

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2021 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2021  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**



**JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR  
RESEARCH**



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2022-2

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2021 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2021  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна 2022

## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	6
Физика частиц . . . . .	6
Физика тяжелых ионов низких энергий . . . . .	9
Нейтронная ядерная физика . . . . .	9
Физика конденсированных сред . . . . .	13
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	17
Ускорительная тематика . . . . .	21
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	24
Образовательная деятельность . . . . .	27
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	28
Theoretical Physics . . . . .	30
Experimental Physics . . . . .	33
Particle Physics . . . . .	33
Low-Energy Heavy-Ion Physics . . . . .	36
Neutron Nuclear Physics . . . . .	36
Condensed Matter Physics . . . . .	39
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	43
Accelerator Topics . . . . .	48
Information Technology and Computer Physics . . . . .	51
Educational Activities . . . . .	53
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members	54

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В рамках наиболее общей перенормируемой теории в четырех измерениях впервые выведены формулы для бета-функций калибровочных и юкавских констант взаимодействия в четырех и трех петлях соответственно. Оригинальность используемого подхода состоит в том, что рассматривались простые «игрушечные» теории и с их помощью фиксировались модельно-независимые коэффициенты в выражениях для ренормгрупповых (РГ) функций без трудоемких и громоздких вычислений. Благодаря выполненным расчетам стало возможным провести РГ-анализ произвольной модели новой физики на новом уровне точности без необходимости явного диаграммного счета и процедуры перенормировки. В качестве приложения найденных формул выведены четырехпетлевые бета-функции всех калибровочных констант в Стандартной модели, а также в ее обобщении с несколькими хиггсовскими дублетами.

- *Bednyakov A., Pikelner A.* Four-Loop Gauge and Three-Loop Yukawa Beta Functions in a General Renormalizable Theory // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127, No. 4. P. 041801.
- *Bednyakov A., Pikelner A.* Six-Loop Beta Functions in General Scalar Theory // JHEP. 2021. V. 04. P. 233.

Исследован процесс  $\gamma\gamma$ -распада низкоэнергетического квадрупольного состояния четно-четного ядра. В качестве примера для первого возбужденного состояния  $^{48}\text{Ca}$  впервые рассчитано отношение ширины  $\gamma\gamma/\gamma$ -распадов и получено максимальное значение  $3 \cdot 10^{-8}$ , которое может быть проверено экспериментально.

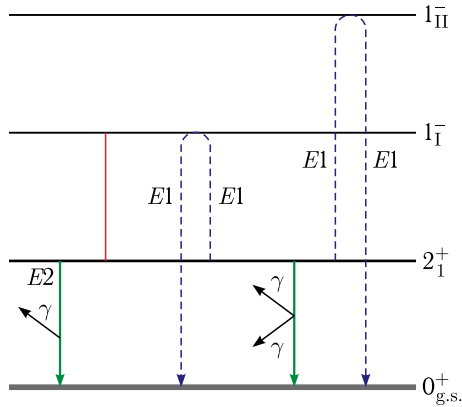
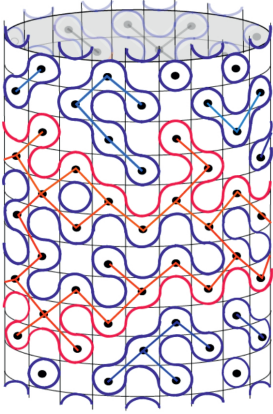


Схема для оценки ширины ядерного двойного  $\gamma$ -распада. Виртуальные переходы отмечены штриховыми линиями

На основе метода функционала плотности энергии показано, что ширина  $\gamma\gamma$ -распада чувствительна к величине смешивания простых и сложных конфигураций в области гигантского дипольного резонанса. Предложен новый способ проверки понимания коллективных мод в атомных ядрах, и открыта перспективная область исследований.

- *Severyukhin A. P., Arsenyev N. N., Pietralla N.* First Calculation of the  $\gamma\gamma$ -Decay Width of a Nuclear  $2^+_1$  State: The Case of  $^{48}\text{Ca}$  // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. P.024310.

Получены точные плотности  $\nu_c$  и  $\nu_{nc}$  стягиваемых и нестягиваемых петель в модели  $O(1)$  на полосе квадратной решетки, свернутой в бесконечный цилиндр с конечным четным периметром основания  $L = 2N$ . Эти плотности также равны плотностям критических перколяционных кластеров на повернутой на  $45^\circ$  квадратной решетке, свернутой в цилиндр, которые не охватывают и охватывают цилиндр соответственно. Результаты представлены как явные рациональные функции  $N$ , принимающие рациональные значения при любом  $N$ . Их асимптотические разложения в пределе больших  $N$  имеют иррациональные коэффициенты, воспроизводящие в ведущих порядках полученные ранее результаты. Данный результат показывает уникальный пример точного вычисления наблюдаемой в ограниченной системе, которая становится критической в пределе бесконечного размера. Исследования ее универсального скейлингового поведения помо-



$$\begin{aligned}
 \nu_c(2N) &= \frac{3\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)\Gamma\left(\frac{3N}{2} + \frac{1}{2}\right)}{4\Gamma\left(\frac{3N}{2}\right)\Gamma\left(\frac{N+1}{2}\right)} + \\
 &+ \frac{\pi^2 - 2N_3^2 - 3N_{\Gamma(3N)}}{\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{6}\right)^2\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{5}{6}\right)^2\Gamma(N)} - \frac{5}{2} = \\
 &= \frac{1}{8}, \frac{17}{160}, \frac{913}{8960}, \frac{3953}{39424}, \frac{14569}{146432}, \frac{3945737}{39829504}, \dots \\
 \nu_{nc}(2N) &= \frac{2^{2(N-2)}\Gamma(N)}{N\pi^2\Gamma(3N)} \times \\
 &\times \left( 3^{3N}\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{6}\right)^2\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{5}{6}\right)^2 - \frac{12\pi^2\Gamma\left(\frac{3N}{2}\right)^2}{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)^2} \right) = \\
 &= \frac{1}{8}, \frac{11}{320}, \frac{421}{26880}, \frac{1403}{157696}, \frac{4189}{732160}, \frac{952067}{238977024}, \dots
 \end{aligned}$$

Стягиваемые (синего цвета) и нестягиваемые (красного цвета) петли в модели петель  $O(1)$  и соответствующие кластеры модели просачивания (слева); точные выражения для их плотностей (справа)

гают лучше понять физику критических явлений в двумерных системах.

- *Povolotsky A. M.* Exact Densities of Loops in  $O(1)$  Dense Loop Model and of Clusters in Critical Percolation on a Cylinder // J. Phys. A: Math. Theor. 2021. V. 5422. P. LT01.

Исследован предложенный Вожелем (Vogel) способ параметризации всех простых комплексных алгебр Ли с помощью трех параметров, которые определяются с точностью до общего множителя и перестановок. Показано, как такое описание возникает при рассмотрении расщепленных (поляризованных) операторов Казимира — основных конструктивных блоков, используемых при вычислении цветовых факторов для амплитуд в неабелевых калибровочных теориях поля. Для расщепленных операторов Казимира всех простых комплексных алгебр Ли в определяющем и присоединенном представлениях были построены характеристические тождества. С помощью этих тождеств получены явные формулы для проекторов на инвариантные подпространства

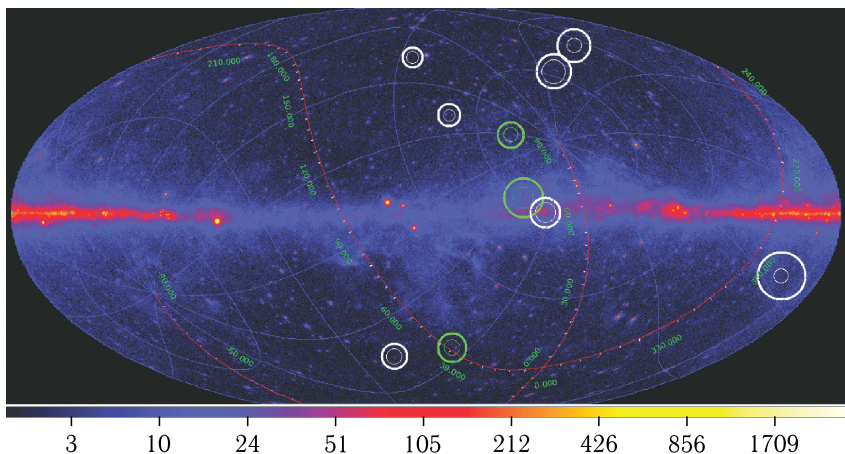
представления  $T \otimes T$  в двух случаях: когда  $T$  — определяющее и когда  $T$  — присоединенное представление. В присоединенном представлении построенные характеристические тождества и соответствующие проекторы исследованы с позиции универсального описания всех простых комплексных алгебр Ли в терминах параметров Вожеля.

- *Isaev A. P., Krivonos S. O.* Split Casimir Operator for Simple Lie Algebras, Solutions of Yang–Baxter Equations and Vogel Parameters // *J. Math. Phys.* 2021. V. 62, No. 8. P. 083503.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### Физика частиц

В начале марта 2021 г. состоялся официальный ввод в эксплуатацию Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в составе восьми кластеров. Телескоп предназначен для регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Эффективный объем детектора достиг значения, близкого к 0,4 км<sup>3</sup>, что уже сейчас делает его крупнейшим в Северном полушарии.



Положение первых десяти кандидатов на астрофизические нейтринные события в Baikal-GVD на небесной карте с источниками FERMI-LAT в галактической системе координат. Внутренняя и внешняя окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 50 и 90 %

При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018, 2019 и 2020 гг., были выделены первые 10 кандидатов на события, инициированные как нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Опубликованы первые результаты поиска событий от нейтрино на детекторе Baikal-GVD, ассоциированных с данными антарктического детектора IceCube.

Детектор Baikal-GVD включен в международные системы многоканальных оповещений с целью поиска и последующего изучения астрофизических источников методами многоволновой и многоканальной астрономии.

- *Allakhverdyan V. A. et al.* Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // PoS ICRC2021. 2021. V.002; doi: 10.22323/1.395.0002.
- *Аврорин А. В., Джилкибаев Ж.-А. М.* Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал // ЖЭТФ. 2021 (принято в печать).

Значительным событием для ОИЯИ стало начало участия в производстве высокотехнологичных детекторов по технологии Micromegas (ММ) для проекта обновления детектора ATLAS New Small Wheel. В 2017 г. в ОИЯИ была создана площадка для сборки частей детектора (квадруплетов) и их отправки в ЦЕРН. На сегодня транспортированы все 32 квадруплета, таким образом ОИЯИ полностью выполнил свои обязательства.

Сотрудники ОИЯИ приняли участие в анализе рождения бозона Хиггса Стандартной модели, распадающегося на  $bb$ -пару и ассоциированно рожденного с  $W$ - или  $Z$ -бозоном, распадающимся по лептонному каналу, на основе данных  $pp$ -столкновений, полученных в течение 2015–2018 гг. на LHC при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Наблюдалось рождение бозона Хиггса в ассоциации с  $W$ - или  $Z$ -бозоном с наблюдаемой и ожидаемой статистической значимостями 4,0 (4,1) и 5,3 (5,1) стандартных отклонения соответственно.

- *ATLAS Collab.* Measurements of  $WH$  and  $ZH$  Production in the  $H \rightarrow bb$  and Decay Channel in  $pp$  Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector // J. Instrum. 2021. V. 16. P. 07029.

В 2021 г. завершены работы по оптимизации оборудования экспериментальной установки  $\nu$ GeN, которая находится под реактором №3 Калининской атомной электростанции на расстоянии немногим более 10 м от центра активной зоны реактора, что позволяет оперировать гигантским потоком нейтрино —



$5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , и начаты измерения. Окружающие конструкционные материалы реактора служат хорошей защитой от космического излучения, соответствующей 50 м водного эквивалента. Энергетическое разрешение детектора в условиях КАЭС составило 101,6(5) эВ (FWHM). Достигнута эффективность регистрации сигналов более 80% с энергиями выше 250 эВ.

Проведен поиск физических явлений за рамками Стандартной модели (СМ) в эксперименте CMS на LHC при столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ в системе центра масс в канале с парой электронов и мюонов высоких энергий с использованием набора данных при полной интегральной светимости  $140 \text{ фб}^{-1}$ . Значимых отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Измерены верхние пределы на отношения сечений рождения новых узких резонансов со спином 1 и спином 2 и калибровочного  $Z$ -бозона. Это позволило установить наиболее сильные мировые ограничения на массы гравитонных состояний в модели Рэндалл–Сандрума, переносчиков взаимодействия между частицами СМ и сектором темной материи, новых тяжелых калибровочных бозонов моделей Великого объединения. В рамках поиска нерезонансных сигналов новой физики был установлен нижний предел на величину ультрафиолетового масштаба обрезания для модели четырехфермионного контактного взаимодействия и модели плоских дополнительных пространственных измерений Аркани–Хамеда–Димопулоса–Двали. Также впервые проверена и подтверждена универсальность лептонных взаимодействий в области до 3 ТэВ. Кроме того, выполнена серия вычислений электрослабых и КХД радиационных поправок для процессов рождения пар высокоэнергичных мюонов в процессе Дрелла–Яна.

- *Sirunyan A. M. et al. (CMS Collab.). Search for Resonant and Nonresonant New Phenomena in High-Mass Dilepton Final States at 13 TeV // JHEP. 2021. V. 07. P. 208.*
- *Zygunov V. A. Effects of Radiative Corrections in the Drell–Yan Process at Ultra-High Invariant Mass of Dilepton // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 4. P. 492–512.*
- *Zygunov V. A. Calculation of Two-Boson Exchange with Complex Masses // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 6. P. 867–885.*
- *Zygunov V. A. Influence of Electroweak Corrections on  $Z$ -Resonance Shape in Neutrino Production Process // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 6. P. 856–866.*

- *Zhizhin I. A., Lanyov A. V., Shmatov S. V.* Search for Heavy Neutral Gauge Bosons in the Dilepton Channel in the CMS Experiment at the LHC // *Phys. At. Nucl.* 2021. V.84, No.10. P.1–5.
- *Zhizhin I. A., Lanyov A. V., Shmatov S. V.* Searches for New Physics in the Dilepton Channel with the CMS Detector at the Large Hadron Collider // *Phys. At. Nucl.* 2021. V.84, No.2. P.184–189; *Yad. Fiz.* 2021. V.84, No.2. P.143–148.
- *Shalaev V. V., Shmatov S. V.* Electroweak Physics with the CMS Experiment at the LHC // *Phys. At. Nucl.* 2021. V.84, No.1. P.37–41; *Yad. Fiz.* 2021. V.84, No.1. P.20–25.
- *Savina M. V., Seitova D.* Program of Searches with the CMS Detector for Signals from Multidimensional Low-Energy Gravity at the Large Hadron Collider // *Phys. At. Nucl.* 2021. V.84, No.2. P.190–196; *Yad. Fiz.* 2021. V.84, No.2. P.149–155.

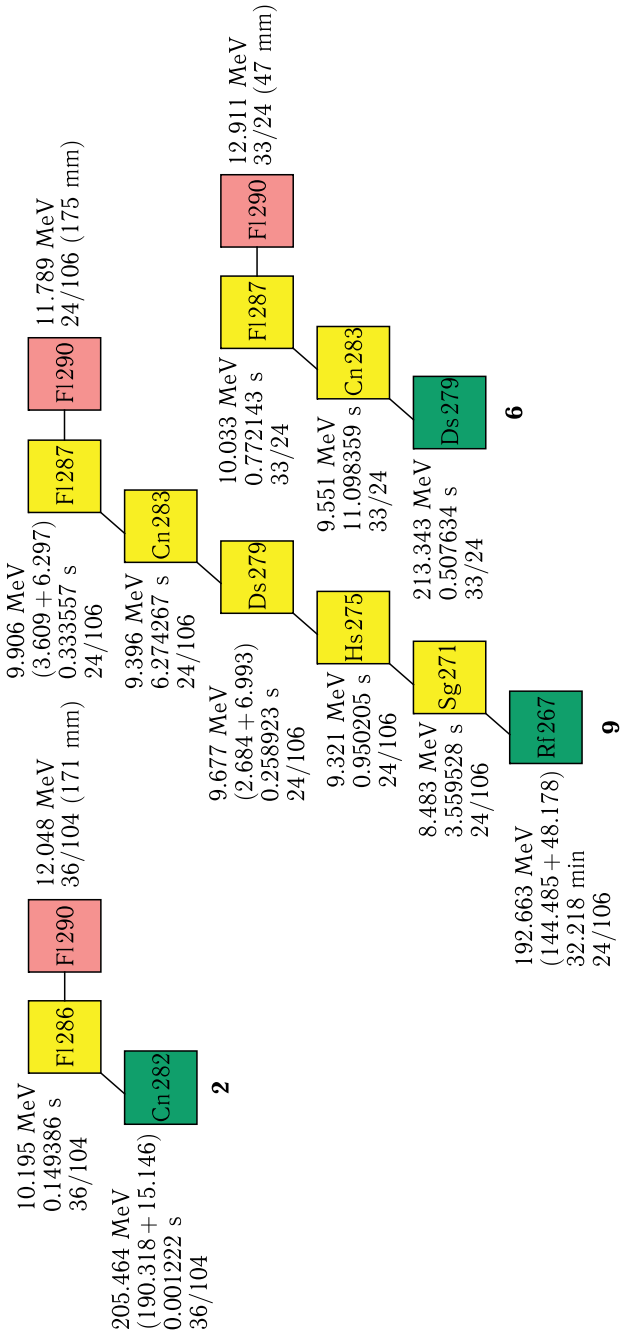
### Физика тяжелых ионов низких энергий

На ускорительном комплексе «Фабрика сверхтяжелых элементов» достигнуты рекордные параметры пучков ускоренных тяжелых ионов. Интенсивность пучка  $^{48}\text{Ca}$  превысила 5 мкА частиц. В результате успешно выполнены две серии экспериментов по синтезу изотопов 115-го элемента (московия) и 114-го (флеровия) в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$  и  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  соответственно (см. рисунок на с. 10). Зарегистрировано порядка сотни событий образования каждого из этих элементов. Это удвоило (в случае элемента 115) и утроило (для элемента 114) число известных атомов данных элементов, зарегистрированных ранее во всех ядерно-физических лабораториях мира. Кроме того, в результате экспериментов был открыт новый изотоп  $^{286}\text{Mc}$ , а также впервые обнаружен альфа-распад  $^{268}\text{Db}$ , что дало возможность наблюдать новый изотоп  $^{264}\text{Lg}$ .

- *Утенков В. К., Карпов А. В.* Флеровий ( $Z = 114$ ) и московский ( $Z = 115$ ) на фабрике СТЭ. Переход к синтезу элементов  $Z > 118$  // *Материалы совещ. «Сверхтяжелые элементы»*, Дубна, 30 июня – 2 июля 2021 г.; <https://indico.jinr.ru/event/2355/>.

### Нейтронная ядерная физика

Проведен анализ данных цикла работ по измерению Т-нечетного эффекта вращения делящегося ядра в угловых распределениях мгновенных  $\gamma$ -квантов (ROT-эффект) при делении  $^{235}\text{U}$  поляризованными нейтронами. Определен угол поворота ядра



Цепочки распада и свойства ядер, полученных в реакции полного слияния  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$

для трех значений энергии налетающего нейтрона: 0,025, 0,06 и 0,3 эВ. Показано, что знак наблюдаемого эффекта не меняется, но его величина для первого резонанса  $^{235}\text{U}$  (0,3 эВ) оказалась в 3 раза меньше, чем для тепловых нейтронов.

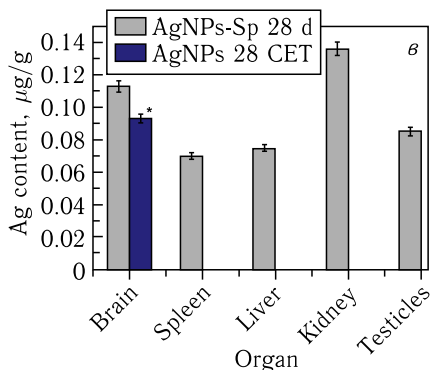
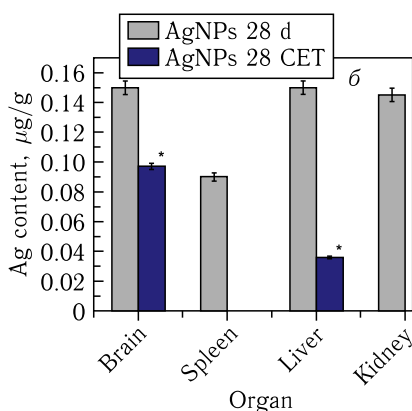
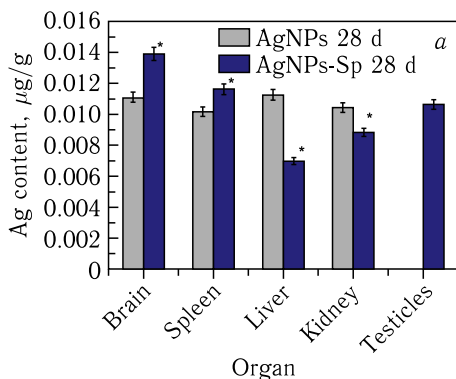
- *Berikov D., Ahmadov G., Kopatch Yu., Gagarski A. et al.* Effect of Rotation in the  $\gamma$ -Ray Emission from 60 MeV Polarized Neutron-Induced Fission of the  $^{235}\text{U}$  Isotope // *Phys. Rev. C.* 2021. V. 104, No. 2. P. 024607; doi: 10.1103/PhysRevC.104.024607.

На установке TANGRA выполнены прецизионные измерения выходов  $\gamma$ -квантов, образующихся в процессе взаимодействия нейтронов с энергией 14,1 МэВ с ядрами железа. Для наиболее сильных переходов 846,8 и 1238,3 кэВ определены коэффициенты угловой анизотропии вылета  $\gamma$ -квантов. Проведена оптимизация параметров оптических потенциалов для ядра  $^{56}\text{Fe}$  с использованием полученных данных, а также данных по дифференциальным сечениям упругого и неупругого рассеяния.

- *Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Kopatch Yu. N. et al.* Inelastic Scattering of 14,1 MeV Neutrons on Iron // *Eur. Phys. J. A.* (IF: 2,345). 2021. V. 57, No. 6. P. 194; doi: 10.1140/epja/s10050-021-00503-x.

Изучено влияние немодифицированных (AgNPs) и модифицированных биомассой *Spirulina platensis* (AgNPs-*Spirulina*) наночастиц серебра на крыс при длительном пероральном введении. Содержание серебра в органах крыс определяли методом нейтронного активационного анализа. У животных, которым вводили немодифицированные наночастицы, самое высокое содержание серебра было определено в головном мозге и почках, тогда как у животных, которым вводили AgNPs-*Spirulina*, серебро в основном накапливалось в головном мозге и яичках (рисунок). После периода полувыведения серебро быстро выводилось из селезенки и почек, однако выведение из мозга было очень низким независимо от типа наночастиц.

С целью выявления действия наночастиц на крыс были проведены гематологические и биохимические тесты. Обнаружена значительная разница в содержании эозинофилов в экспериментальной и контрольной группах. Гематологические показатели крыс под действием наночастиц серебра существенно не изменились, за исключением содержания ретикулоцитов и эозинофилов, которое значительно увеличилось. Изменения биохимиче-



Содержание серебра в органах крыс: а) у животных, которым вводили AgNPs и AgNPs-*Spirulina* в течение 28 дней, измеренное сразу после окончания эксперимента; б) у животных, которым вводили AgNPs в течение 28 дней, измеренное после периода полувыведения; в) у животных, которым вводили AgNPs-*Spirulina* в течение 28 дней, измеренное после периода полувыведения

ских показателей не выходили за пределы нормы. Наночастицы серебра размером 8–20 нм могут проникать через гематоэнцефалический барьер, и их низкое выведение из мозга указывает на необратимость этого процесса.

- Rudi L., Zinicovscaia I., Cepoi L., Chiriac T., Peshkova A., Cepoi A., Grozdov D. Accumulation and Effect of Silver Nanoparticles Functionalized with *Spirulina platensis* on Rats // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 2992; <https://doi.org/10.3390/nano11112992>.

## Физика конденсированных сред

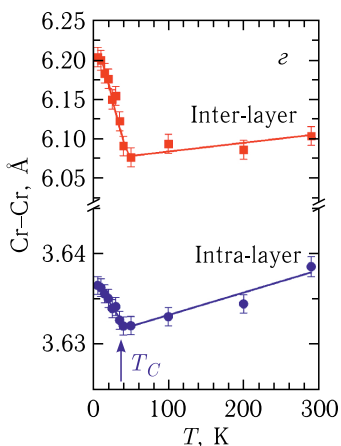
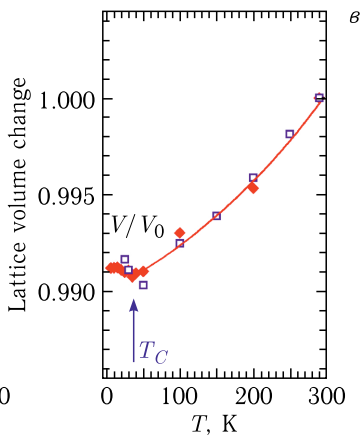
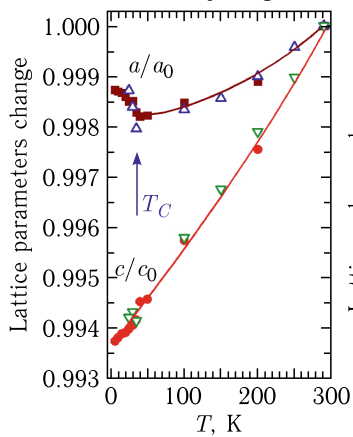
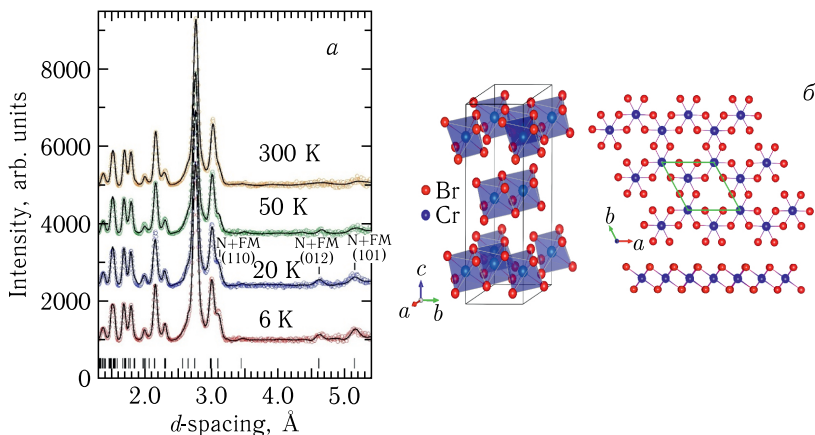
С помощью нейтронной дифракции и рамановской спектроскопии проведены исследования структурных, магнитных и колебательных свойств модельного представителя семейства ван-дер-ваальсовских магнетиков  $\text{CrX}_3$  —  $\text{CrBr}_3$  [1]. Магнитные моменты ионов Cr, формирующие графеноподобную магнитную решетку в слоях Br–Cr–Br, упорядочиваются ферромагнитно при температуре Кюри  $T_C = 37$  К. В области  $T$  обнаружено аномальное поведение структурных параметров (см. рисунок на с. 14). Ниже этой температуры характер теплового расширения изменялся с положительного на отрицательный. В области температуры магнитного упорядочения также наблюдались значительные эффекты спин-фононного взаимодействия, проявляющиеся в значительном увеличении частот колебательных мод.

- *Kozlenko D. P., Lis O. N., Kichanov S. E., Lukin E. V., Belozero-va N. M., Savenko B. N.* Spin Induced Negative Thermal Expansion and Spin-Phonon Coupling in Van der Waals Material  $\text{CrBr}_3$  // *Quantum Materials*. 2021. V. 6. P. 19.

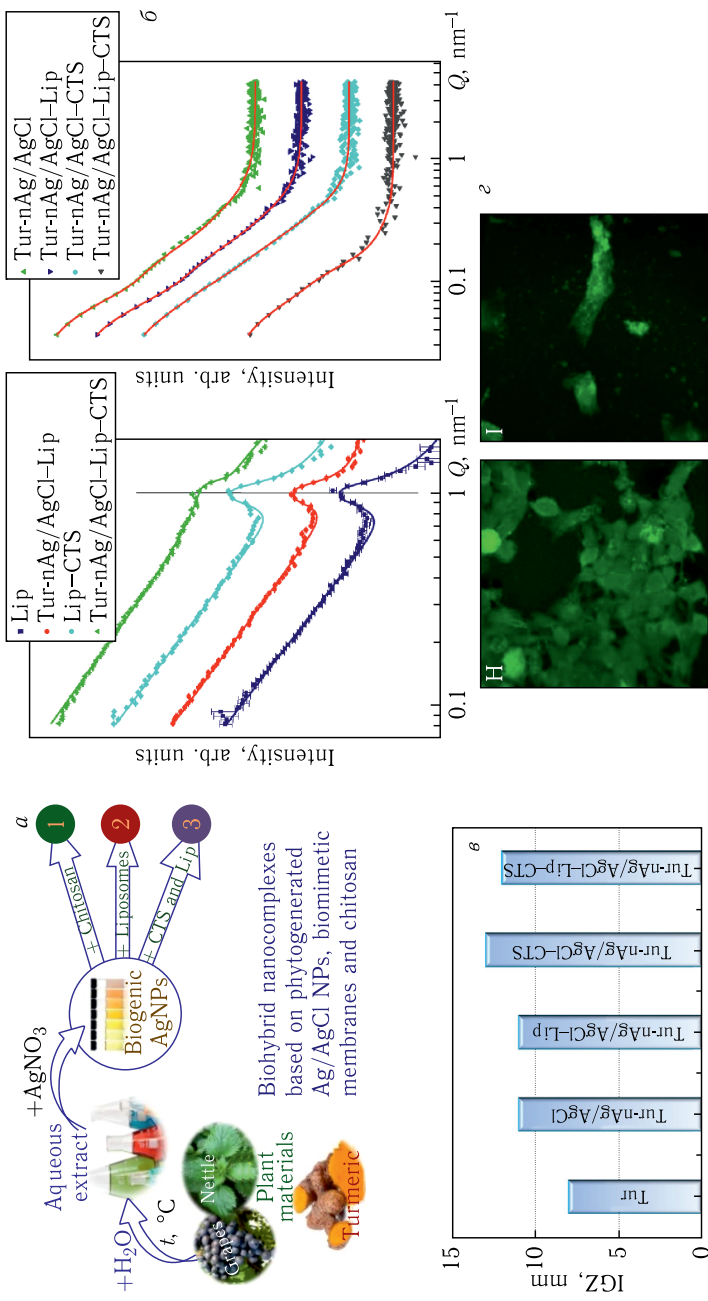
В рамках разработки высокоэффективных биосовместимых материалов, имеющих широкий потенциал применения в различных областях медицины, проведено исследование структурных и антимикробных свойств новых наноконструкций, состоящих из липосом соевого лецитина, хитозана и наночастиц серебра/хлорида серебра, полученных из экстрактов растений, включая куркуму, виноград и мяту (см. рисунок на с. 15). Морфологические и структурные методы анализа подтвердили наноразмерный масштаб компонентов полученных биокомпозитов. Данные наноматериалы также имеют значительную активность против раковых клеток, подтвержденную в *in vitro* экспериментах.

- *Barbinta-Patrascu M.-E., Gorshkova Y., Ungureanu C., Badea N., Bokuchava G., Lazea-Stoyanova A., Bacalum M., Zhigunov A., Petrovič S.* Characterization and Antitumoral Activity of Biohybrids Based on Turmeric and Silver/Silver Chloride Nanoparticles // *Materials*. 2021. V. 14. P. 4726.
- *Gorshkova Y., Barbinta-Patrascu M.-E., Bokuchava G., Badea N., Ungureanu C., Lazea-Stoyanova A., Răileanu M., Bacalum M., Turchenko V., Zhigunov A. et al.* Biological Performances of Plasmonic Biohybrids Based on Phyto-Silver/Silver Chloride Nanoparticles // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 1811.

Экспериментально показано, что при интенсивности непрерывного лазера возбуждения на длине волны 785 нм в диапа-

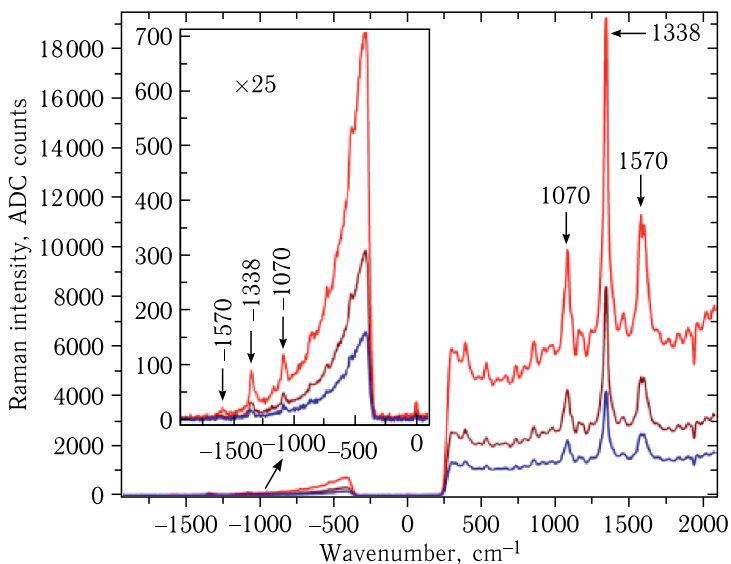


а) Нейтронные дифракционные спектры  $\text{SrB}_2\text{O}_7$ , измеренные при различных температурах, и профили, рассчитанные по методу Ритвельда. б) Ромбоэдрическая кристаллическая структура  $\text{SrB}_2\text{O}_7$  симметрии  $R\bar{3}$ . в) Температурные зависимости параметров и объема элементарной ячейки кристаллической решетки  $\text{SrB}_2\text{O}_7$ , отнормированные на соответствующие значения при комнатной температуре. г) Температурные зависимости расстояний между магнитными ионами Sr внутри ван-дер-ваальсовских слоев (intra-layer) и между слоями (inter-layer)



a) Механизм формирования биогибридных наноконплексов. б) Кривые малоуглового рассеяния нейтронов (слева) и рентгеновских лучей (справа) на исследуемых образцах наноконплексов. в) Биологические свойства исследуемых наноконплексов в отношении бактерий *Enterococcus faecalis*. г) Морфологические свойства исследуемых комплексов, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии в эпифлуоресцентной моде





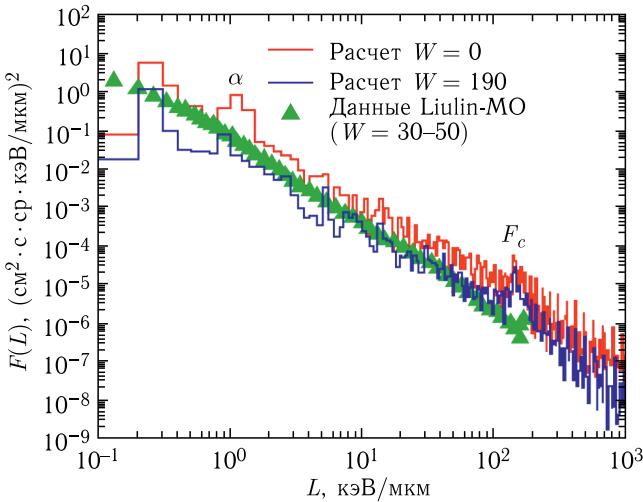
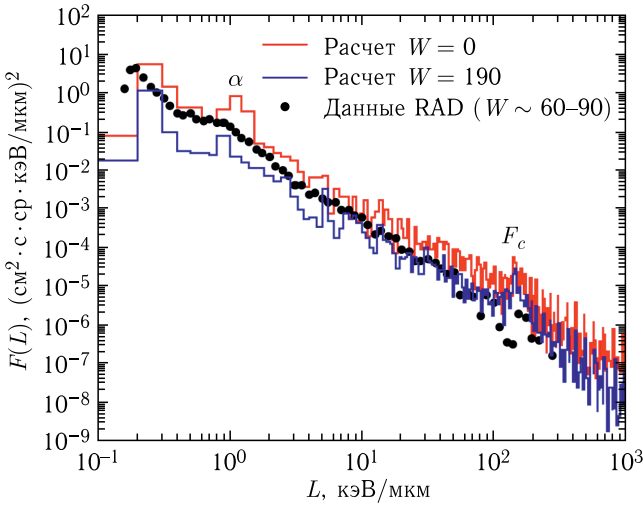
Антистоксовые и стоксовые ГР-спектры TNB/AgP/por-Si в определенной пространственной точке при интенсивностях возбуждения 25, 51 и 105 мкВт/мкм<sup>2</sup>

зоне 3–105 мкВт/мкм<sup>2</sup> рамановские спектры молекул-репортеров TNB (рисунок) воспроизводимы на произвольно наноструктурированной ГР-активной поверхности AgP/por-Si. Это дает возможность измерить зависимость от интенсивности возбуждения одновременно регистрируемых амплитуд антистоксовой и стоксовой линий. Анализ отношений интенсивностей антистоксовых и стоксовых линий в зависимости от интенсивности возбуждения позволил уточнить и оценить вклады в эти отношения: 1) спектрального профиля плазмонного локального фактора усиления электромагнитного поля, 2) лазерного нагрева конъюгатов TNB/AgP и 3) усиленной локальным полем оптической рамановской накачки.

- *Arzumanyan G. M., Mamatkulov K. Z., Vorobyeva M. Y. et al. Plasmon Resonance, Thermal, and Optical Contributions to Anti-Stokes-to-Stokes Line Strength Ratios in Continuous Wave-Excited Surface-Enhanced Raman Scattering Spectra of Molecules at Random Ag Surface // J. Raman Spectroscopy. 2021. V.52. P. 1515–1528; doi.org/10.1002/jrs.6190.*

# РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнен ряд исследований, направленных на оценку радиационного риска космонавтов при длительных межпланетных полетах и на развитие методов экспериментальной космической радиобиологии. Проведены детальные расчеты спектров всех компонентов радиационного поля внутри обитаемого модуля



Сравнение расчетных спектров ЛПЭ с данными RAD и Liulin-MO

космического аппарата от галактических космических излучений в условиях минимума и максимума солнечной активности. Верификация проведенных расчетов сделана на единственно доступных экспериментальных данных приборов RAD и Liulin-МО и показала хорошее согласие с экспериментом. Рассчитаны скорректированные коэффициенты конверсии флюенс – эффективная доза для всех компонентов радиационного поля внутри корабля.

- *Timoshenko G.N., Gordeev I.S.* Simulation of Radiation Field inside Interplanetary Spacecraft // *J. Astrophys. Astron.* 2020. V. 41, No. 5; doi: 10.1007/s12036-020-9620-3.
- *Timoshenko G.N., Gordeev I.S.* Computation of Linear Energy Transfer of Space Radiation in Biological Tissue Analog // *Planet. Space Sci.* 2021. V. 199. P. 105190.
- *Timoshenko G.N., Belvedersky M.I.* Fluence-to-Effective Dose Conversion Coefficients for Male Astronauts // *J. Radiol. Prot.* 2019. V. 39, No. 2. P. 511–521.

С целью развития экспериментальных методов оценки радиационного риска космических полетов в земных условиях предложен уникальный вариант симулятора радиационного поля внутри жилого модуля космического аппарата в условиях глубокого космоса (рис. 1, 2). В нем воспроизводятся в правильном соотноше-

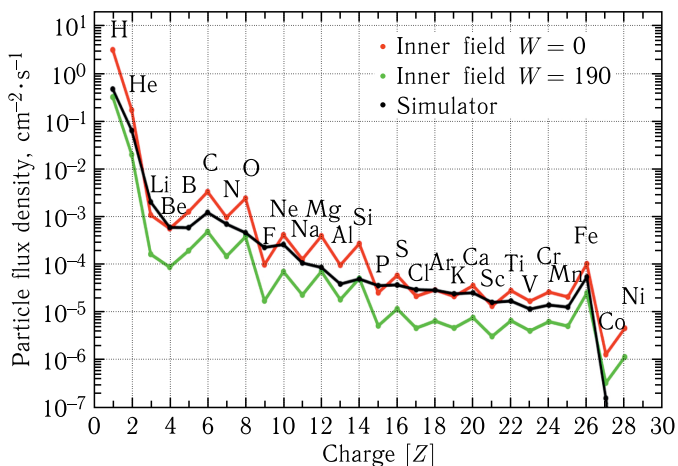


Рис. 1. Сравнение расчетных зарядовых распределений частиц во внутреннем радиационном поле космического корабля в минимуме и максимуме солнечной активности и расчетного зарядового распределения частиц в поле за симулятором

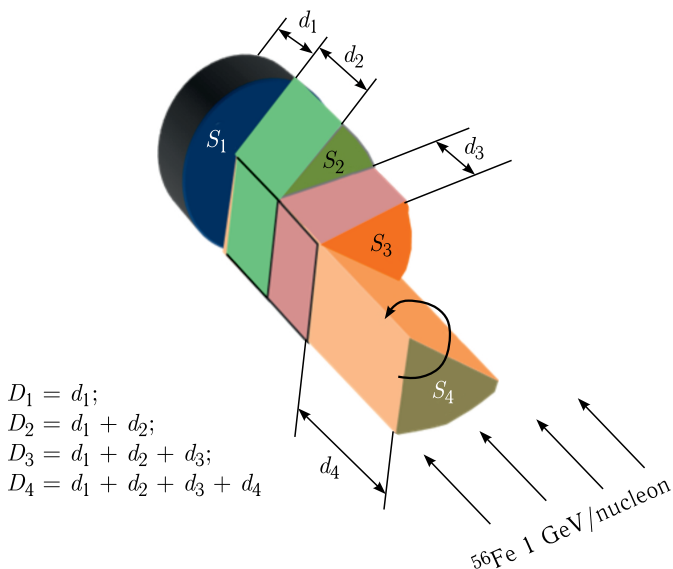
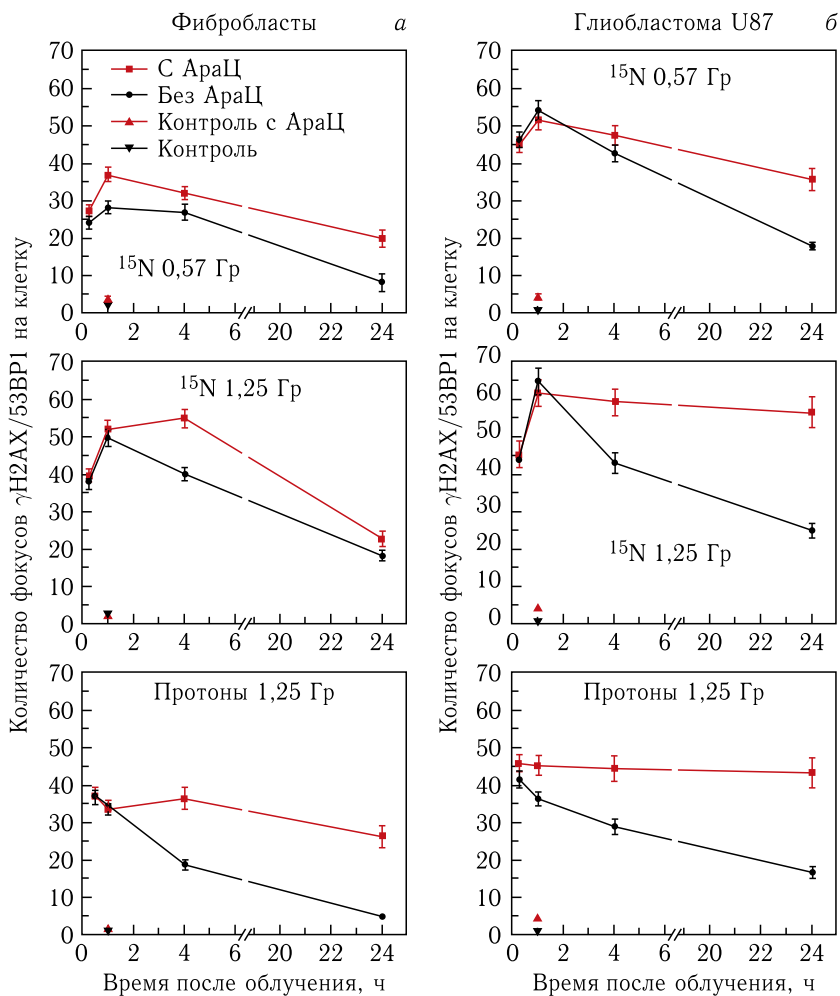


Рис. 2. Схематический вид конвертора симулятора с четырьмя фиксированными толщинами.  $D$  — толщина мишени,  $S$  — площадь мишени

нии все компоненты радиационного поля корабля, усредненные по солнечной активности. Предполагается, что симулятор космического излучения будет установлен на пучке ядер  $^{56}\text{Fe}$  с энергией 1 ГэВ/нуклон на радиобиологическом канале нуклотрона, создаваемом в рамках программы прикладных инновационных исследований на комплексе NICA.

- Gordeev I. S., Timoshenko G. N. A New Type of Ground-Based Simulator of Radiation Field inside a Spacecraft in Deep Space // Life Sci. Space Res. 2021. V. 30. P. 66–71.

Продолжены исследования модифицирующего влияния ингибитора синтеза ДНК арабинозидцитозина (АраЦ) на формирование двунитевых разрывов (ДР) в нормальных (фибробласты) и опухолевых (глиобластома U87) клетках человека при действии протонов в пике Брэгга и ускоренных ионов азота. Установлено угнетение эффективности репарации ДР ДНК в присутствии ингибитора как в нормальных (рис. а), так и в опухолевых (рис. б) клетках человека при действии ускоренных ионов азота. Наиболее ярко модифицирующее влияние АраЦ наблюдается при действии протонов.



Кинетика формирования и элиминации радиационно-индуцированных фокусов  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  в фибробластах (а) и опухолевых клетках (б) человека при действии ускоренных ионов азота и протонов в условиях влияния модификатора (красная линия) и без него (черная линия)

- *Shamina D. D., Boreyko A. V., Zadneprianets M. G., Hramco T. S., Krupnova M. E., Kulikova E. A., Pavlova A. S., Smirnova E. V., Filatova A. S.* The Complexity of Clustered DNA DSBs in Human Fibroblasts under the Action of Low- and High-LET Radiation // AIP Conf. Proc. 2021. V.2377. Art. No.050005; doi: 10.1063/5.0063357.IF=0.40.

- Борейко А. В., Заднепрянец М. Г., Красавин Е. А., Куликова Е. А., Смирнова Е. В., Тимошенко Г. Н., Храшко Т. С. Исследование закономерностей и механизмов формирования молекулярных нарушений в генетических структурах клеток млекопитающих и человека при действии ускоренных тяжелых ионов низких и промежуточных энергий // VIII Съезд по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 окт. 2021 г.): Тезисы докладов. Дубна, 2021. С. 245.

В сентябре 2021 г. группа сотрудников ОИЯИ проводила II этап эксперимента в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН по исследованию сверхглубоких микробных сообществ, обитающих в экстремальных условиях неподалеку от эльбрусского вулканического очага. Отбор образцов воды, грунта и неорганических отложений проводился на расстоянии 4200 м от входа во вспомогательную штольню в подземном горячем источнике.

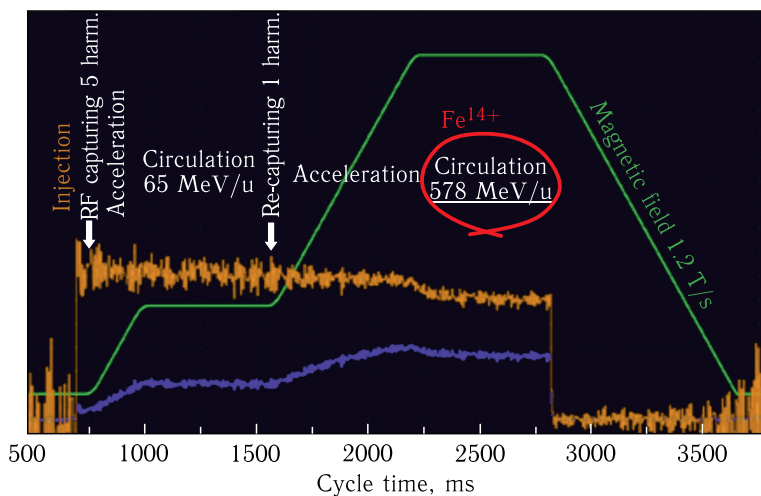
Проведены исследования по изучению влияния пониженного радиационного фона на модельные биологические объекты. Впервые с помощью РНК-секвенирования были идентифицированы все гены *D. melanogaster*, изменившие свою активность в условиях низкофоновой лаборатории. Анализ полученных данных свидетельствует об отсутствии влияния снижения радиационного фона на сложный модельный организм. Этот результат ставит вопрос об области применимости линейной беспороговой модели действия радиации в области низких доз.

- Zarubin M. et al. First Transcriptome Profiling of *D. melanogaster* after Development in a Deep Underground Low Radiation Background Laboratory. <https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0255066>.

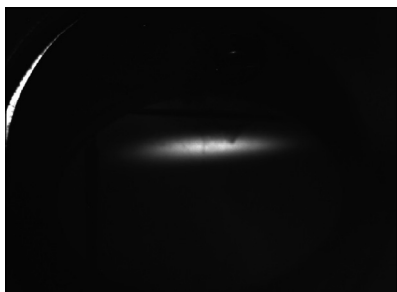
## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

В сентябре 2021 г. системы бустерного синхротрона — одного из узловых элементов ускорительного комплекса тяжелых ионов NICA — были выведены на проектные параметры. В ходе сеанса в кольце бустера пучок ионов железа был впервые ускорен до проектной энергии 578 МэВ/нуклон. В сеансе был также осуществлен полноценный запуск оборудования системы электронного охлаждения бустера и впервые в России получено электронное охлаждение пучка тяжелых ионов. Эксперимент по охлаждению пучка был проведен с ионами  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  при энергии инъекции 3,2 МэВ/нуклон.

Важным итогом сеанса явилось успешное завершение совместных работ специалистов ОИЯИ и ИЯФ СО РАН по созданию систем вывода пучка из бустера и канала транспортировки пучка в нуклотрон. После настройки магнитной системы канала и испытания системы управления оборудованием успешно запущен уникальный ударный магнит для вывода пучка из бустера с рекордным уровнем магнитного поля 2 кГс. Начала работать система локального смещения замкнутой орбиты для быстрого вывода пучка из бустера, получен вывод пучков двух сортов ионов — гелия и железа — при энергии 240 МэВ/нуклон с дальнейшей транспортировкой по каналу, на конечном участке которого пучки ионов были детектированы датчиками тока и положения пучка. Фотоснимки профилей пучка сделаны с люминофорного экрана.



Сигнал с датчика тока пучка в бустере



Пучок ионов  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  на люминофорном экране в конце канала транспортировки пучков бустер-нуклотрон

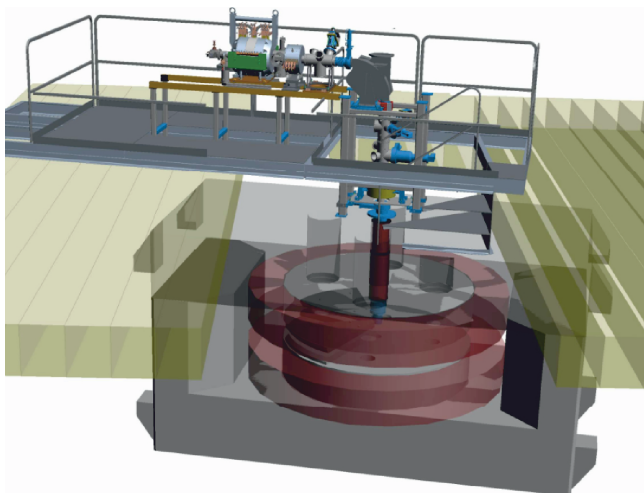
Завершается монтаж новой системы инъекции пучка в нуклотрон и создание тяжелоионной цепочки, которая в дальнейшем будет основной при работе с коллайдером NICA и физической установкой BM@N. В январе 2022 г. запланирован первый сеанс работы с полным циклом ускорения на комплексе NICA.

- *Butenko A., Khodzhbagiyev H., Kostromin S., Meshkov I., Sidorin A., Syresin E., Trubnikov G., Tuzikov A.* The NICA Complex Injection Facility // Proc. of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia; JACoW Publ.; doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOY01.

Разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию установка для производства полого кабеля из высокотемпературного сверхпроводника. Из этого кабеля изготовлен и успешно испытан при 25 К модельный быстроциклирующий квадрупольный магнит для модернизации сверхпроводящего синхротрона нуклотрон.

- *Khodzhbagiyev H., Kekelidze V., Merkuriev A., Nikiforov D., Novikov M., Kuznetsov G., Trubnikov G.* Quadrupole Superconducting Model Magnet for Upgrade of the Nuclotron Synchrotron // Presented on 27th Intern. Conf. on Magnet Technology MT27. Fukuoka, Nov. 15–19, 2021.

В рамках проекта Инновационного центра ядерно-физических исследований ОИЯИ создается ускорительный комплекс ДЦ-140 для исследований в области радиационного материаловедения



Трехмерная модель ускорителя ДЦ-140



и трековых мембран. В 2021 г. была продолжена комплектация ускорителя. Начата работа по размещению систем ускорителя в экспериментальном зале. Плановый срок ввода в эксплуатацию — конец 2023 г.

- *Lisov V. et al.* // Proc. of the 12th Intern. Particle Acc. Conf. P. 1845–1851.
- *Kazarinov N. et al.* Ibid. P. 1852–1854; <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/proceed.pdf>.

Начаты проектные работы по созданию специализированного сверхпроводящего протонного циклотрона MSC-230 с энергией пучка протонов до 230 МэВ и током до 10 мкА, который будет обеспечивать использование наиболее современных методов протонной терапии, включая так называемый карандашный пучок и флэш-терапию.

- *Karamyshev O. et al.* Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // Proc. of the 10th Intern. Particle Acc. Conf., IPAC 2019. TUPTS059.
- *Karamyshev O. et al.* Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy. JINR Preprint E9-2019-2. Dubna, 2019.

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА**

На базе платформы DIRAC создана гетерогенная вычислительная среда для обработки и хранения данных эксперимента MPD мегапроекта NICA. Благодаря DIRAC вычислительные ресурсы и иерархическая гиперконвергентная система обработки и хранения данных суперкомпьютера (СК) «Говорун» включены в созданную среду. СК «Говорун» играет ключевую роль в созданной среде и благодаря гибкости архитектуры позволяет проверить на практике новейшие программно-аппаратные решения в области вычислений и обработки данных.

- *Moshkin A. A., Pelevanyuk I. S., Podgainy D. V., Rogachevsky O. V., Streltsova O. I., Zuev M. I.* Approaches, Services, and Monitoring in a Distributed Heterogeneous Computing Environment for the MPD Experiment // Russian Supercomputing Days: Proc. of the Intern. Conf. 2021. P. 4–11.

На суперкомпьютере «Говорун» проводятся исследования в области работы с большими данными с использованием

новейшей технологии DAOS (Distributed Asynchronous Object Storage). С этой целью на СК «Говорун» развернут DAOS полигон, занявший 16-е место в номинации «10 node challenge» в текущей редакции списка IO500. Большие перспективы по использованию этой технологии связаны с мегапроектом NICA на всех этапах работы ускорителя — от приема экспериментальных данных до финального физического анализа.

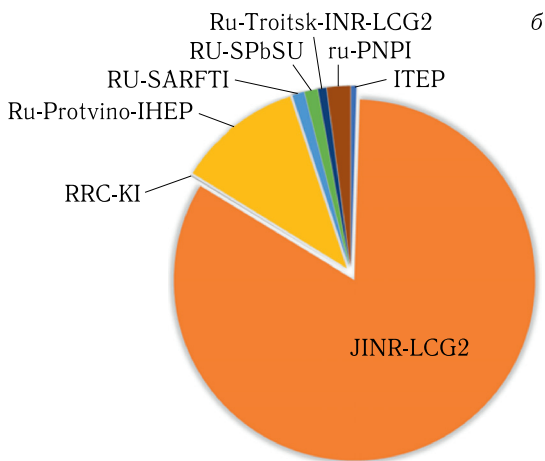
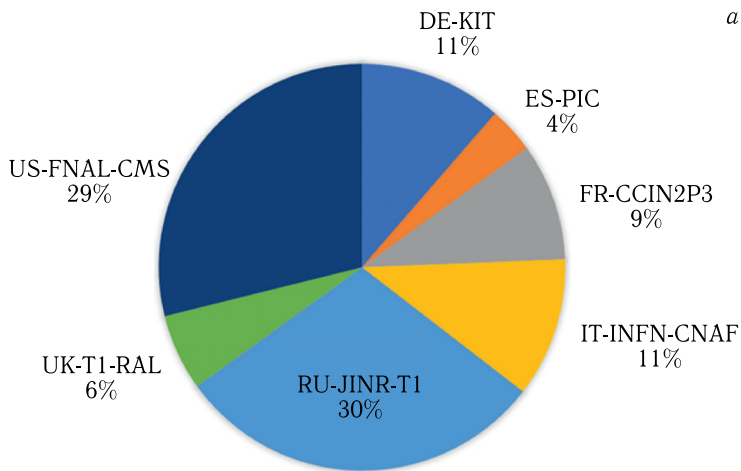
- *Kudryavtsev A. O., Podgainy D. V., Moskovsky A. A.* On-Demand DAOS Storage for Data Processing and Analysis in High Energy Physics: A Case of LIT JINR Data and Compute Infrastructure // ISC High Performance 2021; <https://www.isc-hpc.com/>.
- *Moskovsky A. A., Brekhov A. T., Podgainy D. V., Kudryavtsev A. O.* Hyperconverged Storage for High Performance Data Analysis in High Energy Physics: A Case of Intel DAOS Deployment // Sixth Intern. Parallel Data Systems Workshop, 15 Nov. 2021; <https://sc21.supercomputing.org/session/?sess=sess332>.
- *Val'a M., Podgainy D., Lavrenko P., Brekhov A.* High Energy Physics Experiment Data Processing with DAOS in Multi-Tier Storage Environment Based on RSC Storage on-Demand // The 5th Annual DAOS User Group Meeting, 19 Nov. 2021; <https://daosio.atlassian.net/wiki/spaces/DC/pages/11015454821/DUG21>.

В 2021 г. ресурсный центр Tier-1 ОИЯИ, который используется для обработки и хранения данных эксперимента CMS (ЦЕРН), а также для моделирования данных в рамках проекта NICA, вышел на первое место в мире по производительности среди центров Tier-1 для эксперимента CMS.

Сайт Tier-2 ОИЯИ (JINR-LCG2) является самым продуктивным в российском консорциуме RDIG (Российский грид для интенсивной обработки данных) и занимает 17-е место среди 124 сайтов Tier-2 WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) (см. рисунок на с.26). Ресурсы Tier-2 используются для всех экспериментов на NICA и LHC, ILC, Biomed, NOvA, а также локальными пользователями ОИЯИ.

- *Baginyan A. et al.* Current Status of the MICC: An Overview // CEUR Workshop Proc. (in press).

Проведены расчеты спектра вибрационно-ротационных связанных, метастабильных состояний и состояний рассеяния димера бериллия в основном  $X_1\Sigma_g^+$ -состоянии. Задача решена с ис-



Распределение по нормированному времени загрузки CPU в HS06 часах за 2021 г. для а) Tier-1-сайтов для эксперимента CMS и б) Tier-2-сайтов, входящих в консорциум RDIG

пользованием потенциальных кривых и разработанного авторского программного пакета KANTBP 5M, в котором реализуются метод Ньютона и метод конечных элементов высокого порядка точности. Впервые получен спектр ротационно-вибрационных метастабильных состояний димера бериллия с комплексными собственными значениями энергии, а также спектр вибрационно-

ротационных связанных состояний, согласующийся с результатами других авторов.

- *Derbov V. L. et al.* Spectrum of the Beryllium Dimer in the Ground  $X_1\Sigma_g^+$  State // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2021. V. 262. P. 107529.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В 2021 г. в трех этапах онлайн-программы УНЦ ОИЯИ для студентов и аспирантов научно-технических специальностей INTEREST (INTERNATIONAL REMOTE STUDENT TRAINING) принимали участие 136 студентов и аспирантов из Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Боснии и Герцеговины, Ботсваны, Греции, Египта, Индии, Индонезии, Испании, Италии, Кубы, Мексики, Монголии, Польши, Румынии, России, Сербии, Турции, Узбекистана, Украины, Чехии, ЮАР и Японии. Со времени запуска программы INTEREST ее участниками стали 180 представителей из 29 стран мира. Программа позволяет участникам познакомиться с основными направлениями исследований Института, найти научного руководителя для квалификационной работы, а также в дальнейшем проходить очные стажировки в лабораториях Института. На каждый этап программы отводится 4–6 недель для дистанционного выполнения проектов, предложенных сотрудниками Института, а также для лекций и экскурсий в онлайн-режиме.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении: Всероссийского фестиваля НАУКА 0+, фестиваля технологий и науки «Geek Picnic», фестиваля «Техносреда», общенационального марафона «Наука рядом», 4-го воркшоп-проекта «Музейные связи» по теме «Медиация: практики взаимодействия с посетителем, научная коммуникация». Для школьников были организованы: 33-я Международная компьютерная школа, научная школа для слушателей школьного университета при Академии научных исследований и технологий Египта (ASRT), марафон «ОИЯИ в школах Дубны» в рамках 65-летия ОИЯИ и Года науки и технологий, онлайн-участие в фестивале новых знаний STEAM FEST, онлайн-трансляция лекций ученых ОИЯИ в образовательном центре «Сириус» (Сочи), лекции в онлайн-формате проекта «Большая перемена», лекторий УНЦ для школьников «Классная наука — наука в классе» и участие в Virtual science camp.

В Яндекс.Лицее завершилось двухгодичное обучение школьников и осуществлен новый набор. Организованы ознакомительные экскурсии в ОИЯИ для участников образовательного форума по физике, который проходил в МФТИ в рамках Всероссийской студенческой олимпиады «Я — профессионал», для участников проекта «Здравствуй, Россия!» и для учеников негосударственного образовательного частного учреждения «Британская международная школа».

## **ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 17.12.2020 по 13.12.2021)**

- Книги — 10:

*Блохинцев Д. И.* Акустика неоднородной движущейся среды / Предисл.: Г. П. Свищев. — 3-е изд. — М.: URSS, 2021. — 206 с.: ил. — Библиогр.: с. 202–203.

*Исаев А. П., Рубаков В. А.* Теория групп и симметрий. Кн. 2. Представления групп и алгебр Ли. Приложения. — М.: URSS, 2020. — 693 с.: ил. — Доп. тир. — Библиогр.: с. 681–687.

*Исаев П. С.* Обыкновенные, странные, очаровательные, прекрасные...: об истории развития теоретических идей в физике элементарных частиц. — М.: URSS, 2021. — 315 с.: ил. — (Науку — всем! Шедевры научно-популярной литературы (Физика); № 105). — Библиогр.: с. 314.

*Кузнецов А. А.* Открытие антисигма-минус-гиперона. Дубна: ОИЯИ, 2020. — 16 с.: ил. — (Б-ка еженедельника Объединенного института ядерных исследований «Дубна: наука, содружество, прогресс»).

*Малахов А. И.* Релятивистская ядерная физика: Учеб. пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2021. — 181 с.: цв. ил. — (Учебно-методические пособия Учебно-научного центра ОИЯИ. УНЦ; 2020-61). — Библиогр.: с. 175–177.

*Оганесян Ю. Ц., Пенионжкевич Ю. Э., Григорьев В. А.* Физика тяжелых ионов и ее приложения: Учеб. пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2021. — 363 с.: цв. ил. — (Учебно-методические пособия Учебно-научного центра ОИЯИ. УНЦ; 2019-60). — Библиогр.: с. 362–363.

*Пенионжкевич Ю. Э., Молчанов Е. М.* Экзотические люди и ядра. ЕХОН: 30 лет истории. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 144, [2] с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2020-8).

*Позе Р. Г.* Немецкие ученые и специалисты в Советском атомном проекте: документы, комментарии, воспоминания. — М., 2021. — 279 с.: ил. — Библиогр.: с. 267–279.

*Тяпкин А. А.* «Сквозь железный занавес»: из истории международного научного сотрудничества. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 28 с.: ил. — (Б-ка еженедельника Объединенного института ядерных исследований «Дубна: наука, содружество, прогресс»).

*Швидкий С.* Всему свое время. — Дубна: ОИЯИ, 2021. — 124 с.

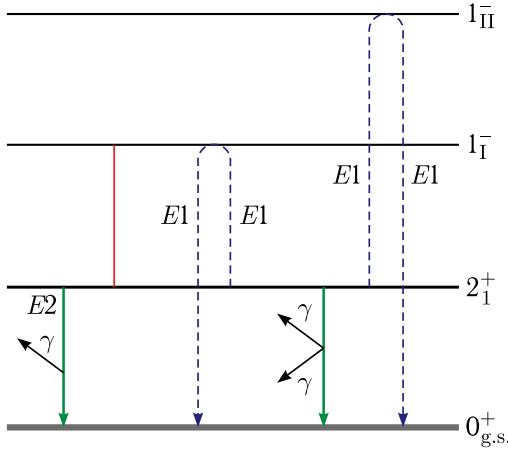
- Журнальные статьи — 1339
- Публикации в трудах конференций — 271
- Препринты — 29
- Авторефераты диссертаций — 23
- Всего: 1672

## THEORETICAL PHYSICS

In the framework of the most general renormalizable theory in four dimensions, for the first time we derived the expressions for the beta functions of gauge and Yukawa coupling constants at four and three loops, respectively. The main feature of the utilized approach lies in the fact that we bypassed tedious and cumbersome calculations by considering simple “toy” models and fixing unknown model-independent coefficients in general expressions for the renormalization group (RG) functions. Thanks to the obtained results, it became possible to carry out precision RG analysis of an arbitrary New Physics model without the need for explicit diagrammatic calculation and renormalization. As an application, we derived the four-loop beta functions of all gauge couplings in the Standard Model and its generalization with several Higgs doublets.

- *Bednyakov A., Pikelner A.* Four-Loop Gauge and Three-Loop Yukawa Beta Functions in a General Renormalizable Theory // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127, No. 4. P. 041801.
- *Bednyakov A., Pikelner A.* Six-Loop Beta Functions in General Scalar Theory // JHEP. 2021. V. 04. P. 233.

The  $\gamma\gamma$  decay of the low-energy quadrupole state of an even-even nucleus was studied. Choosing the first excited state of  $^{48}\text{Ca}$  as an example, its  $\gamma\gamma/\gamma$  branching ratio of  $3 \cdot 10^{-8}$  was computed for the first time for an even-even nucleus. Making use of the energy density functional, it is shown that the  $\gamma\gamma$ -decay width is sensitive to the mixing of the simple and complex configurations in the giant dipole resonance region. This work elucidates a new way to test our



Scheme for estimating the width of nuclear double  $\gamma$  decay. The dashed lines correspond to the virtual transitions

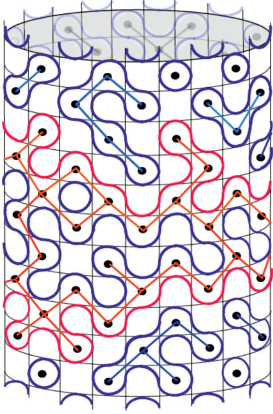
understanding of collective modes of nuclei and opens a perspective area of research.

- *Severyukhin A. P., Arsenyev N. N., Pietralla N.* First Calculation of the  $\gamma\gamma$ -Decay Width of a Nuclear  $2_1^+$  State: The Case of  $^{48}\text{Ca}$  // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. P.024310.

The exact densities  $\nu_c$  and  $\nu_{nc}$  of contractible and non-contractible loops in the  $O(1)$  model on a strip of the square lattice rolled into an infinite cylinder of finite even circumference  $L = 2N$  were obtained. These densities are also equal to the densities of critical percolation clusters on  $45^\circ$  rotated square lattice rolled into a cylinder, which do not or do wrap around the cylinder respectively. The results are presented as explicit rational functions of  $N$  taking rational values for any  $N$ . Their asymptotic expansions in the large  $N$  limit have irrational coefficients reproducing the earlier results in the leading orders. This result gives a unique example of exact calculation of an observable in a confined system that approaches a critical state in the infinite size limit. Studies of its universal scaling behavior are useful for understanding physics of critical phenomena in two-dimensional systems.

- *Povolotsky A. M.* Exact Densities of Loops in  $O(1)$  Dense Loop Model and of Clusters in Critical Percolation on a Cylinder // J. Phys. A: Math. Theor. 2021. 5422LT01.





$$\begin{aligned} \nu_c(2N) &= \frac{3\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)\Gamma\left(\frac{3N}{2} + \frac{1}{2}\right)}{4\Gamma\left(\frac{3N}{2}\right)\Gamma\left(\frac{N+1}{2}\right)} + \\ &+ \frac{\pi^2 - 2N_3^2 - 3N_{\Gamma(3N)}}{\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{6}\right)^2\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{5}{6}\right)^2\Gamma(N)} - \frac{5}{2} = \\ &= \frac{1}{8}, \frac{17}{160}, \frac{913}{8960}, \frac{3953}{39424}, \frac{14569}{146432}, \frac{3945737}{39829504}, \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_{nc}(2N) &= \frac{2^{2(N-2)}\Gamma(N)}{N\pi^2\Gamma(3N)} \times \\ &\times \left( 3^{3N}\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{6}\right)^2\Gamma\left(\frac{N}{2} + \frac{5}{6}\right)^2 - \frac{12\pi^2\Gamma\left(\frac{3N}{2}\right)^2}{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)^2} \right) = \\ &= \frac{1}{8}, \frac{11}{320}, \frac{421}{26880}, \frac{1403}{157696}, \frac{4189}{732160}, \frac{952067}{238977024}, \dots \end{aligned}$$

Contractible (blue) and non-contractible (red) loops of the  $O(1)$  loop model on the cylinder and corresponding percolation clusters (on the left); their exact densities (on the right)

The method to parameterize all simple complex Lie algebras by three parameters, which are defined up to a common factor and permutations, proposed by Vogel, was investigated. It was shown how this description arises when considering the split (polarized) Casimir operators — the main building blocks used in calculating of the color factors in the amplitudes in the non-Abelian gauge field theories. The characteristic identities were constructed for the split Casimir operators of all simple complex Lie algebras in the defining and adjoint representations. Using these identities, the explicit formulas were obtained for the projectors onto invariant subspaces of the representation  $T \otimes T$  in two cases, when  $T$  is the defining and when  $T$  is the adjoint representation. In the adjoint representation, the constructed characteristic identities and the corresponding projectors were investigated from the standpoint of a universal description of all simple complex Lie algebras in terms of the Vogel parameters.



- *Allakhverdyan V.A. et al.* Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // PoS ICRC2021. 2021. V.002; doi: 10.22323/1.395.0002.
- *Avrorin A.V. et al.* Underwater Cherenkov Detector in Lake Baikal // JETP. 2021 (in press).

A significant achievement of JINR was the start of participation in production of the high-tech detectors based on the MicroMegas (MM) technology for the New Small Wheel ATLAS upgrade project. In 2017, JINR created a platform for the MM chambers production (quadruplets) and sending them to CERN. By now all 32 quadruplets have been transported to CERN, therefore JINR has successfully fulfilled its obligations.

JINR participates in measurements of the Standard Model Higgs boson decaying into a  $bb$  pair and produced in association with a  $W$  or  $Z$  boson decaying into leptons, using  $pp$  collision data collected during 2015–2018 by the LHC at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. The production of a Higgs boson in association with a  $W$  or  $Z$  boson is established with observed and expected significances of 4.0 (4.1) and 5.3 (5.1) standard deviations, respectively.

- *ATLAS Collab.* Measurements of  $WH$  and  $ZH$  Production in the  $H \rightarrow bb$  and Decay Channel in  $pp$  Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector // JINST. 2021. V. 16. P. 07029.

In 2021, the works were completed to optimize the equipment of the  $\nu$ GeN experimental setup. The  $\nu$ GeN experimental setup is located under Reactor Unit #3 of the Kalinin Nuclear Power Plant (KNPP) at a distance of about 10 m from the centre of the reactor core. This gives a possibility for operating an enormous neutrino flux greater than  $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and measurements were started. Structural materials of the reactor provide good shielding against cosmic radiation equal to 50 m water equivalent. The detector energy resolution reached at KNPP is 101.6(5) eV (FWHM). The signal detection efficiency is above 80% for signals with energies above 250 eV.

In the CMS experiment at the LHC, the search for physics beyond the Standard Model (SM) in proton–proton collisions at a centre-of-mass energy of 13 TeV in a channel with a pair of electrons and high-energy muons using a dataset with a total integrated luminosity of  $140 \text{ fb}^{-1}$  was carried out. No significant

deviations from the SM predictions were observed. The upper limits on the ratio of the production cross section of various spin-1 and spin-2 new resonances to that of the SM  $Z$  boson were measured. This made it possible to establish the strongest world limits on the masses of graviton states in the Randall–Sundrum model, mediators of interaction between SM particles and dark matter, and new heavy gauge bosons of the GUT. As part of the search for non-resonant signatures of new physics, a lower limit was set on the value of the ultraviolet cutoff parameter for the four-fermion contact interaction model and the Arkani-Hamed–Dimopoulos–Dvali model of large extra dimensions. The universality of lepton interactions at the scale of up to 3 TeV was also tested and confirmed for the first time. In addition, a series of calculations of electroweak and QCD radiation corrections for the processes of production of high-energy muon pairs in the Drell–Yan process was performed.

- *Sirunyan A.M. et al. (CMS Collab.). Search for Resonant and Nonresonant New Phenomena in High-Mass Dilepton Final States at 13 TeV // JHEP. 2021. V.07. P.208.*
- *Zygunov V.A. Effects of Radiative Corrections in the Drell–Yan Process at Ultra-High Invariant Mass of Dilepton // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No. 4. P.492–512.*
- *Zygunov V.A. Calculation of Two-Boson Exchange with Complex Masses // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No. 6. P.867–885.*
- *Zygunov V.A. Influence of Electroweak Corrections on  $Z$ -Resonance Shape in Neutrino Production Process // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No.6. P.856–866.*
- *Zhizhin I.A., Lanyov A.V., Shmatov S.V. Search for Heavy Neutral Gauge Bosons in the Dilepton Channel in the CMS Experiment at the LHC // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No.10. P.1–5.*
- *Zhizhin I.A., Lanyov A.V., Shmatov S.V. Searches for New Physics in the Dilepton Channel with the CMS Detector at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No.2. P.184–189; Yad. Fiz. 2021. V.84, No.2. P.143–148.*
- *Shalaev V.V., Shmatov S.V. Electroweak Physics with the CMS Experiment at the LHC // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No.1. P.37–41; Yad. Fiz. 2021. V.84, No.1. P.20–25.*
- *Savina M.V., Seitova D. Program of Searches with the CMS Detector for Signals from Multidimensional Low-Energy Gravity at the Large Hadron Collider // Phys. At. Nucl. 2021. V.84, No.2. P.190–196; Yad. Fiz. 2021. V.84, No. 2. P.149–155.*

## Low-Energy Heavy-Ion Physics

Record parameters were achieved for heavy-ion beams accelerated at the Factory of Superheavy Elements complex. The intensity of the calcium-48 beam exceeded 5 particle  $\mu\text{A}$ . As a result, two series of experiments were successfully conducted on the synthesis of the isotopes of elements 115 (moscovium) and 114 (flerovium) in the  $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$  and  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$  reactions, respectively (figure on page 37). Around a hundred formation events for each of these elements were registered, which doubled (in case of element 115) and tripled (in case of element 114) the number of the already known atoms of these elements registered in earlier experiments conducted in all physics laboratories worldwide. In the experiments, a new isotope moscovium-286 was also discovered and for the first time the alpha decay of dubnium-268 was detected, which made it possible to observe a novel isotope lawrencium-264.

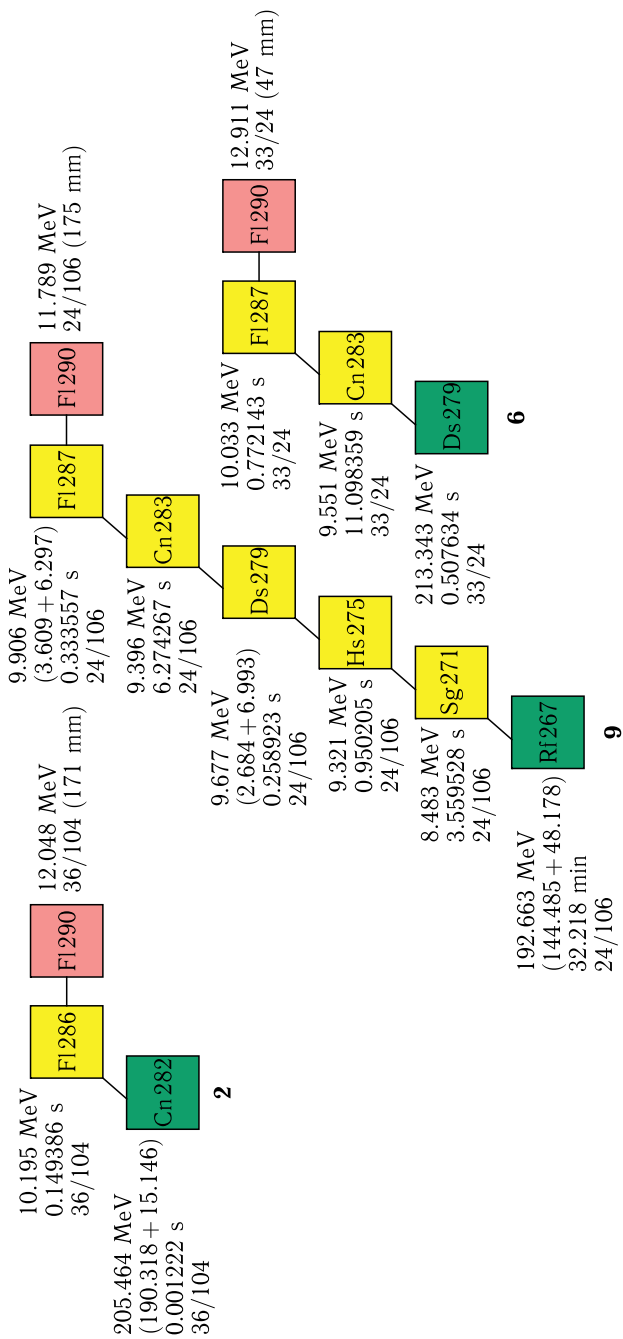
- *Utyonkov V.K., Karpov A.V.* Flerovium ( $Z = 114$ ) and Moscovium ( $Z = 115$ ) at the SHE Factory. Transition to the Synthesis of Elements with  $Z > 118$  // Proc. of the meeting "Superheavy Elements", Dubna, 30 June – 2 July 2021; <https://indico.jinr.ru/event/2355/>.

## Neutron Nuclear Physics

The data from measurements of the  $T$ -odd effect of rotation of a fissile nucleus in the angular distributions of prompt  $\gamma$  rays (ROT effect) in the fission of  $^{235}\text{U}$  by polarized neutrons were analyzed. The angle of rotation of the nucleus was determined for three values of the incident neutron energy: 0.025, 0.06, and 0.3 eV. It is shown that the sign of the observed effect does not change, but its value for the first resonance of  $^{235}\text{U}$  (0.3 eV) is 3 times smaller than for thermal neutrons.

- *Berikov D., Ahmadov G., Kopatch Yu., Gagarski A. et al.* Effect of Rotation in the  $\gamma$ -Ray Emission from 60 MeV Polarized Neutron-Induced Fission of the  $^{235}\text{U}$  Isotope // Phys. Rev. C. 2021. V. 104, No. 2. P. 024607; doi: 10.1103/PhysRevC.104.024607.

Precision measurements of the yields of  $\gamma$  rays produced in the 14.1 MeV neutron-induced reactions on iron were carried out at the TANGRA facility. For the strongest transitions 846.8 keV and 1238.3 keV, the parameters of the angular anisotropy of the  $\gamma$ -ray

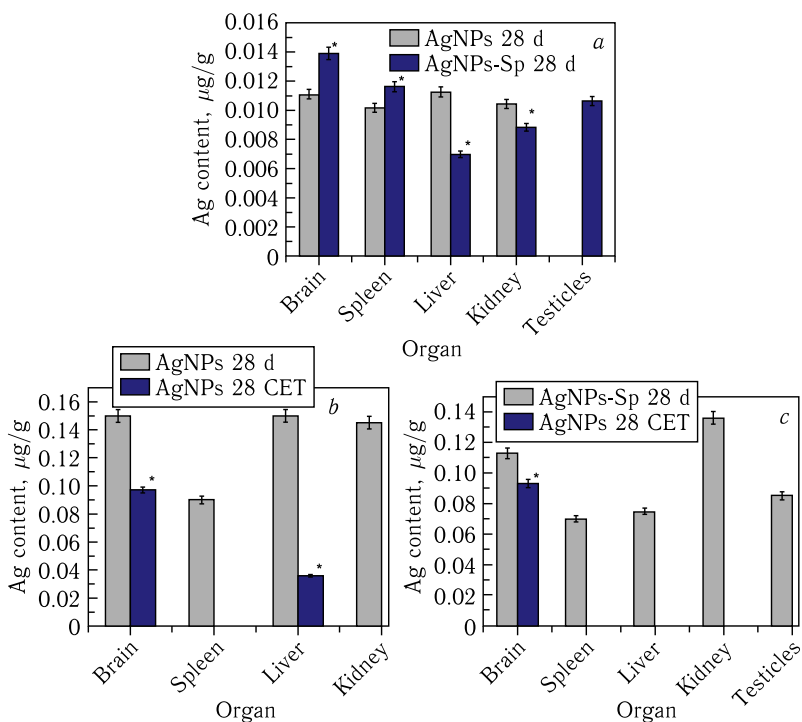


Decay chains and the properties of nuclei produced in the complete fusion reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$

emission were also determined. Optimization of the parameters of optical potentials for the  $^{56}\text{Fe}$  nucleus is carried out using the obtained data, as well as data on the differential cross sections for elastic and inelastic scattering.

- Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Kopatch Yu. N. et al. Inelastic Scattering of 14.1 MeV Neutrons on Iron // Eur. Phys. J. A. (IF: 2,345). 2021. V. 57, No. 6. P. 194; doi: 10.1140/epja/s10050-021-00503-x.

The effect of unmodified (AgNPs) and functionalized *Spirulina platensis* biomass (AgNPs-Spirulina) silver nanoparticles on rats during prolonged oral administration was studied. The content of silver in the different organs of rats was ascertained by using neutron activation analysis. In animals administrated with the



The content of silver in rats' organs: a) animals administrated with AgNPs and AgNPs-Spirulina for 28 days, measured immediately after the end of the experiment; b) animals administrated with AgNPs for 28 days with measurements after a clearance period; c) animals administrated with AgNPs-Spirulina for 28 days after a clearance period

unmodified nanoparticles, the highest content of silver was determined in the brain and kidneys, while in animals administrated with AgNPs-Spirulina, silver was mainly accumulated in the brain and testicles (figure on page 38). After the clearance period, silver was excreted rapidly from the spleen and kidneys; however, the excretion from the brain was very low, regardless of the type of nanoparticles.

Hematological and biochemical tests were performed in order to reveal the effect of nanoparticles on rats. The difference in the content of eosinophils in the experimental and control groups was statistically significant. The hematological indices of the rats did not change significantly under the action of the silver nanoparticles except for the content of reticulocytes and eosinophils, which increased significantly. Changes in the biochemical parameters did not exceed the limits of normal values. Silver nanoparticles with the sizes of 8–20 nm can penetrate the blood–brain barrier, and their persistence after a period of clearance indicated the irreversibility of this process.

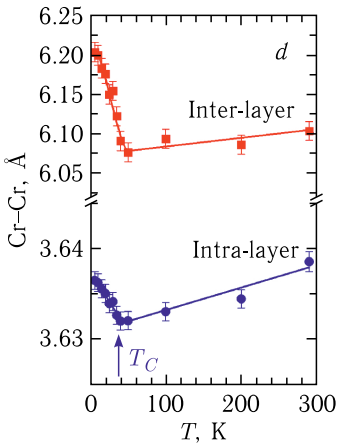
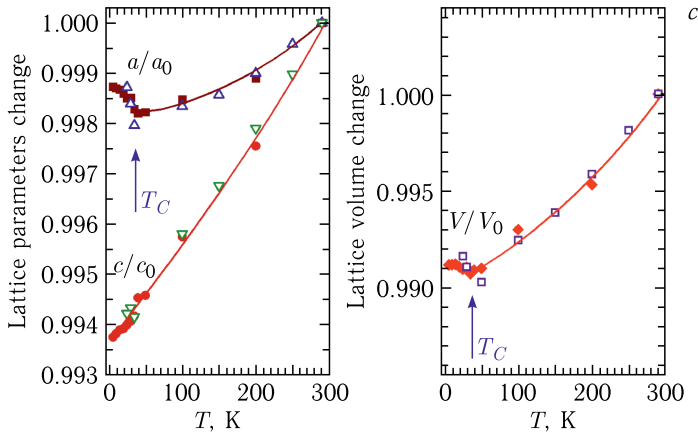
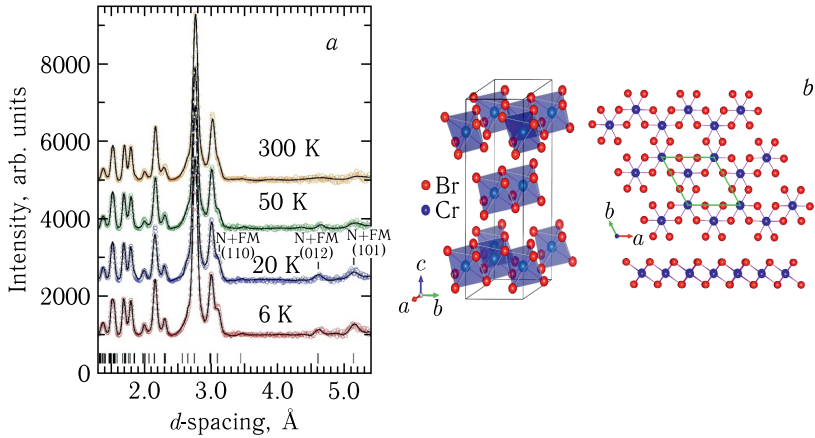
- Rudi L., Zinicovscaia I., Cepoi L., Chiriac T., Peshkova A., Cepoi A., Grozdov D. Accumulation and Effect of Silver Nanoparticles Functionalized with *Spirulina platensis* on Rats // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 2992; <https://doi.org/10.3390/nano11112992>.

### Condensed Matter Physics

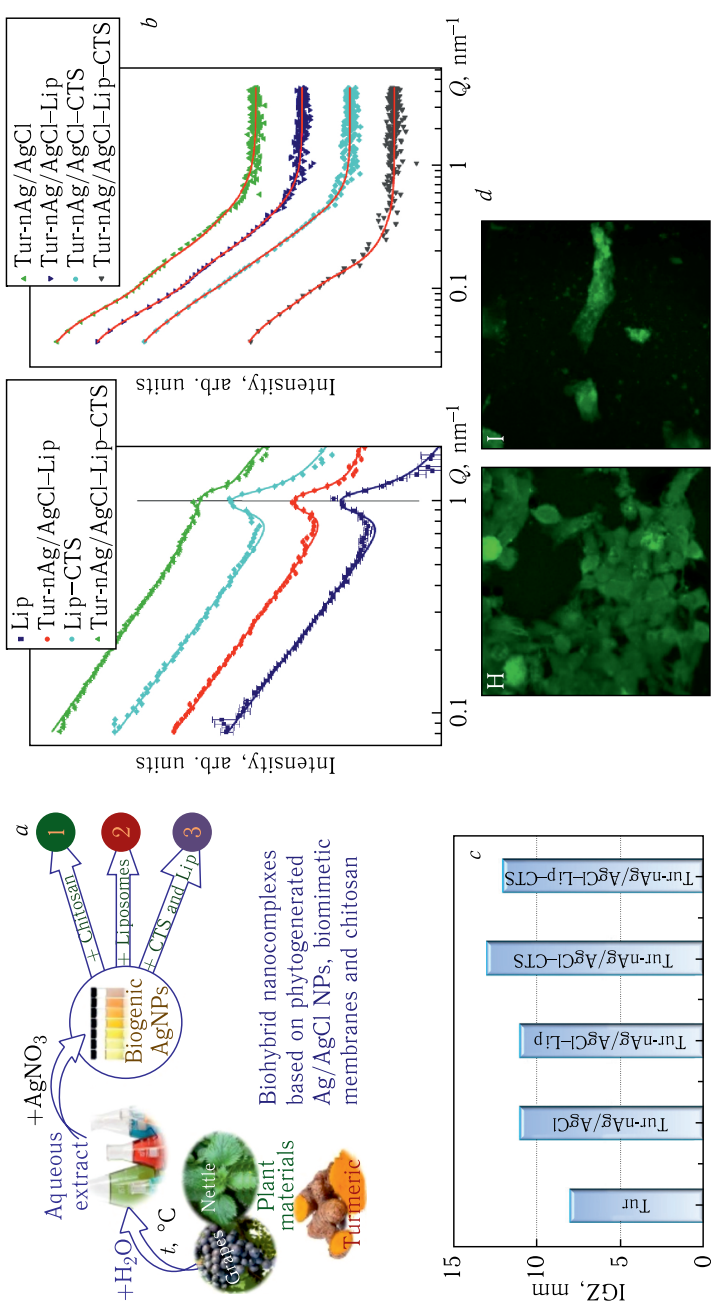
The structural, magnetic and vibrational properties of a model representative of the  $\text{CrX}_3$  materials family  $\text{CrBr}_3$  were studied by means of neutron diffraction and Raman spectroscopy methods. The magnetic moments of Cr ions forming graphene-like magnetic lattice in the Br–Cr–Br layers were found to order ferromagnetically below Curie temperature  $T_C = 37$  K. In the vicinity of  $T_C$  an anomalous behaviour of structural parameters was evidenced (figure on page 40). Below  $T_C$  the character of the lattice volume and van der Waals layers thermal expansion was changed from positive to negative. In the vicinity of  $T_C$  pronounced spin-phonon coupling effects were observed, resulting in substantial increase of the vibrational modes frequencies.

- Kozlenko D. P., Lis O. N., Kichanov S. E., Lukin E. V., Belozero-va N. M., Savenko B. N. Spin Induced Negative Thermal Expansion and Spin-Phonon Coupling in Van der Waals Material  $\text{CrBr}_3$  // *Quantum Materials*. 2021. V. 6. P. 19.





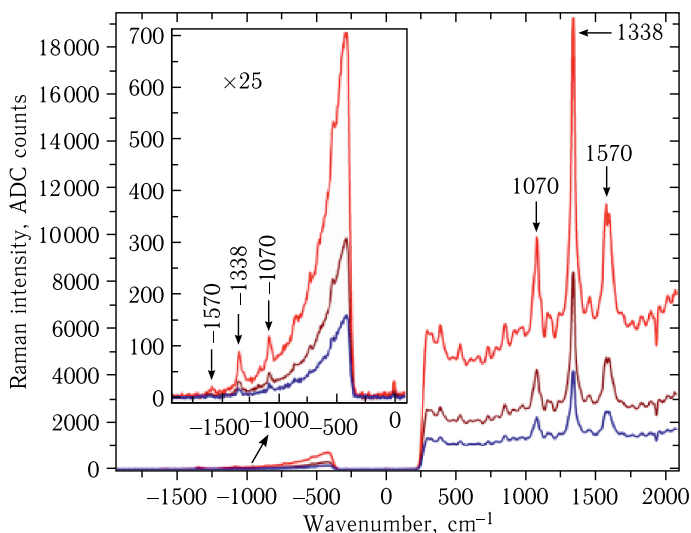
a) Neutron diffraction patterns of  $\text{CrBr}_3$ , measured at selected temperatures and calculated profiles. b) Rhombohedral crystal structure of  $\text{CrBr}_3$  with  $R\bar{3}$  symmetry. c) Temperature dependences of lattice parameters and unit cell volume of  $\text{CrBr}_3$ , normalized to corresponding values at ambient temperature. d) Temperature dependences of interatomic distances between magnetic Cr ions within the van der Waals layers (intra-layer) and between (inter-layer)



a) Formation mechanism of biohybrid nanocomplexes. b) Small angle neutron (left) and X-ray (right) scattering curves from the studied nanocomplexes samples. c) Biocyclic properties of the nanocomplexes against *Enterococcus faecalis* bacteria. d) Morphological properties of the studied nanocomplexes obtained by scanning electron microscopy in epifluorescence mode

Within the framework of development of novel highly efficient biohybrid complexes with a wide application potential in different areas of medicine, a study of structural and antimicrobial properties of novel nanocomplexes, consisting of liposomes of soya lecithin, chitosan and Ag/AgCl nanoparticles (NP) obtained by green synthesis procedure, was performed (figure on page 41). The morphological and structural methods confirmed the nanoscale size of obtained biocomposites components. A presence of hybrid Ag/AgCl nanoparticles synthesized from curcuma rhizome and/or grape and mint leaves was determined by X-ray diffraction and energy dispersive X-ray spectroscopy. The obtained nanocomplexes have substantial antitumoral activity, confirmed by *in vitro* experiments with the HT-29 и HepG2 cells.

- *Barbinta-Patrascu M.-E., Gorshkova Y., Ungureanu C., Badea N., Bokuchava G., Lazea-Stoyanova A., Bacalum M., Zhigunov A., Petrovič S.* Characterization and Antitumoral Activity of Biohybrids Based on Turmeric and Silver/Silver Chloride Nanoparticles // *Materials*. 2021. V. 14. P. 4726.
- *Gorshkova Y., Barbinta-Patrascu M.-E., Bokuchava G., Badea N., Ungureanu C., Lazea-Stoyanova A., Răileanu M., Bacalum M., Turchenko V., Zhigunov A. et al.* Biological Performances of Plasmonic Biohybrids Based on Phyto-Silver/Silver Chloride Nanoparticles // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 1811.



Anti-Stokes and Stokes SERS spectra of TNB/AgP/por-Si in a certain spatial point at excitation intensities 25, 51, and 105 μW/μm<sup>2</sup>

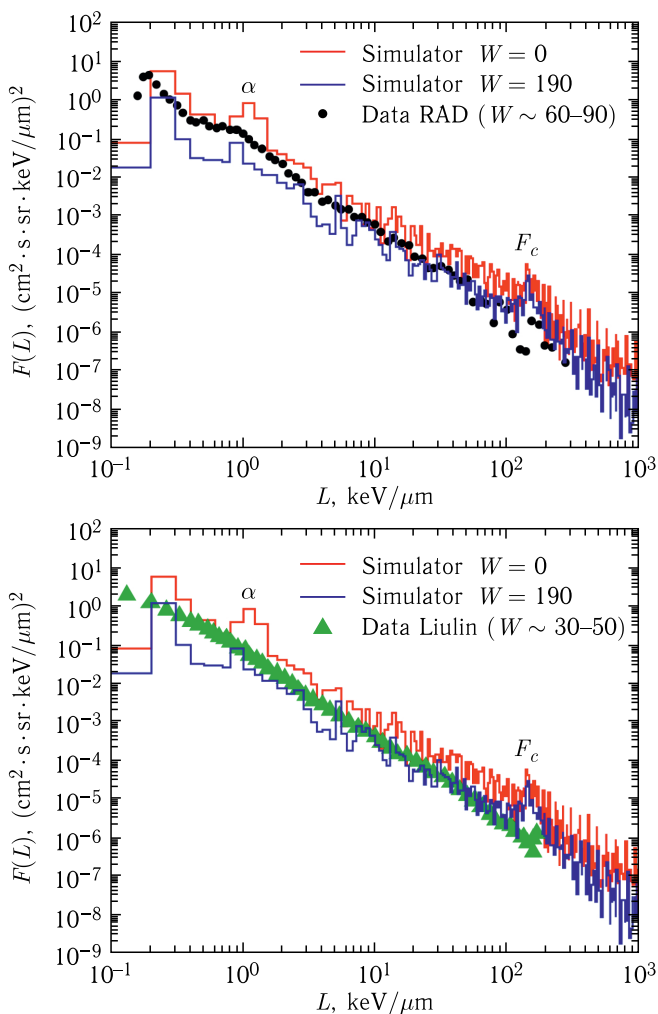
In this study it was experimentally shown that at 785 nm CW excitation laser intensities in the range of 3–105  $\mu\text{W}/\mu\text{m}^2$  Raman spectra of TNB reporter molecules at the randomly nanostructured SERS-active AgPs/por-Si surface are reproducible (figure on page 42). This provides possibility to measure the excitation intensity dependence of the simultaneously recorded anti-Stokes and Stokes line strengths. The analysis of the anti-Stokes-to-Stokes line strength ratios as a function of the excitation intensity allows one to specify and estimate the contributions to these ratios of (i) the plasmonic local electromagnetic field enhancement factor spectral profile, (ii) laser heating of TNB/AgP conjugates, and (iii) local field enhanced optical Raman pumping of the TNB vibrational states.

- *Arzumanyan G.M., Mamatkulov K.Z., Vorobyeva M.Y. et al.* Plasmon Resonance, Thermal, and Optical Contributions to Anti-Stokes-to-Stokes Line Strength Ratios in Continuous Wave-Excited Surface-Enhanced Raman Scattering Spectra of Molecules at Random Ag Surface // *J. Raman Spectroscopy*. 2021. V. 52. P. 1515–1528; doi.org/10.1002/jrs.6190.

## **RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH**

A series of studies has been performed aimed at the assessment of the radiation risk to cosmonauts during interplanetary flights and development of experimental space radiobiology methods. Detailed calculations of the spectra of all radiation field components associated with galactic cosmic rays (GCR) inside the inhabited module of the spacecraft have been performed for minimum and maximum solar activity. The calculations were verified with the only available experimental data from the RAD and Liulin-MO instruments (figure on page 44), which showed good agreement between the calculations and experiment. The corrected fluence-to-effective dose conversion factors have been calculated for all components of the radiation field inside the spacecraft.

- *Timoshenko G.N., Gordeev I.S.* Simulation of Radiation Field inside Interplanetary Spacecraft // *J. Astrophys. Astron.* 2020. V. 41, No. 5; doi: 10.1007/s12036-020-9620-3.
- *Timoshenko G.N., Gordeev I.S.* Computation of Linear Energy Transfer of Space Radiation in Biological Tissue Analog // *Planet. Space Sci.* 2021. V. 199. P. 105190.



A comparison of the calculated LET spectra and data from RAD and Liulin-MO

- *Timoshenko G.N., Belvedersky M.I.* Fluence-to-Effective Dose Conversion Coefficients for Male Astronauts // J. Radiol. Prot. 2019. V. 39, No. 2. P. 511–521.

With the aim of developing experimental ground-based methods to evaluate the radiation risk during space flights, a unique version has been proposed of a simulator of the radiation field inside the habitable module of a spacecraft in deep space (Figs. 1 and 2). Such

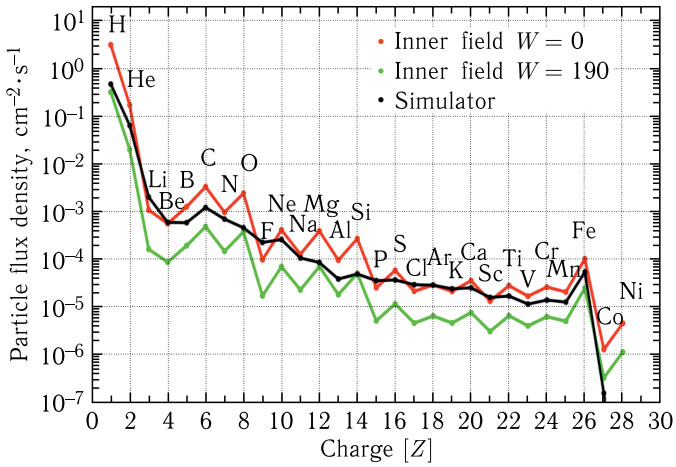


Fig. 1. Comparison of the charged distribution of particles behind the simulator and in the internal radiation field of the spacecraft habitable module at the minimum and maximum solar activity

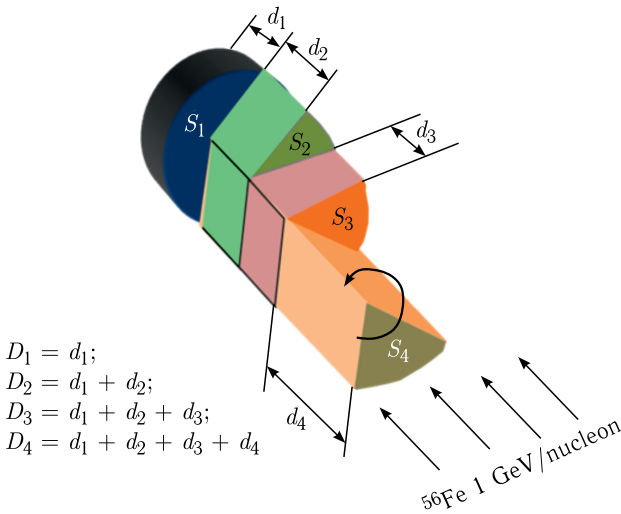


Fig. 2. Schematic view of a simulator converter with four fixed thicknesses.  $D$  – target thickness,  $S$  – target area

a simulator would produce the correct ratio of all components of the spacecraft's internal field averaged over solar activity. The space radiation simulator is going to be installed on a 1 GeV/nucleon <sup>56</sup>Fe nuclei beam at the radiobiological channel of the Nuclotron, which

is being created as part of the programme of applied innovative research at the NICA complex.

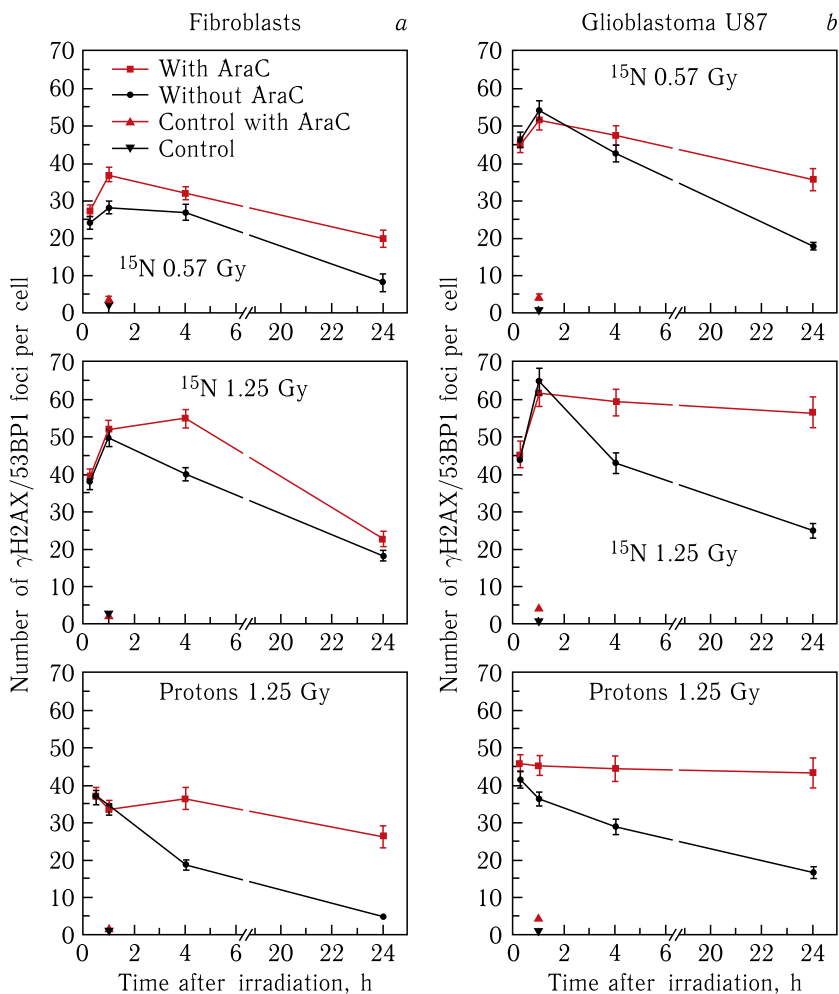
- *Gordeev I. S., Timoshenko G. N.* A New Type of Ground-Based Simulator of Radiation Field inside a Spacecraft in Deep Space // *Life Sci. Space Res.* 2021. V. 30. P. 66–71.

Research has been continued on the modifying effect of the DNA synthesis inhibitor cytosine arabinoside (AraC) on the formation of double-strand breaks (DSB) in normal (fibroblasts) and tumor (U87 glioblastoma) human cells after exposure to Bragg peak protons and accelerated nitrogen ions. It has been found that in the presence of the inhibitor, DNA DSB repair effectiveness is decreased both in normal and in tumor human cells after exposure to accelerated nitrogen ions (figures *a* and *b*, respectively, on page 47). The most pronounced modifying effect of AraC is observed for accelerated protons.

- *Shamina D. D., Boreyko A. V., Zadneprianetc M. G., Hramco T. S., Krupnova M. E., Kulikova E. A., Pavlova A. S., Smirnova E. V., Filatova A. S.* The Complexity of Clustered DNA DSBs in Human Fibroblasts under the Action of Low- and High-LET Radiation // *AIP Conf. Proc.* 2021. V. 2377. Art. No. 050005; doi: 10.1063/5.0063357. IF=0.40
- *Boreyko A. V., Zadneprianetc M. G., Krasavin E. A., Kulikova E. A., Smirnova E. V., Timoshenko G. N., Hramco T. S.* A Study of the Mechanisms of Molecular Damage Formation in Genetic Structures of Mammalian and Human Cells after Exposure to Low- and Intermediate-Energy Accelerated Heavy Ions // 8th Congress on Radiation Research. Moscow, Oct. 12–15, 2021: Book of Abstracts. Dubna: JINR, 2021. P. 245 (in Russian).

In September 2021, the group of JINR researchers performed Stage II of the experiment at the Baksan Neutrino Observatory (INR of RAS) on the study of ultradeep microbial communities inhabiting the extreme environment near the Elbrus magma chamber. Water, soil and inorganic sediments were sampled in an underground hot spring at a distance of 4200 m away from the cross-passage entrance.

Studies have been carried out to study the effect of low radiation background on model biological objects. For the first time, all *D. melanogaster* genes that changed their expression in



Formation and elimination kinetics of radiation-induced  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  foci in human fibroblasts (a) and tumor cells (b) after exposure to accelerated nitrogen ions and protons in the presence of the modifier (red) and without it (black)

conditions of low-background laboratory were identified using RNA sequencing. Analysis of the data indicates that there is no effect of a decrease in the radiation background on a complex model organism. This result raises the question of revising the linear non-threshold model in the low-dose region.

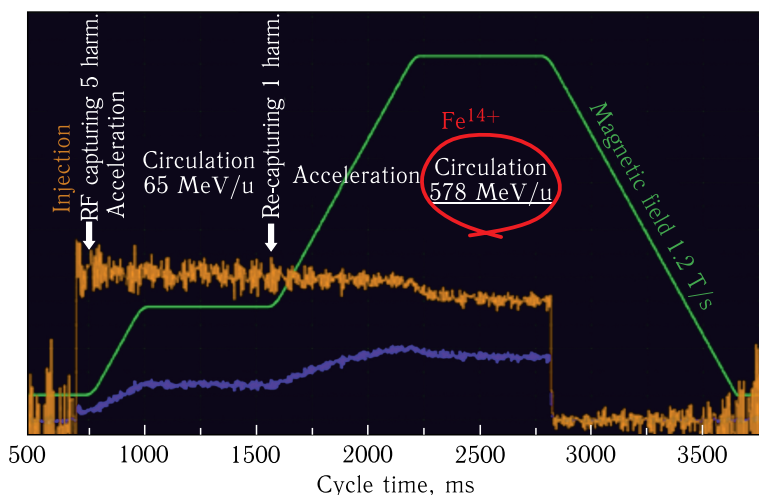


- Zarubin M. et al. First Transcriptome Profiling of *D. melanogaster* after Development in a Deep Underground Low Radiation Background Laboratory. <https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0255066>.

## ACCELERATOR TOPICS

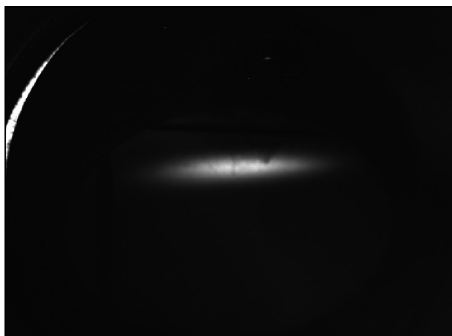
The systems of the Booster synchrotron — one of the key units of the heavy-ion accelerator complex NICA — were brought to the design parameters in September 2021. During the run, for the first time the iron ion beam in the Booster ring was accelerated to the design energy of 578 MeV/nucleon. The equipment of the Booster electron cooling system was also completely launched and, for the first time in Russia, the electron cooling of the heavy-ion beam was obtained. The beam cooling experiment was performed with  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ions circulating at the injection energy of 3.2 MeV/nucleon.

The significant outcome of the run was the successful completion of joint work between specialists from JINR and the INR SB RAS on constructing the systems of extracting the beam from the Booster and the beam transport channel to the Nuclotron. The tuning of the channel magnet system and the testing of the equipment control system were finished. After that, a unique pulsed magnetic kicker for extracting the beam from the Booster was successfully launched with a record level of the magnetic



A signal from the beam current sensor in the Booster

A beam of  $^{56}\text{Fe}^{14+}$  ions on the phosphor screen at the end section of the Booster–Nuclotron transport channel



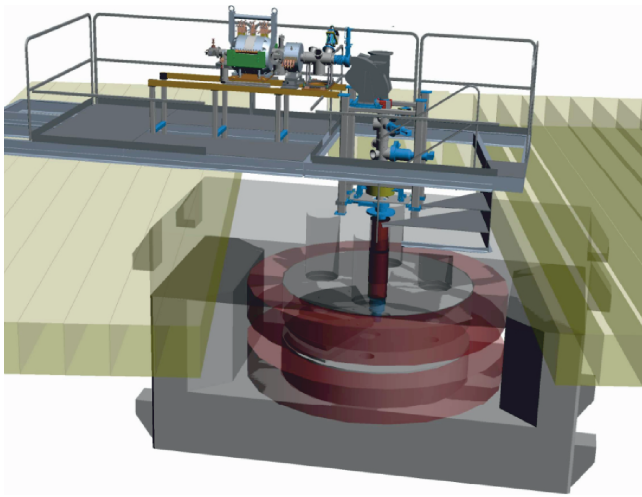
field of 2 kG. A group of specialists launched a system of local displacement of the closed orbit to ensure the fast extraction of the beam from the Booster. The extraction of two types of ions — helium and iron — was obtained at an energy of 240 MeV/nucleon with their further transportation through the channel. At the final section of the channel, beam current and position sensors detected beams. The screenshots of the beam profiles were obtained from the phosphor screen.

The installation of a new system of injection of a beam into the Nuclotron and the construction of a chain of magnets for the acceleration of heavy ions, which will be the basis for operating the NICA collider and the BM@N facility, were completed. In January 2022, the first run with a full acceleration cycle is scheduled at the NICA complex.

- *Butenko A., Khodzhibagiyan H., Kostromin S., Meshkov I., Sidorin A., Syresin E., Trubnikov G., Tuzikov A.* The NICA Complex Injection Facility // Proc. of the 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia. JACoW Publ.; doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOY01.

An installation for the production of a hollow cable of high-temperature superconductor was developed, manufactured and commissioned. A model fast cycling quadrupole magnet for modernization of the superconducting synchrotron Nuclotron was manufactured from this cable and successfully tested at 25 K.

- *Khodzhibagiyan H., Kekelidze V., Merkuriev A., Nikiforov D., Novikov M., Kuznetsov G., Trubnikov G.* Quadrupole Superconducting Model Magnet for Upgrade of the Nuclotron Synchrotron. Presented at the 27th Intern. Conf. on Magnet Technology MT27, Fukuoka, Nov. 15–19, 2021.



Three-dimensional model of the DC-140 accelerator

Under the project of the Innovative Centre for Nuclear Research at JINR, an accelerator complex DC-140 is created for studies in the field of radiation materials science and track membranes. The installation of the accelerator components were continued into 2021. The allocation of the accelerator systems in the experimental hall has begun. The start-up is planned for the end of 2023.

- *Lisov V. et al.* // Proc. of the 12th Intern. Particle Acc. Conf. P. 1845–1851.
- *Kazarinov N. et al.* Ibid. P. 1852–1854; [https:// accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/proceed.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/proceed.pdf).

Design work has begun on the creation of a specialized superconducting proton cyclotron MSC-230 with a proton beam energy up to 230 MeV and a current up to  $10 \mu\text{A}$ , which will ensure the use of the most modern methods of proton therapy, including the so-called “pencil” beam and flash therapy.

- *Karamyshev O. et al.* Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // Proc. of the 10th Intern. Particle Acc. Conf., IPAC 2019. TUPTS059.
- *Karamyshev O. et al.* Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy. JINR Preprint E9-2019-2. Dubna, 2019.

## INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

A heterogeneous computing environment, based on the DIRAC platform, was created for processing and storing data of the MPD experiment within the NICA megaproject. Owing to DIRAC, the computing resources and the hierarchical hyper-converged data processing and storage system of the “Govorun” supercomputer were included in the created environment. The “Govorun” supercomputer plays a key role in the environment and, due to the flexibility of the architecture, it enables to test in practice the latest software and hardware solutions in the field of computing and data processing.

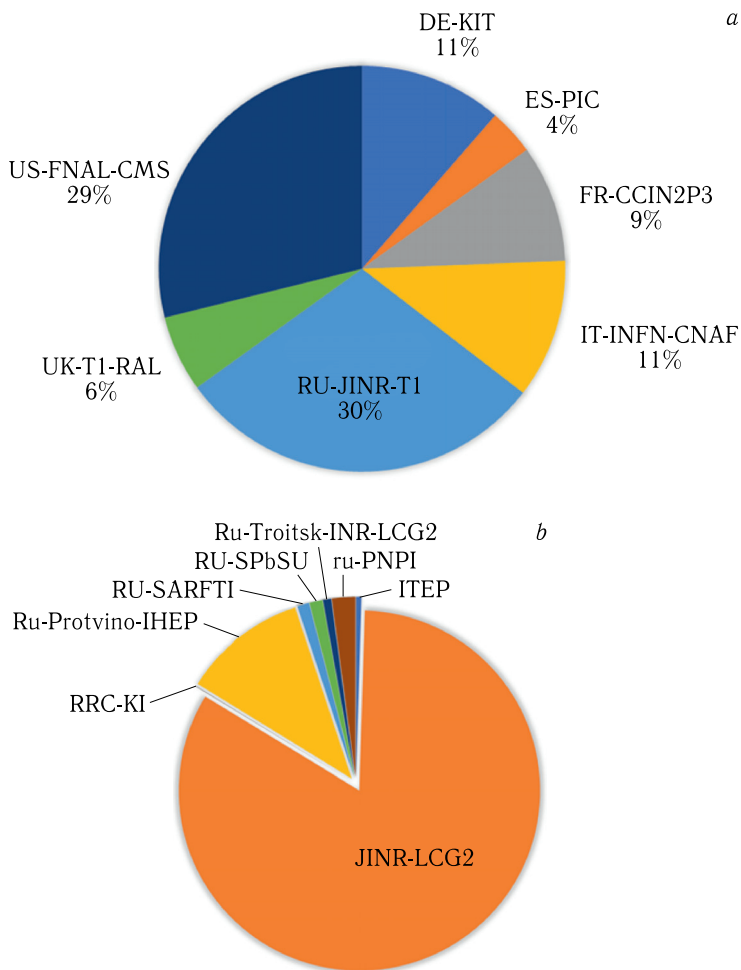
- *Moshkin A. A., Pelevanyuk I. S., Podgainy D. V., Rogachevsky O. V., Streltsova O. I., Zuev M. I.* Approaches, Services, and Monitoring in a Distributed Heterogeneous Computing Environment for the MPD Experiment // Russian Supercomputing Days: Proc. of the Intern. Conf. 2021. P. 4–11.

Studies in the field of working with Big Data are carried out on the “Govorun” supercomputer using the novel technology DAOS (Distributed Asynchronous Object Storage). For this purpose, a DAOS polygon was deployed on the “Govorun” supercomputer; it ranked 16th in the “10 node challenge” nomination in the current edition of the IO500 list. Great prospects for the use of this technology are related to the NICA megaproject at all stages of the accelerator operation — from experimental data acquisition to final physical analysis.

- *Kudryavtsev A. O., Podgainy D. V., Moskovsky A. A.* On-Demand DAOS Storage for Data Processing and Analysis in High Energy Physics: A Case of LIT JINR Data and Compute Infrastructure // ISC High Performance 2021; <https://www.isc-hpc.com/>.
- *Moskovsky A. A., Brekhov A. T., Podgainy D. V., Kudryavtsev A. O.* Hyperconverged Storage for High Performance Data Analysis in High Energy Physics: A Case of Intel DAOS Deployment // Sixth Intern. Parallel Data Systems Workshop, 15 Nov. 2021; <https://sc21.supercomputing.org/session/?sess=sess332>.
- *Val'a M., Podgainy D., Lavrenko P., Brekhov A.* High Energy Physics Experiment Data Processing with DAOS in Multi-Tier Storage Environment Based on RSC Storage On-Demand // The 5th Annual DAOS User Group Meeting, 19 Nov. 2021; <https://daosio.atlassian.net/wiki/spaces/DC/pages/11015454821/DUG21>.

In 2021, in terms of performance, JINR Tier1 ranked first in the world among Tier1 centres for the CMS experiment. The JINR Tier1 resource centre is used for processing and storing data of the CMS experiment (CERN), as well as for modeling data within the NICA project.

The JINR Tier2 site (JINR-LCG2) is the most productive in the Russian consortium RDIG (Russian Data Intensive Grid) and ranks



Distribution by the normalized CPU load time in HS06 hours within 2021 for (a) Tier1 sites for the CMS experiment and (b) Tier2 sites being part of the RDIG consortium

17th among 124 WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) Tier2 sites. The Tier2 resources are used by all experiments at NICA and the LHC, ILC, Biomed, NOvA, as well as by JINR local users.

- *Baginyan A. et al.* Current Status of the MICC: An Overview // CEUR Workshop Proc. (in press).

The spectrum of vibrational-rotational bound, metastable states and scattering states of the beryllium dimer in the ground  $X_1\Sigma_g^+$  state was calculated. The problem was solved using potential curves and the authors' software package KANTBP 5M, which implements Newton's method and the high-accuracy finite element method. The spectrum of rotational-vibrational metastable states of the beryllium dimer with complex energy eigenvalues, as well as the spectrum of vibrational-rotational bound states, which is in good agreement with the results of other authors, was obtained for the first time.

- *Derbov V. L. et al.* Spectrum of the Beryllium Dimer in the Ground  $X_1\Sigma_g^+$  State // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 262. P. 107529.

## EDUCATIONAL ACTIVITIES

In 2021, 136 students and postgraduates from Azerbaijan, Belarus, Bosnia and Herzegovina, Botswana, Bulgaria, Cuba, Czech Republic, Egypt, Greece, India, Indonesia, Italy, Japan, Mexico, Mongolia, Poland, Romania, Russia, Serbia, Spain, South Africa, Turkey, Ukraine, and Uzbekistan took part in the three Waves of the JINR UC online programme for undergraduate and postgraduate students of scientific and technical specialties INTEREST – ITeRnational REmote Student Training at JINR. Since its launch, INTEREST has been attended by 180 representatives of 29 countries of the world. The programme allows its participants to get acquainted with the main areas of research conducted at the Institute and to find a thesis supervisor. It also increases the chances to get selected for full-time offline internships in the laboratories of the Institute. Each Wave of the programme lasts for 4–6 weeks dedicated to remote work on the projects developed by JINR specialists, as well as to lectures and excursions in online mode.

JINR UC took part in the organization and running of the following events: All-Russian Festival “NAUKA 0+”;

Festival of Science and Technology “Geek Picnic”; Festival “TEKHNOSREDA”; National Marathon “Science Is Near”; 4th workshop project “Museum Connections” on the topic “Mediation: The Practice of Interaction with the Visitor, Scientific Communication”. For school students the following events were held: 33rd International Computer School; Science School for Students of the School University of the Egyptian Academy of Scientific Research and Technology (ASRT); Marathon “JINR in Dubna Schools” held within the framework of the 65th anniversary of JINR and the Year of Science and Technology; online participation in the STEAM FEST New Knowledge Festival; online streaming of lectures by JINR scientists at the Sirius Educational Center (Sochi); online lectures for the Bolshaya Peremena project; UC Lectorium for school students “S’COOL Science” and participation in the Virtual Science Camp. A two-year training of school students at Yandex.Lyceum came to its end and new students were enrolled. Introduction tours of JINR were organized for the participants of the educational forum on physics held at MIPT as part of the All-Russian Student Olympiad “I Am a Professional”, for the participants of the project “Hello, Russia!”, and for students of the British International School.

**GENERAL DATA  
ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS  
BY JINR STAFF MEMBERS  
(from 17.12.2020 to 13.12.2021)**

• Books — 10:

*Blokhintsev D. I.* Acoustics of Inhomogeneous Moving Media / Preface.: G. P. Svishchev. — 3rd ed. — M.: URSS, 2021. — 206 p.: ill. — Bibliogr.: p. 202–203.

*Isaev A. P., Rubakov V. A.* Theory of Groups and Symmetries. Book 2. Representations of Groups and Lie Algebras. Applications. — M.: URSS, 2020. — 693 p.: ill. — (MSU classical textbook). — Bibliogr.: p. 681–687.

*Isaev P. S.* Ordinary, Strange, Fascinating, Beautiful...: On the History of the Development of Theoretical Ideas in Elementary Particle Physics. — M.: URSS, 2021. — 315 p.: ill. — (Science to All! Masterpieces of Popular Science Literature. (Physics); No. 105). — Bibliogr.: p. 314.

*Kuznetsov A. A.* Discovery of Antisigma-Minus-Hyperon. — Dubna: JINR, 2020. — 16 p.: ill. — (Library of the weekly of the Joint Institute for Nuclear Research “Dubna: Science, Cooperation, Progress”).

*Malakhov A. I.* Relativistic Nuclear Physics: Study guide. — Dubna: JINR, 2021. — 181 p.: ill. — (Study guides of the JINR University Centre. UC; 2020-61). — Bibliogr.: p. 175–177.

*Oganessian Yu. Ts., Peniozhkevich Yu. E., Grigoriev V. A.* Heavy-Ion Physics and Its Applications: Study guide. — Dubna: JINR, 2021. — 363 p.: ill. — (Study guides of the JINR University Centre. UC; 2019-60). — Bibliogr.: p. 362–363.

*Peniozhkevich Yu. Eh., Molchanov E. M.* Exotic People and Nuclei. EXON: 30 Years of History. — Dubna: JINR, 2020. — 144, [2] p.: col. ill. — (JINR; 2020-8).

*Pose R. G.* German Scientists and Specialists in the Soviet Atomic Project: Documents, Comments, Memoirs. — M., 2021. — 279 p.: ill. — Bibliogr.: p. 267–279.

*Tyapkin A. A.* “Through the Iron Curtain”: History of International Scientific Cooperation. — Dubna: JINR, 2020. — 28 p.: ill. — (Library of the weekly of the Joint Institute for Nuclear Research “Dubna: Science, Cooperation, Progress”).

*Shvidkij S.* All in Good Time. — Dubna: JINR, 2021. — 124 p.

- Journal papers — 1339
- Publications in Proceedings — 271
- Preprints — 29
- Abstracts of theses — 23
- Total: 1672



Дизайн обложки *И. Ю. Щербаковой*

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

Подписано в печать 8.02.2022.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,89. Тираж 170 экз. Заказ № 60351.

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/)

