



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2018-1

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2017 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2017  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна 2018



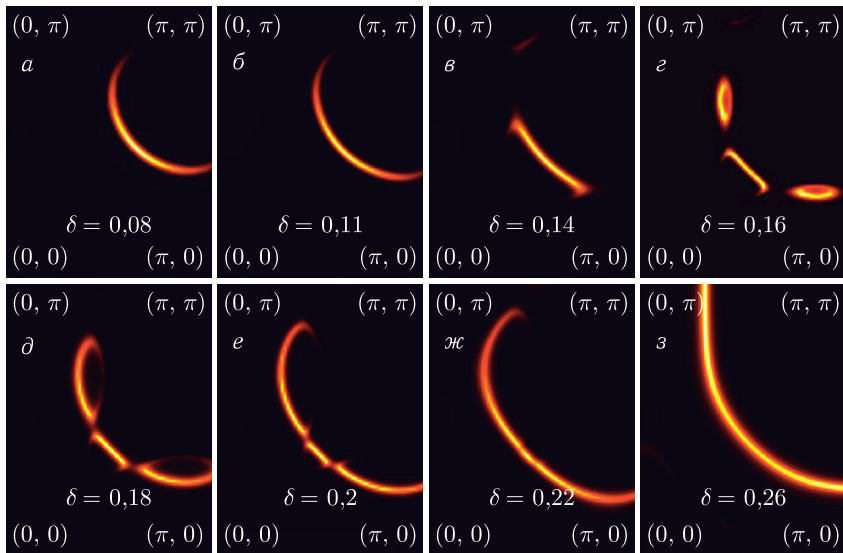
## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Сечения образования самых тяжелых неизвестных изотопов  $^{283,284}\text{Rg}$ ,  $^{287-290}\text{Nh}$ ,  $^{291-294}\text{Mc}$ ,  $^{294}\text{Lv}$  и  $^{295-297}\text{Ts}$  были впервые вычислены в  $pxn$ -испарительных каналах реакций горячего слияния, а  $^{286,287}\text{Cn}$ ,  $^{290,291}\text{Fl}$ ,  $^{291,292}\text{Mc}$  и  $^{294}\text{Lv}$  — в  $\alpha xn$ -каналах. Показано, что использование каналов испарения заряженных частиц позволяет увеличить массовое число самых тяжелых изотопов ядер с  $Z = 111-117$  на несколько единиц. Каналы испарения протонов более эффективны для достижения  $N = 184$ , чем каналы  $\alpha$ -эмиссии. Испарительные каналы  $pxn$  и  $\alpha xn$  позволяют получить те изотопы, которые недоступны в  $xn$ -каналах из-за отсутствия подходящих комбинаций сталкивающихся ядер. В асимметричных реакциях горячего синтеза с радиоактивными ядрами оценены сечения образования новых изотопов  $^{261,263,264}\text{No}$ ,  $^{263-265}\text{Lr}$ ,  $^{263,264,266,268}\text{Rf}$ ,  $^{264,265,269}\text{Db}$  и  $^{267,268,270,272}\text{Sg}$  в  $\alpha xn$ - и  $xn$ -испарительных каналах. Показано, что в каналах испарения заряженных частиц можно получить неизвестные изотопы с сечениями около  $0,1-300$  нб.

- *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V.* Ways to Produce New Superheavy Isotopes with  $Z = 111-117$  in Charged Particle Evaporation Channels // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 764. P. 42-48.
- *Hong J., Adamian G. G., Antonenko N. V.* Possibilities of Production of Transfermium Nuclei in Complete Fusion Reactions with Radioactive Beams // *Phys. Rev. C.* 2017. V. 96. P. 014609.

Показано, что необычное поведение поверхности Ферми в высокотемпературно-сверхпроводящих купратах может быть объяснено в рамках микроскопической  $t$ - $J$ -модели. Оно вызвано сильными электронными корреляциями, приводящими к возникновению волн зарядовой плотности. Таким образом, впервые в рамках микроскопической модели получено объяснение экспериментальных данных по реконструкции поверхности Ферми в допированных купратах.

- *Ivantsov I., Ferraz A., Kochetov E.* Itinerant-Localized Model of Strongly Correlated Electrons: Fermi-Surface Reconstruction // *Phys. Rev. B.* 2017. V. 96. P. 195161.



Спектральные функции на уровне Ферми в первом квадрате зоны Бриллюэна, вычисленные для различных уровней допирования  $\delta$ . Показана возникающая реконструкция поверхности Ферми, согласующаяся с экспериментом: псевдощелевая фаза ( $a-\delta$ )  $\leftrightarrow$  волна зарядовой плотности ( $г-e$ )  $\leftrightarrow$  псевдощелевая фаза ( $ж$ )  $\leftrightarrow$  ферми-жидкость ( $з$ )

Представлена общая теория вращающихся частиц с электрическими и магнитными дипольными моментами, движущимися в произвольных электромагнитных, инерциальных и гравитационных полях. Исследована как квантово-механическая, так и классическая динамика. Полное согласие между квантовой механикой и классической теорией доказано в общем случае. В качестве приложения полученных результатов изучается динамика вращающейся частицы в гравитационной волне и анализируются перспективы использования установки магнитного резонанса для регистрации гравитационной волны за счет ее влияния на спиновую динамику (см. рисунок на с. 5).

- *Obukhov Yu. N., Silenko A. J., Teryaev O. V.* General Treatment of Quantum and Classical Spinning Particles in External Fields // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 105005.

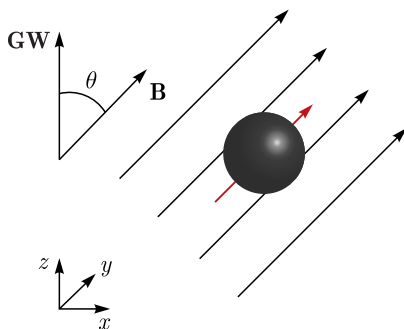


Схема усиления действия плоской гравитационной волны, стимулирующей переходы между спиновыми состояниями постоянным магнитным полем  $\mathbf{B}$  в плоскости  $x-z$ , снимающим их вырождение

В рамках исследований интегрируемых систем с неполным набором первых интегралов было предложено понятие псевдоторической структуры на фазовом пространстве, в присутствии которой оказывается возможным обобщить методы геометрического квантования на случай такой не вполне интегрируемой системы. Кроме того, язык таких новых структур оказался очень удобным для описания известных примеров нестандартных лагранжевых подмногообразий в компактных фазовых пространствах, а также для построения лагранжевых слоений. Была частично решена задача существования таких структур на компактных фазовых пространствах, а также сформулирована дальнейшая программа исследований псевдоторических структур.

- *Тюрин Н. А.* Псевдоторические структуры: лагранжевы подмногообразия и лагранжевы слоения // *Успехи матем. наук.* 2017. Т. 72, вып. 3(435). С. 131–169.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### Физика частиц

Коллаборацией COMPASS (ЦЕРН) при активном участии физиков из ОИЯИ было выполнено первое измерение поперечной спин-зависимой азимутальной асимметрии в процессе Дрелла–Яна (DY) на пучке  $\pi$ -мезонов ускорителя SPS с энергией 190 ГэВ/с и поперечно-поляризованной водородной мишенью. Азимутальные асимметрии, дающие доступ к различным функциям распределения партонов (PDF), зависящим от поперечного импульса (TMD), были получены в процессах рождения мюонных пар с инвариантной массой в диапазоне от 4,3

до  $8,5 \text{ (ГэВ/с)}^2$ . Обнаружено, что извлеченные партонные распределения Сиверса имеют знак, противоположный знаку, полученному из данных в полуинклюзивном глубоконеупругом рассеянии (SIDIS), что согласуется с фундаментальным предсказанием КХД. Также получены данные по измерению распределений Бойера–Мулдерса и «pretzelocity».

- *COMPASS Collab.* First Measurement of Transverse-Spin-Dependent Azimuthal Asymmetries in the Drell–Yan Process // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 112002.

Коллаборация STAR (США) при активном участии группы из ОИЯИ сообщила о первом наблюдении эффекта коллективной поляризации  $\Lambda$ -гиперонов в столкновениях тяжелых ионов. Обнаружено, что направление поляризации  $\Lambda$ -гиперонов коррелирует с направлением углового момента системы на уровне нескольких процентов при нецентральных столкновениях с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7\text{--}32 \text{ ГэВ}$ .

Также установлено, что горячая система, возникающая в области средних быстрот, может рассматриваться как жидкость, и гидродинамические расчеты напрямую связывают поляризацию испущенных частиц с так называемой завихренностью (закручиванием потока) жидкости. С использованием этой связи была сделана оценка завихренности жидкости, созданной на RHIC, которая составляет порядка  $9 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1}$ , что на 14 порядков выше, чем у любой из ранее наблюдаемых жидкостей. Предыдущие результаты показали, что система на RHIC является самой горячей и наименее вязкой (относительно плотности энтропии) из когда-либо созданных. Новый результат добавляет еще один рекорд — столкновения на RHIC производят наиболее завихренную жидкость из всех известных.

- *STAR Collab.* // Nature. 2017. V. 548. P. 62.

В рамках работ по проекту создания на оз. Байкал глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD выполнен монтаж и запуск второго кластера детектора в составе восьми гирлянд глубоководных оптических модулей. Запущенная установка обладает эффективным объемом для поиска событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ.

- *Aurorin A.D. et al.* Status of the Baikal-GVD Experiment — 2017 // Proc. of the 35th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC-2017), July 10–20, Bexco, Busan, Korea, 2017.



Монтаж гирлянды оптических модулей перед погружением в Байкал

В рамках проекта *Borexino* (Италия) опубликованы результаты анализа временных вариаций потока бериллиевых нейтрино. Период вариаций соответствует астрономическому году, при этом амплитуда и фаза вариаций находятся в согласии с ожидаемыми за счет эксцентриситета орбиты Земли. Полученное подгоночное значение периода  $T = (367 \pm 10)$  сут можно рассматривать как первое измерение длительности астрономического года с помощью солнечных нейтрино. Точность определения потока солнечных бериллиевых нейтрино улучшена до 3%, *pp*-нейтрино до 10% и *pep*-нейтрино до 17%. При этом надежность наблюдения сигнала от *pep*-нейтрино впервые превысила уровень  $5\sigma$ . Новые данные *Borexino* по солнечным нейтрино имеют лучшее, но статистически слабо значимое согласие с вариантом модели Солнца с высокой металличностью. Из анализа отклонения формы спектра электронов отдачи от предсказываемого Стандартной моделью получено лучшее на сегодня ограничение на эффективный магнитный момент солнечных нейтрино  $\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2,8 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (90% C.L.).

- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Seasonal Modulation of the  ${}^7\text{Be}$  Solar Neutrino Rate in Borexino // Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 21.*

- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Limiting Neutrino Magnetic Moments with Borexino Phase-II Solar Neutrino Data // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 091103(R).*

В эксперименте NEMO-3/SuperNEMO (Франция) завершена сборка первого модуля демонстратора SuperNEMO (официальная «инаугурация» состоялась 7 ноября 2017 г.). Набор данных планируется на начало 2018 г. Целью эксперимента является проверка технических возможностей и достижение чувствительности к  $0\nu\beta\beta$ -распаду около  $T(0\nu)_{1/2} > 5,9 \cdot 10^{24}$  лет с практически нулевым фоном. Получен первый в мире предел  $T(0\nu)_{1/2} > (1-3) \cdot 10^{21}$  лет на двойной бета-распад  $0\nu 4\beta$  в  $^{150}\text{Nd}$ .

- *Arnold R. et al. (NEMO-3 Collab.). Search for Neutrinoless Quadruple- $\beta$  Decay of  $^{150}\text{Nd}$  with the NEMO-3 Detector // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 041801.*
- *Arnold R. et al. Measurement of the Double-Beta Decay Half-Life and Search for the Neutrinoless Double-Beta Decay of  $^{116}\text{Cd}$  with the NEMO-3 Detector // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 012007.*

### **Релятивистская ядерная физика**

В эксперименте ALICE (ЦЕРН) группой ОИЯИ были получены новые результаты по 1- и 3-мерным фемтоскопическим корреляциям в анализе рождения каонных пар в Pb–Pb-столкновениях. Новые данные хорошо согласуются с теоретическими моделями и полученными ранее результатами.

- *Acharya S. et al. (ALICE Collab.). Kaon Femtoscopy in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. arXiv:1709.0173, 2017.*
- *Acharya S. et al. (ALICE Collab.). Measuring  $K_S^0 K^\pm$  Interactions Using Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Lett. B. 2017. V. 774. P. 64.*

### **Физика тяжелых ионов**

На ускорителе У-400М введен в эксплуатацию новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 для получения пучков радиоактивных ядер. Экспериментально подтверждены проектные параметры данной установки: интенсивности пучков, полученные в реакции фрагментации  $^{15}\text{Ne} + \text{Be}$ , в среднем в 25 раз превышают ранее достигнутые. Сепаратор является базовой установкой для изучения легких экзотических ядер вблизи границ нуклонной стабильности и позволит впервые выполнить поиск и исследо-





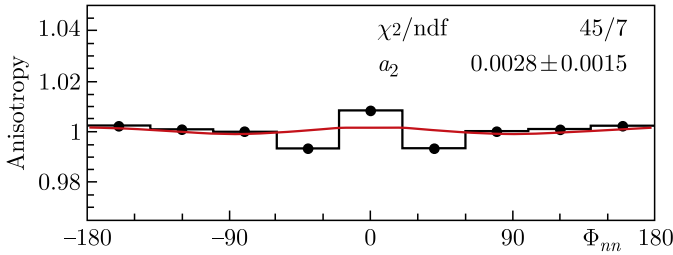
Фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2

вание экзотических ядерных систем, таких как  ${}^{5-7}\text{H}$ ,  ${}^{8-10}\text{He}$ ,  ${}^{24-26}\text{O}$  и др., а также новых видов радиоактивного распада.

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

### Нейтронная ядерная физика

Проведены измерения угловых корреляций вылета мгновенных нейтронов деления из спонтанного источника  ${}^{252}\text{Cf}$ . Были исследованы корреляции угла вылета нейтронов относительно оси деления, корреляции между парами нейтронов из одного события деления, а также тройные угловые корреляции нейтрон–нейтрон–осколок. Из анализа данных было установлено,



Зависимость анизотропии вылета мгновенных нейтронов деления от проекции угла между двумя нейтронами в плоскости, перпендикулярной оси деления

что полученные экспериментальные данные не противоречат предыдущим измерениям, указывающим на наличие «разрывных» нейтронов деления, а также на наличие угловой анизотропии вылета нейтронов в системе центра масс осколков.

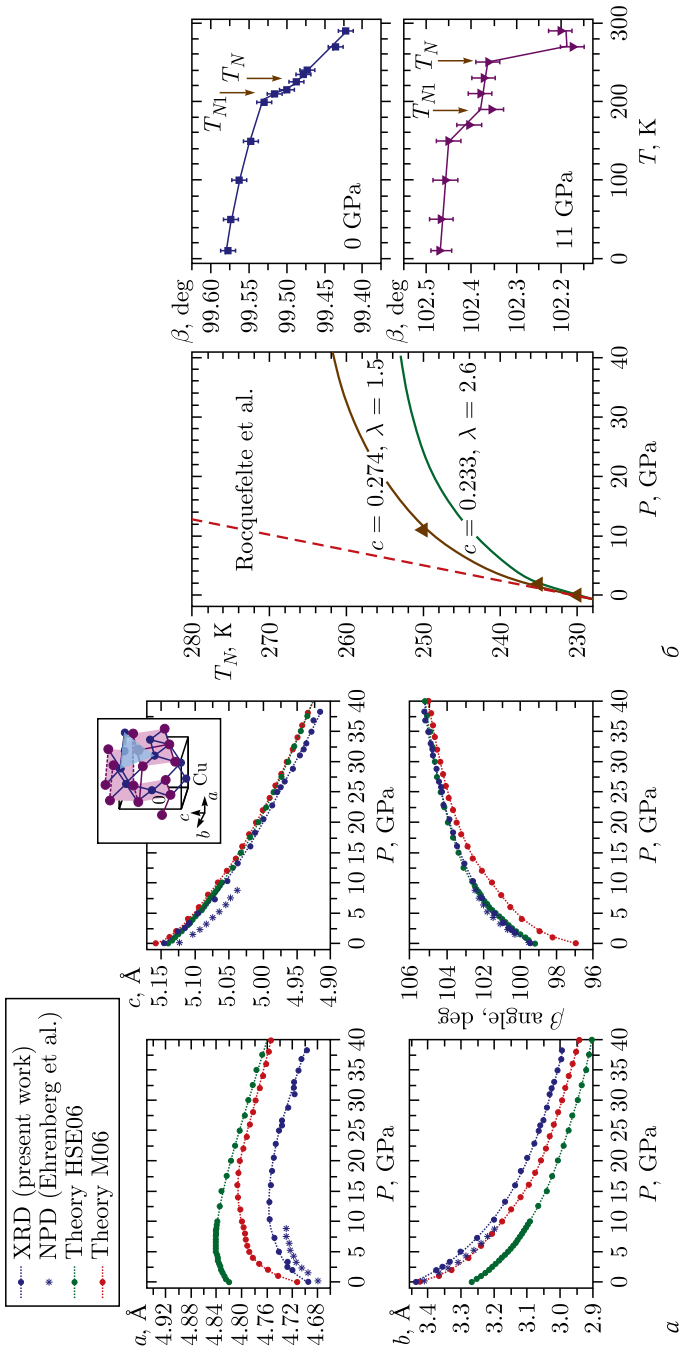
- *Kopatch Yu., Chietera A., Stuttgé L., Gönnerwein F., Mutterer M., Gagarski A., Guseva I., Dorvaux O., Hanappe F., Hambsch F.-J.* Angular Correlations in the Prompt Neutron Emission in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$  // EPJ Web Conf. 2017. V.146. P.04017.

Завершен анализ результатов измерений пространственно-нечетной асимметрии вылета  $\alpha$ -частиц в реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ , выполненных на пучках холодных поляризованных нейтронов реактора ВВР-М (Гатчина) и PF1В реактора ILL (Гренобль, Франция). Работы посвящены исследованию проявлений слабого взаимодействия в ядерных процессах. Получено значение  $\alpha_{\text{P-odd}}^{^{10}\text{B}, \alpha} = -(11,2 \pm 3,4) \cdot 10^{-8}$ . Ненулевой результат в реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  получен впервые в мире, и  $^{10}\text{B}$  является вторым легким ядром после  $^6\text{Li}$ , где наблюдался P-нечетный эффект.

- *Gledenov Yu. M., Nesvizhevsky V. V., Sedyshev P. V., Shul'gina E. V., Szalanski P., Vesna V. A.* First Observation of P-odd Asymmetry of  $\alpha$ -Particle Emission in the  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  Nuclear Reaction // Phys. Lett. B. 2017. V. 769. P. 111–116.

### Физика конденсированных сред

Оксид меди  $\text{CuO}$  является одним из наиболее структурно простых несобственных мультиферроиков, в котором спонтанная сегнетоэлектрическая поляризация возникает в промежуточной антиферромагнитной (АФМ) модулированной фазе в диапазоне



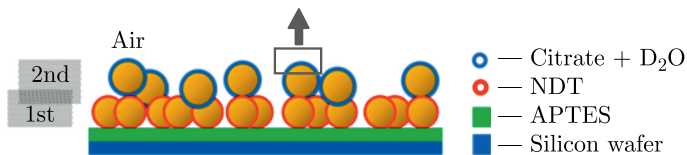
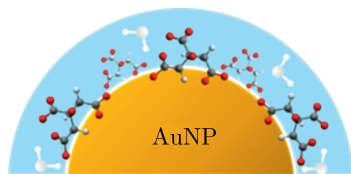
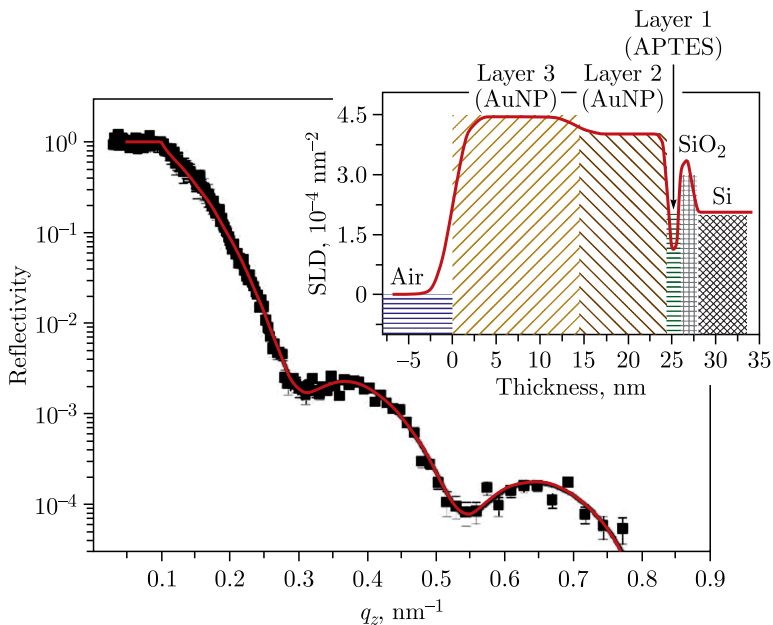
Барические зависимости параметров элементарной ячейки CuO. *а*) Экспериментальные точки, результаты теоретических DFT-расчетов с помощью гибридных функционалов HSE06, M06 и предыдущих нейтронных исследований. *б*) Экспериментальные и расчетные барические зависимости температуры Нееля и температурные зависимости моноклинного угла кристаллической решетки CuO при давлении 0 и 11 ГПа

значений температуры 213–230 К. Теоретические расчеты предсказали существование такой фазы при комнатной температуре при высоком давлении 20–40 ГПа. Для проверки этого предположения были проведены исследования атомной и магнитной структур CuO методами нейтронной и рентгеновской дифракции (рисунок). Обнаружена аномальная сжимаемость кристаллической решетки моноклинной структуры CuO. Температура Нееля в диапазоне значений давления до 11 ГПа увеличивается до 250 К, а температурная область стабильности АФМ модулированной фазы расширяется под давлением. Для объяснения наблюдаемых аномалий в структурном поведении CuO под давлением проведены теоретические расчеты из первых принципов, которые позволили успешно воспроизвести барические зависимости структурных параметров.

- *Kozlenko D. P., Družbicki K., Kichanov S. E., Lukin E. V., Liermann H.-P., Glazyrin K. V., Savenko B. N.* Anomalous Lattice Compression and Magnetic Ordering in CuO at High Pressures: A Structural Study and First Principles Calculations // *Phys. Rev. B.* 2017. V. 95. P. 054115.

Проведены исследования структурной организации слоев наночастиц золота, осаждаемых из водного раствора на кремниевую подложку и функционализированных молекулярным слоем 1,9-нонанедитиола, — перспективных из-за своих специфических оптических свойств систем для нанoeлектронных устройств. С помощью нейтронной рефлектометрии определен профиль структуры слоев наночастиц золота с последующей оценкой толщины слоев и плотности упаковки частиц (рисунок). Установлено присутствие молекул воды в адсорбированных слоях золотых наночастиц. Полученные результаты использовались в комплексном подходе, что позволило достаточно надежно и однозначно восстановить профиль структуры.

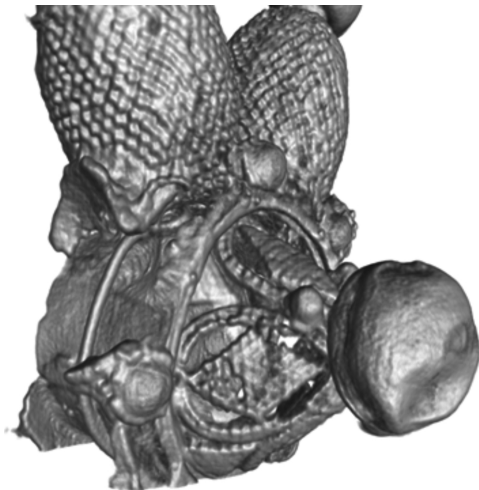
- *Snegir S. V., Artykulnyi O. P., Petrenko V. I., Krumova M., Kutsenko V. Ye., Avdeev M. V., Bulavin L. A.* On the Structure of Assemblies of Coated Au Nanoparticles on Silicon Substrate // *Appl. Nanosci.* 2017 (submitted).



- 2nd — layer of AuNPs with increased density and thickness  $\sim 12$  nm
- 1st — layer of AuNPs with density of Au and thickness  $\sim 15$  nm

Слои функционализированных наночастиц золота на кремниевой подложке: данные нейтронной рефлектометрии с соответствующим профилем ПДР и предложенная модель структурной организации золотых частиц на поверхности

В сотрудничестве с Институтом археологии РАН проведены работы по одному из новых направлений — неразрушающему исследованию внутреннего строения объектов исторического наследия с помощью методов нейтронной радиографии и томо-



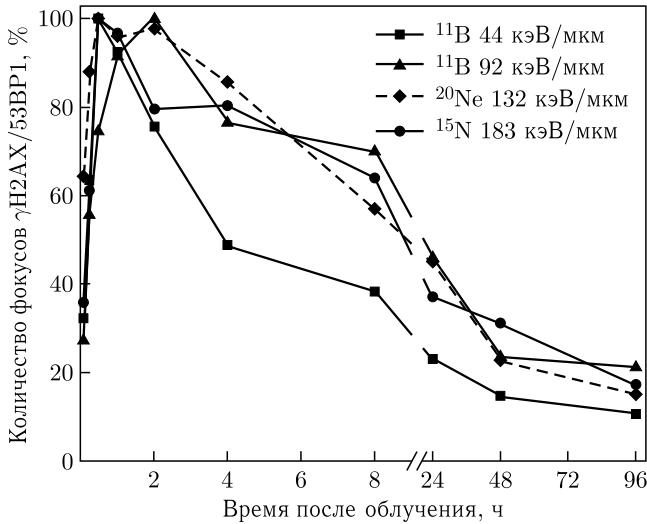
Фотография исследуемого фрагмента лучевого колта (слева). Высота фрагмента 5 см. Восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель фрагмента колта (справа). Отчетливо видны участки крепежного обруча, узоры и рифление на лучах колта, опорная проволока

графии. Построены 3D-модели фрагментов браслета и лучевого колта из Тверского клада (датирован XIII–XIV вв., найден в 2014 г. в Твери). Их анализ позволяет сделать выводы об особенностях технологий, использовавшихся для изготовления подобных изделий данного периода времени.

- *Кичанов С. Е., Козленко Д. П., Сапрыкина И. А., Лукин Е. В., Руткаускас А. В., Назаров К. М., Савенко Б. Н.* Исследование археологических объектов методом нейтронной томографии // *Новости ОИЯИ.* 2017. № 1. С. 20–23.

## **РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследованы закономерности индукции и репарации двуниевых разрывов ДНК (ДР ДНК) в клетках млекопитающих и человека при действии ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками. Проанализирована кинетика формирования и элиминации фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 в ядрах облученных фибробластов человека. Изучены формирование и репарация комплексных ДР ДНК с участием модифицированных оснований. Показано, что с увеличением линейной передачи

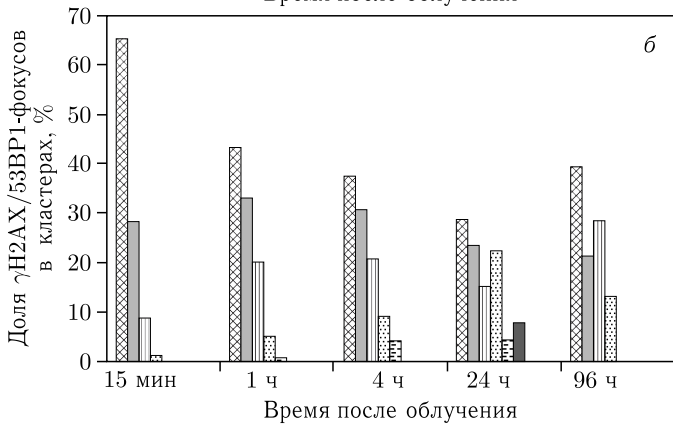
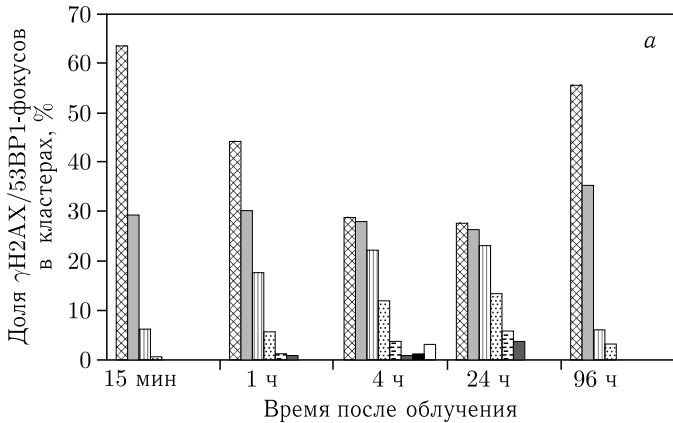


Кинетика формирования и элиминации фокусов  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  при облучении ускоренными ионами с разными физическими характеристиками

энергии заряженных частиц наблюдается снижение эффективности репарации ДР ДНК (рисунок).

Облучение под малым углом к плоскости распространения пучка ускоренными ионами  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{11}\text{B}$  позволило исследовать влияние параметров треков заряженных частиц на сложность формируемых ДР ДНК. Выявлено, что ионы  $^{20}\text{Ne}$  с высокой плотностью  $\delta$ -электронов в треке ( $Z^2/\beta^2 = 1454$ ) индуцируют более крупные и сложноорганизованные кластерные  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$ -фокусы (рисунок на с. 16).

- *Заднепрянец М. Г., Борейко А. В., Буланова Т. С., Йежкова Л., Красавин Е. А., Куликова Е. А., Смирнова Е. В., Фальк М., Фалькова И.* Закономерности формирования и элиминации  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$ -фокусов при действии  $\gamma$ -квантов и ускоренных тяжелых ионов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. № 1 (в печати).
- *Jezkova L., Boreyko A. V., Bulanova T. S., Davidkova M., Falkova I., Kozubek S., Depes D., Krasavin E., Kruglyakova E., Smirnova E., Valentova O., Zadneprianetc M., Falk M.* Particles with Similar LET Values Generate DNA Breaks of Different Complexity and Reparability: A High-Resolution Microscopy Analysis of  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  Foci // Nanoscale. 2018. V. 10(3). P. 1162–1179.



□ 1 ■ 2 ▨ 3 ▩ 4 ▪ 5 ■ 6 ■ 7 □ 8 — индивидуальные  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$ -фокусы в кластерах

Распределение индивидуальных фокусов в сложноорганизованных кластерах  $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$  при воздействии ускоренных ионов: а)  $^{20}\text{Ne}$  (ЛПЭ = 171 кэВ/мкм,  $E = 34$  МэВ/нуклон) и б)  $^{11}\text{B}$  (ЛПЭ = 55 кэВ/мкм,  $E = 25$  МэВ/нуклон)

С использованием программ транспорта излучений в веществе методом Монте-Карло MCNPX и GEANT4 выполнены расчеты полей адронов внутри обитаемого модуля космического аппарата с корпусом из Al ( $15 \text{ г/см}^2$ ), облучаемого легкими частицами галактического космического излучения ( $p$ ,  $d$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ) вне магнитосферы Земли в периоды минимума и максимума солнечной активности. Получены усредненные по объему модуля спектральные распределения флюенсов внутренних протонов, нейтронов, заряженных  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, дейтронов, ядер  $^3\text{He}$ ,



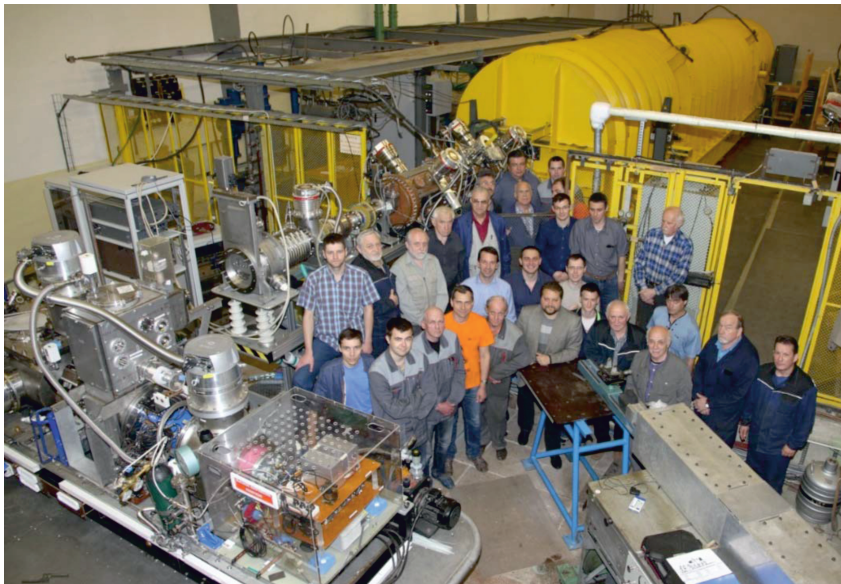
$^4\text{He}$  и  $\gamma$ -квантов. Рассчитаны реалистичные значения коэффициентов конверсии флюенс – эффективная доза на основе энергетических зависимостей ОБЭ от ЛПЭ и тканевых весовых коэффициентов для взрослых мужчин (близких к когорте космонавтов). Путем свертки спектров внутренних частиц с энергетическими зависимостями коэффициентов конверсии флюенс – эффективная доза рассчитаны парциальные дозы для космонавтов внутри модуля от разных компонентов поля излучения в минимуме и максимуме солнечной активности.

На основе выполненных расчетов предложен метод организации на пучке протонов с энергией 10 ГэВ нуклотрона ОИЯИ совокупного поля протонов, нейтронов и  $\pi$ -мезонов, моделирующего усредненное (в пределах изменения солнечной активности) поле внутри жилого модуля корабля, генерируемое легкими частицами ГКИ.

- *Timoshenko G. N., Krylov A. R., Paraipan M., Gordeev I. S.* Particle Accelerator-Based Simulation of the Radiation Environment on Board Spacecraft for Manned Interplanetary Missions // *Rad. Meas.* 2017. V. 107. P. 27–32.

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

В ходе реализации в ОИЯИ мегасайенс-проекта NICA впервые осуществлен режим ускорения поляризованных протонов в ускорителе ОИЯИ нуклотрон, что является принципиальным шагом в осуществлении программы по спиновой физике на комплексе NICA. Главная научная задача этой программы — исследование спиновой кварк-партоной структуры протона. Этому предшествовало создание (совместно с ИЯИ РАН) высокоинтенсивного источника поляризованных протонов и дейтронов, ввод в действие новой высокочастотной секции предускорителя, разработанного в сотрудничестве ОИЯИ–МИФИ–ИТЭФ НИЦ КИ и изготовленного на предприятии в Снежинске. Была решена сложная задача сохранения поляризации протонных пучков в жесткофокусирующем сверхпроводящем синхротроне, и рассмотрена возможность использования нуклотрона при экстремально низкой энергии инжекции протонов — 5 МэВ. Проведенные измерения показали, что параметры источника обеспечат получение пучков поляризованных протонов и дейтронов с интенсивностью на уровне  $10^{11}$  частиц за цикл и степенью поляризации более 90 %.

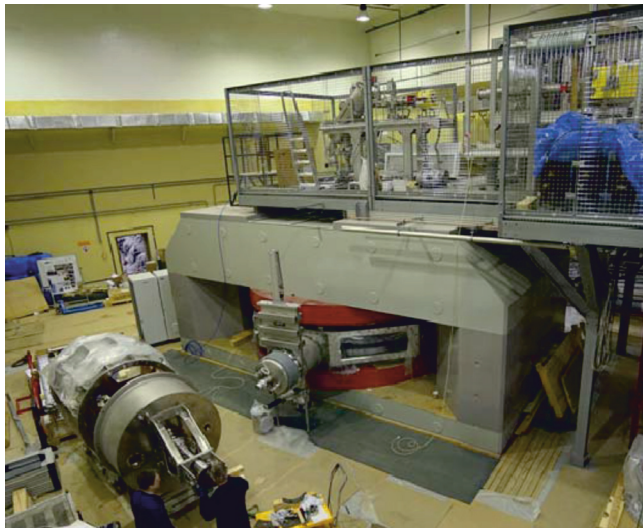


### Новый источник поляризованных ионов

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

Создание первой очереди фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ) вышло на финальную стадию. Завершен монтаж циклотрона ДЦ-280, включающего ионный источник ЭЦР-типа и систему аксиальной инжекции. Изготовлен и доставлен в Дубну новый газонаполненный сепаратор — установка, на которой будут выполнены первые эксперименты на фабрике СТЭ. Пусконаладочные работы, а также сдача всего комплекса в эксплуатацию намечены на первую половину 2018 г. Первые эксперименты на фабрике СТЭ планируются во второй половине 2018 г.

- *Dmitriev S. N.* Dubna Superheavy Elements Factory // 3rd Intern. Symp. on Super-Heavy Elements “Challenges in the Studies of Super-Heavy Nuclei and Atoms”, Kazimierz Dolny, Poland, Sept. 10–14, 2017.



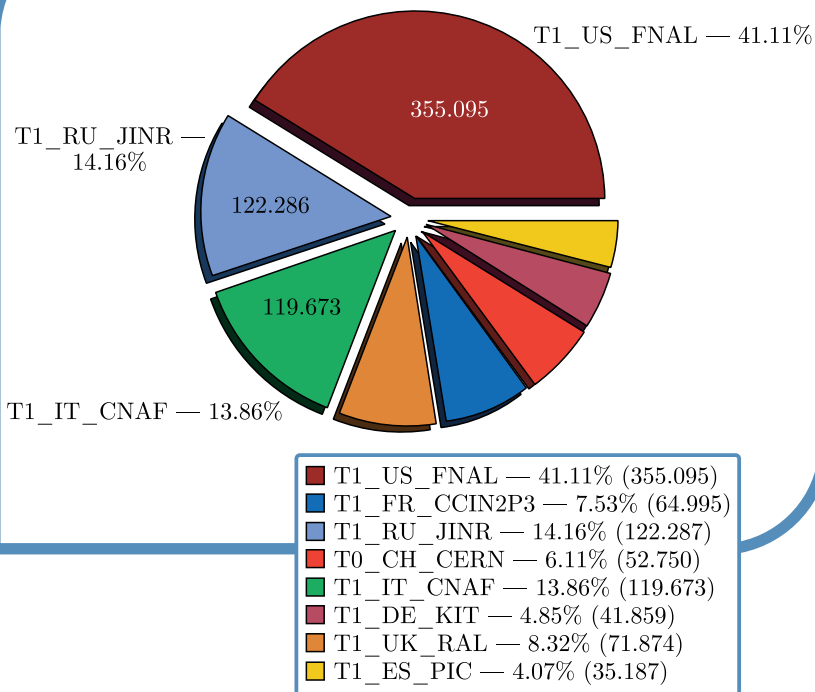
Ускоритель ДЦ-280 фабрики СТЭ

- *Oganessian Yu. Ts.* Experimental Studies of SHE // 3rd Intern. Symp. on Super-Heavy Elements “Challenges in the Studies of Super-Heavy Nuclei and Atoms”, Kazimierz Dolny, Poland, Sept. 10–14, 2017.

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА**

Сайт Tier-1 ОИЯИ — один из центров хранения и обработки данных эксперимента CMS на LHC (ЦЕРН) — занимает второе место в мире: на нем обработано более 120 млн событий, что превышает 14% от общего числа. Этот грид-компонент Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ рассматривается как прототип центра обработки и хранения данных мегапроекта NICA.

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



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

Разработан интеллектуальный планировщик для облака, в котором предложено использовать механизм оверкоммитмента (превышения виртуальных ресурсов над физически доступными), с автоматизацией миграции виртуальных машин на освобождаемые ресурсы. По результатам тестов и полученному опыту работы с системами Ganglia, Icinga2, NetXMS, NMIS и Zabbix для использования в интеллектуальном планировщике была выбрана система Icinga2.

- Кадочников И. и др. <http://ceur-ws.org/Vol-1787/279-283-paper-47.pdf>

Сотрудниками ОИЯИ совместно с сотрудниками международной коллаборации CBM разрабатываются системы считывания и сбора данных детектора черенковских колец RICH эксперимента CBM. На основе данных, собранных в течение пучковых

тестов в ЦЕРН, и результатов лабораторных измерений с помощью специально построенного для этого стенда проведен подробный анализ прототипов модулей считывания и приема данных. Разработано программное обеспечение приема и анализа данных СВМ RICH. Проведено прямое измерение временного профиля сместителя спектра п-терфенила, и оценено его влияние на временные характеристики всей системы считывания СВМ RICH. Полученные результаты достаточны для использования исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте СВМ.

- *Adamczewski-Musch J. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 6. P. 904–912.*

Проведено моделирование структурных изменений на поверхности образца никеля при облучении ионами урана с энергией диапазона 100–700 МэВ. Получены размеры характерных повреждений в зависимости от энергии облучения в различные моменты времени. В рамках проведенных исследований можно сделать следующие выводы: 1) предложенная методика хорошо подходит для описания структурных изменений в поверхностных слоях облучаемого материала, 2) для получения более точных предсказаний о структурных изменениях рекомендуется использовать экспериментальные данные, а также более полно использовать нелинейную зависимость от температуры параметров модели термического пика.

- *Дидык А. Ю. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 6. С. 16–21.*

Предложены новые вычислительные схемы и алгоритмы для решения параметрической самосопряженной эллиптической краевой задачи в двумерной области с граничными условиями Дирихле или Неймана с использованием метода конечных элементов высокого порядка точности с прямоугольными и треугольными элементами. Эффективность предложенных схем расчета и алгоритмов продемонстрирована на решении двумерных эллиптических краевых задач, описывающих квадрупольные колебания в коллективной модели атомного ядра.

- *Гусев А. А. и др. // Вестн. РУДН: Сер. Математика. Информатика. Физика. 2017. Т. 25, № 1. С. 36–55.*

## УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

В 2017 г. в Учебно-научном центре ОИЯИ проходили обучение более 400 студентов базовых кафедр МГУ, МФТИ, МИФИ, университета «Дубна» и университетов стран-участниц (Армении, Белоруссии, Казахстана и РФ). Более 200 студентов были прикреплены к лабораториям ОИЯИ для прохождения летних учебных и производственных практик.

В трех этапах ежегодной летней студенческой практики по направлениям исследований ОИЯИ принимали участие 163 представителя Азербайджана, Белоруссии, Египта, Кубы, Польши, Румынии, Сербии, Словакии, Чехии и ЮАР.

В рамках летней студенческой программы 49 студентов и аспирантов из вузов Белоруссии, Болгарии, Египта, Испании, Казахстана, Кубы, Мексики, Польши, Румынии, РФ, Сербии и Украины в течение 6–8 недель с июня по октябрь выполняли учебно-исследовательские проекты в лабораториях Института.

В работе международных научных школ для учителей физики, проходивших в 2017 г. летом в ОИЯИ и осенью в ЦЕРН, принимали участие 41 преподаватель и 10 учеников из Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Казахстана, Молдавии, РФ и Украины. Программы школ включали лекции, встречи с физиками в рабочей и неформальной обстановках, экскурсии, тематические обсуждения, работу в физическом практикуме.

В г. Брашов (Румыния) в работе организованной УНЦ 8-й Международной студенческой летней школы «Ядерная физика — наука и приложения» (NUCPHYS-SC&APPL) участвовали более 70 студентов и аспирантов из Армении, Кубы, Македонии, Польши, России, Румынии, Сербии, Украины и Чехии.

На 7-м Всероссийском фестивале НАУКА 0+ в Москве ОИЯИ представлял экспозиции, отражающие направления научной деятельности Института. На двух выставочных площадках проводились демонстрации макетов, опыты по физике и химии, мастер-классы по робототехнике, развивающие игры, читались лекции.

В Сочи в рамках 19-го Всемирного фестиваля молодежи и студентов интернациональная группа молодых сотрудников ОИЯИ представляла флагманский проект Института — ускорительный комплекс NICA, а также знакомила гостей и участников фестиваля с образовательной программой ОИЯИ и возможностями для студентов и аспирантов.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении Дней физики, 6-го турнира по робототехнике Открытой Верхневолжской образовательной кибернетической сети и 1-го зонального отборочного тура областных соревнований по основам конструирования и робототехники; организовывал видеоконференции, виртуальные лекции; проводил ознакомительные и научно-популярные лекции, а также экскурсии для студентов, школьников и учителей из государств-членов ОИЯИ и других стран.

## **ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 23.12.2016 по 17.12.2017)**

- Книги — 8:

*De Florian D., Kazakov D.I. et al.* Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector: Report of the LHC Higgs Cross Section Working Group / Eds.: D. De Florian, C. Grojean, F. Maltoni, et al. — Geneva: CERN, 2017. — XX, 849 p.: ill. — (CERN; 2017-002-M) (CERN Yellow Reports: Monographs; V. 2/2017). — Bibliogr.: p. 761–849.

*Bica I., Balasoiu M., Bunoiu M.* Elements of Materials Technology in DC Plasma. — M.: Technosphaera, 2017. — 445 p.: ill. — Bibliogr.: p. 438–445.

*Namsrai Kh.* Universal Formulas for Calculation of Complicated Functional Depending Integrals. — Dubna: JINR, 2017. — 209 p. — Bibliogr.: p. 209.

*Solov'ev E. A.* The Foundations of Quantum Physics: New Interpretation and Systematic Application. — Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2017. — VI, 158 p.: ill. — Bibliogr.: p. 151–158.

*Бедняков В. А., Русакович Н. А.* Объединенный институт ядерных исследований в экспериментальной физике элементарных частиц. — Дубна: ОИЯИ, 2017. — 75, [2] с.: цв. ил. — (ОИЯИ; P1-2017-14). — Библиогр.: с. 53–76. — К 60-летию ОИЯИ.

*Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В.* Квантовые поля: учебное пособие. — Изд. 4-е. — М.: URSS, 2017. — 393 с.: ил. — (Классический университетский учебник). — Библиогр.: с. 391–392.

*Сморodinский Я. А., Филонович С. Р.* Температура / Отв. ред.: С. Р. Филонович. — Изд. 5-е. — М.: URSS, 2017. — 189 с.: ил. — (Науку — всем! Шедевры научно-популярной литературы. (Физика); № 141).

*Узиков Ю. Н.* Избранные главы квантовой теории столкновений: учебное пособие. — М.: Университетская книга, 2017. — 258 с.: ил. — Библиогр.: с. 253–258.

- Журнальные статьи — 830
- Публикации в трудах конференций — 427
- Препринты — 64
- Авторефераты диссертаций — 13
- Всего: 1342

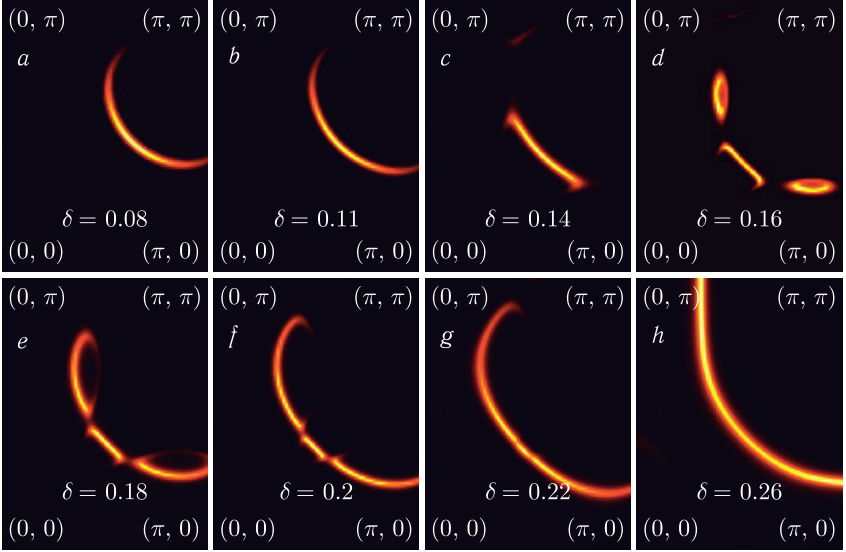


## THEORETICAL PHYSICS

The production cross sections of the heaviest unknown isotopes  $^{283,284}\text{Rg}$ ,  $^{287-290}\text{Nh}$ ,  $^{291-294}\text{Mc}$ ,  $^{294}\text{Lv}$ , and  $^{295-297}\text{Ts}$  in the  $pxn$ -channels and  $^{286,287}\text{Cn}$ ,  $^{290,291}\text{Fl}$ ,  $^{291,292}\text{Mc}$ , and  $^{294}\text{Lv}$  in the  $\alpha xn$ -channels of the hot-fusion reactions were calculated for the first time. As shown, the use of the charged particle evaporation channels allows us to increase the mass number of the heaviest isotopes of nuclei with  $Z = 111-117$  by a few units. The proton evaporation channels are more effective to approach  $N = 184$  than the  $\alpha$ -emission channels. The  $pxn$  and  $\alpha xn$  evaporation channels allow us to obtain an access to those isotopes which are unreachable in the  $xn$ -channels due to the lack of proper projectile-target combination. The production cross sections of new isotopes  $^{261,263,264}\text{No}$ ,  $^{263-265}\text{Lr}$ ,  $^{263,264,266,268}\text{Rf}$ ,  $^{264,265,269}\text{Db}$ , and  $^{267,268,270,272}\text{Sg}$  in the  $\alpha xn$  and  $xn$  evaporation channels of the asymmetric hot-fusion reactions with the radioactive beams were estimated. It is shown that the charged particle evaporation channels are suitable for producing these unknown isotopes with the cross sections of about 0.1–300 nb.

- *Hong J., Adamian G.G., Antonenko N.V.* Ways to Produce New Superheavy Isotopes with  $Z = 111-117$  in Charged Particle Evaporation Channels // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 764. P. 42–48.
- *Hong J., Adamian G.G., Antonenko N.V.* Possibilities of Production of Transfermium Nuclei in Complete Fusion Reactions with Radioactive Beams // *Phys. Rev. C.* 2017. V. 96. P. 014609.

A number of recent experiments on high-temperature superconductors have highlighted a transformation of a large cuprate Fermi surface into small pockets in the underdoped region. A few phenomenological models have recently been put forward to account for this transformation. However, none of those models have been derived microscopically nor are totally compatible with experimental data. Our work shows that the unexpected behavior of the Fermi surface of high-temperature superconducting cuprates

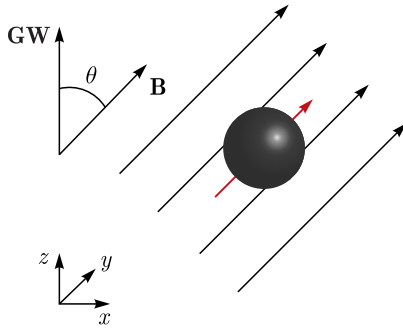


The spectral function at the Fermi level in the first quadrant of the Brillouin zone is calculated for different doping levels,  $\delta$ . The observed Fermi surface reconstruction: pseudogap phase (a-c)  $\leftrightarrow$  charge density wave (d-f)  $\leftrightarrow$  pseudogap (g)  $\leftrightarrow$  Fermi liquid (h)

can be explained in the framework of the  $t$ - $J$  model due to strong electron correlations resulting in charge density wave instability. Our results, for the first time, reproduce the experimental data on the charge ordering in the hole-doped cuprates within the microscopic model.

- *Ivantsov I., Ferraz A., Kochetov E.* Itinerant-Localized Model of Strongly Correlated Electrons: Fermi-Surface Reconstruction // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. P. 195161.

The general theory of spinning particles with electric and magnetic dipole moments moving in arbitrary electromagnetic, inertial, and gravitational fields is presented. Both the quantum-mechanical and classical dynamics are investigated. The starting point is the covariant Dirac equation extended to a spin-1/2 fermion with anomalous magnetic and electric dipole moments. The relativistic Foldy-Wouthuysen transformation is then performed. This transformation allows one to obtain the quantum-mechanical equations of motion for the physical operators in the Schrödinger form and to establish the classical limit of relativistic quantum mechanics. The results obtained are then compared to the general



Scheme of amplification of the action of plane gravitational wave stimulating the transitions between spin states by the constant magnetic field  $\mathbf{B}$  in  $x$ - $z$  plane lifting their degeneracy

classical description of the spinning particle interacting with electromagnetic, inertial, and gravitational fields. The complete agreement between the quantum mechanics and the classical theory is proven in the general case. As an application of the results obtained, the dynamics of a spinning particle in the gravitational wave is considered, and the prospects of the use of the magnetic resonance setup for the registration of the gravitational wave via its impact on the spin dynamics are analyzed.

- *Obukhov Yu. N., Silenko A. J., Teryaev O. V.* General Treatment of Quantum and Classical Spinning Particles in External Fields // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 105005.

The notion of pseudotoric structure on phase spaces was introduced in the framework of the studies of noncomplete integrable systems. The presence of this structure makes it possible to generalize the methods of Geometric Quantization to the case of such a noncompletely integrable system. Furthermore, the language of such new structures turned to be very useful for the description of known examples of nonstandard Lagrangian submanifolds in compact phase spaces (for example, exotic Chekanov Lagrangian tori, Gelfand-Zeytlin Lagrangian spheres, Mironov cycles, etc.), as well as for the construction of Lagrangian fibrations (for example, special a la Auroux Lagrangian fibrations on Fano varieties). The existence of such structures on compact phase spaces was partially solved, and the further program of the studies of these pseudotoric structures was formulated.

- *Tyurin N. A.* Pseudotoric Structures: Lagrangian Submanifolds and Lagrangian Fibrations // *Russ. Math. Surv.* 2017. V. 72, No. 3(435). P. 131–169.

## EXPERIMENTAL PHYSICS

### Particle Physics

In 2017, the COMPASS collaboration with the active participation of JINR physicists performed the first measurement of transverse-spin-dependent azimuthal asymmetries in the pion-induced Drell–Yan (DY) process with the use of the CERN SPS 190 GeV/c  $\pi^-$  beam and a transversely polarized hydrogen target. The azimuthal asymmetries, which give the access to different transverse-momentum-dependent (TMD) parton distribution functions (PDFs), have been extracted using dimuon events with the invariant mass between 4.3 and 8.5 (GeV/c)<sup>2</sup>. The observed sign of the Sivers asymmetry is found to be consistent with the fundamental prediction of QCD that the Sivers TMD PDFs extracted from DY have a sign opposite to the one extracted from semi-inclusive deep-inelastic scattering (SIDIS) data. Moreover, data on the Boer–Mulders and pretzelosity TMD have been obtained.

- *COMPASS Collab.* First Measurement of Transverse-Spin-Dependent Azimuthal Asymmetries in the Drell–Yan Process // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 112002.

The STAR collaboration (USA) with a strong support of JINR team has recently reported on the first observation of the global polarization of Lambda hyperons in heavy-ion collisions. It is discovered that the polarization direction of the Lambdas correlates at the level of several percent with the direction of the system angular momentum in noncentral collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7-32$  GeV.

It has been well-established that the hot system created at midrapidity in the system may be considered as a fluid, and hydrodynamic calculations directly relate the polarization of emitted particles to the vorticity — the curl of a flow field — of a fluid. Using this relation, the curl of the fluid created at RHIC has been estimated to be about  $9 \cdot 10^{21} \text{ s}^{-1}$ , which is 14 orders of magnitude higher than any fluid ever observed. Previous results have proved the system at RHIC to be the hottest and the least viscous (relative

to entropy density) fluid ever created. New result adds another record — collisions at RHIC produce the most vortical fluid.

- *STAR Collab.* // Nature. 2017. V. 548. P. 62.

Within the Baikal-GVD project aimed at constructing a deep underwater neutrino telescope with the effective volume of about a cubic kilometer at Lake Baikal, the second cluster of eight optical-module strings was mounted and set to run in a test mode with constant data-taking. The setup of two clusters (576 modules) put into operation in mid-April 2016 has an effective volume close to  $0.1 \text{ km}^3$  for events from neutrinos with the energy of about 100 TeV, which allows searching for events from extraterrestrial high-energy and ultrahigh-energy neutrinos detected for the first time in the IceCube experiment.



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

- *Avrarin A.D. et al.* Status of the Baikal-GVD Experiment — 2017 // Proc. of the 35th Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC-2017), Bexco, Busan, Korea, 10–20 July 2017.

Within the Borexino project, the results of the temporal variation analysis performed in 2017 for the beryllium neutrino flux are published. The period of the variations corresponds to an astronomical year, and their amplitude and phase agree with those

expected due to eccentricity of the Earth's orbit. The fitting value of the period found to be  $T = (367 \pm 10)$  d can be treated as the first measurement of the astronomical year duration using solar neutrinos. The neutrino flux determination accuracy is improved to 3% for beryllium neutrinos, 10% for  $pp$  neutrinos, and 17% for  $pep$  neutrinos. For the first time, the reliability of observation of a  $pep$  neutrino signal exceeded the level of  $5\sigma$ . New Borexino data on solar neutrinos are in better but statistically poorly significant agreement with the high-metallicity solar model. The analysis of the deviations of the recoil electron spectrum shape from that predicted by the Standard Model has yielded the currently best limit on the effective magnetic moment of solar neutrinos  $\mu_{\nu}^{\text{eff}} < 2.8 \cdot 10^{-11} \mu_B$  (90% C.L.).

- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Seasonal Modulation of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Rate in Borexino // Astropart. Phys. 2017. V. 92. P. 21.*
- *Agostini M. et al. (Borexino Collab.). Limiting Neutrino Magnetic Moments with Borexino Phase-II Solar Neutrino Data // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 091103(R).*

The assembly of the SuperNEMO Demonstrator (first module) has been finished (the official inauguration was on 7 November 2017). The first data will be collected in early 2018. The goal of the Demonstrator is to validate the technique and to reach a sensitivity of the  $0\nu\beta\beta$ -decay half-life of about  $T(0\nu)_{1/2} > 5.9 \cdot 10^{24}$  yr with zero background in the region of interest. World first ever limit  $T(0\nu)_{1/2} > (1-3) \cdot 10^{21}$  yr on quadruple double-beta decay  $0\nu 4\beta$  in  $^{150}\text{Nd}$  has been obtained. The final NEMO-3 result for  $^{116}\text{Cd}$  has been also published.

- *Arnold R. et al. (NEMO-3 Collab.). Search for Neutrinoless Quadruple- $\beta$  Decay of  $^{150}\text{Nd}$  with the NEMO-3 Detector // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 041801.*
- *Arnold R. et al. Measurement of the Double-Beta Decay Half-Life and Search for the Neutrinoless Double-Beta Decay of  $^{116}\text{Cd}$  with the NEMO-3 Detector // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 012007.*

## Relativistic Nuclear Physics

In 2017, in the ALICE experiment (CERN) new results of the 1D and 3D femtoscopic correlation analysis for  $K^+K^-$  pair production in Pb-Pb collisions were obtained and compared with the model and the previous results. A good agreement has been observed.

- Acharya S. et al. (ALICE Collab.). Kaon Femtoscopy in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. arXiv:1709.0173. 2017.
- Acharya S. et al. (ALICE Collab.). Measuring  $K_S^0 K^\pm$  Interactions Using Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Lett. B. 2017. V.774. P.64.

## Heavy Ion Physics

A new ACCULINNA-2 fragment separator designed for the production of radioactive ion beams has been commissioned. The project parameters of the setup were experimentally validated: the intensities of the beams produced in the  $^{15}\text{Ne} + \text{Be}$  fragmentation reaction are on average higher by a factor of 25 compared to those attained earlier. The separator will become a basic facility for the study of light exotic nuclei near the limits of nucleon stability and will allow the search and investigation of exotic nuclear systems,



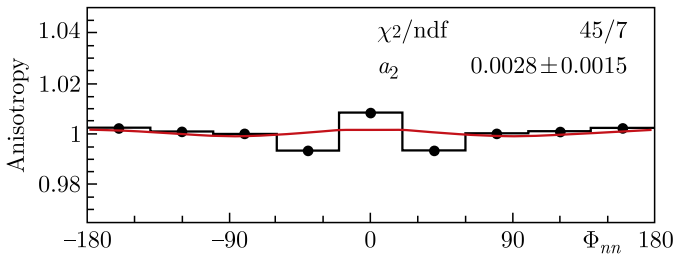
ACCULINNA-2 fragment separator

such as  $^5\text{-}^7\text{H}$ ,  $^8\text{-}^{10}\text{He}$ ,  $^{24}\text{-}^{26}\text{O}$ , etc., and of new types of radioactive decay.

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

## Neutron Nuclear Physics

Angular correlations of the emission of prompt fission neutrons from a spontaneous  $^{252}\text{Cf}$  source have been measured. Correlations of the neutron emission angle with respect to the fission axis, correlations between neutron pairs from one fission event, as well as triple angular correlations of a neutron–neutron–fragment were investigated. It was established that the experimental data do not contradict the previous measurements indicating the presence of “scission” neutrons, as well as the angular anisotropy of the neutron emission in the center of mass of the fragments.



Dependence of the anisotropy of the emission of prompt fission neutrons on the projection of the angle between two neutrons in a plane perpendicular to the fission axis

- *Kopatch Yu., Chietera A., Stuttgé L., Gönnerwein F., Mutterer M., Gagarski A., Guseva I., Dorvaux O., Hanappe F., Hamsch F.-J.* Angular Correlations in the Prompt Neutron Emission in Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$  // EPJ Web Conf. 2017. V. 146. P. 04017.

An analysis of the results of measurements of spatial odd asymmetry of emission of  $\alpha$  particles in the  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  reaction has been completed. The measurements were carried out using beams of polarized cold neutrons of the WWR-M reactor (Gatchina) and the reactor of ILL (Grenoble, France). The work is devoted to the investigation of manifestations of weak interaction in nuclear



processes. The obtained value is  $\alpha_{\text{P-odd}}^{10\text{B},\alpha} = -(11.2 \pm 3.4) \cdot 10^{-8}$ . The nonzero result in the reaction  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  is obtained for the first time.  $^{10}\text{B}$  is the second light nucleus, after  $^6\text{Li}$ , where P-odd effect has been observed.

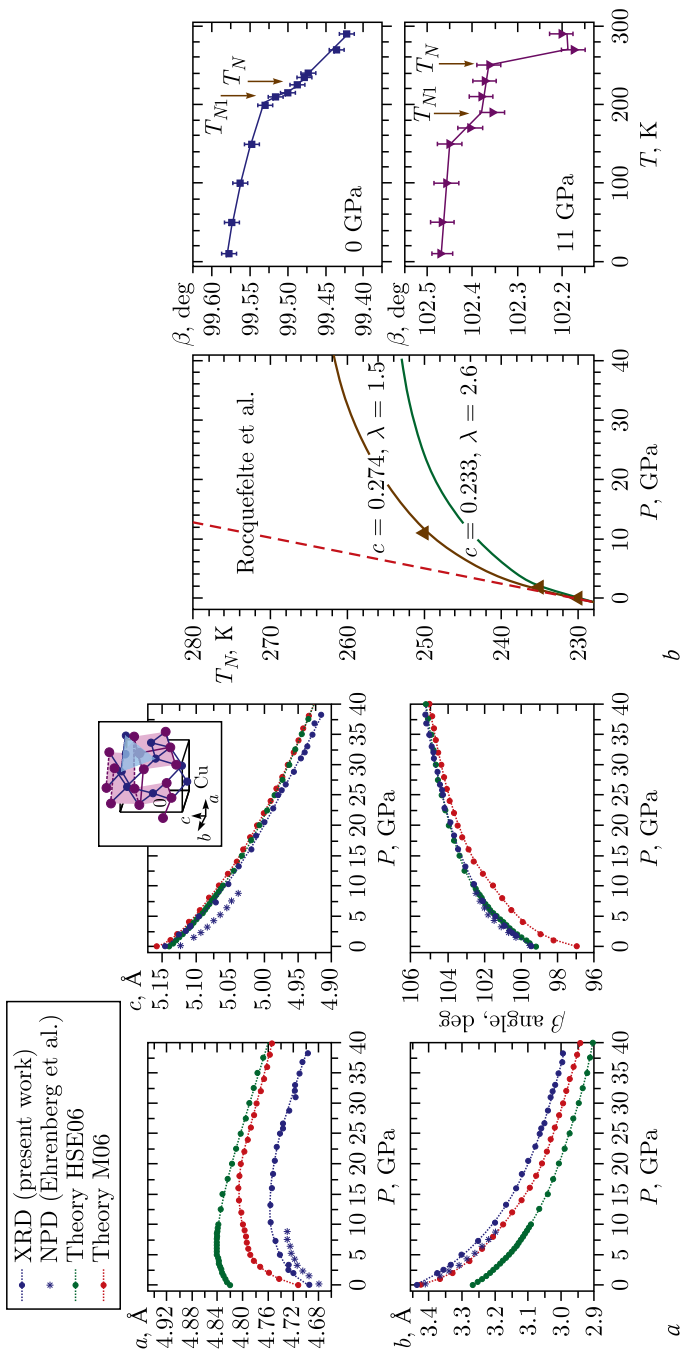
- *Gledenov Yu.M., Nesvizhevsky V.V., Sedyshev P.V., Shul'gina E.V., Szalanski P., Vesna V.A.* First Observation of P-odd Asymmetry of  $\alpha$ -Particle Emission in the  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  Nuclear Reaction // *Phys. Lett. B.* 2017. V. 769. P. 111–116.

## Condensed Matter Physics

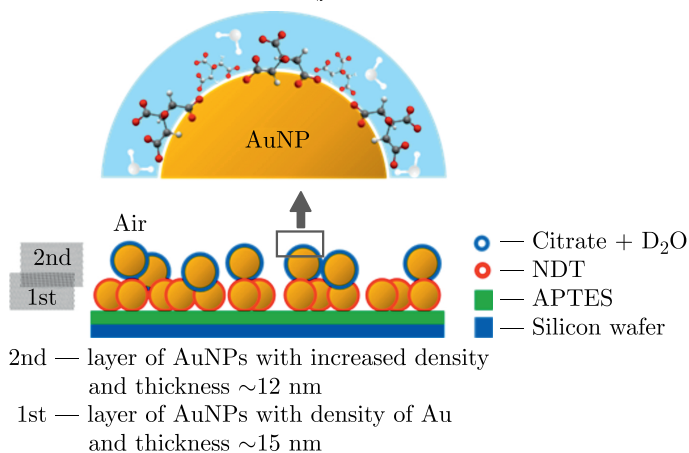
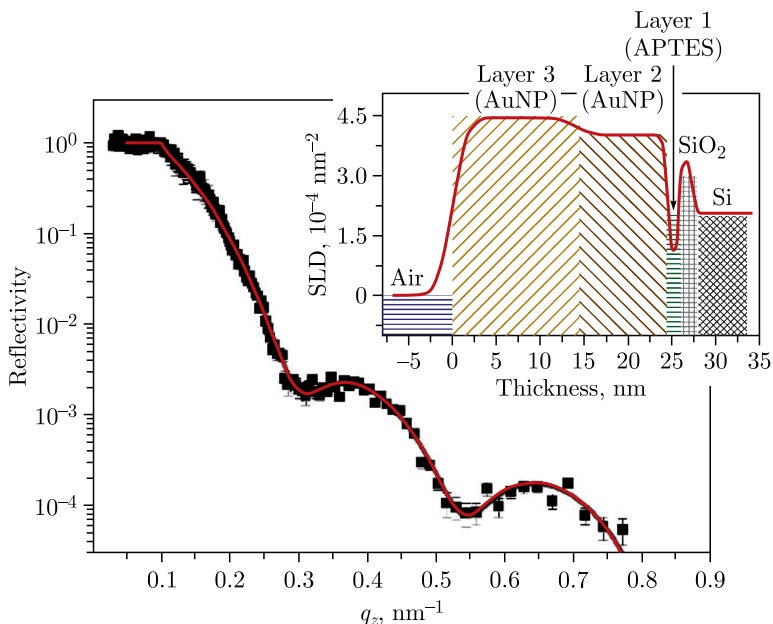
Copper oxide CuO is one of the most structurally simple improper multiferroics in which spontaneous ferroelectric polarization arises in an intermediate antiferromagnetic (AFM) modulated phase in a temperature range of 213–230 K. Theoretical calculations have predicted the existence of this phase at room temperature at high pressures of 20–40 GPa. To verify this assumption, the atomic and magnetic structures of CuO were studied by neutron and X-ray diffraction (see the Figure). Anomalous lattice compression of the monoclinic crystal lattice of CuO was observed. The Neel temperature in the pressure range of up to 11 GPa increases up to 250 K, and the temperature range of stability of the AFM modulated phase extends under pressure. To explain the observed anomalies in the structural behavior of CuO under pressure, theoretical calculations from first principles were performed. This made it possible to successfully reproduce the pressure dependences for the structural parameters.

- *Kozlenko D.P., Družbicki K., Kichanov S.E., Lukin E.V., Liermann H.-P., Glazyrin K.V., Savenko B.N.* Anomalous Lattice Compression and Magnetic Ordering in CuO at High Pressures: A Structural Study and First Principles Calculations // *Phys. Rev. B.* 2017. V. 95. P. 054115.

The structural organization of layers of nanoparticles of gold deposited from aqueous solutions onto a silicon substrate and functionalized with a molecular layer of 1,9-nonanedithiol (promising systems for nanoelectronic devices due to their specific optical properties) was studied. For a full description of the system, the data of neutron reflectometry, atomic force microscopy, X-ray reflectometry and diffraction were used. On the basis of the data of neutron reflectometry, the structure profile of gold nanoparticle layers was determined and used to estimate the layer thickness and



Pressure dependences of unit cell parameters of CuO. *a*) Experimental points, results of theoretical DFT calculations using hybrid functionals HSE06, M06, and results of previous neutron studies are shown. *b*) Experimental and calculated pressure dependences of the Neel temperature and temperature dependences of the monoclinic angle of the CuO crystal lattice at a pressure of 0 and 11 GPa



Layers of functionalized nanoparticles of gold on silicon substrate: neutron reflectometry data with the corresponding SLD profile and the proposed model of the structural organization of gold particles on the surface

particle packing density (see the Figure). The presence of water molecules in the adsorbed layers of gold nanoparticles was found. The obtained results were used in the complex approach, which made it possible to reliably and unambiguously describe the surface packing of nanoparticles.

- *Snegir S. V., Artykulnyi O. P., Petrenko V. I., Krumova M., Kutsenko V. Ye., Avdeev M. V., Bulavin L. A.* On the Structure of Assemblies of Coated Au Nanoparticles on Silicon Substrate // *Appl. Nanosci.* 2017 (submitted).

In 2017, studies were conducted in one of new research areas — nondestructive investigation of the internal structure of objects of cultural heritage by neutron radiography and tomography in cooperation with the Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences. 3D models of fragments of a bracelet and ray kolt from the Tver treasure (dated XIII–XIV centuries, found in 2014 in the city of Tver) were obtained. Their analysis makes it possible to conclude about specific features of technologies used to manufacture these products at that time.

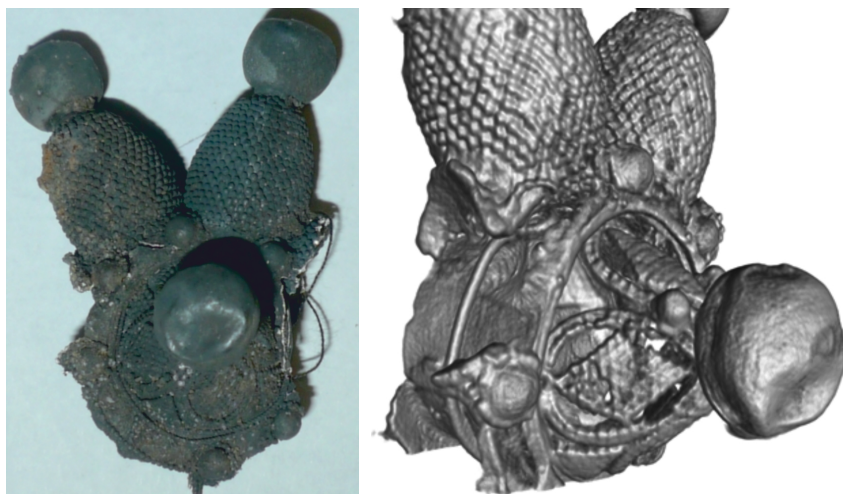
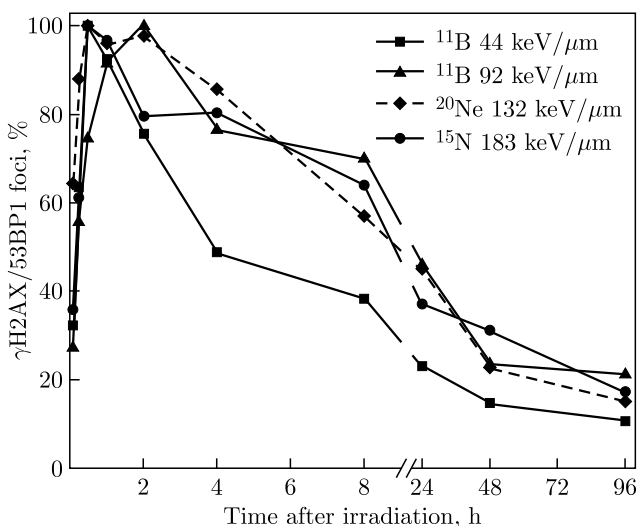


Photo (left) of a fragment of a ray kolt. The height of the fragment is 5 cm. A three-dimensional model (right) of the fragment of the kolt reconstructed from neutron tomography data. The mounting ring, grooving and patterns on the rays of the kolt, and a supporting wire are clearly visible

- *Kichanov S. E., Kozlenko D. P., Saprykina I. A., Lukin E. V., Rutkauskas A. V., Nazarov K. M., Savenko B. N.* A Study of the Archeological Objects by Means of a Neutron Tomography Method // *JINR News.* 2017. No. 1. P. 20–23.

## RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

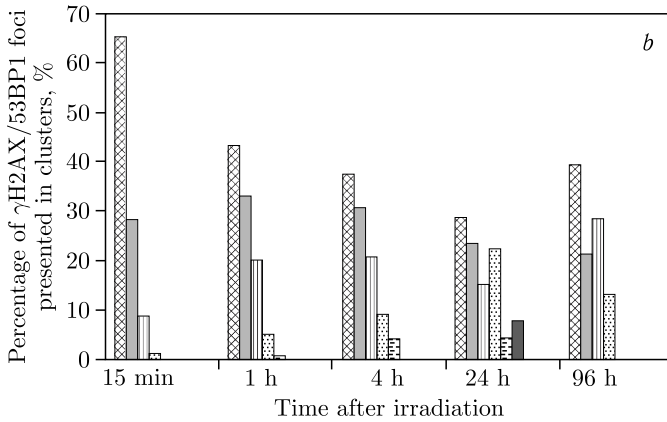
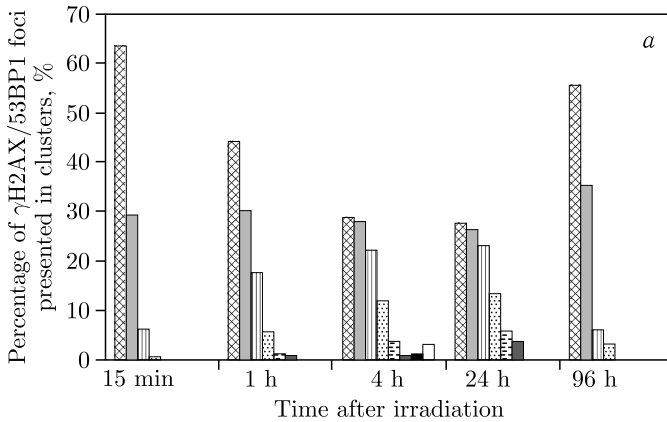
Regularities were studied in the induction and repair of DNA double-strand breaks (DSBs) in mammalian and human cells after exposure to ionizing radiations with different physical characteristics. The kinetics of the formation and elimination of  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci in the nuclei of exposed human fibroblasts was analyzed. Formation and repair of complex DNA DSBs involving modified bases were studied. It was shown that with increasing charged particles' linear energy transfer (LET) a decrease in the efficiency of DNA DSB repair is observed (Figure).



Kinetics of  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci formation and elimination after exposure to accelerated ions with different physical characteristics

Irradiation with accelerated  $^{20}\text{Ne}$  and  $^{11}\text{B}$  ions at small angles with respect to the beam axis allowed studying the influence of charged particle track parameters on the complexity of the induced DNA DSBs. It was found that  $^{20}\text{Ne}$  ions with a high density of  $\delta$  electrons in the track ( $Z^2/\beta^2 = 1454$ ) induce larger and more complex clustered  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci (Figure on p. 38).

- *Zadnepryanets M. G., Boreyko A. V., Bulanova T. S., Ježková L., Krasavin E. A., Kulikova E. A., Smirnova E. V., Falk M., Falkova I.* Regularities in the Formation and Elimination of  $\gamma$ H2AX/53BP1 Foci after Exposure to  $\gamma$  Rays and Accelerated Heavy Ions // *Radiatsionnaya Biologiya, Radioekologiya*. 2018. No. 1 (in Russian) (in press).



▣ 1 ▣ 2 ▣ 3 ▣ 4 ▣ 5 ▣ 6 ▣ 7 ▣ 8 — individual  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci in clusters

Distribution of individual foci in complex clustered  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci after exposure to accelerated  $^{20}\text{Ne}$  ions (LET = 171 keV/ $\mu\text{m}$ ,  $E = 34$  MeV/nucleon) (a) and  $^{11}\text{B}$  ions (LET = 55 keV/ $\mu\text{m}$ ,  $E = 25$  MeV/nucleon) (b)

- Jezkova L., Boreyko A. V., Bulanova T. S., Davidkova M., Falkova I., Kozubek S., Depes D., Krasavin E., Kruglyakova E., Smirnova E., Valentova O., Zadneprianetc M., Falk M. Particles with Similar LET Values Generate DNA Breaks of Different Complexity and Reparability: A High-Resolution Microscopy Analysis of  $\gamma$ H2AX/53BP1 Foci // *Nanoscale*. 2018. V.10(3). P.1162–1179.

With the use of Monte Carlo software toolkits MCNPX and GEANT4 for the calculation of radiation transport in matter,

hadron fields were calculated inside a spacecraft's habitable module with an aluminum hull,  $15 \text{ g/cm}^2$ , which is exposed to light particles of galactic cosmic radiation (GCR) ( $p$ ,  $d$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ) beyond the Earth's magnetosphere during solar activity minimum and maximum. Spectral distributions of fluence, averaged over the module's volume, were obtained for internal protons, neutrons, charged  $\pi$  and  $K$  mesons, deuterons,  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$  nuclei, and  $\gamma$  quanta. Realistic values of the fluence-effective dose conversion coefficients were calculated based on the dependence of relative biological effectiveness on LET and using tissue weight coefficients for the adult men's cohort (which is close to the cosmonaut cohort). By the convolution of internal particle spectra with energy dependences of the fluence-effective dose conversion coefficients, cosmonauts' partial doses inside the module were calculated for different components of the radiation field during solar activity minimum and maximum. On the grounds of the calculations, a method was proposed of the generation of a mixed proton, neutron, and  $\pi$ -meson field at the Nuclotron 10-GeV proton beam (VBLHEP, JINR) that would model the field (averaged over the solar activity range) generated inside a spacecraft's habitable module by GCR light particles.

- *Timoshenko G.N., Krylov A.R., Paraipan M., Gordeev I.S.* Particle Accelerator-Based Simulation of the Radiation Environment on Board Spacecraft for Manned Interplanetary Missions // *Rad. Meas.* 2017. V. 107. P. 27–32.

## ACCELERATOR TOPICS

For the first time in the development of the mega-science project NICA at JINR the mode of acceleration of polarized protons was carried out at the JINR accelerator Nuclotron. It is a radical step in the implementation of the spin-physics programme at the NICA complex. The main scientific task of this programme is the study of spin quark-parton structure of proton. It was preceded by the development of a high-intensity source of polarized protons and deuterons, together with INP RAS, the launch of a new high-frequency section of the pre-accelerator worked out in collaboration of JINR-MEPHI-ITEP NRC KI and produced in Snezhinsk. Complex tasks were solved to maintain polarization of proton beams in the strong focusing superconducting synchrotron and use the Nuclotron at extremely low energy of proton injection — 5 MeV. The measurements showed that the source parameters



The new source of polarized ions

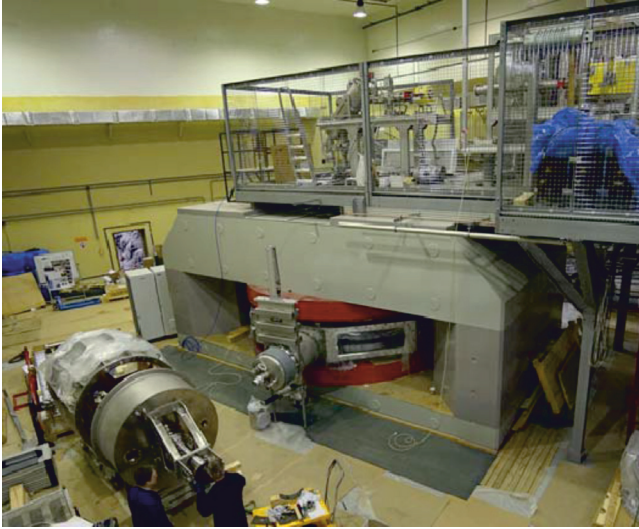
provide beams of polarized protons and deuterons with the intensity of  $10^{11}$  particles per cycle level and polarization degree over 90%.

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

The phase 1 construction of the Factory of Superheavy Elements (SHE) is now entering its final stage. The assembly of the DC-280 cyclotron, including the ECR ion source and the axial injection system, is now finished. A new gas-filled separator — a setup that will be used to carry out first experiments at SHE — was constructed and transported to Dubna. The commissioning work and the startup of the complex are scheduled for the first half of 2018. First experiments at the SHE Factory are scheduled for the second half of 2018.

- *Dmitriev S. N.* Dubna Superheavy Elements Factory // 3rd Intern. Symp. on Super-Heavy Elements “Challenges in the Studies of Super-Heavy Nuclei and Atoms”, Kazimierz Dolny, Poland, 10–14 Sept. 2017.





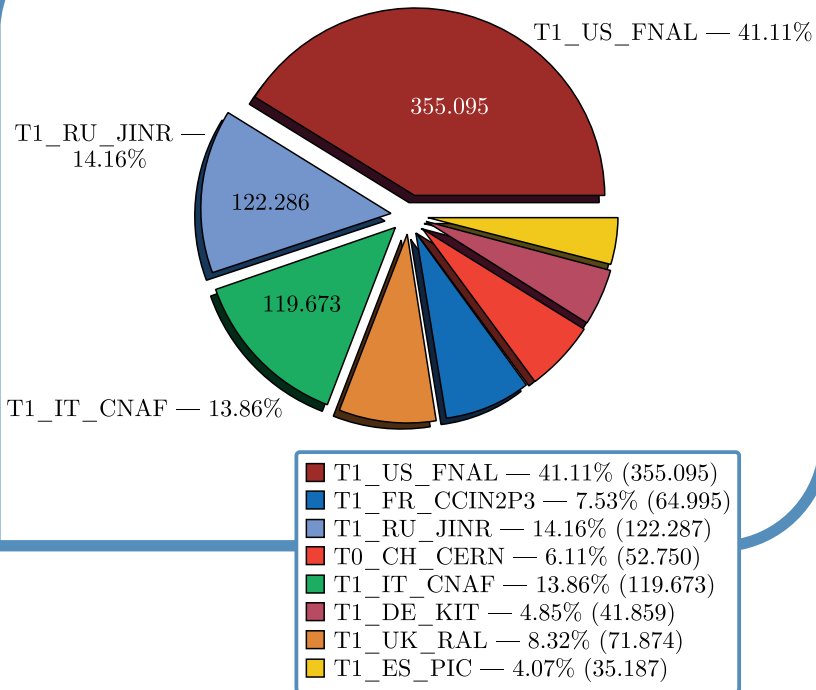
SHE Factory DC-280 accelerator

- *Oganessian Yu. Ts.* Experimental Studies of SHE // 3rd Intern. Symp. on Super-Heavy Elements “Challenges in the Studies of Super-Heavy Nuclei and Atoms”, Kazimierz Dolny, Poland, 10–14 Sept. 2017.

## INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

The Grid component of the JINR Multifunctional Information and Computing Complex is currently presented by a centre of Tier-1 level, which is one of the seven world’s centers of storing and processing data of the CMS experiment at the LHC. The diagram shows a contribution of the world centers of the first level in the processing of the CMS experimental data (in millions of processed events) for 2017. The JINR Tier-1 site takes the second place in the world — it has processed more than 120 million events that is more than 14% of the total number. This component of MICC is considered as a prototype of centres of Tier-0 and Tier-1 levels of the data processing and storing system of the NICA mega-project.

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



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

A smart scheduler for the cloud has been developed that proposes using an overcommitment mechanism (assigning more virtual resources than physically available) with the automated virtual machine migration to de-allocated resources. A necessary part of this project is to collect current and historical information on the load distribution in the cloud. The default monitoring system embedded into the OpenNebula cloud platform possesses limited possibilities as to data collection and data processing options. Therefore, the problem of choosing the most suitable external monitoring system gets urgent. Another important aspect to be considered is its performance and scalability, as in large clouds it can be a critical limiting factor for the scheduler. The test results for the systems Ganglia, Icinga2, NetXMS, NMIS, and Zabbix are given. Basing on the obtained results and the gained experience,

Icinga2 has been chosen as a load information collection system for the smart cloud scheduler project.

- *Kadochnikov I. et al.* <http://ceur-ws.org/Vol-1787/279-283-paper-47.pdf>

The LIT specialists in cooperation with their colleagues from the international CBM collaboration develop the readout and data acquisition systems of the ring imaging Cherenkov detector (RICH), an integral component of the future Compressed Baryonic Matter (CBM) experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt, Germany. A detailed analysis of the readout and DAQ prototype has been conducted using the data gathered during the tests of the CBM RICH prototype in the beam conditions at CERN and using the results of the laboratory measurements performed by means of a specifically developed test stand. Calibration technique was developed and implemented along with the DAQ and analysis code in the CbmRoot framework. Optimization of the readout module components has been performed that allows achievement of best timing characteristics in the high beam rate conditions expected at CBM. The obtained sub-nanosecond time precision also allows one to directly measure the time profile of the additional wavelength-shifting films on top of the MAPMT windows and investigate their effect on timing of the full CBM RICH readout chain. The obtained results allow one to conclude that the tested readout and DAQ chain is suitable for the CBM experiment.

- *Adamczewski-Musch J. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 6. P. 904–912.

Simulations of structural changes on the nickel surface exposed to 100–700 MeV uranium ions have been performed. The dimensions of specific injuries have been obtained in dependence on the energy of irradiation at different points of time. It should be noted that when irradiating the metal sample with high-energy ions, the most part of energy is lost in the electron gas and then passed to the crystal lattice, but a certain amount of the energy is accumulated in the electron gas. Therefore, if choosing the initial conditions for the molecular dynamics simulation, this fact must be taken into account. The initial conditions (temperature profiles) can be varied in this case. In addition, the experimental data can be used to refine the initial conditions. Within the conducted research, one can make the following two conclusions: the technique proposed in this work is well-suited to describe the structural changes in

the surface layers of the material under irradiation and to obtain more accurate predictions on the structural changes, and the use of experimental data is recommended as well as a better use of nonlinear dependence on the temperature of parameters of a thermal spike model.

- *Didyk A. Yu. et al. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. No.6. P.16–21.*

New calculation schemes and algorithms have been suggested for solving a parametric self-adjoint elliptic boundary-value problem with the Dirichlet and/or Neumann type boundary conditions in a 2D finite domain using a high-accuracy finite element method (FEM) with rectangular and triangular elements. The programs complexes implementing the algorithms calculate eigenvalues, surface eigenfunctions and their first derivatives with respect to the parameter and the potential matrix elements — the integrals of the products of surface eigenfunctions and/or their first derivatives with respect to the parameter which appear when reducing the multidimensional boundary-value problem to a one-dimensional one by means of the Kantorovich method. The efficiency of the proposed calculation schemes and algorithms is demonstrated in benchmark calculations of the 2D elliptic boundary-value problems describing quadrupole vibrations in a collective nuclear model.

- *Gusev A. A. et al. // RFUR Bull.: Math., Informat., Phys. 2017. V. 25, No. 1. P. 36–55.*

## **JINR UNIVERSITY CENTRE**

In 2017, more than 400 students of the JINR-based departments of MSU, MIPT, MEPHI, Dubna University, and the universities of the Member States — Armenia, Belarus, Kazakhstan, and Russia — were trained at the JINR University Centre. More than 200 students were attached to the JINR Laboratories to do their summer training at the Institute.

163 representatives of Azerbaijan, Belarus, Cuba, the Czech Republic, Egypt, Poland, Romania, Serbia, Slovakia, and South Africa participated in three stages of the annual International Student Practice in JINR Fields of Research.

For 6–8 weeks, in the period from June to October, 49 students and postgraduates from the universities of Belarus, Bulgaria, Cuba, Egypt, Kazakhstan, Mexico, Poland, Serbia, Spain, Romania, Russia, and Ukraine carried out their research projects in the

laboratories of the Institute within the framework of the Summer Student Programme.

In 2017, 41 teachers and 10 school-students from Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Kazakhstan, Moldova, Russia, and Ukraine took part in the International Scientific Schools for Physics Teachers held at JINR in summer and at CERN in autumn. The programmes of the Schools included lectures, formal and informal meetings with scientists, excursions, discussions, hands-on workshops.

More than 70 students and postgraduates from Armenia, Cuba, the Czech Republic, Macedonia, Poland, Romania, Russia, Serbia, Ukraine, the United Kingdom, and the United States participated in the 8th International Student Summer School “Nuclear Physics – Science and Applications” held in Brasov, Romania.

At the 7th All-Russian Science Festival NAUKA 0+ held in Moscow, JINR was represented at two exhibition sites reflecting the fields of research conducted at the Institute. The exhibition programme included demonstrations of mock-ups, lectures, physics and chemistry experiments, master classes in robotics, and brain games.

In Sochi, within the framework of the 19th World Festival of Youth and Students, an international group of young JINR staff members represented the flagship project of the Institute – the NICA Accelerator Complex – and acquainted the guests and participants of the Festival with the JINR educational programme and opportunities available for students and postgraduates at the Institute.

The JINR University Centre participated in the organization and running of Physics Days; the 6th Robotics Tournament of the Open Upper-Volga Educational Cyber Network and the 1st round of regional competitions in the basics of design and robotics; videoconferences, virtual lectures; popular science lectures; visits for students, schoolchildren, and teachers from the JINR Member States and other countries.

## **GENERAL DATA ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS BY JINR STAFF MEMBERS (from 23.12.2016 to 17.12.2017)**

- Books – 8:

*De Florian D., Kazakov D.I. et al.* Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector: Report of the LHC Higgs Cross Section Working Group / Eds.:

D. De Florian, C. Grojean, F. Maltoni, et al. — Geneva: CERN, 2017. — XX, 849 p.: ill. — (CERN; 2017-002-M) (CERN Yellow Reports: Monographs; V. 2/2017). — Bibliogr.: p. 761–849.

*Bica I., Balasoiu M., Bunoiu M.* Elements of Materials Technology in DC Plasma. — M.: Technosphaera, 2017. — 445 p.: ill. — Bibliogr.: p. 438–445.

*Namsrai Kh.* Universal Formulas for Calculation of Complicated Functional Depending Integrals. — Dubna: JINR, 2017. — 209 p. — Bibliogr.: p. 209.

*Solov'ev E. A.* The Foundations of Quantum Physics: New Interpretation and Systematic Application. — Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2017. — VI, 158 p.: ill. — Bibliogr.: p. 151–158.

*Bednyakov V. A., Russakovich N. A.* The Joint Institute for Nuclear Research in Experimental Physics of Elementary Particles. — Dubna: JINR, 2017. — 75, [2] p.: col. ill. — (JINR; R1-2017-14). — Bibliogr.: p. 53–76. — To the 60th Anniversary of JINR.

*Bogoliubov N. N., Shirkov D. V.* Quantum Fields: Manual. — 4th ed. — M.: URSS, 2017. 393 p.: ill. — (Classic university manual). — Bibliogr.: p. 391–392.

*Smorodinsky Ya. A., Filonovich S. R.* Temperature / Chief ed.: S. R. Filonovich. — 5th ed. — M.: URSS, 2017. — 189 p.: ill. — (Science to Everybody! Masterpieces of science fiction literature. (Physics); Num. 141).

*Uzikov Yu. N.* Selected Chapters of Quantum Theory of Collisions: Manual. — M.: Universitetskaya kniga, 2017. — 258 p.: ill. — Bibliogr.: p. 253–258.

- Journal papers — 830
- Publications in Proceedings of conferences — 427
- Preprints — 64
- Abstracts of theses — 13
- Total: 1342

## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	5
Физика частиц . . . . .	5
Релятивистская ядерная физика . . . . .	8
Физика тяжелых ионов . . . . .	8
Нейтронная ядерная физика . . . . .	9
Физика конденсированных сред . . . . .	10
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	14
Ускорительная тематика . . . . .	17
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	19
Учебно-научный центр . . . . .	22
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	23
Theoretical Physics . . . . .	25
Experimental Physics . . . . .	28
Particle Physics . . . . .	28
Relativistic Nuclear Physics . . . . .	30
Heavy Ion Physics . . . . .	31
Neutron Nuclear Physics . . . . .	32
Condensed Matter Physics . . . . .	33
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	37
Accelerator Topics . . . . .	39
Information Technology and Computer Physics . . . . .	41
JINR University Centre . . . . .	44
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members . . . . .	45

Редакторы: *Е. И. Крупко, Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 12.02.2018.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,94. Уч.-изд. л. 2,92. Тираж 170 экз. Заказ № 59341.

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/)