



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2017-1

**КРАТКИЙ ОБЗОР  
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В 2016 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW  
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS  
OBTAINED IN 2016  
AT THE JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна 2017



## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Для исследования Стандартной модели (СМ) при энергиях, недоступных ускорителям, был разработан специализированный открытый компьютерный код (*mr* — *Matching & Running*) для нахождения значений, зависящих от масштаба энергий («бегущих») параметров СМ. Код позволяет моментально выполнить объемные расчеты, касающиеся вопроса стабильности вакуума СМ, с учетом новых экспериментальных данных. Код может служить отправной точкой для исследования различных моделей «новой» физики. Впервые найдены лидирующие четырехпетлевые поправки к уравнению эволюции для сильной константы связи. Были учтены вклады взаимодействия фермионов СМ с полем Хиггса, а также самодействия последнего. Показано, что найденными вкладками нельзя пренебрегать по сравнению с полученным недавно пятипетлевым результатом в «чистой» квантовой хромодинамике.

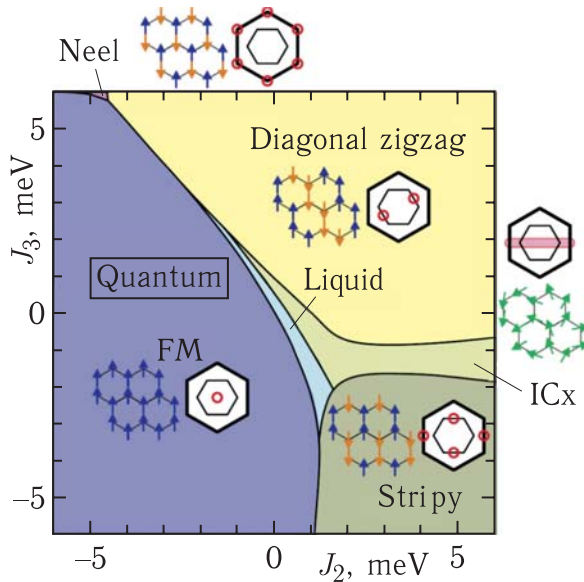
- *Kniehl B. A., Pikelner A. F., Veretin O. L.* *mr: a C++ Library for the Matching and Running of the Standard Model Parameters* // *Comput. Phys. Commun.* 2016. V. 206. P. 84–96.
- *Bednyakov A. V., Pikelner A. F.* *Four-Loop Strong Coupling Beta-Function in the Standard Model* // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 762. P. 151–156.

При теоретическом исследовании деления тяжелых ядер обнаружено, что эволюция от одно- к трех-, а затем к двугорбому массовому и зарядовому распределением фрагментов деления происходит при изменении массы ядра на несколько единиц. Предложенная модель предсказывает наличие симметричных и асимметричных мод деления с равной вероятностью при числе нейтронов  $N = 136$ , независимо от заряда делящейся системы. Важным результатом является сохранение асимметричных форм распределения массы и заряда осколков деления при достаточно высоких энергиях возбуждения делящегося ядра.

- *Pasca H. et al.* *Energy-Dependence of Mass, Charge, Isotopic, and Energy Distributions in Neutron-Induced Fission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$*  // *Phys. Rev. C.* 2016. V. 93. P. 054602.

- *Pasca H. et al.* Possible Origin of Transition from Symmetric to Asymmetric Fission // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 760. P. 800.

Оксиды иридия с гексагональной магнитной решеткой представляют собой новое семейство функциональных магнитных материалов для реализации на их основе квантовых компьютерных вычислений.



Магнитная фазовая диаграмма гексагонального оксида иридия  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$

Возможность такой реализации предполагает наличие топологического спин-жидкостного фазового состояния магнитной структуры в пределе низких температур. В данной работе детально исследована обобщенная квантовая спиновая модель Китаева для одного из представителей указанного семейства,  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$ , рассчитана его фазовая диаграмма (рисунок) и найдена область модельных параметров для реализации топологической спин-жидкостной фазы.

- *Nishimoto S. et al.* Strongly Frustrated Triangular Spin Lattice Emerging from Triplet Dimer Formation in Honeycomb  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$  // *Nature Commun.* 2016. V. 7. P. 10273.

Отражение электромагнитных волн от листа графена подчиняется уравнениям Максвелла с условиями сшивки, в которые входит поляризационный тензор. В модели Дирака для  $2 + 1$ -мерных фермионов, взаимодействующих с  $3 + 1$ -мерными фотонами, поляризационный тензор вычислен в однопетлевом приближении при конечной температуре, ненулевой массе носителей и ненулевом химическом потенциале. Коэффициенты отражения графена, выраженные через компоненты поляризационного тензора, имеют полюс при частоте, равной частоте поверхностного плазмона. Физически это соответствует электромагнитным колебаниям, которые свободно распространяются вдоль поверхности раздела и экспоненциально спадают в нормальном к ней направлении. Изучено влияние конечной температуры и конечного химического потенциала на поверхностные плазмоны.

- *Bordag M., Pirozhenko I. G.* QED and Surface Plasmons on Graphene // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2016. V. 31. P. 1641027.

- *Bordag M., Pirozhenko I. Surface Plasmon on Graphene at Finite  $T$  // Intern. J. Mod. Phys. B. 2016. V. 30. P. 1650120.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

### Физика частиц

Одно из важных достижений группы ОИЯИ в коллаборации COMPASS (ЦЕРН) — завершение работ по созданию нового электромагнитного калориметра. Этот детектор, предложенный и разработанный в ОИЯИ, является уникальным прибором: вместо традиционных фотоэлектронных умножителей в нем применены самые современные фотоприемники — микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД) с ультравысокой плотностью пикселей (до 15 тыс./мм<sup>2</sup>).

Коллаборацией COMPASS при активном участии ОИЯИ были выполнены и опубликованы наиболее точные на сегодняшний день измерения множественностей заряженных каонов. Результаты получены из анализа процессов рассеяния мюонов с энергией 160 ГэВ на изоскалярной LiD-мишени. Экспериментальные данные перекрывают кинематическую область:  $1 < Q^2 < 60$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>,  $0,004 < x_{Bj} < 0,4$ ,  $0,1 < y < 0,7$ ,  $0,20 < z < 0,85$  и  $W^2 > 5$  ГэВ/с<sup>2</sup> — по инвариантной массе рожденных адронов. Результаты по сумме множественностей  $K^+$  и  $K^-$ , проинтегрированных по  $z$ , для области больших значений  $x$ , отнесенные к нестранным функциям фрагментации, показывают превышение над полученными ранее значениями (параметризация DSS).

- *COMPASS Collab. Multiplicities of Charged Kaons from Deep-Inelastic Muon Scattering off the Isoscalar Target // CERN-EP/2016-206, hep-ex/1608.06760; PLB (submitted).*

В прошедшем году по данным детектора BOREXINO опубликованы ограничения на нейтринные потоки, связанные с гамма-всплесками [1]. На статистике  $(1422 \pm 67)$  кг·сут данных, набранных на прототипе детектора DarkSide, получены ограничения на WIMP-нуклонное спиннезависимое сечение. Данное сечение составляет меньше  $2 \cdot 10^{-44}$  ( $8,6 \cdot 10^{-44}$ ,  $8,0 \cdot 10^{-43}$ ) см<sup>2</sup> для частиц WIMP с массой 100 ГэВ (100 ГэВ, 10 ТэВ) на 90 %-м уровне достоверности [2]. Для детектора DS20k разработан программный модуль для моделирования сигналов с кремниевых фотоумножителей.

1. *Agostini M. et al.* A Search for Low-Energy Neutrino and Antineutrino Signals Correlated with Gamma-Ray Bursts with BOREXINO // *Astropart. Phys.* 2017. V. 86. P. 11–17.
2. *Agnes P. et al.* Results from the First Use of Low Radioactivity Argon in a Dark Matter Search // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 081101.

В эксперименте NEMO-3 было изучено 7 изотопов (Mo-100, Se-82, Te-130, Cd-116, Nd-150, Zr-96, Ca-48) с одновременной записью энергии и треков событий двойного бета-распада. За счет своей большей массы выделялись результаты по исследованию Mo-100 и Se-82. За время набора данных не наблюдалось событий безнейтринного двойного бета-распада, были получены только ограничения на эффективную массу нейтрино, которые являются одними из лучших в мире на сегодняшний день, особенно для упомянутых изотопов Mo-100 и Se-82.

- *Arnold R. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 112008.
- *Arnold R. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 94. P. 072003.
- *Arnold R. et al.* arXiv: 1610.03226; *Phys. Rev. D.* (submitted).

В эксперименте ATLAS проведены исследования по поиску новой физики в резонансах высокой массы в мюонном и электронном каналах распада. Для поиска использовались данные протон-протонных соударений  $13 \text{ фб}^{-1}$ , полученных при энергии  $13 \text{ ТэВ}$  в с. ц. м. в 2015 и 2016 гг. Никаких значимых отклонений от Стандартной модели не было обнаружено. Верхний предел при 95 %-м уровне достоверности на сечение рождения с учетом вероятности распада на пару лептонов в зависимости от модели был поставлен в интервалах массы от 3,36 до 4,05 ТэВ.

Исследована возможность поиска суперсимметричных частиц глюино в их распаде с конечным состоянием, содержащим электрон или мюон, несколько адронных струй и большое значение потерянной поперечной энергии в событиях протон-протонных соударений при энергии  $13 \text{ ТэВ}$  в с. ц. м. Объем данных, собранных в 2015 г., соответствует интегральной светимости в  $3,2 \text{ фб}^{-1}$ . Было применено шесть различных наборов критериев отбора. Для всех шести данные хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной модели. Самое большое отклонение составляет  $2,1\sigma$ .

Проведены исследования по поиску новых резонансов с массой более  $250 \text{ ГэВ}$ , распадающихся на  $Z$ -бозон и фотон.  $Z$ -бозон рассматривался как в распадах на легкие заряженные лептоны ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ), так и в распадах на адроны. Данные хорошо

согласуются с ожидаемым фоном во всем спектре рассматриваемых масс, и предел на сечение рождения с учетом вероятности распада на  $Z\gamma$  для узкого скалярного бозона был поставлен в интервале масс от 250 ГэВ до 2,75 ТэВ.

- *Bednyakov V. A., Eletsikh I. V., Chizhov M. V. // ATLAS-CONF-2016-045.*
- *Khramov E. V. // Phys. J. C. 2016. V.76. P.565.*
- *Khramov E. V. // Phys. Lett. B. 2017. V.764. P.11.*

### **Релятивистская ядерная физика**

Группой ОИЯИ в рамках исследования фемтоскопических корреляций пар каонов, рожденных в Pb–Pb-столкновениях при энергии 2,76 ТэВ на установке ALICE (ЦЕРН), были получены новые результаты для одномерных фемтоскопических корреляций, показавшие хорошее согласие с предсказаниями Р. Ледницкого и В. Любошица (ОИЯИ) (Sov. J. Nucl. Phys. 1982. V. 35).

- *Adam J. et al. (ALICE Collab.). Centrality Dependence of Pion Freez-Out Radii in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Rev. C. 2016. V.93. P.024905.*
- *Adam J. et al. (ALICE Collab.). Multipion Bose–Einstein Correlations in  $pp$ ,  $p$ -Pb and Pb–Pb Collisions at LHC // Phys. Rev. C. 2016. V.93. P.054908.*


### **Физика тяжелых ионов**

Завершен цикл экспериментов по синтезу новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева с атомными номерами 115, 117 и 118. Решением Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) от 28 ноября 2016 г. новым элементам присвоены названия и символы:

- московий (Moscovium) и символ Mc для элемента 115;
- теннессин (Tennessine) и символ Ts для элемента 117;
- оганесон (Oganesson) и символ Og для элемента 118.

Синтез этих элементов был впервые осуществлен в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ, являющейся признанным мировым лидером в области синтеза и изучения свойств сверхтяжелых ядер. Всего за последние 16 лет в ОИЯИ были открыты 5 элементов с атомными номерами 114–118 и, таким образом, завершен седьмой период таблицы Д. И. Менделеева.





		Бор 5 10,81 Boron	Углерод 6 12,011 Carbon	Азот 7 14,007 Nitrogen	Кислород 8 15,999 Oxygen	Фтор 9 18,998 Fluorine	Неон 10 20,18 Neon	
		Алюминий 13 26,982 Aluminum	Кремний 14 28,085 Silicon	Фосфор 15 30,974 Phosphorus	Сера 16 32,06 Sulfur	Хлор 17 35,45 Chlorine	Аргон 18 39,948 Argon	
Никель 28 58,693 Nickel	Медь 29 63,546 Copper	Цинк 30 65,38 Zinc	Галлий 31 69,723 Gallium	Германий 32 72,630 Germanium	Мышьяк 33 74,922 Arsenic	Селен 34 78,971 Selenium	Бром 35 79,904 Bromine	Криптон 36 83,798 Krypton
Палладий 46 106,42 Palladium	Серебро 47 107,87 Silver	Кадмий 48 112,41 Cadmium	Индий 49 114,82 Indium	Олово 50 118,71 Tin	Сурьма 51 121,76 Antimony	Теллур 52 127,60 Tellurium	Йод 53 126,90 Iodine	Ксенон 54 131,29 Xenon
Платина 78 195,08 Platinum	Золото 79 196,9 Gold	Ртуть 80 200,59 Mercury	Таллий 81 204,38 Thallium	Свинец 82 207,2 Lead	Висмут 83 208,98 Bismuth	Полоний 84 [209]	Астат 85 [210]	Радон 86 [222]
Дармштадтий 110 [281]	Ренгений 111 [282]	Коперниций 112 [285]	Нихоний 113 [286]	Флеровий 114 [289]	Московский 115 [290]	Ливерморий 116 [293]	Теннесси 117 [294]	Оганесон 118 [294]

Часть Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева (2016 г.)

- *Оганесян Ю. Ц., Дмитриев С. Н.* Синтез и исследование свойств сверхтяжелых атомов. Фабрика сверхтяжелых элементов // Усп. химии. 2016. Т. 85. С. 901.
- *Utyonkov V. et al.* The Discovery of Elements 113 to 118 // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P. 06003.
- *Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu.* Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
- IUPAC Press Release. <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>

Успешно выполнен пилотный эксперимент международной программы EXPERT (EXotic Particle Emission and Radioactivity by Tracking): были открыты новые изотопы  $^{29}\text{Cl}$  и  $^{30}\text{Ar}$ , впервые наблюдался трехпротонный  $\beta$ -задержанный распад  $^{31}\text{Ar}$ . Было показано, что двухпротонный распад основного состояния  $^{30}\text{Ar}$  протекает в уникальном «переходном» режиме, имеющем аналогию с физикой фазовых переходов, что позволило предложить новый непрямой метод определения времен жизни ядер — протонных распадчиков [1–3].

1. *Golubkova T. A. et al.* Transition from Direct to Sequential Two-Proton Decay in s-d Shell Nuclei // Physics. Lett. B. 2016. V. 762. P. 263.



2. EXPERT Technical Design Report: [http://aculina.jinr.ru/pdf/EXPERT\\_TDR\\_revised5.pdf](http://aculina.jinr.ru/pdf/EXPERT_TDR_revised5.pdf)
3. *Grigorenko L. V. et al.* Studies of Light Exotic Nuclei in the Vicinity of Neutron and Proton Drip Lines at FLNR JINR // Physics — Uspekhi. 2016. V. 59. P. 321; УФН. 2016. Т. 186. С. 337.

### Нейтронная ядерная физика

В рамках проекта ТАНГРА были проведены измерения угловых корреляций  $\gamma$ -квантов, образующихся в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах  $^{12}\text{C}$ . В качестве источника меченых нейтронов использовался портативный нейтронный генератор ИНГ-27 (разработанный и выпускаемый во ВНИИА (Москва)) со встроенным 64-пиксель-

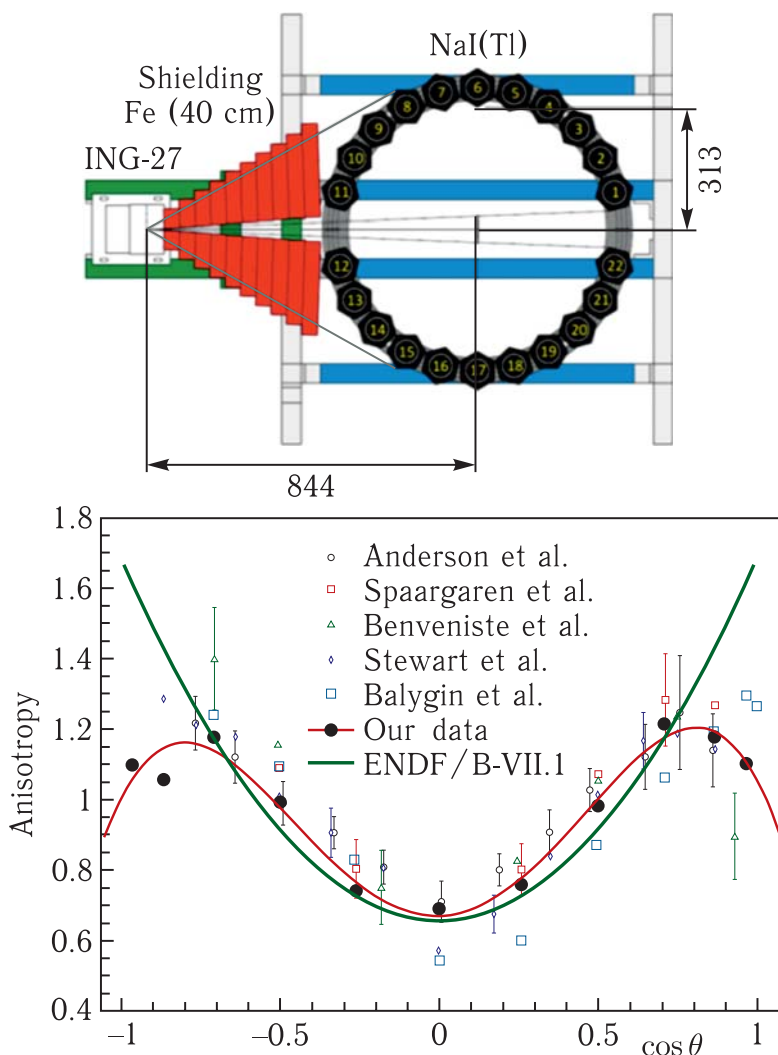


Схема экспериментальной установки (сверху); измеренная угловая зависимость в сравнении с другими данными (снизу)

ным кремниевым  $\alpha$ -детектором, позволяющий генерировать пучки меченых нейтронов с привязкой как по направлению вылета нейтрона, так и по времени его испускания. Регистрация  $\gamma$ -квантов характеристического ядерного излучения  $^{12}\text{C}$  осуществлялась с помощью спектрометрической системы, состоящей из 22  $\gamma$ -детекторов на основе кристаллов  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , расположенных вокруг мишени. Экспериментальные данные описаны формулой  $W(\theta) = 1 + a \cos^2 \theta - b \cos^4 \theta$  с коэффициентами  $a = 2,47 \pm 0,10$  и  $b = 2,04 \pm 0,12$ . Полученная угловая зависимость сильно отличается от той, которая используется в библиотеках по нейтронным данным (рисунок).

- *Bystritsky V.M. et al.* Angular Distribution of 4.43-MeV  $\gamma$ -Rays Produced in Inelastic Scattering of 14.1-MeV Neutrons by  $^{12}\text{C}$  Nuclei // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 4. P. 504; *Быстрицкий В.М. и др.* // *Письма в ЭЧАЯ.* 2016. Т. 13, вып. 4.

### Физика конденсированных сред

Оксиды железа играют важную роль в формировании магнитных и других физических свойств Земли и находят широкий спектр технологических применений. Недавно в условиях комбинированного воздействия высокого давления и температуры был синтезирован новый оксид железа —  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ , который предположительно может существовать в слоях верхней мантии Земли. В результате комплексного исследования физических свойств, а также атомной и магнитной структур с применением методов нейтронной дифракции на реакторе ИБР-2 в этом соединении был обнаружен новый тип зарядово-упорядоченного состояния с формированием димерных и тримерных электронных состояний. Фазовый переход в это состояние сопровождается резким скачком электрического сопротивления и последующим изменением симметрии магнитного упорядочения с коллинеарного антиферромагнитного (АФМ) на скошенное АФМ с ферромагнитной (ФМ) компонентой, а также изменением характера модуляции атомной структуры (рисунок).

- *Ovsyannikov S.V. et al.* Charge Ordering Transition in Iron Oxide  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ , Involving Competing Dimer and Trimer Formation // *Nat. Chem.* 2016. V. 8. P. 501.

В рамках усовершенствования работы литиевых аккумуляторов проведена серия экспериментов по нейтронной рефлектометрии на реакторе ИБР-2 для изучения электрохимических границ раздела жидкий электролит/твердый электрод (рисунок).

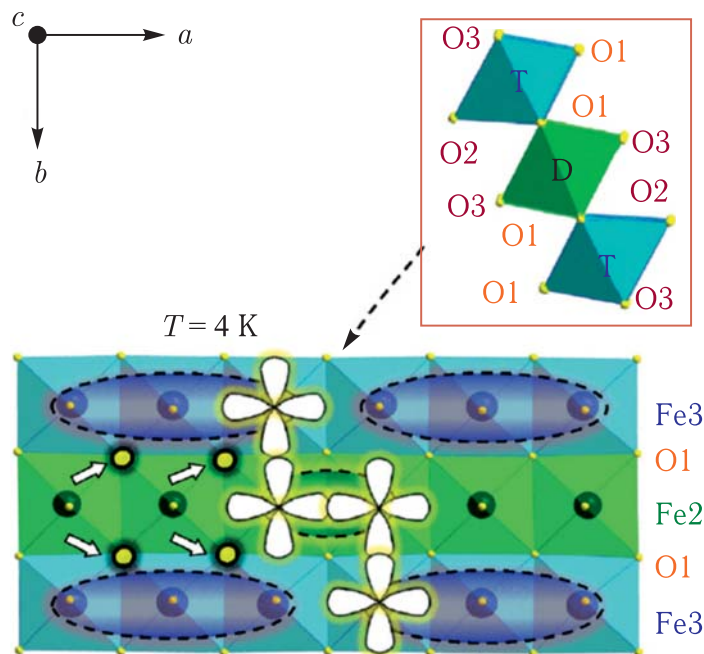
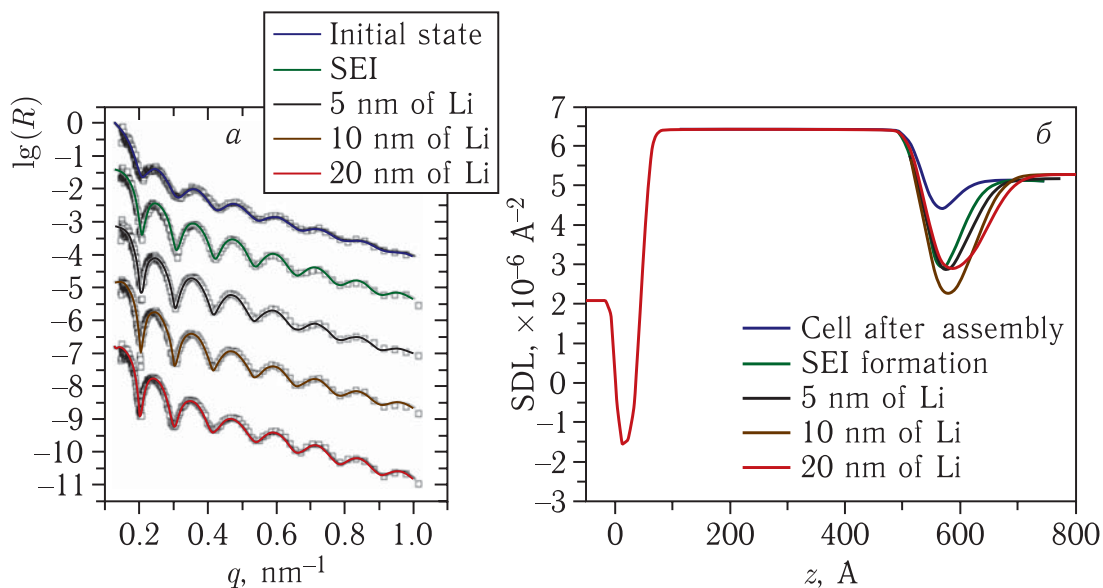


Иллюстрация механизма формирования димерных и тримерных электронных состояний в оксиде  $\text{Fe}_4\text{O}_5$



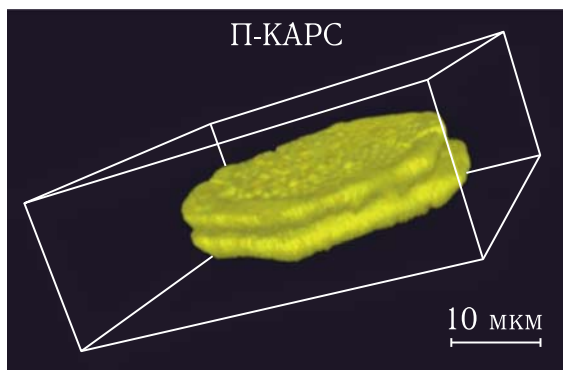
а) Экспериментальные кривые зеркального отражения нейтронов (точки) от медного электрода на границе с электролитом при различном режиме подачи тока и напряжения. б) Полученные из аппроксимации профили плотности длины рассеяния для различных режимов с указанием характерной толщины слоя осажденного лития

Из анализа зеркального отражения было выявлено образование твердоэлектролитной интерфазы (Solid-Electrolyte Interphase, SEI) на поверхности электрода (Cu), а также прослежено электроосаждение лития и рост паразитных дендритных образований в процессе работы электрохимической ячейки. Полученные про-

фили плотности длины рассеяния перпендикулярно поверхности электрода позволили проанализировать различные режимы образования SEI, а также формирование и рост нанометровых слоев лития различной шероховатости на изначально сформированном SEI. Показано, что нейтронная рефлектометрия может эффективно использоваться для *in situ* характеристики осаждения лития на металлические электроды.

- *Avdeev M. V. et al. Monitoring of Lithium Plating by Neutron Reflectometry // Appl. Surf. Sci. 2016 (submitted).*

Структурное исследование кристаллов белков является серьезной проблемой из-за трудностей, связанных с ростом, детектированием и визуализацией кристаллов, пригодных для рентгеновской кристаллографии. Для устранения этого пробела был применен метод поляризованного когерентного антистоксова рассеяния света (П-КАРС) с целью визуализации кристаллов мем-



Трехмерное П-КАРС-изображение двойникового кристалла бактериородопсина

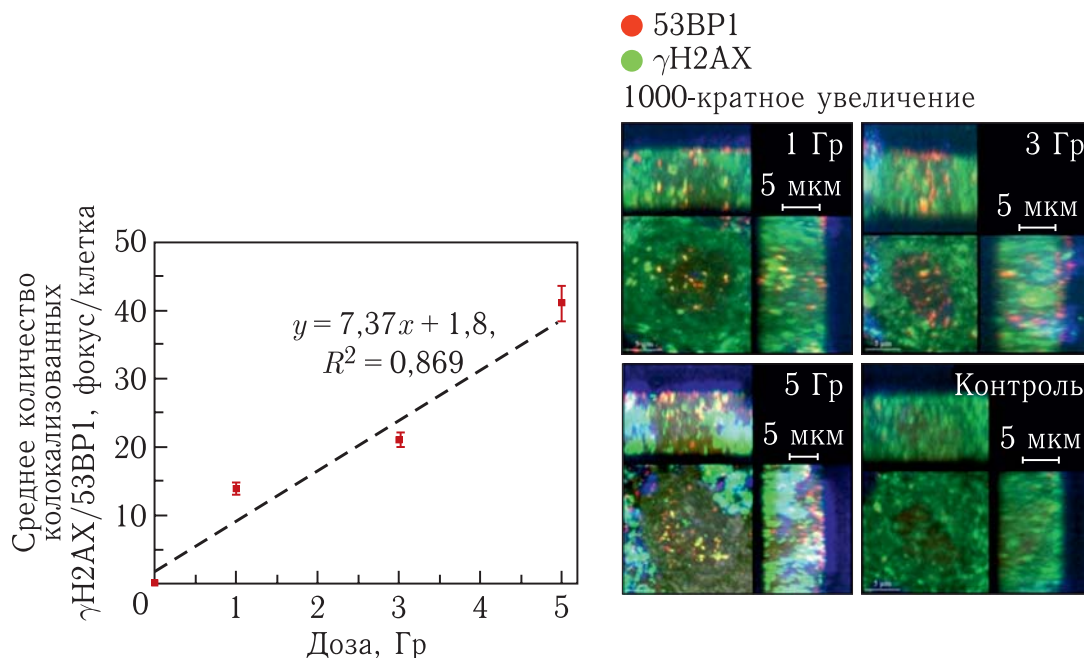
бранных белков, выращенных в мезофазе (рисунок).

Впервые в данной работе показано, что кристаллы бактериородопсина в оптически непрозрачных матрицах кристаллизации могут быть визуализированы методом колебательной КАРС-микроскопии с высокой чувствительностью, контрастом и субмикронным пространственным разрешением.

- *Arzumanyan G. M. et al. Highly Sensitive Coherent anti-Stokes Raman Scattering Imaging of Protein Crystals // JACS. 2016. V. 138(41). P. 13457–13460.*

## РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен качественный анализ морфологических нарушений в нейронах Пуркинье коры мозжечка крыс, легко идентифицируемых без использования специфических морфологических маркеров благодаря уникальной анатомической организации коры мозжечка. Установлено, что максимальное количество фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 формируется в нейронах Пуркинье через 1 ч после облучения (21  $\gamma$ H2AX/53BP1-фокус на ядро) и уже через 4 ч



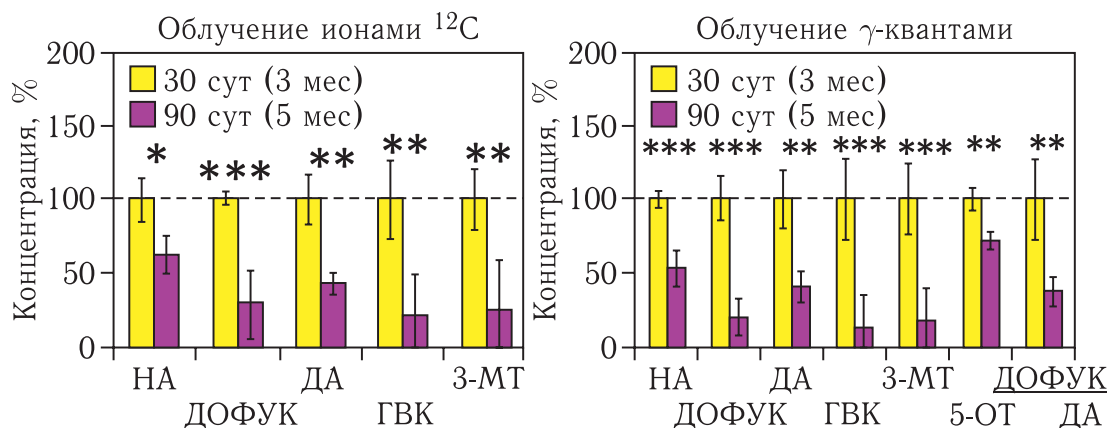
Дозовая зависимость количества радиационно-индуцированных фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 в ядрах клеток Пуркиньюе через 1 ч после облучения

число фокусов уменьшается на 50%. Через 24 ч после облучения в ядрах остается только 2,5 фокуса на ядро, что свидетельствует об эффективной репарации ДР ДНК. Показано, что дозовая зависимость частоты образования фокусов  $\gamma$ H2AX/53BP1 через 1 ч после облучения  $\gamma$ -квантами носит линейный характер (рисунок).

- Буланова Т. С. и др. Индукция и репарация двунитевых разрывов ДНК в клетках коры мозжечка крыс при действии  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  // Письма в ЭЧАЯ (направлено).

Выполнен цикл работ по изучению нейрохимических показателей мозга крыс после воздействия ионов углерода и  $\gamma$ -квантов в дозе 1 Гр. Показано, что воздействие тяжелых заряженных частиц индуцирует изменения в работе норадреналин-, дофамин- и серотонинергической системы через 30 и 90 сут после облучения (рисунок). При этом наиболее выраженные различия у облученных и контрольных животных наблюдались в префронтальной коре, прилежащем ядре и гипоталамусе, что указывает на важную роль этих структур в реализации поздних эффектов воздействия радиации на функции центральной нервной системы. Проведено сопоставление результатов нейрохимических исследований с показателями поведения животных после облучения. Обнаружено, что наряду с изменениями в метаболизме моноаминов воздействие ионов  $^{12}\text{C}$  приводит к модификации двигательной и





Распределение моноаминов и их метаболитов в префронтальной коре головного мозга крыс различных возрастных категорий через 30 и 90 сут после облучения ускоренными ионами углерода ( $^{12}\text{C}$ ) с энергией 500 МэВ/нуклон и  $\gamma$ -квантами в дозе 1 Гр ( $\pm\text{SD}$ ; \*\* —  $p \leq 0,05$ ; \*\*\* —  $p \leq 0,01$ ). В скобках указан возраст животных на момент исследования

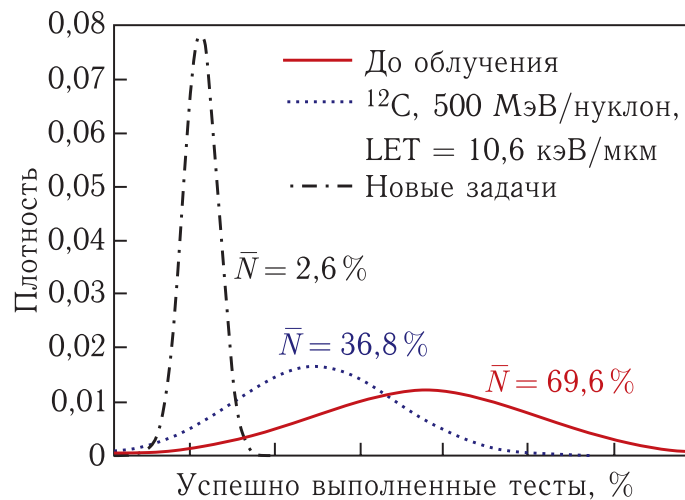
исследовательской активности животных, а также к изменениям показателей тревожности у облученных крыс.

- *Belov O. et al.* Exposure to  $^{12}\text{C}$  Particles Alters the Normal Dynamics of Brain Monoamine Metabolism and Behaviour in Rats // *Physica Medica: Eur. J. Med. Phys.* 2016. V. 32, No. 9. P. 1088–1094.
- *Белокопытова К.В. и др.* Динамика обмена моноаминов в структурах головного мозга крыс в поздние сроки после облучения ускоренными ионами углерода // *Нейрохимия.* 2016. Т. 33, № 2. С. 147–155.
- *Белокопытова К.В. и др.* Динамика нейромедиаторного обмена у крыс в поздние сроки после облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  // *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2016 (в печати).

Получены данные о воздействии высокоэнергетических протонов и ускоренных ионов углерода  $^{12}\text{C}$  на когнитивные функции обезьян и содержание моноаминов и их метаболитов в периферической крови. Показано, что облучение головы обезьян протонами в дозе 3 Гр не вызывает существенных изменений их когнитивных функций. В то же время после воздействия ионов углерода в дозе 1 Гр наблюдается достоверное снижение когнитивных функций и концентрации метаболитов серотонина в крови у обезьян возбудимого неуравновешенного типа высшей нервной деятельности (рисунок).

- *Беляева А.Г. и др.* Воздействие высокоэнергетических протонов и ионов углерода  $^{12}\text{C}$  на когнитивные функции обе-





Плотность распределения показателей когнитивных функций обезьян

и содержание моноаминов и их метаболитов в периферической крови // *Нейрохимия*. 2017. Т. 34, №1. С. 1–9.

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

Сделан ключевой шаг в реализации программы исследований с пучками поляризованных легких ядер на комплексе NICA ОИЯИ — получены пучки поляризованных дейтронов, обеспечена оперативная поляриметрия на этапах инжекции в нуклотрон, в режиме циркулирующего в нуклотроне ускоренного и выведенного пучка.

- *Kovalenko A. D. et al.* Current Results on Implementation of the Nuclotron/NICA R&D Program with Polarized Beams. Presented at SPIN2016, Urbana/Champagne, IL, USA, September, 2016.
- *Krivenkov D. O. et al.* Polarimetry at Nuclotron. Presented at SNP School 2016, Tohoku University, Sendai, Japan, November, 2016.

Завершены работы по созданию линейного ускорителя тяжелых ионов (HILac). На выходе ускорителя был получен пучок ионов  $C^{2+}$  от лазерного источника с проектной энергией и коэффициентом трансмиссии по току, близким к проектному.

Созданный линейный ускоритель тяжелых ионов является первым ускорителем такого класса в странах-участницах ОИЯИ. В нем впервые используется система высокочастотного питания на основе твердотельных транзисторных усилителей. Для стран-участниц ОИЯИ это заметное достижение в области ускорительной науки и техники — силами большой международной



Начальная часть линейного ускорителя тяжелых ионов коллайдерного комплекса NICA

ной коллаборации создана уникальная установка с параметрами, соответствующими передовому мировому уровню.

- *Butenko A. et al.* Commissioning of Heavy Ion Linear Accelerator (HILAC) of the NICA Project // Proc. of RuPAC 2016, Saint-Petersburg, Russia.

Ускоритель, предназначенный для инжекции пучка в существующий ускорительный комплекс нуклотрон, был спроектирован совместно с ИТЭФ ГРНЦ КИ и НИЯУ МИФИ и изготовлен в ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина (Снежинск). В создании систем диагностики и управления принимали участие специалисты из ИЯИ РАН.

В 2016 г. проведены два сеанса работы комплекса нуклотрон по ускорению поляризованных пучков дейтронов с использованием нового ускорителя. Создание такой установки является заметным достижением для российской ускорительной физики и техники.

- *Trubnikov G. et al.* Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron-NICA // Proc. of IPAC'16, Busan, Korea, 2016.
- *Trubnikov G. et al.* Commissioning of New Light Ion RFQ Linac and First NuclotronRun with New Injector // RuPAC 2016, Saint-Petersburg, Russia, 2016.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В течение 2016 г. активно развивался уникальный центр хранения, обработки и анализа данных глобальной грид-инфраструктуры — Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ (МИВК), являющийся одной из базовых установок Института. Было обработано 13 % событий, полученных в эксперименте CMS в ЦЕРН, что позволило ОИЯИ занять второе место в мире среди центров первого уровня. Этот центр является одной из основных составляющих будущего вычислительного комплекса для мегапроекта NICA.

- *Astakhov N. S. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5. P. 714–717.*

Для объединения облачных ресурсов организаций-партнеров из стран-участниц ОИЯИ с целью решения совместных задач, а также для распределения пиковых нагрузок по интегрированным ресурсам был разработан специальный драйвер. Он позволяет объединять ресурсы партнерских организаций, развернутые в облаке как на базе OpenNebula, так и других облачных платформ, которые поддерживают «open cloud computing interface» (ОССИ-интерфейс). С облаком ОИЯИ интегрированы облака Института физики Национальной академии наук Азербайджана (Баку), Института теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Национальной академии наук Украины (Киев), Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова (Москва). Кроме того, облако ОИЯИ интегрировано в Федеративное облако Европейской грид-инфраструктуры (ЕГИ), что делает возможным взаимное использование облачных ресурсов ОИЯИ и ЕГИ.

- *Баранов А. В. и др. // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 3. С. 583–590.*

Предложен новый алгоритм поиска треков-кандидатов для реконструкции событий в эксперименте VM@N (Baryonic Matter at Nuclotron). Реконструкция событий — одна из наиболее важных задач по обработке экспериментальных данных физики высоких энергий. Она состоит из поиска треков и оценки их параметров в трековых детекторах эксперимента, что требует огромного числа переборов всех хитов (реконструированных откликов детектора), чтобы найти те из них, которые принадлежат одному треку.

Авторами предлагается новое координатное преобразование, переводящее экспериментальные данные в пространство нормированных координат, в котором хиты, соответствующие одному треку, группируются в компактные горизонтальные отрезки. Для оценки параметров найденные треки-кандидаты аппроксимируются спиралями Архимеда. Ввиду компактности данных в пространстве нормированных координат предложенный алгоритм может быть эффективно распараллелен на современных вычислительных архитектурах.

- *Baranov D. et al.* // EPJ Web Conf. 2016. V. 108. P. 02012.

Разработана программа глауберовских расчетов для экспериментов на коллайдере NICA. Согласно расчетам, проведенным по новой программе, геометрические характеристики взаимодействий ядер золота с ядрами золота при энергиях RHIC и NICA (5–10 ГэВ в системе центра масс  $NN$ -соударений) различаются не более чем на 5–7%. Поэтому возможные изменения физических характеристик соударений на NICA могут быть связаны с изменениями физики взаимодействий.

- *Галоян А. С., Ужинский В. В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. С. 368.

Разработан новый алгоритм реконструкции трек-сегментов в катодно-стриповых камерах. Были получены результаты сравнения работы стандартного и нового алгоритмов для различных типов моделированных данных. С использованием нового алгоритма трек-сегменты реконструируются с большей точностью и эффективностью, особенно в условиях высокой светимости на Большом адронном коллайдере и при больших поперечных импульсах частиц, проходящих через торцевую часть мюонной системы. Алгоритм был включен в официальный пакет реконструкции эксперимента CMS в июле 2016 г.

- *Voytishin N. et al.* // EPJ Web Conf. 2016. V. 108. P. 02023.

Рассмотрена модель Намбу–Йона-Лазинио с петлей Полякова в присутствии векторного взаимодействия и с дополнительной связью между кварковым и калибровочным секторами. Изучено влияние данных взаимодействий на фазовую структуру КХД: киральный фазовый переход первого рода, возникающий при конечном химическом потенциале, и связанная с ним критическая конечная точка исчезают при достаточно высоких значениях константы векторного взаимодействия  $G_V$ . Присутствие дополнительной связи между кварками и глюонами приводит к

росту критического значения константы векторного взаимодействия  $G_V$ , при котором в термодинамической системе происходит исчезновение фазового перехода первого рода. Показано, что векторное взаимодействие влияет на кривизну линии фазового перехода типа «кроссовер» в плоскости  $T-\mu$  вблизи  $\mu = 0$  как с наличием дополнительного взаимодействия между кварками и глюонами, так и без него.

- *Friesen A., Kalinovsky Yu., Toneev V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 668, No. 1. P. 012128.

Проведены исследования фосфолипидной транспортной наносистемы (ФТНС) переноса лекарств в рамках модели разделенных формфакторов (РФФ) с использованием метода асинхронной дифференциальной эволюции (АДЭ). Базовые параметры однослойных везикул ФТНС фитируются к экспериментальным данным малоуглового синхротронного рентгеновского рассеяния. Структура наночастиц ФТНС проанализирована в зависимости от концентрации мальтозы в воде. Численные результаты демонстрируют эффективность параллельной реализации на основе технологии МРІ, а также преимущество АДЭ-подхода перед другими известными оптимизационными процедурами.

- *Zemlyanaya E. et al.* // J. Phys. C. S. 2016. V. 724. P. 012056.

## УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

В 2016 г. в Учебно-научном центре проходили обучение 440 студентов базовых кафедр МГУ, МФТИ, МИФИ, университета «Дубна» и университетов стран-участниц. Летние учебные и производственные практики были организованы для 238 студентов вузов Армении, Белоруссии, Грузии, Монголии и РФ.

В трех этапах ежегодной летней студенческой практики по направлениям исследований ОИЯИ принимал участие 161 представитель Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Египта, Кубы, Польши, Румынии, Сербии, Словакии, Чехии и ЮАР.

40 студентов и аспирантов из вузов Белоруссии, Египта, Казахстана, Кубы, Польши, Румынии, РФ, ЮАР в течение 6–8 недель с июня по октябрь выполняли учебно-исследовательские проекты в лабораториях Института в рамках летней студенческой программы.

Летняя школа для учителей физики из стран-участниц ОИЯИ в Дубне проходила в два этапа: для 26 преподавателей и 8 учащихся из Болгарии, РФ и Украины и 20 преподавателей из



Москвы. В осенней научной школе для российских учителей физики в ЦЕРН принимали участие 43 преподавателя из Армении, Казахстана, Молдавии, РФ, Украины, Швейцарии. Программы школ включали научно-популярные лекции ведущих специалистов ОИЯИ и ЦЕРН, экскурсии, знакомство с проектной работой в физическом практикуме, круглый стол по обсуждению современных проблем физики и методики преподавания физики в школе.

Две экспозиции об основных направлениях исследований и флагманских проектах Института представил ОИЯИ в Москве на VI Всероссийском фестивале НАУКА 0+.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении «Дней физики» для детей и взрослых, 5-го турнира по робототехнике Открытой Верхневолжской образовательной кибернетической сети, организовывал видеоконференции, виртуальные лекции, проводил ознакомительные и научно-популярные лекции, а также экскурсии для студентов и школьников городов РФ и Германии.

## **ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 01.01.2016 по 22.12.2016)**

- Книги — 14:

*Битюков С. И., Красников Н. В.* Применение статистических методов для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере. — М.: URSS, 2013. — 268, [1] с.: ил. — Библиогр.: с. 257–[269].

*Блохинцев Д. И., Драбкина С. И.* Теория относительности А. Эйнштейна. — Изд. 2-е. — М.: URSS, 2015. — 106 с.: ил. — (Науку — всем! Шедевры научно-популярной литературы. (Физика); Вып. 99).

*Бутцев В. С.* Наше время. — М.: Академика, 2015. — 255 с.: цв. ил. — Библиогр.: с. 240–245.

*Загребаев В. И.* Ядерные реакции с тяжелыми ионами: учебное пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 184 с.: ил. — (Учебно-научный центр ОИЯИ. УНЦ; 2015-57). — Библиогр.: с. 183–184.

*Исаев А. П., Рубаков В. А.* Теория групп и симметрий. Конечные группы. Группы и алгебры Ли. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 361 с. — (ОИЯИ; 2016-61). — Библиогр.: с. 354–356.

*Малахов А. И.* Люди высоких энергий: документальная повесть. — М.: Академика, 2016. — 253, [2] с.: цв. ил.



*Орелович Л. Н.* Путешествие из Петербурга в Дубну длиною в жизнь... — СПб.: Культура, 2015. — 305, [2] с.: цв. ил.

*Пенционжкевич Ю. Э., Калпакчиева Р. Г.* Легкие ядра у границы нейтронной стабильности: посвящается 60-летию Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 383 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2015-12). — Библиогр. в конце глав. — В надзаг.: Объединенный институт ядерных исследований.

*Сухов А. М.* Мемуары в стихах. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 140 с.: ил.

*Таран Ю. В.* Вспоминая ФЛ, вспоминаешь себя. Вспоминая себя, вспоминаешь ФЛ: Mix of Science & Life. Part One, 1956–1966. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 74, [1] с.: ил. — (ОИЯИ; РЗ-2015-102). — Библиогр.: с. 58–60; Список изобретений Ю. В. Тарана: с. 65–66. — В надзаг.: К 60-летию ОИЯИ.

Тот самый «Импульс»: избранное: 50-летию ЛВТА (ЛИТ) посвящается / В. П. Шириков, А. А. Корнейчук, Г. Л. Мазный, Е. Ю. Мазепа, Л. Крюков, А. Кавченко; Авт.-сост.: А. А. Расторгуев. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 287 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2016-52).

*Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П.* Технологии интеллектуальных вычислений. Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления: Учебно-методическое пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2015. — 246 с.: ил. — (Учебно-методические пособия Учебно-научного центра ОИЯИ. УНЦ; 2015-56). — Библиогр. в конце глав.

Финансовый менеджмент в системе управления предприятием. В помощь студентам при подготовке к зачетам и экзаменам / Е. А. Елисеева, А. М. Лебедев, А. А. Левитин, В. Н. Самойлов, Т. В. Тюпикова. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 98 с. — (ОИЯИ; 2015-46). — Библиогр: с. 96–98.

*Шукринов Ю. М., Рахмонов И. Р., Куликов К. В.* Применение численных методов для исследования эффекта Джозефсона: учебное пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2016. — 94 с.: ил. — (Учебно-методические пособия Учебно-научного центра ОИЯИ. УНЦ; УНЦ-2016-59).

- Журнальные статьи — 966
- Публикации в трудах конференций — 399
- Препринты — 55
- Авторефераты диссертаций — 13
- Всего: 1447

## THEORETICAL PHYSICS

For investigation of the Standard Model (SM) at energy scales not accessible to accelerators, a specialized open source computer code (mr — Matching & Running) was developed to evaluate scale-dependent (“running”) parameters of the SM. By means of this code one can carry out complicated calculations on vacuum stability with the account of new experimental data. The code can be used as a starting point for a New Physics study. For the first time the leading four-loop corrections to the evolution equations of the strong coupling were found in the SM. The contributions due to interactions between the SM fermions and the Higgs field together with self-interactions of the latter were taken into account. It was demonstrated that the corrections are not negligible in comparison with recent five-loop pure QCD result.

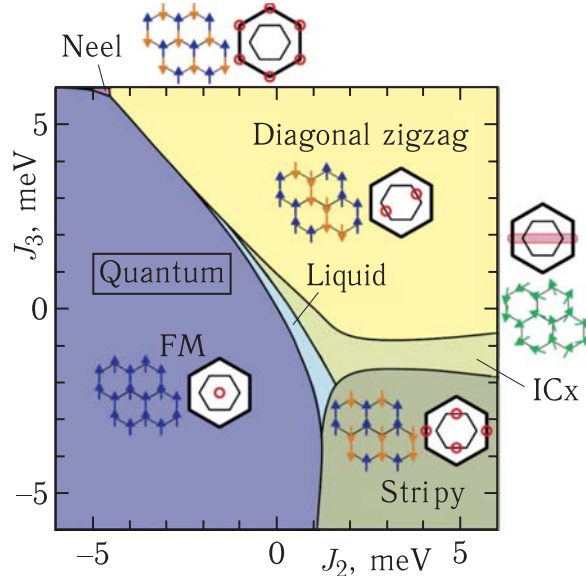
- *Kniehl B.A., Pikelner A.F., Veretin O.L.* mr: A C++ Library for the Matching and Running of the Standard Model Parameters // Comput. Phys. Commun. 2016. V. 206. P. 84–96.
- *Bednyakov A.V., Pikelner A.F.* Four-Loop Strong Coupling Beta-Function in the Standard Model // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 151–156.

In the theoretical investigation of the heavy-nuclear fission, it is found that the evolution from a one- to three- and then two-peaked mass and charge distributions of the fission fragments occurs across several mass units. The three-equal-peaked charge distributions are predicted for the fissioning nuclei with the neutron number  $N = 136$ . The suggested model predicts the presence of symmetric and asymmetric fission modes with equal probabilities at  $N=136$ , regardless of the charge number of the fissioning system. The important result was the conservation of the asymmetric shapes of the mass and charge distributions of the fission fragments at high enough excitation energies of the fissioning nucleus.

- *Pasca H. et al.* Energy-Dependence of Mass, Charge, Isotopic, and Energy Distributions in Neutron-Induced Fission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 054602.

- *Pasca H. et al.* Possible Origin of Transition from Symmetric to Asymmetric Fission // *Phys. Lett. B.* 2016. V.760. P. 800.

Iridium oxides with a honeycomb lattice are a new family of functional materials that have been suggested to be a platform for implementation of quantum computer calculations. To make this implementation possible, a special type of topological spin-liquid phase should be present in the low temperature limit. In the present work, a generalized Kitaev quantum spin model was applied to a particular member of the family,  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$ , and studied in great detail. The magnetic phase diagram was calculated (figure), which allowed one to identify the region in the model parameter space where the topological spin-liquid phase is located.



Magnetic phase diagram of honeycomb iridium oxide  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$

- *Nishimoto S. et al.* Strongly Frustrated Triangular Spin Lattice Emerging from Triplet Dimer Formation in Honeycomb  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$  // *Nature Commun.* 2016. V. 7. P. 10273.

The reflection of the electromagnetic waves by a graphene sheet obeys the Maxwell equations with matching conditions comprising a polarization tensor. The latter was computed within the Dirac model for  $(2 + 1)$ -dimensional fermions interacting with  $(3 + 1)$ -dimensional photons. In the leading order of perturbation theory the account of finite temperature, finite chemical potential, and nonzero mass gap was made. The reflection coefficients were expressed in terms of the polarization tensor components. The poles of the reflection coefficients yield the plasmon frequencies related to the solutions of the Maxwell equations which freely propagate along the interface and fall exponentially in the normal direction. The influence of temperature and finite chemical potential on the surface plasmons of graphene with finite mass gap was studied.

- *Bordag M., Pirozhenko I. G.* QED and Surface Plasmons on Graphene // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2016. V. 31. P. 1641027.
- *Bordag M., Pirozhenko I.* Surface Plasmon on Graphene at Finite  $T$  // *Intern. J. Mod. Phys. B.* 2016. V. 30. P. 1650120.

## EXPERIMENTAL PHYSICS

### Particle Physics

One of the main results of the JINR group in 2016 is completion of work on development of the new electromagnetic calorimeter. This calorimeter, suggested and developed at JINR, is a unique device which uses the most advanced photodetectors — Micro-pixel Avalanche Photo Diodes (MAPD) with ultra-high pixel density (up to 15 thousand pixels/mm<sup>2</sup>), instead of traditional photomultiplier tubes.

The most accurate measurements of charged kaon multiplicities in deep inelastic scattering were performed by COMPASS and published in 2016. These results were obtained with the active participation of the JINR group. The data were obtained in scattering of 160-GeV muons off the isoscalar LiD target. Experimental data cover the kinematic domain  $1 \text{ (GeV}/c)^2 < Q^2 < 60 \text{ (GeV}/c)^2$  in the photon virtuality,  $0.004 < x_{Bj} < 0.4$ ,  $0.1 < y < 0.7$ ,  $0.20 < z < 0.85$ , and  $W^2 > 5 \text{ (GeV}/c)^2$  in the invariant mass of hadronic system. The results from the sum of the  $z$ -integrated  $K^+$  and  $K^-$  multiplicities at high  $x$  point to the value of the non-strange quark fragmentation function which turned out to be larger than that obtained earlier by the DSS fit.

- *COMPASS Collab.* Multiplicities of Charged Kaons from Deep-Inelastic Muon Scattering off the Isoscalar Target. CERN-EP/2016-206. hep-ex/1608.06760; Phys. Lett. B (submitted).

The limits on the neutrino fluxes associated with the gamma-ray bursts are obtained by the Borexino collaboration this year [1]. Using  $(1422 \pm 67) \text{ kg} \cdot \text{d}$  of data acquired with the prototype of the Dark Side detector, the limits on the spin-independent WIMP-nucleon cross section have been obtained. These cross sections for WIMP particles of mass 100 GeV (100 GeV, 10 TeV) are  $2 \cdot 10^{-44}$  ( $8.6 \cdot 10^{-44}$ ,  $8.0 \cdot 10^{-43}$ ) cm<sup>2</sup> at the 90% C.L. correspondingly [2]. A silicon PM (SiPM) simulation module has been developed for the DS20k detector.

1. *Agostini M. et al.* A Search for Low-Energy Neutrino and Antineutrino Signals Correlated with Gamma-Ray Bursts with Borexino // *Astropart. Phys.* 2017. V. 86. P. 11–17.

2. *Agnes P. et al.* Results from the First Use of Low Radioactivity Argon in a Dark Matter Search // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 081101.

The NEMO-3 experiment searched for  $2\nu 2\beta$  and  $0\nu 2\beta$  processes at the Modane Underground Laboratory (LSM). Seven isotopes (Mo-100, Se-82, Te-130, Cd-116, Nd-150, Zr-96, Ca-48) were studied by the simultaneous recording of the energy and track of the event, Mo-100 and Se-82 standing out since they were the most massive ones. No evidence for neutrinoless double beta decay has been observed, leading to obtain limits on the effective neutrino mass that are among the best to date, especially for the mentioned isotopes Mo-100 and Se-82.

- *Arnold R. et al.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 112008.
- *Arnold R. et al.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. P. 072003.
- *Arnold R. et al.* arXiv: 1610.03226; Phys. Rev. D. (submitted).

A search is conducted for resonant high-mass new phenomena in dielectron and dimuon final states. The search uses  $13.3 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data, collected at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  by the ATLAS experiment at the LHC in 2015 and 2016. The dilepton invariant mass is used as the discriminating variable. No significant deviation from the Standard Model prediction is observed. Upper limits at 95% credibility level are set on the cross section times branching ratio for resonances decaying to dileptons, which are converted into lower limits on the resonance mass, ranging between 3.36 and 4.05 TeV, depending on the model.

Search for gluinos in final states with an isolated electron or muon, multiple jets and large missing transverse momentum using proton-proton collision data at a centre-of-mass energy of  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  is performed. The dataset used was recorded in 2015 by the ATLAS experiment at the Large Hadron Collider and corresponds to an integrated luminosity of  $3.2 \text{ fb}^{-1}$ . Six signal selections are defined that best exploit the signal characteristics. The data agree with the Standard Model background expectation in all six signal selections, and the largest deviation is a 2.1 standard deviation excess.

Search is carried out for new resonances with mass larger than 250 GeV, decaying to a  $Z$  boson and a photon. The  $Z$  bosons are identified through their decays either to charged, light, lepton pairs ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ) or to hadrons, the data are found to be consistent with the expected background in the whole mass range investigated and upper limits are set on the production cross section times decay



branching ratio to  $Z\gamma$  of a narrow scalar boson with mass between 250 GeV and 2.75 TeV.

- *Bednyakov V.A., Eletsikh I.V., Chizhov M.V.* ATLAS-CONF-2016-045.
- *Khramov E.V.* // Phys. J. C. 2016. V.76. P.565.
- *Khramov E.V.* // Phys. Lett. B. 2017. V.764. P.11.

### Relativistic Nuclear Physics

New results of the 1D femtoscopic correlation analysis for  $K^+K^-$  pair production in Pb–Pb collisions at 2.76 TeV (per nucleon pair) were obtained and compared with the prediction of R.Lednicky and V.Luboshitz (Sov. J. Nucl. Phys. 1982. V.35). A good agreement between these two different methods has been observed.

- *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* Centrality Dependence of Pion Freez-Out Radii in Pb–Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Rev. C. 2016. V.93. P.024905.
- *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* Multipion Bose–Einstein Correlations in  $pp$ ,  $p$ -Pb and Pb–Pb Collisions at LHC // Phys. Rev. C. 2016. V.93. P.054908.

### Heavy Ion Physics


A series of experiments on the synthesis of superheavy elements with atomic numbers 115, 117 and 118 of the Mendeleev Periodic Table has been completed. According to the decision of the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) dated November 28, 2016, the following names and symbols have been assigned to the new elements:

- Moscovium and Mc for element 115;
- Tennessine and Ts for element 117;
- Oganesson and Og for element 118.

The synthesis of these elements was first performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR), a recognized world leader in the field of synthesis and study of properties of superheavy nuclei. Over the past 16 years, five elements with atomic numbers 114–118 — the heaviest elements known nowadays — have been discovered at JINR. This marked the completion of the seventh period of the Mendeleev Periodic Table.

- *Oganessian Yu.Ts., Dmitriev S.N.* Synthesis and Study of Properties of Superheavy Atoms. Factory of Superheavy Elements // Russ. Chem. Rev. 2016. V.85. P.901.





		Бор 5 10,81 Boron	Углерод 6 12,011 Carbon	Азот 7 14,007 Nitrogen	Кислород 8 15,999 Oxygen	Фтор 9 18,998 Fluorine	Неон 10 20,18 Neon	
		Алюминий 13 26,982 Aluminum	Кремний 14 28,085 Silicon	Фосфор 15 30,974 Phosphorus	Сера 16 32,06 Sulfur	Хлор 17 35,45 Chlorine	Аргон 18 39,948 Argon	
Никель 28 58,693 Nickel	Медь 29 63,546 Copper	Цинк 30 65,38 Zinc	Галлий 31 69,723 Gallium	Германий 32 72,630 Germanium	Мышьяк 33 74,922 Arsenic	Селен 34 78,971 Selenium	Бром 35 79,904 Bromine	Криптон 36 83,798 Krypton
Палладий 46 106,42 Palladium	Серебро 47 107,87 Silver	Кадмий 48 112,41 Cadmium	Индий 49 114,82 Indium	Олово 50 118,71 Tin	Сурьма 51 121,76 Antimony	Теллур 52 127,60 Tellurium	Йод 53 126,90 Iodine	Ксенон 54 131,29 Xenon
Платина 78 195,08 Platinum	Золото 79 196,9 Gold	Ртуть 80 200,59 Mercury	Таллий 81 204,38 Thallium	Свинец 82 207,2 Lead	Висмут 83 208,98 Bismuth	Полоний 84 [209]	Астат 85 [210]	Радон 86 [222]
Дармштатий 110 [281]	Резерфордий 111 [281]	Коперниций 112 [285]	Нихоний 113 [286]	Флеровий 114 [289]	Московский 115 [289]	Ливерморий 116 [289]	Теннессиум 117 [294]	Оганессон 118 [294]

Part of the Mendeleev Periodic Table highlighting the elements synthesized at JINR over the past 16 years

- *Utyonkov V. et al.* The Discovery of Elements 113 to 118 // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P.06003.
- *Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu.* Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. NS 160, EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P.08001.
- IUPAC Press Release. <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>

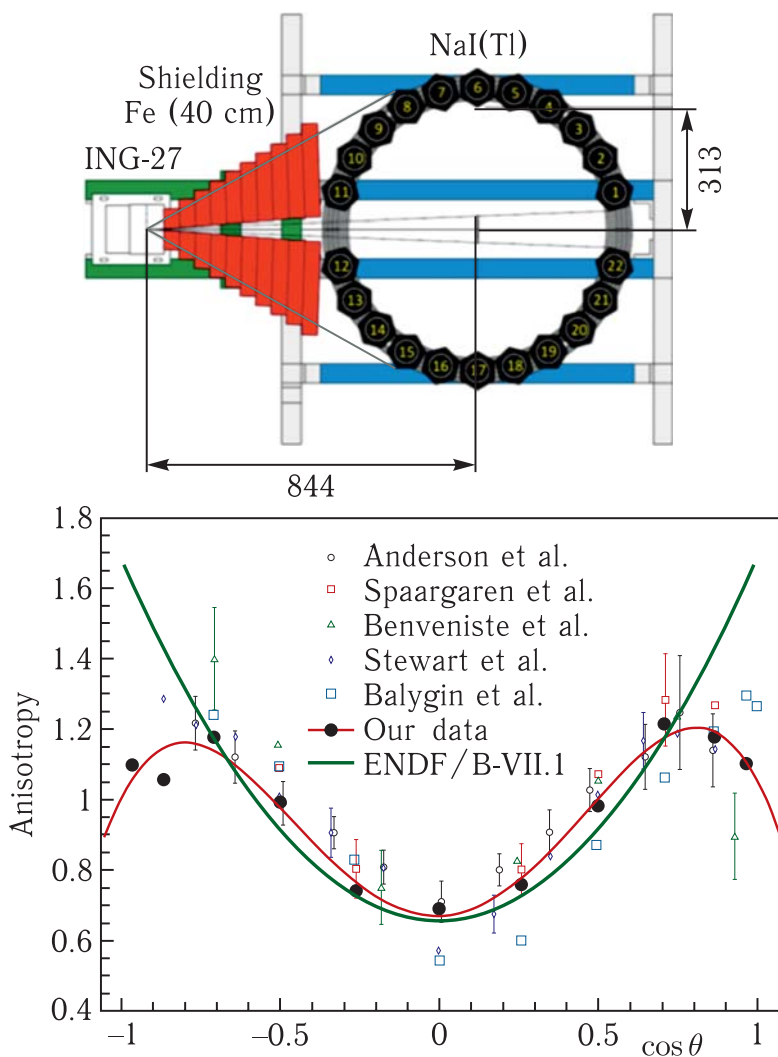
A pilot testing of the EXPERT (EXotic Particle Emission and Radioactivity by Tracking) program has been performed successfully: new isotopes  $^{29}\text{Cl}$  and  $^{30}\text{Ar}$  were discovered, a three-proton  $\beta$ -delayed decay of  $^{31}\text{Ar}$  was observed for the first time. It has been demonstrated that a two-proton decay of the  $^{30}\text{Ar}$  ground state occurs in a unique “transition” mode having a certain similarity with the physics of phase transitions, which has allowed proposing a new indirect method to determine the lifetime of nuclei — proton decayers [1–3].

1. *Golubkova T.A. et al.* Transition from Direct to Sequential Two-Proton Decay in *s-d* Shell Nuclei // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 263.
2. EXPERT Technical Design Report. [http://aculina.jinr.ru/pdf/EXPERT\\_TDR\\_revised5.pdf](http://aculina.jinr.ru/pdf/EXPERT_TDR_revised5.pdf)

3. Grigorenko L. V. et al. Studies of Light Exotic Nuclei in the Vicinity of Neutron and Proton Drip Lines at FLNR JINR // Physics — Uspekhi. 2016. V. 59. P. 321; Usp. Fiz. Nauk. 2016. V. 186. P. 337.

### Neutron Nuclear Physics

In the framework of the TANGRA project the angular correlations of  $\gamma$  rays produced in inelastic scattering of 14.1 MeV neutrons by  $^{12}\text{C}$  nuclei were measured. A portable neutron generator ING-27 (designed and manufactured at VNIIA, Moscow) with a built-in 64-pixel silicon  $\alpha$  detector was used as a source of tagged neutrons. It is capable of generating beams of tagged neutrons with reference to both the direction of neutron emission and emission time. The  $\gamma$  rays of characteristic nuclear radiation



Schematic of the experimental setup (top); measured angular dependence in comparison with other data (bottom)

from  $^{12}\text{C}$  were detected with a spectrometric system consisting of 22  $\gamma$  detectors based on NaI(Tl) crystals arranged around the carbon target. The experimental data were described by the formula  $W(\theta) = 1 + a \cos^2 \theta - b \cos^4 \theta$  with the coefficients  $a = 2.47 \pm 0.10$  and  $b = 2.04 \pm 0.12$ . The resulting angular dependence differs much from that used in the neutron data libraries (see figure).

- *Bystriksy V.M. et al.* Angular Distribution of 4.43-MeV  $\gamma$ -Rays Produced in Inelastic Scattering of 14.1-MeV Neutrons by  $^{12}\text{C}$  Nuclei // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 4. P.504.

## Condensed Matter Physics

Iron oxides play an important role in the formation of magnetic and other physical properties of the Earth, and find a wide range of technological applications. Recently, a new iron oxide,  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ , which can presumably exist in the layers of the Earth's upper mantle, has been synthesized under the combined effect of high pressures and temperatures. A comprehensive study of its physical properties, as well as atomic and magnetic structure using neutron diffraction techniques at the IBR-2 reactor, has revealed a new type of the charge-ordering state with the formation of dimeric and trimeric electronic states in this compound. The phase transition into this state is accompanied by a sharp increase in the electrical resistance and a subsequent change in the symmetry of the magnetic order,

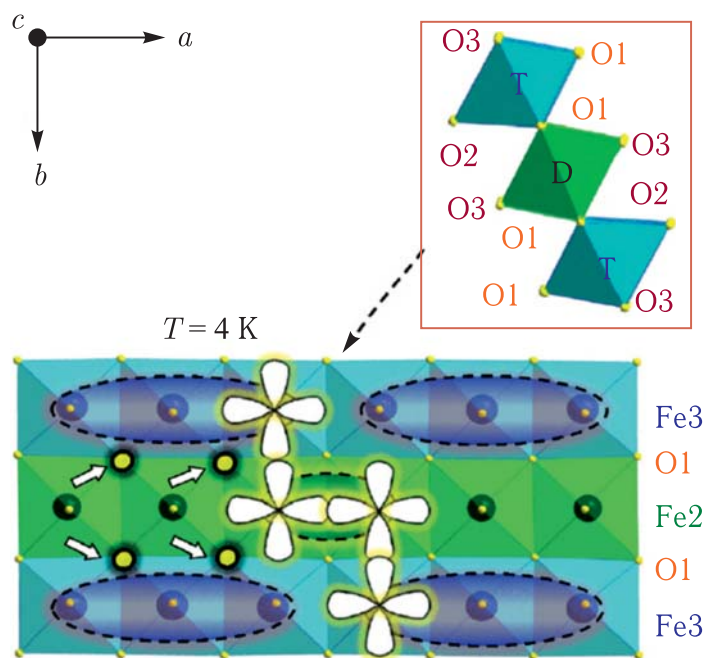


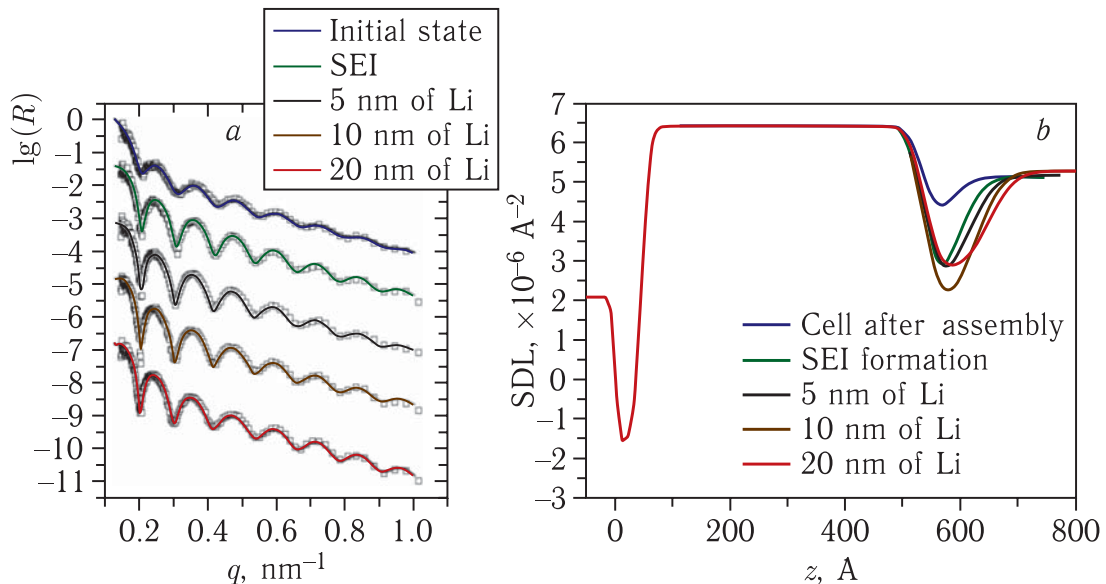
Illustration of the mechanism of the formation of dimeric and trimeric electronic states in  $\text{Fe}_4\text{O}_5$

namely from a collinear antiferromagnetic (AFM) order to a canting AFM order with a ferromagnetic (FM) component, as well as by a change in the nature of the modulation of the atomic structure (figure).

- *Ovsyannikov S. V. et al.* Charge Ordering Transition in Iron Oxide  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ , Involving Competing Dimer and Trimer Formation // *Nature Chem.* 2016. V.8. P.501.

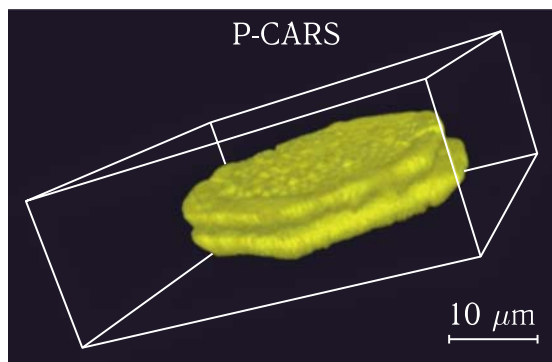
In the framework of the studies on improving the performance of lithium batteries, a series of experiments on neutron reflectometry at the IBR-2 reactor to study electrochemical interfaces liquid electrolyte/solid electrode has been carried out (figure). From the specular reflectivity analysis, the formation of a solid-electrolyte interphase (SEI) on the surface of the electrode (Cu) has been concluded, and the lithium electrodeposition and growth of parasitic dendritic structures during the operation of the electrochemical cell has been tracked. The obtained profiles of the scattering length density perpendicular to the electrode surface have made it possible to analyze different modes of SEI formation, as well as the formation and growth of nanometer layers of lithium of different roughness on the originally formed SEI. It has been shown that neutron reflectometry can be effectively used for *in situ* characterization of the lithium plating on metal electrodes.

- *Avdeev M. V. et al.* Monitoring of Lithium Plating by Neutron Reflectometry // *Appl. Surf. Sci.* 2016 (submitted).



Experimental neutron specular reflectivity curves (points) for a copper electrode at the interface with the electrolyte at different current and voltage supply modes (a). Resulting scattering length density profiles for different modes with the indication of characteristic thicknesses of the deposited lithium (b)

Structural study of MPs is a major challenge due to dramatic difficulties with growing, detection and imaging of the crystals suitable for X-ray crystallography. To fill this gap, a polarized coherent anti-Stokes Raman scattering (P-CARS) was applied to imaging of in meso grown membrane protein crystals (figure).



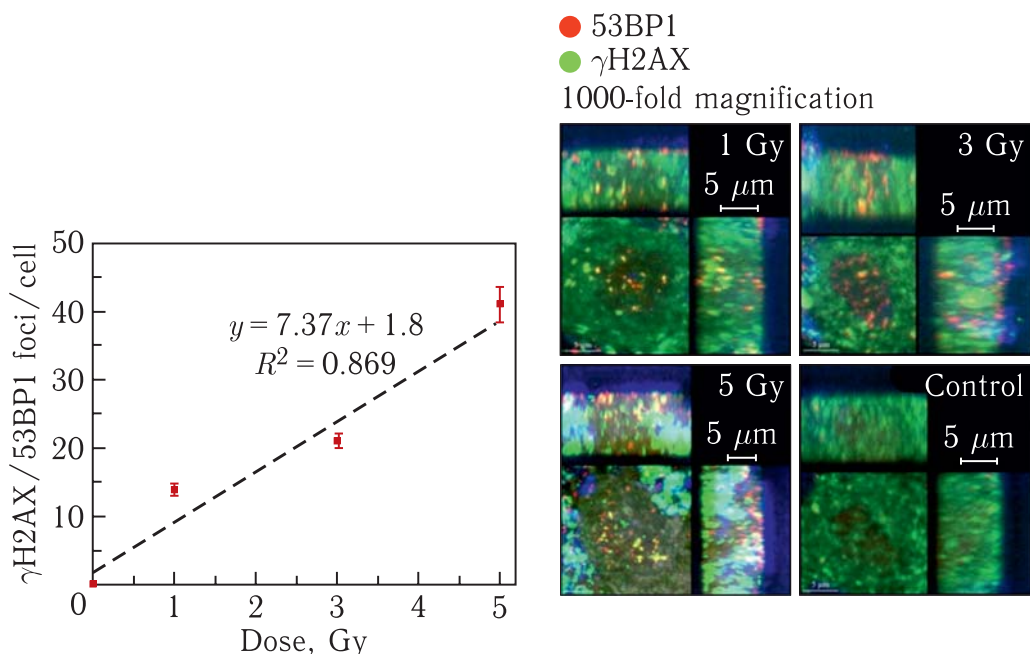
P-CARS 3D-image of a twinned bacteriorhodopsin crystal

In this study for the first time it was shown that bacteriorhodopsin crystals in optically non-transparent crystallization matrix can be imaged by vibrational CARS microscopy with high sensitivity, contrast and submicron spatial resolution.

- *Arzumanyan G.M. et al.* Highly Sensitive Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Imaging of Protein Crystals // JACS. 2016. V.138(41). P. 13457–13460.

## RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

A qualitative analysis was performed of the morphological disorders of Purkinje neurons in the rat cerebellar cortex, which



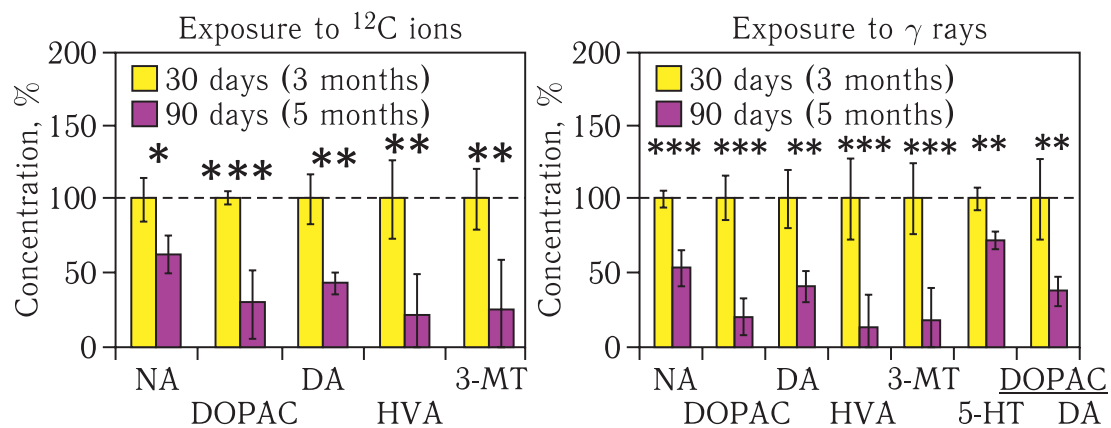
The dose dependence of radiation-induced  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci yield in Purkinje cells 1 h after exposure



are easily identifiable without specific morphological markers due to a unique anatomic organization of the cerebellar cortex. It was found that the highest yield of the  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci is formed in Purkinje neurons 1 h after exposure (21  $\gamma$ H2AX/53BP1 foci/nucleus); 4 h afterwards, the number of foci decreases by 50%. Within 24 h after exposure, only 2.5 foci/nucleus remain, which points to the efficient repair of DNA double-strand breaks. It was shown that the dose dependence of  $\gamma$ H2AX/53BP1 focus formation frequency 1 h after  $\gamma$  irradiation is linear (figure).

- *Bulanova T. S. et al.* Induction and Repair of DNA Double-Strand Breaks in the Rat Cerebellar Cortex Exposed to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays // Phys. Part. Nucl. Lett. (submitted).

A cycle of research was performed to study neurochemical indicators of the rat brain after exposure to carbon ions and  $\gamma$  rays at a dose of 1 Gy. It was shown that the action of accelerated heavy charged particles induces changes in the functioning of the noradrenaline, dopamine, and serotonergic systems 30 and 90 days after exposure (figure). The most pronounced changes between the irradiated and control animals were observed in the prefrontal cortex, nucleus accumbens, and hypothalamus, which points to an important role of these structures in the realization of the long-term effects of radiation exposure on the central nervous system functions. The neurochemical study results were compared with the animals' behavior indicators after exposure. It was found that, along with changes in monoamine metabolism, irradiation with  $^{12}\text{C}$  ions



The distribution of monoamines and their metabolites in the prefrontal cortex of rats of different age categories 30 and 90 days after irradiation with 500 MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  ions and  $\gamma$  rays at a dose of 1 Gy ( $\pm$ SD; \*\* —  $p \leq 0.05$ ; \*\*\* —  $p \leq 0.01$ ). In parentheses, the animals' age is given as of the time of the study

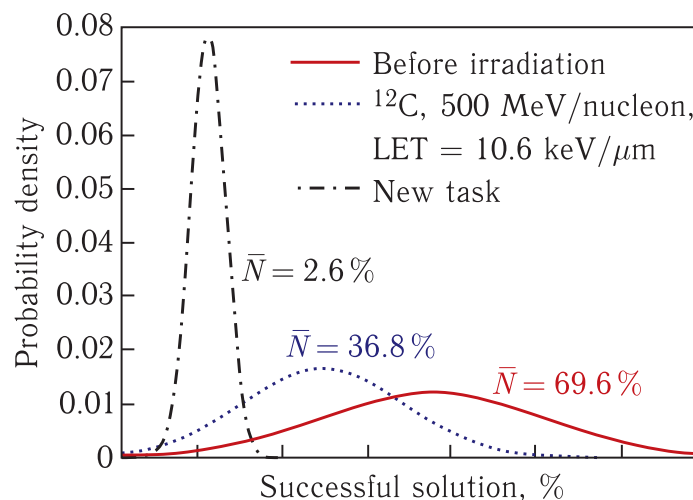


causes modification of the exposed animals' motion and exploratory activity and changes in their anxiety indicators.

- *Belov O. et al.* Exposure to  $^{12}\text{C}$  Particles Alters the Normal Dynamics of Brain Monoamine Metabolism and Behaviour in Rats // *Physica Medica: Eur. J. Med. Phys.* 2016. V.32, No.9. P.1088–1094.
- *Belokopytova K. V. et al.* Monoamine Exchange Dynamics in Rat Brain Structures at Late Times after Exposure to Accelerated Carbon Ions // *Neurochem. J.* 2016. V.33, No.2. P.147–155 (in Russian).
- *Belokopytova K. V. et al.* Neuromediator Exchange Dynamics in Rats at Late Times after Exposure to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays // *Med. Radiol. Radiat. Safety.* 2016 (in press).

Data were obtained on the action of high-energy protons and accelerated  $^{12}\text{C}$  ions on macaques' cognitive functions and the content of monoamines and their metabolites in peripheral blood. It was shown that proton irradiation of macaques' head at a dose of 3 Gy causes no changes in cognitive functions. However, after carbon ion exposure at a dose of 1 Gy, a reliable decrease is observed in the cognitive functions and serotonin metabolite concentrations in the blood of macaques of the excitable unbalanced type of higher nervous activity (figure).

- *Belyaeva A. G. et al.* Action of High-Energy Protons and  $^{12}\text{C}$  Ions on Macaques' Cognitive Functions and the Content of Monoamines and Their Metabolites in Peripheral Blood // *Neurochem. J.* 2017. V.34, No.1. P.1–9.



The distribution density of macaques' cognitive function indicators

## ACCELERATOR TOPICS

VBLHEP made a breakthrough step to ensure the feasibility of implementation of the program for NICA, JINR. It is the basis for studies with polarized light nuclei beams — beams of polarized deuterons were obtained, prompt polarimetry at the injection stages in Nuclotron was ensured, in the mode of accelerated beam circulating inside Nuclotron and beam extracted from Nuclotron.

- *Kovalenko A. D. et al.* Current Results on Implementation of the Nuclotron/NICA R&D Program with Polarized Beams. Presented at SPIN2016, Urbana/Champagne, IL, USA, September 2016.
- *Krivenkov D. O. et al.* Polarimetry at Nuclotron. Presented at SNP School 2016, Tohoku University, Sendai, Japan, November 2016.

The work on creation of a heavy ion linear accelerator (HILAC) was completed. At the output of the accelerator,  $C^{2+}$  ion beam was obtained from the laser source (charge to mass ratio corresponds to ions of gold in the charge state of  $32+$ ) with the design energy and transmission coefficient close to the current project.



Initial part of the heavy ion linear accelerator of the NICA collider complex

The established linear accelerator is the first heavy ion accelerator of such a level in the JINR Member States. High-frequency power supply system on the basis of solid-state transistor amplifiers is used for the first time. For countries participating in JINR it is a significant achievement in the field of accelerator science and technology — within the framework of the wide international collaboration a unique facility with parameters corresponding to the world level has been created.

- *Butenko A. et al.* Commissioning of Heavy Ion Linear Accelerator (HILAC) of the NICA Project // Proc. of RUPAC2016, Saint-Petersburg, Russia.

The accelerator required for the beam injection into the existing accelerator complex Nuclotron was designed in co-operation with ITEP and MEPhI and fabricated at VNIITF (Snezhinsk). Creation of the control and diagnostic systems was provided with participation of specialists from INR RAS.

Two Nuclotron runs with usage of the new accelerator were performed in 2016. Creation of such a facility is a big achievement for all Russian accelerator physics and technique.

- *Trubnikov G. et al.* Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron–NICA // Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, 2016.
- *Trubnikov G. et al.* Commissioning of New Light Ion RFQ Linac and First Nuclotron Run with New Injector // RuPAC 2016. St. Petersburg, Russia, 2016.

## **INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS**

The Multi-functional Information and Computing Complex of LIT JINR (MICC) was actively developing during 2016. It is one of the basic JINR facilities, which includes a grid-component presented by the centres of Tier-1 level for the CMS experiment and of the Tier-2 level for all LHC experiments. By the end of 2016 for Tier-1, processed were 56.5 million of all CMS events, which is 13% of their total number and which allows the centre to take a second place among the Tier-1 centres for CMS worldwide. This centre is considered as one of the main components of the future computing system for the mega-project NICA.

- *Astakhov N. S. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, Iss. 5. P. 714–717.

One of the most important trends in the cloud technologies at the moment is the development of method of integrating various

cloud infrastructures. In order to join the cloud resources of partner organizations from JINR Member States for solving common tasks as well as to distribute a peak load across them, a cloud bursting driver has been designed by the JINR cloud team. It allows one to integrate the JINR cloud with the partner clouds either OpenNebula-based one (and in this case it is possible to enable real time external cloud resources monitoring) or any other cloud platform which supports Open Cloud Computing Interface (OCCI). The clouds of the following partner organizations from JINR Member States are integrated with the JINR cloud: Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences (Baku, Azerbaijan); Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine); Plekhanov Russian University of Economics — PRUE (Moscow, Russia). Apart from that the JINR cloud is integrated into EGI Federated Cloud thus enabling a possibility to use a part of JINR computing resources by EGI FedCloud Virtual Organizations.

- *Baranov A. V. et al. // Comp. Res. Modeling. 2016. V. 8, No. 3. P. 583–590.*

A new algorithm of searching for track candidates for event reconstruction in the experiment BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) has been proposed. The event reconstruction is one of the most important tasks for experimental data processing in high energy physics. It consists of the tracks and their parameters evaluation in the tracking detectors of the experiment, which requires a huge number of searches of all the hits (reconstructed responses of the detector) to find those belonging to one track. The authors propose a new coordinate transformation that maps experimental data to the normalized coordinate space in which the hits corresponding to one track are grouped into compact horizontal segments. In order to estimate the parameters, the found track candidates are approximated by Archimedes spirals. Due to the compactness of data in the space of normalized coordinates, the proposed algorithm can be effectively parallelized on modern computing architectures.

- *Baranov D. et al. // EPJ Web Conf. 2016. V. 108. P. 02012.*

A computer program of the Glauber calculations for the NICA experiments has been proposed. It should be noted that all contemporary experiments with relativistic nuclear beams (RHIC, LHC, NICA, CBM) will continue to use various methods of determining the geometrical properties of interactions, especially collision impact parameter. No impact parameter can be measured

directly. That is why the experimental observable quantities are connected, in one or another manner, with the geometrical properties calculated within the Glauber approach. However, the existing methods of the Glauber calculations do not meet modern requirements. The proposed approach allows one to calculate the geometrical properties of interactions of gold nuclei with gold nuclei at RHIC and NICA energies (5–10 GeV in the center of mass of  $NN$  collisions) and to improve the result by 5–7% as compared to the currently used software. The changes of the physical characteristics of the NICA collisions can be related to changing the interaction physics.

- *Galoyan A. S., Uzhinsky V. V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. P. 333.*

A new segment building algorithm for the cathode-strip chambers has been developed. Results of comparison of the standard and new algorithm were obtained for various types of simulated data. Track-segments are reconstructed with higher precision and efficiency using the new algorithm, especially for high luminosity on the LHC and high transverse momentum of particles passing through the muon endcap system. In July 2016, the algorithm was implemented in the official CMS reconstruction software package.

- *Voytishin N. et al. // EPJ Web Conf. 2016. V. 108. P. 02023.*

Effects of vector interaction in Nambu–Jona-Lasinio model with Polyakov loop have been studied in combination with entanglement interaction between quark and pure gauge sector. The QCD phase diagram was investigated. It has been found that the first-order chiral phase transition at the finite baryon chemical potentials and its critical point disappear at sufficiently large values of the vector interaction constant  $G_V$ . The presence of entanglement interaction between the quark and pure gauge sector leads to the increasing of the value of  $G_V$  when the first-order phase transition in the thermodynamic system disappears. The influence of non-zero  $G_V$  on the curvature of the crossover boundary in the  $T-\mu$  plane nearby  $\mu = 0$  is also examined for the cases of the additional quark–gluon interaction and without it.

- *Friesen A., Kalinovsky Yu., Toneev V. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 668, No. 1. P. 012128.*

The Asynchronous Differential Evolution (ADE) method is applied to research on the drug delivery Phospholipid Transport Nano System (PTNS) in the framework of the separated form factor model. Basic parameters of PTNS unilamellar vesicles are fitted to



experimental data of the small-angle synchrotron X-ray scattering. The structure of PTNS nano-particles has been analyzed depending on the maltose concentration in water. Numerical results confirm the efficiency of parallel MPI-implementation and the preference of the ADE-based global minimization in comparison to other popular optimizing procedures.

- *Zemlyanaya E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V.724. P.012056.*

## **JINR UNIVERSITY CENTRE**

In 2016, 440 students of the JINR-based departments of MSU, MIPT, MEPHI, University “Dubna”, and universities of the Member States were trained at the UC. Summer educational and training courses were organized for 238 students from the universities of Armenia, Belarus, Georgia, Mongolia, and the Russian Federation.

The three stages of the annual International Student Practice in JINR Fields of Research were attended by 161 representatives of Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Cuba, the Czech Republic, Egypt, Poland, Romania, Serbia, Slovakia, and South Africa.

In the period from June to October 2016, 40 undergraduate and graduate students from the universities of Belarus, Cuba, Egypt, Kazakhstan, Poland, Romania, the Russian Federation, and South Africa participated in the Summer Student Programme, working on the research projects in the laboratories of the Institute for 6–8 weeks.

The summer School for teachers of physics from JINR Member States in Dubna was held in two stages: for 26 teachers and 8 school students from Bulgaria, Russia and Ukraine, and for 20 teachers from Moscow. The autumn School for Russian speaking teachers of physics at CERN was attended by 43 teachers from Armenia, Kazakhstan, Moldova, Russia, Ukraine, and Switzerland. The programmes of the Schools included popular science lectures by the leading specialists of JINR and CERN, visits, hands-on activities in the physics lab, a round table discussion on the issues of modern physics and methods of teaching physics at school.

Two exhibition areas demonstrating the main fields of research and top-priority projects of JINR were presented at the VI All-Russian Science Festival NAUKA 0+ in Moscow.

The JINR UC participated in the organization and running of the “Physics Days” for children and adults, and the 5th Robotics Tournament of the Open Upper-Volga Educational Cyber Network;



organized videoconferences, virtual lectures; held introductory and popular science lectures and excursions for university and school students from Russia and Germany.

**GENERAL DATA ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS  
BY JINR STAFF MEMBERS  
(from 01.01.2016 to 22.12.2016)**

• Books — 14:

*Bityukov S. I., Krasnikov N. V.* Statistical Methods Application to Search for New Physics at the Large Hadron Collider. — M.: URSS, 2013. — 268, [1] p.: ill. — Bibliogr.: P. 257–[269].

*Blokhintsev D. I., Drabkina S. I.* A. Einstein's Relativity Theory. — 2nd ed. — M.: URSS, 2015. — 106 p.: ill. — (Science — to Everyone! Masterpieces of Science Fiction. (Physics): Issue 99).

*Butsev V. S.* Our Times. — M.: Akademiya, 2015. — 255 p.: col. ill. — Bibliogr.: P. 240–245.

*Zagrebaev V. I.* Nuclear Reactions with Heavy Ions: Manual. Dubna: JINR, 2016. — 184 p.: ill. — (JINR University Centre. UC; 2015-57). — Bibliogr.: P. 183–184.

*Isaev A. P., Rubakov V. A.* Theory of Groups and Symmetries. Finite Groups. Lie Groups and Algebras. — Dubna: JINR, 2016. — 361 p. — (JINR; 2016-61). — Bibliogr.: P. 354–356.

*Malakhov A. I.* People of High Energy: A Documentary Novel. M.: Akademiya, 2016. — P. 253, [2] p.: col. ill.

*Orelovich L. N.* A Life-Long Journey from Petersburg to Dubna... — SPb.: Kultura, 2015. — 305 [2] p.: col. ill.

*Penionzhkevich Yu. Eh., Kalpakchieva R. G.* Light Nuclei near the Border of Neutron Stability: Dedicated to the 60th Anniversary of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions. — Dubna: JINR, 2016. — 383 p.: col. ill. — (JINR; 2015-12). — Bibliogr.: end of chapter. — In Heading: Joint Institute for Nuclear Research.

*Sukhov A. M.* Memoirs in Verse. — Dubna: JINR, 2016. — 140 p.: ill.

*Taran Yu. V.* Remembering FL (F. L. Shapiro) I Recall Myself. When I Recall Myself I Remember FL: Mix of Science & Life. Part One, 1956–1966. — Dubna: JINR, 2016. — 74, [1] p.: ill. — (JINR; R3-2015-102). — Bibliogr.: P. 58–60; List of Yu. V. Taran's Inventions: P. 65–66. — In Heading: To the 60th Anniversary of JINR.

That Very “Impuls”: Selected Papers: To the 50th Anniversary of LCTA (LIT) / V.P. Shirikov, A.A. Kornejchuk, G.L. Maznyj, E. Yu. Mazepa, L. Kryukov, A. Kravchenko; Auth.-comp.: A.A. Rastorguev. — Dubna: JINR, 2016. — 287 p.: col. ill. — (JINR; 2016-52).

*Ulyanov S. V., Reshetnikov A. G., Reshetnikov G. P.* Intelligent Computing Technology. Quantum Computing and Programming of Self-Organizing Intelligent Control Systems: Textbook. — Dubna: JINR, 2015. — 246 p.: ill. — (Manuals of the JINR University Centre. UC; 2015-56). Bibliogr.: end of chapter.

Financial Management in Enterprise Control System. For Students in Preparation to Tests and Examinations / E. A. Eliseeva, A. M. Lebedev, A. A. Levitin, V. N. Samoilov, T. V. Tyupikova. — Dubna: JINR, 2016. — 98 p. — (JINR; 2015-46). — Bibliogr.: P. 96–98.

*Shukrinov Yu. M., Rakhmonov I. R., Kulikov K. V.* Application of Calculus to Study the Josephson Effect: Manual. — Dubna: JINR, 2016. — 94 p.: ill. — (Manuals of the JINR University Centre. UC; UC-2016-59).

- Journal papers — 966
- Publications in conference Proceedings — 399
- Preprints — 55
- Theses abstracts — 13
- Total: 1447

## СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика . . . . .	3
Экспериментальная физика . . . . .	5
Физика частиц . . . . .	5
Релятивистская ядерная физика . . . . .	7
Физика тяжелых ионов . . . . .	7
Нейтронная ядерная физика . . . . .	9
Физика конденсированных сред. . . . .	10
Радиационные и радиобиологические исследования . . . . .	12
Ускорительная тематика . . . . .	15
Информационные технологии и вычислительная физика . . . . .	17
Учебно-научный центр. . . . .	19
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ . . . . .	20
Theoretical Physics . . . . .	22
Experimental Physics . . . . .	24
Particle Physics . . . . .	24
Relativistic Nuclear Physics . . . . .	26
Heavy Ion Physics . . . . .	26
Neutron Nuclear Physics . . . . .	28
Condensed Matter Physics . . . . .	29
Radiation and Radiobiological Research . . . . .	31
Accelerator Topics . . . . .	34
Information Technology and Computer Physics. . . . .	35
JINR University Centre . . . . .	38
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members . . . . .	39

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

Подписано в печать 10.02.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 170 экз. Заказ № 59030.

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/)