at JINR reached 270.

Seventy students and postgraduates from Armenia, Belarus, Brazil, Cuba, Egypt, Great Britain, Hungary, India, Mexico, Russia, Saudi Arabia, Serbia, Uzbekistan, and Vietnam took part in 2 Waves of online INTEREST programme 2023. The programme includes remote work on research projects, lectures, and online excursions.

Sixty-two students from Armenia, Belarus, Cuba, Egypt, France, Great Britain, India, Kuwait, Mexico, Russia, and Uzbekistan participated in the annual JINR programme START (STudent Advanced Research Training at JINR). For two months they were working on their scientific projects onsite under the supervision of JINR specialists.

Fifty students from Egypt and South Africa took part in the International Student Practice at JINR.

In 2023, 14 teachers from the Kamchatka Region, 12 from Moscow, and 20 representatives from 18 regions of Russia and Armenia participated in the International Scientific Schools for Physics Teachers.

In 2023, 36 representatives of administrative and scientific personnel from research and educational organizations of Egypt, Pakistan, Russia, South Africa, Tunisia, and Vietnam participated in JINR Expertise for Member States and Partner Countries training programmes.

The network of Information Centres (IC) of the Joint Institute for Nuclear Research expanded in 2023. New centres were established at Irkutsk State University, Arab Atomic Energy Agency (Tunisia), and the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan (Almaty).

Seventy students from MIPT, MSU, VSU, BSU (Belarus), TSU, and FEFU participated in the workshops on the physics of quark–gluon matter held in Dubna. Together with Tomsk Polytechnic University, there was organized a summer scientific intensive school “Physics and Technology of Accelerators” in June with 32 participants representing Engineering and Physics Departments of different universities from the JINR Member States.

The University Centre participated in and supported the following events: NAUKA 0+ science festival, Career Booster held at MIPT,

Careers in Physics held at SPBBU, physics workshop “Element 105” of the Summer School.

Within the framework of career guidance, the following events were organized: Days of Physics — a traditional science festival, 35th International Computer School, 3rd Science School for Students of the Children’s University of the Egyptian Academy of Scientific Research and Technology, a robotics tournament “CyberDubna-2023” of the Open Upper Volga Cyber Net, a qualifying stage of the Hackathon “Dubna-2023”, UC Lectorium, series of both online and onsite lectures and excursions for the Information Centres from Far Eastern Federal University, Kamchatka State University, University of Tomsk, North Ossetian State University, Northern (Arctic) Federal University of Arkhangelsk, as well as for school students from Dubna, Moscow, Novgorod, Solnechnogorsk, Tver and other cities.

**GENERAL DATA  
ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS  
BY JINR STAFF MEMBERS  
(from 07.12.2022 to 12.12.2023)**

• Books — 7:

*Agapov A. V., Borisevich I. V., Bugay A. N., Gavrish Yu. N., Gikal B. N., Dmitriev S. N., Kalinin I. V., Karamysheva G. A., Kostromin S. A., Krasavin E. A., Larionova I. I., Mitsyn G. V., Osina Yu. K., Ratmanov M. A., Skvortsova V. I., Stolypina L. Yu., Trubnikov G. V., Turenko O. Yu., Shirkov G. D., Shirkov S. G., Yakovenko S. L., Yakovleva T. V.* Concept of Developing and Creating a Scientific and Clinical Centre for Proton Therapy Based on the MSC-230 Superconducting Proton Cyclotron in Dubna. — Dubna: JINR, 2023. — 20 p.: col. ill. — (JINR; 2023-42). — Bibliogr.: p. 20.

*Avdeev M. V.* Introduction to Small-Angle Neutron Scattering: A Textbook. M.: MSU Fac. of Phys., 2023. — 282 p.: ill. — Bibliogr.: p. 282.

*Aksenov V. L., Balagurov A. M.* Fundamentals of Neutronography: A Textbook. — M.: Mosk. Univ., 2023. — 583 p.: col. ill. — (Classical university textbook). — Bibliogr.: end of parts.

*Komarov V. I.* To the 110th Anniversary of the Birth of B. M. Pontecorvo. — Dubna: JINR, 2023. — 24 p. — (JINR; P1-2023-39).

*Sadygov Z. Ya.* Physics of Solid-State Photomultipliers: To the 40th Anniversary of the Author’s Scientific Activity on the

Development of Semiconductor Avalanche Photodetectors. — Dubna: JINR, 2023. — 153 p. — (JINR; 2023-8). — Bibliogr.: end of chapters.

*Shvidkij S.* Everything in the World Is Changeable — Forever: [A collection of poems]. — Dubna: JINR, 2023. — 81 p.

*Inozemtsev V. I.* Integrable Many-Particle Systems. — New Jersey [etc.]: World Sci., 2023. — XI, 268 p.

- Journal papers — 1170
- Publications in Proceedings — 324
- Preprints — 37
- Abstracts of theses — 28

Total: 1566

## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	5
Физика частиц . . . . .	5
Физика тяжелых ионов низких энергий . . . . .	11
Физика конденсированных сред . . . . .	13
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	17
Ускорительная тематика . . . . .	23
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	24
Экологические исследования . . . . .	27
Образовательная деятельность . . . . .	28
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	30
Theoretical Physics . . . . .	31
Experimental Physics . . . . .	33
Particle Physics . . . . .	33
Low-Energy Heavy-Ion Physics . . . . .	38
Condensed Matter Physics . . . . .	41
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	45
Accelerator Topics . . . . .	51
Information Technology and Computer Physics . . . . .	52
Ecological Research . . . . .	55
Educational Activities . . . . .	56
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members . . . . .	57

Дизайн обложки *И. Ю. Щербаковой*

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

Подписано в печать 2.02.2024.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,6. Уч.-изд. л. 4,1. Тираж 180 экз. Заказ 60812.

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

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

