



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

2019-1

**КРАТКИЙ ОБЗОР
ВАЖНЕЙШИХ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В 2018 ГОДУ**

**BRIEF REVIEW
OF TOPMOST SCIENTIFIC RESULTS
OBTAINED IN 2018
AT THE JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна 2019

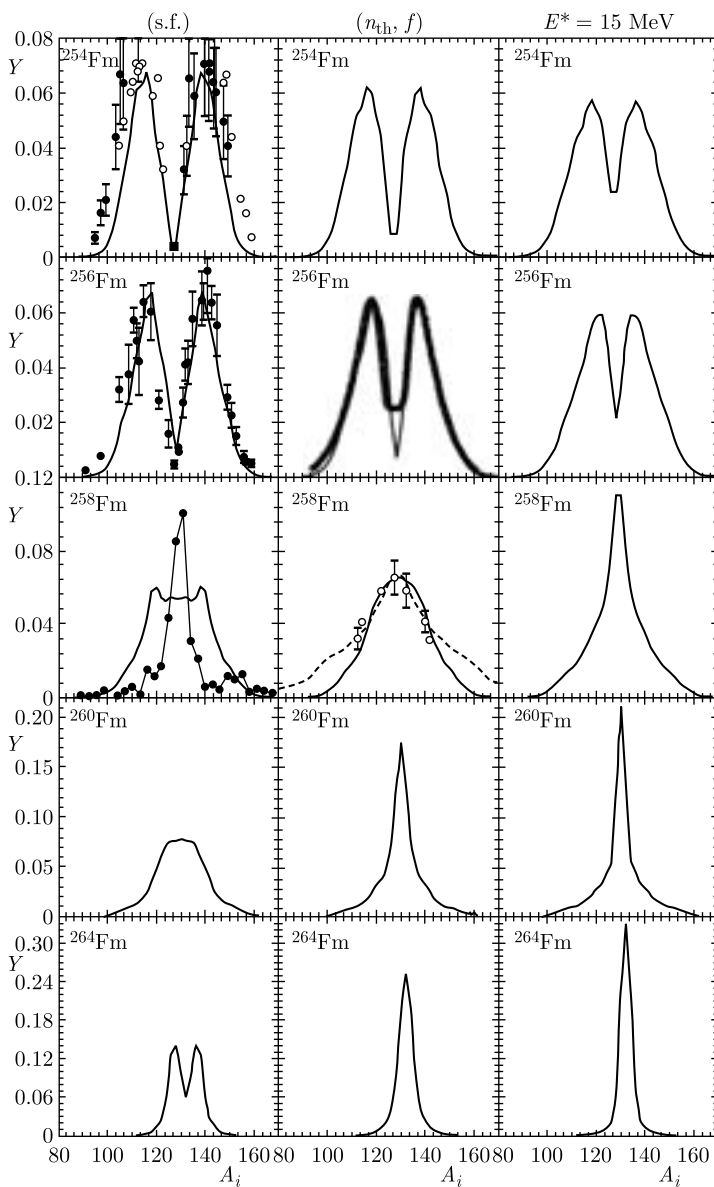
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Развит новый подход к теории неперенормируемых взаимодействий. Получены обобщения уравнений ренормгруппы, позволяющие суммировать ведущие асимптотики во всех порядках теории возмущений. Найдено ультрафиолетовое поведение ряда суперсимметричных калибровочных моделей квантовой теории поля.

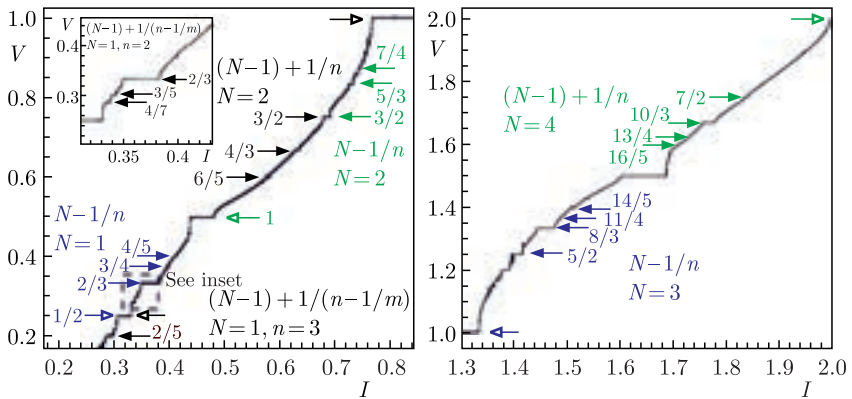
- *Kazakov D. I., Bortakov A. T., Tolkachev D. M., Vlasenko D. E. // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 125008.*
- *Kazakov D. I. // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 327.*

В рамках программы по изучению свойств самых тяжелых ядер зарядовые и массовые распределения продуктов, возникающих в результате спонтанного и вынужденного деления четно-четных ядер $^{254-260,264}\text{Fm}$, $^{258-264}\text{No}$, $^{262-266}\text{Rf}$, изучены с помощью статистической модели точки разрыва. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными (см. рисунок). В отличие от экспериментальных данных рассчитанное массовое распределение для $^{258}\text{Fm}(\text{s.f.})$ поразительно похоже на экспериментальное распределение для $^{257}\text{Fm}(\text{s.f.})$. Изменение формы зарядового распределения с увеличением изоспина и энергии возбуждения происходит постепенно и аналогично изменению массового распределения, но медленнее. Для ^{254}Fm (индуцированное деление), $^{257}\text{Fm}(n_{\text{th}}, f)$ и $^{260}\text{Fm}(\text{s.f.})$ впервые предсказана неожиданная разница между формами (симметричная или асимметричная) зарядового и массового распределений. При некоторой критической энергии возбуждения продемонстрировано насыщение симметричной компоненты зарядовых и массовых выходов. Для делящихся ядер Fm и No предсказаны переходы от асимметричного к симметричному массовому распределению.

- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V. // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 034621.*
- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V. // Nucl. Phys. A. 2018. V. 969. P. 226.*



Рассчитанные массовые распределения (сплошные линии) для спонтанного ($E^* = 0$ МэВ, 1-й столбец) и вынужденного ($E^* = 15$ МэВ, 3-й столбец) деления ядер $^{254,256,258,260,264}\text{Fm}$, а также вызванного тепловыми нейтронами ($E^* \sim 6,3$ МэВ, 2-й столбец) деления ядер $^{253,255,257,259,263}\text{Fm}$. Точками обозначены имеющиеся экспериментальные данные



Субгармонические лестничные структуры в различных частях вольт-амперной характеристики $S/F/S$ -перехода при ферромагнитном резонансе

Исследовано влияние связи между сверхпроводящим током и намагниченностью в джозефсоновском переходе сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник в циркулярно поляризованном магнитном поле. Продемонстрирована возможность проявления ферромагнитного резонанса на частотной зависимости амплитуды намагниченности и средней критической плотности тока. На вольт-амперных характеристиках обнаружены субгармонические лестничные структуры, обусловленные влиянием динамики намагниченности на разность фаз в джозефсоновском переходе. Субгармонические лестничные структуры могут быть использованы для регистрации майорановских состояний в джозефсоновских наноструктурах.

- *Nashaat M., Botha A. E., Shukrinov Yu. M.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 224514.

Исследована многочастичная $SU(2|1)$ суперсимметричная квантовая механика с дополнительными полудинамическими спиновыми степенями свободы. В частности, дана $\mathcal{N} = 4$ суперсимметризация квантовой спиновой $U(2)$ модели Калоджеро–Мозера с внутренним массовым параметром, появляющимся из центрального расширения супералгебры $\widehat{su}(2|1)$. Полная система допускает $SU(2|1)$ ковариантное разделение на сектор центра масс и фактор по этому сектору. Выведены явные выражения для классических и квантовых $SU(2|1)$ генераторов в обоих секторах, а также для полной системы. Определены

соответствующие энергетические спектры, вырождения и наборы физических состояний.

- *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O., Sidorov S.* // JHEP. 2018. V. 1804. P. 043; arXiv:1801.00206 [hep-th].

Исследована устойчивость решений третьего семейства для гибридных компактных звезд с кварковым ядром, соответствующих возникновению высокомассивных близнецов, по отношению к размягчению фазового перехода с помощью конструкции, имитирующей эффекты «макаронных» структур в смешанной фазе. Рассмотрен параметризованный класс гибридных моделей уравнения состояния на основе релятивистской модели среднего поля как для адронной, так и для кварковой фаз вещества. Найдено значение относительного добавочного давления около 6%, при котором исчезает решение, соответствующее третьему семейству компактных звезд. Показано, что по крайней мере более тяжелая звезда из зарегистрированного слияния пары нейтронных звезд GW170817 могла быть членом третьего семейства гибридных звезд.

- *Ayriyan A. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 045802.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

Физика частиц

Группой ОИЯИ, участвующей в проекте NA62, опубликована заключительная статья по результатам анализа ранее не наблюдавшегося редкого распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$. Результаты основаны на $1,7 \cdot 10^{11}$ распадах заряженных каонов, зарегистрированных в 2003–2004 гг. в эксперименте NA48/2. Исследование отобранных 4919 кандидатов с фоном на уровне 4,9% позволило определить парциальную ширину распада $BR = (4,24 \pm 0,14) \times 10^{-6}$. Изучение кинематического пространства распада показывает наличие вклада, зависящего от структуры каона, совпадающего с предсказаниями киральной теории возмущений.

- *Batley J.R. et al. (NA48/2 Collab.).* First Observation and Study of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ Decay // Phys. Lett. B (in press); arXiv:1809.02873 [hep-ex].

При существенном вкладе группы ОИЯИ в рамках эксперимента NA64 в ЦЕРН, посвященного поиску новой физики, обработаны и опубликованы данные 2016 и 2017 гг. по поиску темного фотона с массой менее 1 ГэВ; суммарная статистика

составила $\sim 10^{11}$ событий; кандидатов на сигнал, отвечающий сигнатуре темного фотона, не обнаружено. Сеанс 2017 г. частично был посвящен поиску темного фотона A' с массой 16,7 МэВ, существование которого могло бы объяснить результаты по аномальному рождению e^+e^- -пар в распаде возбужденного состояния ${}^8\text{Be}^*$ в стабильное, полученные в эксперименте АТОМКИ. Было набрано $5,4 \cdot 10^{10}$ событий; гипотетический бозон не был обнаружен; полученные данные позволили существенно увеличить ограничение на вероятность его рождения, дополнив результаты других исследовательских групп.

- *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Search for Vector Mediator of Dark Matter Production in Invisible Decay Mode // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 072002.*
- *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Search for a Hypothetical 16 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 231802.*

В 2018 г. на озере Байкал установлен третий кластер глубоководного полномасштабного телескопа Baikal-GVD. Байкальский нейтринный телескоп является крупнейшим в Северном полушарии и одним из трех крупнейших по эффективной площади и объему для наблюдения природных потоков нейтрино. В настоящее время детектор состоит из 864 оптических модулей, расположенных на 24 вертикальных гирляндах (8 гирлянд в каждом кластере) на глубине от 750 до 1250 м. Эффективный объем глубоководного детектора GVD-2018 для регистрации каскадных событий составляет $0,16 \text{ км}^3$, что позволяет регистрировать поток астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий, соизмеримый с потоком, зарегистрированным в эксперименте IceCube. В течение 2018 г. установка работала как в режиме стандартного набора данных, так и в специальных тестовых режимах. Проводился анализ данных, накопленных в течение 2016–2017 гг. Был получен предел на поток нейтрино от события гравитационной волны GW170817.

- *Aurorin A.D. et al. (Baikal Collab.). Search for High-Energy Neutrinos from GW170817 with Baikal-GVD Neutrino Telescope // Pis'ma v ZhETF. 2018. V. 108(12). P. 803–804.*
- *Aurorin A.D. et al. (Baikal Collab.). Baikal-GVD — Neutrino Telescope of the Next Generation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2018 (in press).*
- *Aurorin A.D. et al. Data Management and Processing System for the Baikal-GVD Telescope // PoS(ICRC2017). 2018. P. 1046.*

Нейтринный детектор DANSS, созданный физиками ОИЯИ совместно со специалистами ИТЭФ (Москва) и установленный на Калининской АЭС, исправно регистрирует около 4000 реакторных антинейтрино в сутки при фоне, не превышающем 2–3 % (на сегодня лучшее в мире значение).

В 2018 г. завершен анализ первой части экспериментальных данных, на основе которого получено наиболее строгое модельно-независимое ограничение на существование стерильных нейтрино. Набор данных и их детальный анализ продолжают.

- *Alekseev I. et al.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // Phys. Lett. B. 2018. V. 787. P. 56–63; arXiv:1804.04046 [hep-ex].

Ученые коллаборации Borexino представили результаты наиболее полного на сегодня анализа потоков нейтрино, сопровождающих термоядерные процессы внутри Солнца. Точность измерения потока бериллиевых нейтрино от Солнца составила рекордные 2,7%, что в два раза лучше, чем существующие теоретические предсказания. Сигнал от реакции *pep* на Солнце впервые зарегистрирован на уровне достоверности, позволяющем говорить о надежном подтверждении протекания данной реакции внутри Солнца. Нейтрино из реакции на ^8B (борные нейтрино) измерены при низком энергетическом пороге 3,2 МэВ, недоступном другим нейтринным детекторам. Высокая точность измерений потока *pp*-нейтрино позволила впервые экспериментально уточнить детали термоядерных процессов внутри Солнца. Сравнение зарегистрированных нейтринных сигналов в детекторе с предсказаниями стандартной модели Солнца однозначно указывает на существование переходной зоны в области низких энергий между двумя режимами нейтринных осцилляций, предсказываемых механизмом Михеева–Смирнова–Вольфенштейна. Таким образом, результаты Borexino независимо, без привлечения данных других экспериментов, подтверждают теоретически предсказываемый переход между «вакуумным» режимом осцилляций и осцилляциями в веществе.

- *Borexino Collab.* Comprehensive Measurement of *pp*-Chain Solar Neutrinos // Nature. 2018. V. 562. P. 505–510.

Физиками ОИЯИ в эксперименте COMPASS (ЦЕРН) была инициирована программа поиска нового возможного механизма рождения экзотических чармониев — фоторождения на ядерной мишени. В результате поиска $X(3872)$ со статистической значимостью в $4,1\sigma$ в спектре инвариантных масс подсистемы

$J/\psi\pi^+\pi^-$ конечного состояния был обнаружен сигнал частицы, масса и ширина которой согласуются с ожидаемыми для $X(3872)$. Детальный анализ кинематики распада наблюдаемой частицы показал полное несоответствие хорошо известной кинематике распада $X(3872)$. Это неожиданное наблюдение позволило предположить, что, возможно, обнаруженный сигнал принадлежит новой частице, получившей название $\tilde{X}(3872)$, которая является частицей-партнером $X(3872)$, имеет близкую массу, но отличается от $X(3872)$ набором квантовых чисел. Существование такой частицы-партнера предсказывается некоторыми теоретическими моделями, описывающими $X(3872)$ как состояние из двух кварков и двух антикварков, тесно связанное сильным взаимодействием (тетракварк). Масса нового состояния $\tilde{X}(3872)$ равна $(3860,1 \pm 10,0)$ МэВ/ c^2 , брейт-вигнеровская ширина с вероятностью 90 % составляет менее 51 МэВ/ c^2 .

- *Aghasyan M. et al.* Search for Muoproduction of $X(3872)$ at COMPASS and Indication of a New State $\tilde{X}(3872)$ // Phys. Lett. B. 2018. V. 783. P. 334.

Физика тяжелых ионов высоких энергий

В 2018 г. коллаборация BM@N провела первый сеанс по физической программе эксперимента. Было зарегистрировано более 2 млн событий во взаимодействии пучка ионов углерода с энергией 4 ГэВ/с на нуклон с жидководородной мишенью в рамках реализации программы исследований короткодействующих корреляций, ведется анализ данных.

Кроме того, коллаборация BM@N зарегистрировала почти 200 млн событий на пучках ионов аргона и криптона с кинетической энергией 3,2 и 2,3 (2,9) АГэВ соответственно. Целью измерений было изучение процессов рождения гиперонов, странных мезонов, фрагментов легких ядер и мультифотонных состояний в неупругих взаимодействиях на ядерных мишенях (Al, Cu, Sn, Pb).

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.)*. Studies of Baryonic Matter at BM@N (JINR) // Quark Matter Conf. 2018, Venezia, Italy, 14–19 May 2018.
- *Pokatashkin G. et al.* Hyperons at the BM@N Experiment: First Results // The 24th Intern. Baldin Seminar, Dubna, 17–22 Sept. 2018.
- *Gornaya Yu.* Analysis of Data from C–A and Ar–A Collisions at the BM@N Experiment // ICCPA-2018 Conf., Moscow, Oct. 2018.

Группа ОИЯИ, участвующая в эксперименте ALICE, исследовала фемтоскопические корреляции пар K^+K^- в Pb-Pb-столкновениях при энергии LHC 2,76 ТэВ. Были получены фемтоскопические радиусы и извлечена масса резонанса $f_0(980)$. С использованием нового фита, предложенного дубненской группой, получено значение ширины f_0 ($7,0 \pm 2,2$) МэВ, согласующееся с результатом коллаборации BESIII ($(9,5 \pm 1,1)$ МэВ). Такое значение ширины, в три раза меньше среднего, полученного в разных экспериментах, достаточно активно обсуждается с точки зрения вклада возможных механизмов.

Результаты были доложены на XX рабочем совещании GDRE (Нант, Франция, 2018).

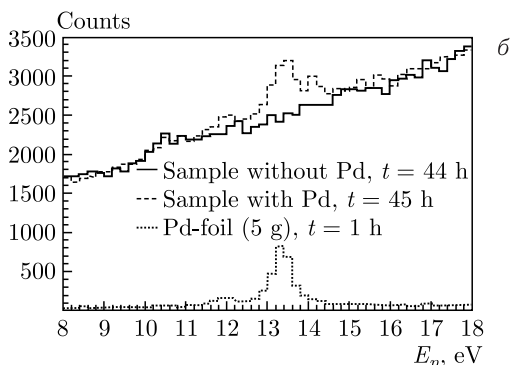
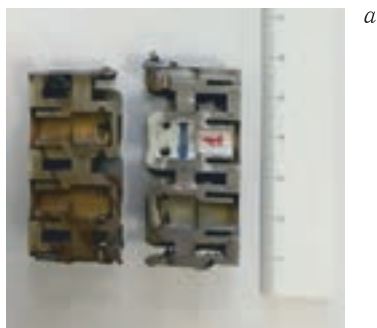
Физика тяжелых ионов низких энергий

В 2018 г. выполнены первые эксперименты на радиоактивных пучках, полученных на новом фрагмент-сепараторе ACCULINNA-2. Сепаратор был построен совместно с французской компанией SIGMAPHИ и установлен на линии первичного пучка ускорителя У-400М в ЛЯР ОИЯИ. В частности, был проведен первый опыт по поиску сверхнейтроноизбыточного ядра ${}^7\text{H}$ в реакции ${}^8\text{He}(d, {}^3\text{He}){}^7\text{H} \rightarrow t + 4n$ на пучке ${}^8\text{He}$ (25 МэВ/нуклон) с регистрацией ${}^3\text{He}$ и тритонов. По результатам обработки данных будет принято решение о дальнейшем развитии метода и проведении более длительного эксперимента с регистрацией всех продуктов реакции.

- *Fomichev A.S. et al.* The ACCULINNA-2 Project: The Physics Case and Technical Challenges // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.

Нейтронная ядерная физика

На источнике резонансных нейтронов ИРЕН проведен эксперимент по изучению возможности определения содержания палладия в элементах двигателей ракеты-носителя «Протон». В работе использовались два образца (элементы двигателя) приблизительно одинаковой массы (около 60 г), предоставленные «Роскосмосом», один содержащий палладий, другой без палладия, а также стандартный образец из чистого палладия массой 5 г. В результате измерения было продемонстрировано наличие характерных резонансов в образце, содержащем палладий. Масса обнаруженного палладия составляет (99 ± 7) мг на уровне

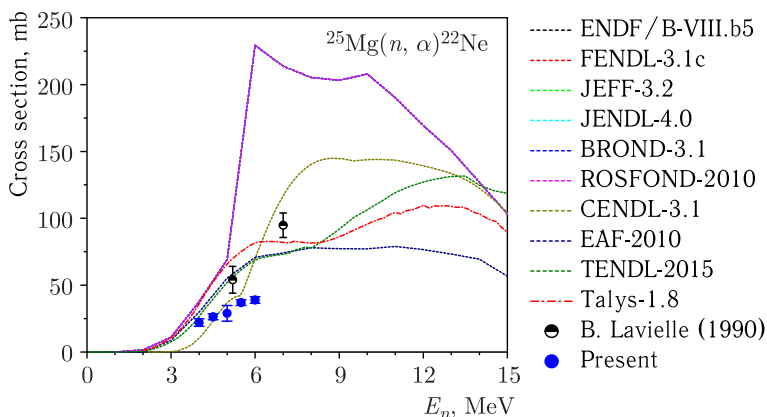


а) Исследуемые образцы (элементы двигателя); цифрой «1» помечен образец, содержащий палладий. б) Фрагменты времяпролетных спектров для исследуемых образцов, а также для образца из чистого палладия

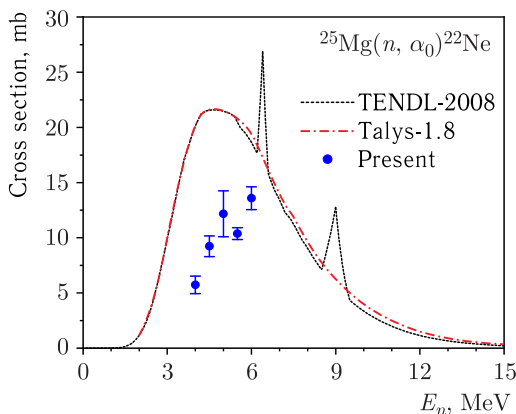
массы образца 60 г. Таким образом, чувствительность метода составляет ~ 2 мг/г.

- Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Aliev F.A., Bystritsky V.M., Kopatch Yu.N., Ruskov I.N., Sedyshev P.V., Skoy V.R., Shvetsov V.N., Baraev A.V., Kologov A.V. Elemental Analysis of Engine Parts of the Proton Rocket Carrier with Resonance Neutrons // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15(5). P. 537; doi.org/10.1134/S1547477118050102.

Завершен анализ данных из измерений реакций $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ в пяти точках в области значений энергии нейтронов 4,0–6,0 МэВ. Результаты позволяют получить функцию возбуждения для реакций $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ и $^{25}\text{Mg}(n, \alpha_0)^{22}\text{Ne}$. Согласно принципу детального баланса эти данные могут дать информацию о реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$, которая является одним из основных источников нейтронов в астрофизическом



Сечение реакции $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ в сравнении с имеющимися экспериментальными данными, библиотеками и расчетами по Talys-1.8



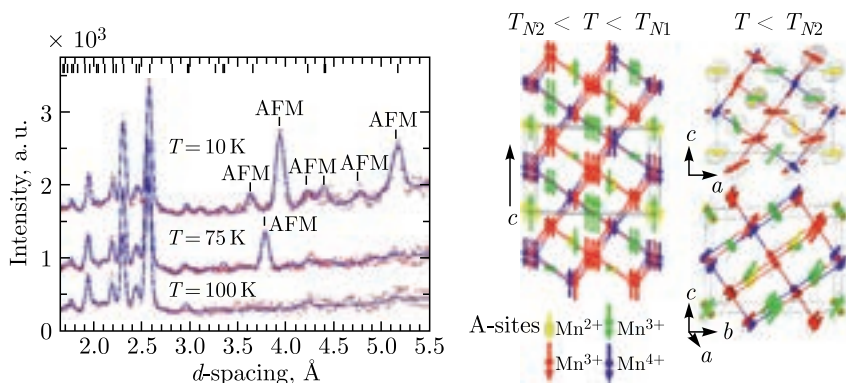
Сечение реакции $^{25}\text{Mg}(n, \alpha_0)^{22}\text{Ne}$ в сравнении с имеющимися экспериментальными данными, библиотеками и расчетами по Talys-1.8

s -процессе. Результаты сравнены с имеющимися экспериментальными данными, библиотеками и расчетами по Talys-1.8.

- *Gledenov Yu. M., Sedysheva M. V., Khuukhenkhuu G., Bai Huaiyong, Jiang Haoyu, Lu Yi, Cui Zengqi, Chen Jinxiang, Zhang Guohui.* Measurement of the Cross Sections of the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ Reaction in the 4–6 MeV Region // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 98. P. 034605.

Физика конденсированных сред

В условиях воздействия высоких температур и давлений синтезирована новая перовскитная фаза простого бинарного окси-

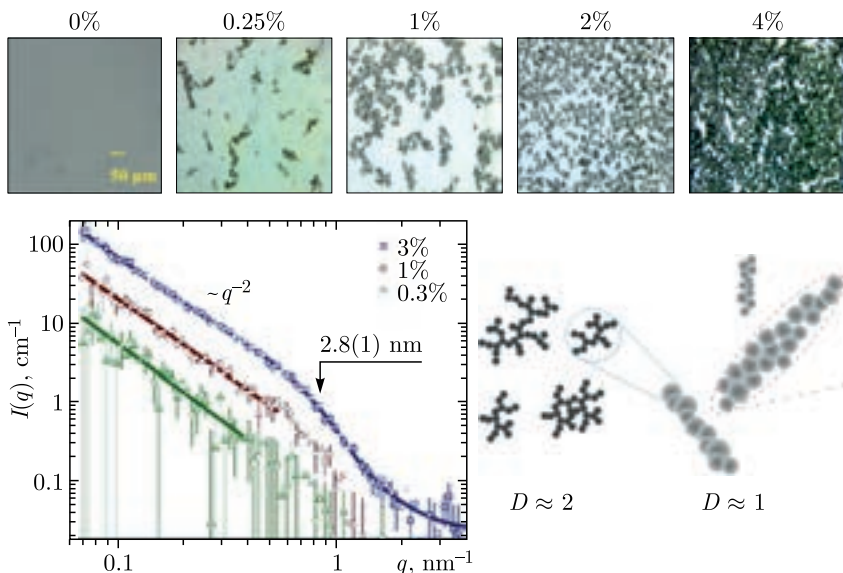


Нейтронные дифракционные спектры (слева) и симметрия модулированных магнитных структур (справа) оксида Mn_2O_3

да Mn_2O_3 . Уникальность этого материала состоит в том, что в позициях А и В перовскитной структуры (ABO_3) располагаются одноименные магнитные ионы марганца. Проведено комплексное исследование структурных, магнитных и сегнетоэлектрических свойств данного материала. Установлено существование двух сложных модулированных антиферромагнитных фаз ($T_{N1} \approx 100\text{ K}$, $T_{N2} \approx 50\text{ K}$), и определена их магнитная структура. В несоразмерной низкотемпературной АФМ-фазе наблюдались появление спин-индуцированной спонтанной сегнетоэлектрической поляризации и магнитоэлектрический эффект.

- *Cong J., Zhai K., Chai Y., Shang D., Khalyavin D.D., Johnson R.D., Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Abakumov A.M., Tsirlin A.A., Dubrovinsky L., Xu X., Sheng Z., Ovsyannikov S.V., Sun Y. Spin-Induced Multiferroicity in the Binary Perovskite Magnetite Mn_2O_3 // Nat. Commun. 2018. V. 9. P. 2996.*

Методами малоуглового рассеяния нейтронов и поляризационной микроскопии исследованы особенности агрегации наночастиц алмаза в композитах на основе нематических жидких кристаллов. Показано, что, как и исходные используемые в синтезе водные дисперсии наноалмазов, композитная система обладает многоуровневой структурой. Наноалмазы собраны во фрактальные кластеры с размерностью 2, существенно меньшей, чем в исходных дисперсиях (размерность 2,3). Кластеры входят в состав квазилинейных агрегатов, способных образовывать непрерывную сетку при концентрациях от 1 мас. %. Дополнительно рассмотрен



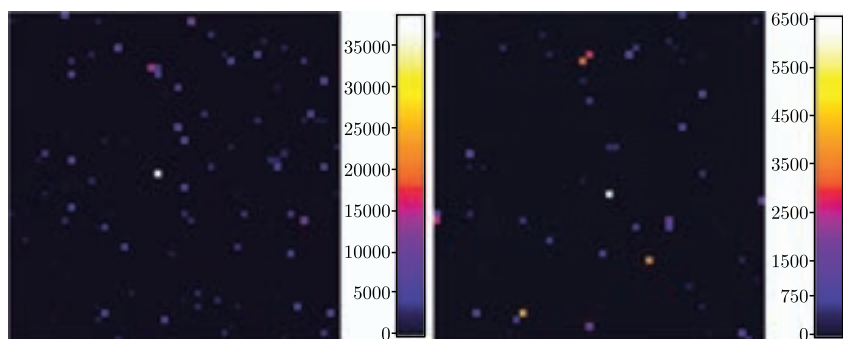
Структурная организация жидкокристаллической суспензии с нанодиамазами. Показаны результаты, полученные методом поляризационной микроскопии (вверху), малоуглового рассеяния нейтронов (внизу слева), и схематическое изображение формируемых кластеров и агрегатов (внизу справа)

вопрос о влиянии толщины слоя жидкокристаллической суспензии на процесс агрегации.

- *Tomylo S. V., Tomchuk O. V., Ivankov O. I., Ryukhtin V. V., Bulavin L. A., Avdeev M. V.* Multilevel Structure of Diamond Nanoparticles — Liquid Crystal Composites // *Materials Today: Proc.* 2018 (submitted).

В сотрудничестве с Институтом общей физики РАН в ОИЯИ получены результаты, которые впервые демонстрируют возможность регистрации высококонтрастных КАРС-сигналов от молекул-репортеров тионитробензойной кислоты (ТНВ), иммобилизованных к золотым наночастицам, осажденным на поверхность новых плазмонно-активных метаматериалов на основе наноструктурированной фасеточной поверхности диэлектрической пленки CeO_2 , напыленной на Al -подслое.

Пространственное распределение КАРС-сигнала для не модифицированной молекулами-аналитами плазмонной поверхности подложки регистрировалось на двух длинах волн накачки: $\lambda_p = 932$ и 900 нм. Выбранные значения λ_p соответствуют ра-



Пространственное распределение КАРС-сигнала для немодифицированных Au-NPs на поверхности пленки CeO_2 размерами 40×40 мкм

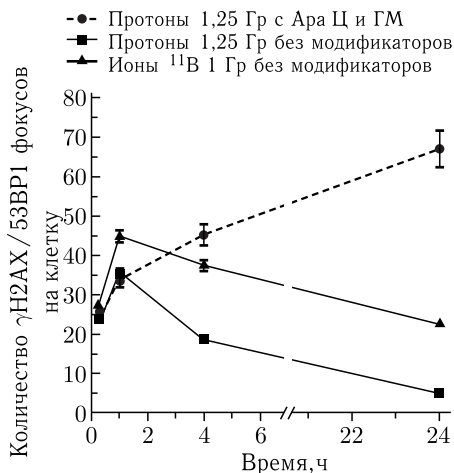
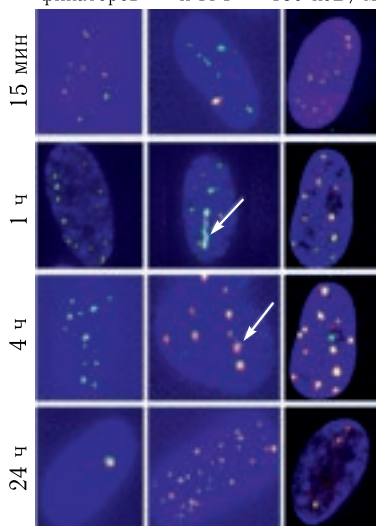
мановским сдвигам $1,333 \text{ см}^{-1}$ (резонансному с одним из раман-активных переходов TNB) и $1,714 \text{ см}^{-1}$ (нерезонансному переходу). Исследования показали, что при раман-резонансном лазерном возбуждении TNB/Au-NP-конъюгатов интенсивные КАРС-сигналы могут генерироваться при лазерных мощностях, не приводящих к разрушению конъюгатов.

- *Arzumanyan G. M., Mamatkulov K. Z., Smirnov V. V., Fabelinsky V. I. et al.* Surface-Enhanced Micro-CARS Mapping of a Nanostructured Cerium Dioxide/Aluminum Film Surface with Gold Nanoparticle-Bound Organic Molecules // *J. Raman Spectroscopy*. 2018. V. 49(7). P. 1145–1154.

РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработан принципиально новый метод повышения биологической эффективности пучков протонов медицинского назначения и гамма-терапевтических установок. Метод позволяет приблизить биологическую эффективность протонного облучения к эффективности облучения ионами углерода. Подход основан на применении официального препарата — 1- β -D-арабинофуранозилцитозина (Ара Ц), используемого в онкологической практике при лечении раковых заболеваний кроветворной системы. Установлено, что при введении препарата перед облучением клеток человека ионизирующими излучениями происходит трансформация одностранных разрывов ДНК в летальные двунитевые разрывы. Применение предложенного подхода, обеспечивающего существенное повышение биологической эффективности пучков

Протоны 0,6 Гр ^{11}B 1 Гр
 без моди- с Ара Ц 8 МэВ/нуклон
 фикаторов и ГМ 139 кэВ/мкм



Изображения индивидуальных $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$ фокусов и кинетика их формирования и элиминации в ядрах клеток человека при действии протонов в пике Брэгга и ускоренных ионов бора с энергией 8 МэВ/нуклон при облучении в обычных условиях и в присутствии радиомодификатора

протонов и гамма-терапевтических установок, значительно сближает области использования протонных и углеродных ускорителей для терапевтических целей.

- Красавин Е. А., Борейко А. В., Заднепрянец М. Г., Ильина Е. В., Кожина Р. А., Кузьмина Е. А., Куликова Е. А., Смирнова Е. В., Тимошенко Г. Н., Тиунчик С. И., Чаусов В. Н. Влияние ингибиторов синтеза ДНК на биологическую эффективность пучка протонов в модифицированном пике Брэгга. Препринт ОИЯИ Р19-2018-48. Дубна, 2018.

УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТЕМАТИКА

В период с февраля по апрель был успешно проведен ускорительный сеанс на базовом элементе создаваемого комплекса NICA — сверхпроводящем синхротроне нуклотрон — на выведенных пучках ионов $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$ и $^{78}\text{Kr}^{26+}$.

В ходе сеанса:

— впервые в мировой практике реализован бесструктурный режим медленного вывода ускоренного пучка из сверхпроводя-

щего синхротрона с использованием ВЧ-шума для повышения качества и равномерности растяжки;

— исключительно стабильно и надежно отработал новый источник многозарядных ионов «Крион-6Т», являющийся базовым для тяжелоионной программы комплекса NICA;

— впервые в России ускорены и выведены из кольца ионы криптона с энергией 3,1 ГэВ/нуклон, продемонстрирована возможность стабильной работы нуклотрона с полем уровня 18 кГц.

- *Sidorin A. et al.* Status of the Nuclotron // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 49–51.
- *Butenko A. V. et al.* Progress of the NICA Complex Injection Facility Development // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 75–77.
- *Donets E. D. et al.* Emittance Measurement on Krion-6T Ion Source by Pepper-Pot Method // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 207–210.

Завершено создание первой очереди фабрики сверхтяжелых элементов, включающей экспериментальный корпус, новый ускоритель тяжелых ионов циклотрон ДЦ-280 (с интенсивностью ионов, на порядок превышающей достигнутые на действующих ускорителях в мире) и высокоэффективный газонаполненный сепаратор продуктов реакции.

Цель создания фабрики — синтез новых сверхтяжелых элементов с $Z = 119$ и 120 и дальнейшее изучение свойств СТЭ,



Ускоритель ДЦ-280



Газонаполненный сепаратор фабрики СТЭ

ранее открытых в ОИЯИ (^{114}Fl , ^{115}Mc , ^{116}Lv , ^{117}Ts , ^{118}Og). Первые эксперименты запланированы на апрель–май 2019 г.

Прецизионный лазерный инклинометр (ПЛИ) — уникальный прибор, сделавший возможным регистрацию угловых микросейсмических колебаний. Разработанные и изготовленные в ОИЯИ профессиональные ПЛИ проходят комплексные испытания в ЦЕРН (Швейцария) и в Гарнийской геофизической обсерватории (Армения). В 2018 г. расширен частотный диапазон прибора до 12,5 Гц и зарегистрирована минимальная спектральная плотность колебаний $2,4 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц $^{1/2}$ в области частот 0,01–4 Гц. Исследовано влияние угловых колебаний на расхождение фокусов пучков коллайдера в зоне их столкновения. Для научной группы, разработавшей ПЛИ, создана специализированная метрологическая лаборатория.

- *Азарян Н. С. и др.* Минимизация долговременных шумов 24-битных АЦП для прецизионного лазерного инклинометра. Препринт ОИЯИ Р13-2018-47. Дубна, 2018.
- *Azaryan N. et al.* Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events // Part. Nucl. (submitted).

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

В 2018 г. Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК) ОИЯИ пополнился новой гетерогенной высокопроизводительной компонентой — суперкомпьютером «Говорун». Он содержит как CPU вычислительные компоненты, так и ускорители вычислений GPU NVIDIA V100, что позво-

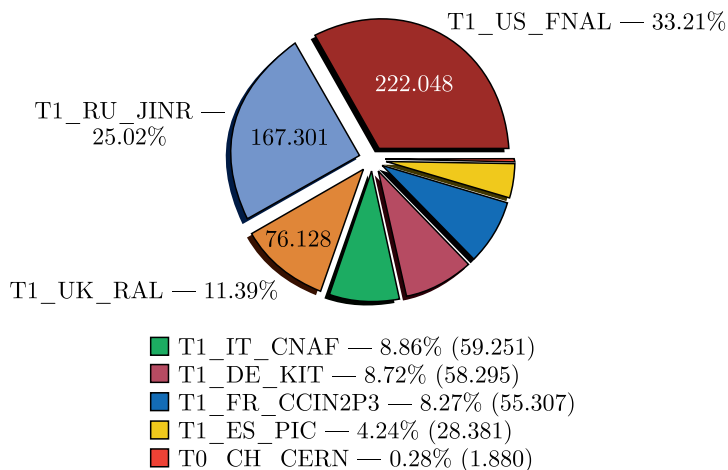
ляет проводить ресурсоемкие, массивно-параллельные расчеты, для которых требуются различные типы вычислительных архитектур. Процессорная составляющая суперкомпьютера «Говорун» реализована российской компанией ЗАО «РСК Технологии» на основе передового жидкостного охлаждения, а также целого ряда собственных инновационных решений. В настоящее время суперкомпьютер используется для решения массивно-параллельных и ресурсоемких задач, связанных с реализуемым в ОИЯИ мегасайенс-проектом NICA.

За период с июля по ноябрь 2018 г. на суперкомпьютере было выполнено свыше 66 000 задач на всех вычислительных компонентах как для теоретических расчетов, так и для обработки экспериментальных данных проекта NICA.

- Суперкомпьютер «Говорун». http://hlit.jinr.ru/about_govorun/

В состав МИВК входит единственный грид-центр уровня Tier-1 для обработки и хранения данных эксперимента CMS (ЦЕРН) в странах-участницах ОИЯИ. Грид-центр ОИЯИ занимает второе место в мире — в нем обработано более 150 млн событий, что превосходит 24 % от полного количества событий, обработанных мировыми грид-центрами 1-го уровня.

Осуществляется интеграция облачных инфраструктур каждой из партнерских организаций стран-участниц ОИЯИ (рисунков) в распределенную платформу на основе платформы DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control).



Вклад мировых центров 1-го уровня в обработку экспериментальных данных CMS (в миллионах обработанных событий) за 2018 г.



В рамках непрерывно-атомистической модели, которая состоит из комбинации модели термического пика и метода молекулярной динамики, развит подход, на основе которого исследованы процессы в мишени из никеля при облучении ионами урана с энергией 700 МэВ. Для решения уравнений непрерывно-атомистической модели разработан программный комплекс, расчеты проводились на гетерогенной платформе HybriLIT.

- *Batgerel B. et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 173. P. 03005.*

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В 2018 г. более 400 студентов базовых кафедр МГУ, МФТИ, МИФИ, государственного университета «Дубна» и университетов государств-членов ОИЯИ обучались в Учебно-научном центре ОИЯИ. В летних учебных и производственных практиках в лабораториях ОИЯИ приняли участие более 300 студентов вузов Белоруссии, Казахстана, РФ, Украины.

140 представителей Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Египта, Кубы, Монголии, Польши, Румынии, Сербии, Словакии, Чехии и ЮАР принимали участие в трех этапах ежегодной международной студенческой практики.

От 4 до 8 недель отводилось на выполнение студенческих исследовательских проектов в научных подразделениях ОИЯИ 63 участникам летней студенческой программы из Белоруссии, Болгарии, Бразилии, Германии, Египта, Италии, Казахстана, Китая, Кубы, Польши, Румынии, РФ, Сербии, Узбекистана, Украины.

Научные школы для учителей физики из государств-членов ОИЯИ, проходившие в ОИЯИ и в ЦЕРН, собрали 47 преподава-

телей и 13 учащихся из Азербайджана, Белоруссии, Болгарии, Индии, Казахстана, Молдавии, РФ и Украины.

В Москве на VIII Всероссийском фестивале НАУКА 0+ «Megascience: Россия в мире — Россия для мира» сотрудники ОИЯИ представили экспозиции, содержащие макеты действующих и будущих установок ОИЯИ. На двух выставочных площадках для школьников проводились мастер-классы, опыты и эксперименты по физике, химии и робототехнике, читались лекции.

В Черногории в работе Международной школы по ядерным методам в науке о жизни и окружающей среде NMELS'18, организованной УНЦ, ЛНФ и ЛЯП, приняли участие 50 студентов и аспирантов из Албании, Болгарии, Боснии, Венгрии, Греции, Македонии, Румынии, Сербии, Хорватии, Черногории. Лекции по ядерным и смежным методам для экологических исследований различных экосистем представили известные ученые из ОИЯИ, а также из научных центров Греции, Македонии, Норвегии, Польши, Румынии, Сербии, Черногории и ЮАР.

УНЦ ОИЯИ участвовал в организации и проведении Дней физики, 7-го турнира Открытой Верхневолжской кибернетической сети CyberDubna-2018, 30-й Межрегиональной компьютерной школы им. В. Волокитина и Е. Ширковой, международной образовательно-просветительской акции «Открытая лабораторная», олимпиад по физике и математике; организовывал ознакомительные, научно-популярные, виртуальные лекции, а также экскурсии для студентов, школьников и учителей из государств-членов ОИЯИ и других стран.

ОБЩИЕ ДАННЫЕ О КОЛИЧЕСТВЕ ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ОИЯИ (с 18.12.2017 по 12.12.2018)

- Книги — 11:

Ignatovich V. Electromagnetic Waves and My Adventures along Pages about EPR Paradox: Photons in Condensed Matter and in Fundamental Physics. — Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2018. — 65 p.: ill. — Bibliogr.: p. 61–65.

Ignatovich V. Quantum Mechanics Illustrated with Neutrons: Non Relativistic Theory. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 144 p.: ill. — Bibliogr.: p. 137–144.

Namsrai Kh. Handbook in Differential Equations and Applications to Physics. — Ulaanbaatar: Univ. of the Humanities, [2018]. — 215 p. — Bibliogr.: p.207–208.

Объединенный институт ядерных исследований в эксперименте ATLAS. 1992–2015 гг. / Вадим Александрович Бедняков, Юлиан Арамович Будагов, Виктор Васильевич Кухтин, Николай Артемьевич Русакович, Александр Павлович Чеплаков, Георгий Александрович Шелков, Евгений Владимирович Храмов. — Дубна: ОИЯИ, 2018. — 280 с.: цв. ил. — (ОИЯИ; 2017-45). — Библиогр.: с. 240–280.

Боголюбов Н. Н., Боголюбов Н. Н. (мл.) Введение в квантовую статистическую механику. — Изд. 3-е. — М.: URSS, 2018. — 384 с. — (Классический учебник МГУ). — Библиогр. в конце частей.

Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей: учебное пособие. — 6-е изд., испр. и доп. — М.: URSS, 2018. — 643 с.: ил. — (Классический учебник МГУ). — Библиогр.: с. 642–643.

Игнатович В. Квантовая механика на примере нейтрона: нерелятивистская квантовая механика. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 154 с.: ил. — Библиогр.: с. 147–154.

Игнатович В. Электромагнитные волны и мои приключения по страницам ЭПР парадокса: фотоны в сплошных средах и в фундаментальной физике. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 67 с.: ил. — Библиогр.: с. 63–67.

Исаев А. П., Рубаков В. А. Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры Ли. — М.: URSS, 2018. — 491 с.: ил. — Доп. тир. — Библиогр.: с. 482–485.

Строковский Е. А. Физика атомного ядра и элементарных частиц: основы кинематики: учебное пособие. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Юрайт, 2018. — 361 с.: ил. — (Бакалавр. Академический курс). — Библиогр.: с. 349–361.

Франк И. М. Научные труды: в двух книгах. Кн. 1. / Сост.: А. И. Франк. — М.: Наука, 2018. — 478 с.: ил. — Библиогр. в конце гл.

- Журнальные статьи — 867
- Публикации в трудах конференций — 639
- Препринты — 56
- Авторефераты диссертаций — 10
- Всего: 1583

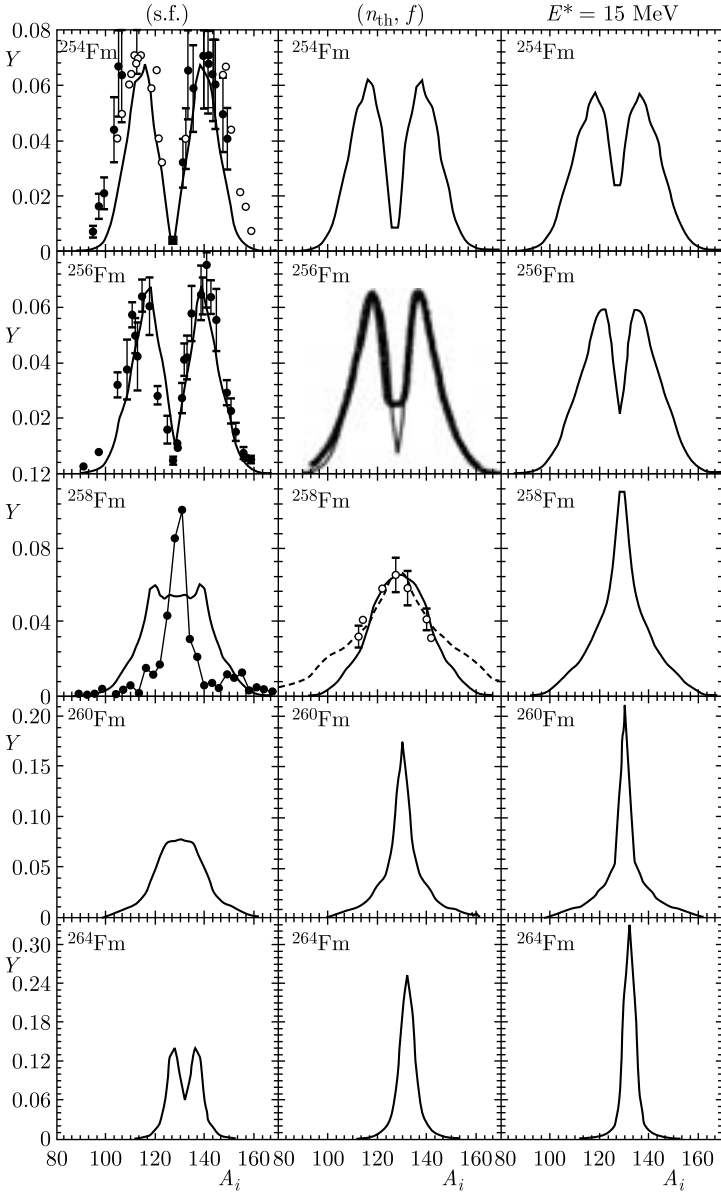
THEORETICAL PHYSICS

A new approach to the theory of nonrenormalized interactions is developed. Generalizations of the renormalization group equations are obtained, which make it possible to sum up the leading asymptotics in all orders of the perturbation theory. The ultraviolet behavior of a number of supersymmetric gauge models of quantum field theory is found.

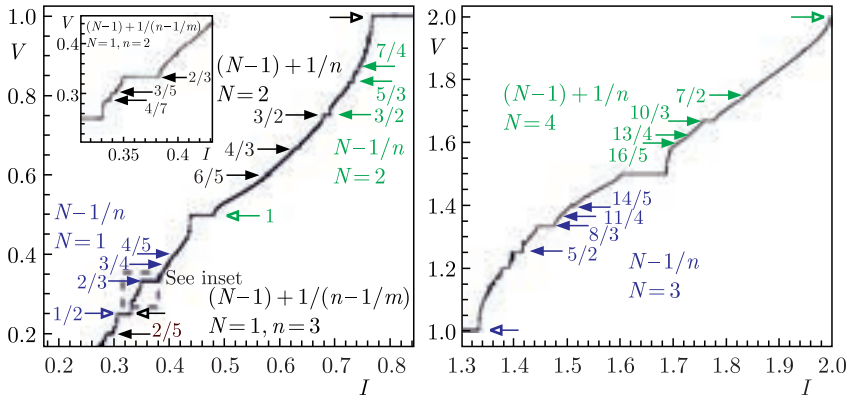
- *Kazakov D.I., Borlakov A.T., Tolkachev D.M., Vlasenko D.E.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 125008.
- *Kazakov D.I.* // Phys. Lett. B. 2018. V. 786. P. 327.

Within the program on the study of the properties of the heaviest nuclei, the charge and mass distributions of fission fragments resulting from spontaneous and induced fission of even-even nuclei $^{254-260,264}\text{Fm}$, $^{258-264}\text{No}$, and $^{262-266}\text{Rf}$ were studied with the statistical scission-point model. The calculated results were compared with the available experimental data (see the figure). In contrast to the experimental data, the calculated mass distribution for $^{258}\text{Fm}(\text{s.f.})$ is strikingly similar to the experimental one for $^{257}\text{Fm}(\text{s.f.})$. The transformation of the shape of charge distribution with increasing isospin and excitation energy occurs gradually and in a similar way to that of the mass distribution but slower. For $^{254}\text{Fm}(\text{i.f.})$, $^{257}\text{Fm}(n_{\text{th}}, f)$, and $^{260}\text{Fm}(\text{s.f.})$, the unexpected difference between the shapes (symmetric or asymmetric) of charge and mass distributions was predicted for the first time. At some critical excitation energy, the saturation of the symmetric component of charge and mass yields was demonstrated. For the fissioning Fm and No nuclei, the transitions from two-peaked to single-peaked mass distributions were predicted.

- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 034621.
- *Pasca H., Andreev A. V., Adamian G. G., Antonenko N. V.* // Nucl. Phys. A. 2018. V. 969. P. 226.



The calculated mass distributions (solid lines) resulting from the spontaneous ($E^* = 0 \text{ MeV}$, the first column) and induced ($E^* = 15 \text{ MeV}$, the third column) fission of the indicated nuclei $^{254,256,258,260,264}\text{Fm}$, and thermal-neutron-induced ($E^* \sim 6.3 \text{ MeV}$, the second column) fission of nuclei $^{253,255,257,259,263}\text{Fm}$. The symbols represent experimental data



Subharmonic steps that form devil's staircases in different parts of IV-characteristic at ferromagnetic resonance

The effect of coupling between the superconducting current and magnetization in the superconductor/ferromagnet/superconductor Josephson junction under an applied circularly polarized magnetic field is studied. Manifestation of ferromagnetic resonance in the frequency dependence of the amplitude of the magnetization and the average critical current density is demonstrated. The IV-characteristics show subharmonic steps that form devil's staircases, following a continued fraction algorithm. The origin of the found steps relates to the effect of the magnetization dynamics on the phase difference in the Josephson junction.

- *Nashaat M., Botha A.E., Shukrinov Yu.M.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. P. 224514.

$SU(2|1)$ supersymmetric multiparticle quantum mechanics with additional semidynamical spin degrees of freedom is considered. In particular, an $\mathcal{N} = 4$ supersymmetrization of the quantum $U(2)$ spin Calogero–Moser model is provided, with an intrinsic mass parameter coming from the centrally extended superalgebra $\widehat{su}(2|1)$. The full system admits an $SU(2|1)$ covariant separation into the center-of-mass sector and the quotient. Explicit expressions for the classical and quantum $SU(2|1)$ generators in both sectors as well as for the total system are derived, and the relevant energy spectra, degeneracies, and the sets of physical states are determined.

- *Fedoruk S., Ivanov E., Lechtenfeld O., Sidorov S.* // JHEP. 2018. V. 1804. P. 043; arXiv:1801.00206 [hep-th].

We have investigated the robustness of third family solutions for hybrid compact stars with a quark matter core that correspond to

the occurrence of high-mass twin stars against the softening of the phase transition by means of a construction that mimics the effects of pasta structures in the mixed phase. We consider a class of hybrid equations of state that exploits a relativistic mean-field model for the hadronic as well as for the quark matter phase. We present parameterizations that correspond to branches of high-mass twin star pairs with maximum masses between 2.05 and 1.48 masses of the Sun and having the radius differences between 3.2 and 1.5 km, respectively. When compared to a Maxwell construction of the first-order phase transition with a fixed value of critical pressure, the effect of the mixed phase construction consists in the occurrence of an additional pressure, around the critical point, belonging to the coexistence of hadronic and quark matter phases. A relative additional pressure of about 6% was found at which the solution corresponding to the third family of compact stars disappears. It has been shown that at least heavier of the neutron stars of the binary merger GW170817 could have been a member of the third family of hybrid stars.

- *Ayriyan A. et al. // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. P. 045802.*

EXPERIMENTAL PHYSICS

Particle Physics

The JINR group participating in the NA62 project published the final article based on the analysis of the previously unobserved rare decay of $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$. The results are based on the analysis of $1.7 \cdot 10^{11}$ decays of charged kaons registered in 2003–2004 in the NA48/2 experiment. The study of the selected 4919 candidates with the background of 4.9% allowed one to determine the partial decay width of $BR = (4.24 \pm 0.14) \cdot 10^{-6}$. The study of the kinematic decay space shows the existence of the contribution that is dependent on the kaon structure, which is in accordance with the chiral perturbation theory prediction.

- *Batley J.R. et al. (NA48/2 Collab.). First Observation and Study of the $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 e^+ e^-$ Decay // Phys. Lett. B (in press); arXiv:1809.02873 [hep-ex].*

With substantive contributions from JINR group participating in the NA64 experiment at CERN, which is devoted to the search for new physics, data of 2016 and 2017 on the search for a dark photon with a mass less than 1 GeV were analyzed and published.

The total statistics comprises $\sim 10^{11}$ events, no candidates for the signal corresponding to the dark photon signature were found. The 2017 run was partially devoted to the search for dark photon A' with the mass of 16.7 MeV, the existence of which could explain the result of the anomalous production of e^+e^- pairs in the decay of the excited state of ${}^8\text{Be}^*$ into the stable one (the ATOMKI experiment). $5.4 \cdot 10^{10}$ events were collected, the hypothetical boson was not observed, the obtained data allowed a significant increase in the constraint on the probability of its existence, complementing the results of other research groups.

- *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Search for Vector Mediator of Dark Matter Production in Invisible Decay Mode // Phys. Rev. D. 2018. V. 97. P. 072002.*
- *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.). Search for a Hypothetical 16 MeV Gauge Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 231802.*

Baikal neutrino telescope is one of the three largest operating detectors in terms of effective volume and effective area for natural neutrino flux observation and is the largest in the North Hemisphere. The most important achievement of the year 2018 is the construction of the third cluster of the deep underwater detector in Lake Baikal as the next step to full-scale Baikal-GVD detector. The detector-2018 consists of 864 optical modules assembled on 24 vertical strings (8 strings in each cluster) distributed at the depth of 750–1250 m. The deep underwater detector GVD-2018 has the effective volume of about 0.16 km^3 for cascade registration, which provides the ability to look into astrophysical neutrino flux of ultra-high energy detected at IceCube experiment. During 2018 the detector was run in regular data acquiring mode and in special test regimes. The analysis of experimental data of 2016–2017 also proceeded during this year. Limit on the neutrino flux from the event GW170817 was obtained.

- *Avrerin A.D. et al. (Baikal Collab.). Search for High-Energy Neutrinos from GW170817 with Baikal-GVD Neutrino Telescope // Pis'ma v ZhETF. 2018. V. 108(12). P. 803–804.*
- *Avrerin A.D. et al. (Baikal Collab.). Baikal-GVD — Neutrino Telescope of the Next Generation // Bull. Russ. Acad. Sci. 2018 (in press).*
- *Avrerin A.D. et al. Data Management and Processing System for the Baikal-GVD Telescope // PoS(ICRC2017). 2018. P. 1046.*

The JINR DLNP physicists in collaboration with ITEP (Moscow) colleagues created neutrino detector DANSS which

contains neither flammable nor caustic liquids and therefore could be located in close vicinity of an industrial nuclear reactor. The detector started its operation at the fourth unit of the Kalinin NPP in 2016. It registers about 4000 neutrinos per day with a background less than 2–3% (both values are the worldwide best now). Due to a lifting gear, the detector is movable on-line by 2 m, thus measuring neutrino energy spectrum as a function of distance. In addition to the reactor diagnostics, this feature allows one to investigate short-range neutrino oscillations (i.e., periodic variation of the neutrino flux with distance) in the way independent of any questionable assumptions about theoretical neutrino spectrum. In 2018, analysis of the first portion of data (approximately one year of measurement) was performed and the strongest model-independent limit of the sterile neutrino existence was produced. The data acquisition and detailed analysis are in progress.

- *Alekseev I. et al.* Search for Sterile Neutrinos at the DANSS Experiment // Phys. Lett. B. 2018. V.787. P.56–63; arXiv:1804.04046 [hep-ex].

The international collaboration Borexino has published the compendium of its results on neutrinos, accompanying the thermonuclear processes in the Sun. The Borexino detector registers neutrino from the Sun by scintillation light from the scattered off electrons in the liquid organic scintillator of the total mass of 300 t. The ultra-low level of radioactivity achieved in the detector is one of milestones of the Borexino project success. The most precise and complete results of the spectral analysis of accumulated so far data are presented by the Collaboration. The uncertainty of the beryllium neutrino flux is reduced to 2.7%, two times better than existing theoretical prediction. For the first time the robust signature of the *pep* reaction in the Sun is detected, confirming the presence of corresponding process in the Sun. Neutrino flux from the ^8B reaction is measured with the low-energy threshold of 3.2 MeV, unreachable in other neutrino detectors. The high precision of the *pp*-neutrino flux measurement revealed further details of the thermonuclear processes in the Sun's core and confirmed the thermonuclear origin of the Sun's energy production. Through the comparison of these experimental data of very high quality and accuracy with the forecasts of the Standard Solar Model, Borexino demonstrates incontrovertibly the existence in the low-energy region of the oscillation between neutrinos of different flavour by the MSW (Mikheyev–Smirnov–Wolfenstein) effect.

In particular, Borexino emphasizes in a completely autonomous way, using only its own data and without having to resort to the results of other experiments, the peculiar transition between the two regimes of “vacuum” and “matter” that represents the signature of the MSW effect.

- *Borexino Collab.* Comprehensive Measurement of pp -Chain Solar Neutrinos // *Nature*. 2018. V. 562. P. 505–510.

Physicists from JINR DLNP initiated a search for a new possible production mechanism for exotic charmonia, the photoproduction off nuclear targets, in the COMPASS experiment (CERN). As a result of the performed search for $X(3872)$, a signal with the statistical significance of 4.1σ in the spectrum of invariant masses of the $J/\psi\pi^+\pi^-$ subsystem of the final state was found. The mass and the width of the observed particle are fully consistent with the expected ones for $X(3872)$, while a detailed analysis of the decay kinematics of the observed particle showed a complete disparity with the well-known decay kinematics of $X(3872)$. This surprising observation gave an opportunity to suppose that the discovered signal may belong to a new particle that was called $\tilde{X}(3872)$ which is a partner particle of $X(3872)$. It has almost the same mass but a different set of quantum numbers. Existence of such a partner particle is predicted by some theoretical models describing $X(3872)$ as a state of two quarks and two antiquarks closely bounded by strong interaction (tetraquark). The mass of the new state $\tilde{X}(3872)$ is $(3860.1 \pm 10.0) \text{ MeV}/c^2$, while its Breit–Wigner width is below $51 \text{ MeV}/c^2$ with 90% probability.

- *Aghasyan M. et al.* Search for Muoproduction of $X(3872)$ at COMPASS and Indication of a New State $\tilde{X}(3872)$ // *Phys. Lett. B*. 2018. V. 783. P. 334.

High Energy Heavy Ion Physics

In 2018, first physical run of the BM@N collaboration was performed. More than 2 million events were obtained with 4 GeV/c per nucleon carbon beam at liquid hydrogen target according to the program for studies of Short Range Correlations, data analysis is in progress.

Additionally, almost 200 million events were written by BM@N with argon and krypton beams with kinetic energy of 3.2 and 2.3 (2.9) A GeV, respectively. The aim of the measurement was the study of hyperons, strange mesons, light nucleus fragments and

multi-gamma states production in inelastic interactions with fixed targets (Al, Cu, Sn, Pb).

- *Kapishin M. (for the BM@N Collab.)*. Studies of Baryonic Matter at BM@N (JINR) // Quark Matter Conf. 2018, Venezia, Italy, 14–19 May 2018.
- *Pokatashkin G. et al.* Hyperons at the BM@N Experiment: First Results // The 24th Intern. Baldin Seminar, Dubna, 17–22 Sept. 2018.
- *Gornaya Yu.* Analysis of Data from C–A and Ar–A Collisions at the BM@N Experiment // ICCPA-2018 Conf., Moscow, Oct. 2018.

The JINR ALICE group studied K^+K^- femtoscopic correlations in Pb–Pb collisions at the LHC energy of 2.76 TeV. The femtoscopic radii and $f_0(980)$ resonance mass have been extracted. The new value of f_0 width (7.0 ± 2.2) MeV was obtained from Dubna fit that agrees with the BESIII result ((9.5 ± 1.1) MeV). This width value, three times less than the mean one for different experiments, is discussed actively enough in terms of contributions of different mechanisms.

The results were reported at the XX GDRE Workshop (Nantes, France, July 2018).

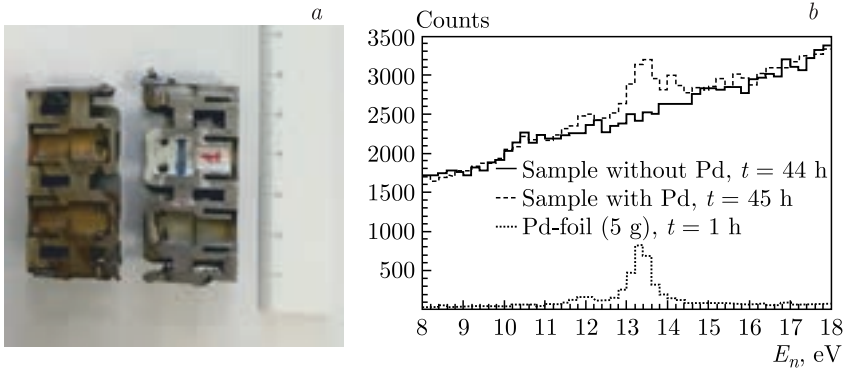
Low Energy Heavy Ion Physics

In 2018, first experiments were conducted with radioactive beams produced using the new ACCULINNA-2 fragment separator. The separator was manufactured in cooperation with the French company SIGMAPHI and installed at the primary beam line of the U-400M accelerator at FLNR, JINR. The first experimental search for highly neutron-rich ${}^7\text{H}$ nuclei was undertaken using the ${}^8\text{He}(d, {}^3\text{He}){}^7\text{H} \rightarrow t + 4n$ reaction (25 MeV/nucleon), with ${}^3\text{He}$ and tritons being detected. Based on data processing, a decision will be made on further development of the method and on conducting a more long-term experiment with the detection of all reaction products.

- *Fomichev A.S. et al.* The ACCULINNA-2 Project: The Physics Case and Technical Challenges // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.

Neutron Nuclear Physics

An experiment on the study of the possibility of determining the palladium (Pd) content in the engine components of the “Proton” rocket carrier has been carried out on the IREN source of resonance

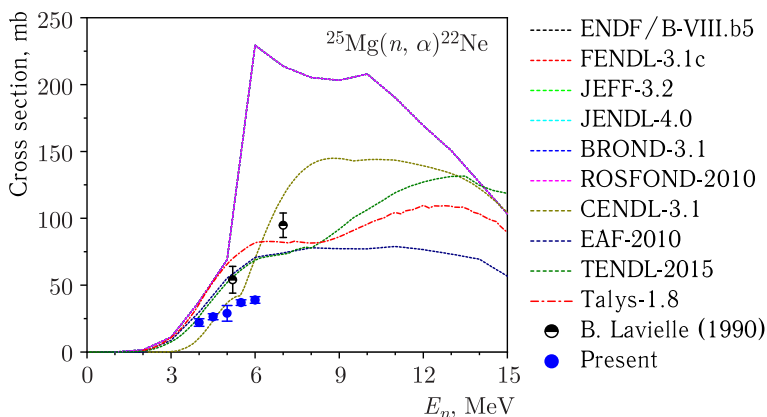


a) Investigated samples (rocket engine components); “1” stands for the sample containing Pd. b) Fragments of time-of-flight spectra of investigated samples as well as for the sample of pure Pd

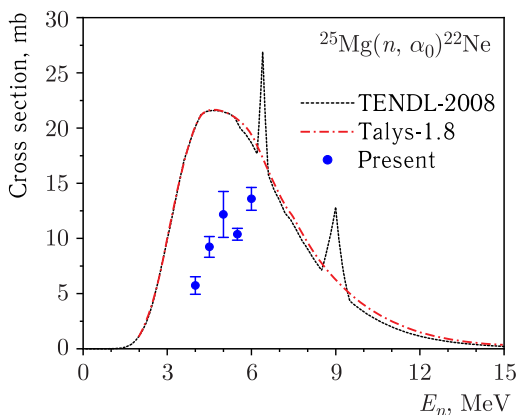
neutrons at FLNP, JINR. The method is rather sensitive, especially to the components such as palladium for which the resonance cross section of neutron capture is large enough. Two samples (rocket engine components) of about the same mass (around 60 g) have been used in the experiment provided by the Roscosmos Corporation, one part containing Pd and the other part without Pd, as well as a reference material of pure palladium with a mass of 5 g. As the result of measurement the availability of particular resonances was demonstrated in the sample containing Pd. The detected Pd mass is (99 ± 7) mg at the level of the sample mass of 60 g. Accordingly, the sensitivity of the method is ~ 2 mg/g.

- Grozdanov D.N., Fedorov N.A., Aliev F.A., Bystritsky V.M., Kopatch Yu.N., Ruskov I.N., Sedyshev P.V., Skoy V.R., Shvetsov V.N., Baraev A.V., Kologov A.V. Elemental Analysis of Engine Parts of the Proton Rocket Carrier with Resonance Neutrons // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15(5). P. 537; doi.org/10.1134/S1547477118050102.

Analysis of the data from the measurements of the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ reactions at five points in the neutron energy range of 4.0–6.0 MeV is completed. The results allow one to obtain an excitation function for the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ and $^{25}\text{Mg}(n, \alpha_0)^{22}\text{Ne}$ reactions. According to the principle of detailed balance, our data may provide information on the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction, one of the basic neutron sources in the astrophysical *s*-process. The results are compared with the existing experimental data, libraries and calculations based on Talys-1.8 (see the figure).



The cross section of the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ reaction in comparison with the existing experimental data, libraries and calculations based on Talys-1.8

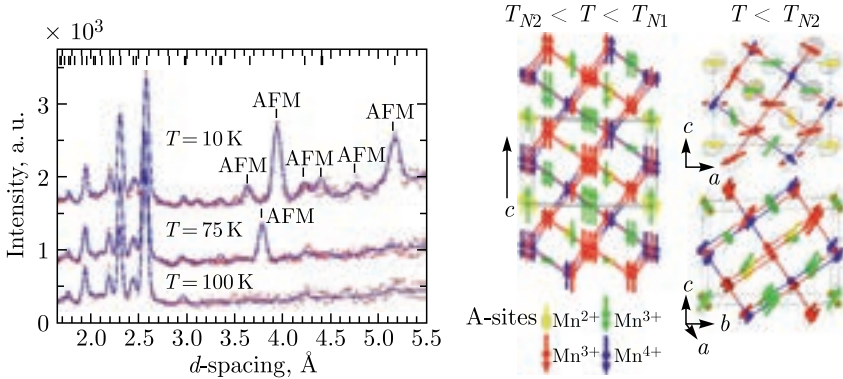


The cross section of the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ reaction in comparison with the existing experimental data, libraries and calculations based on Talys-1.8

- *Gledenov Yu. M., Sedysheva M. V., Khuukhenkhuu G., Bai Huaiyong, Jiang Haoyu, Lu Yi, Cui Zengqi, Chen Jinxiang, Zhang Guohui.* Measurement of the Cross Sections of the $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ Reaction in the 4–6 MeV Region // *Phys. Rev. C.* 2018. V.98. P.034605.

Condensed Matter Physics

Recently a new perovskite phase of the simple binary oxide Mn_2O_3 was synthesized at high pressure and high temperature conditions. The unique feature of this material is a presence of the

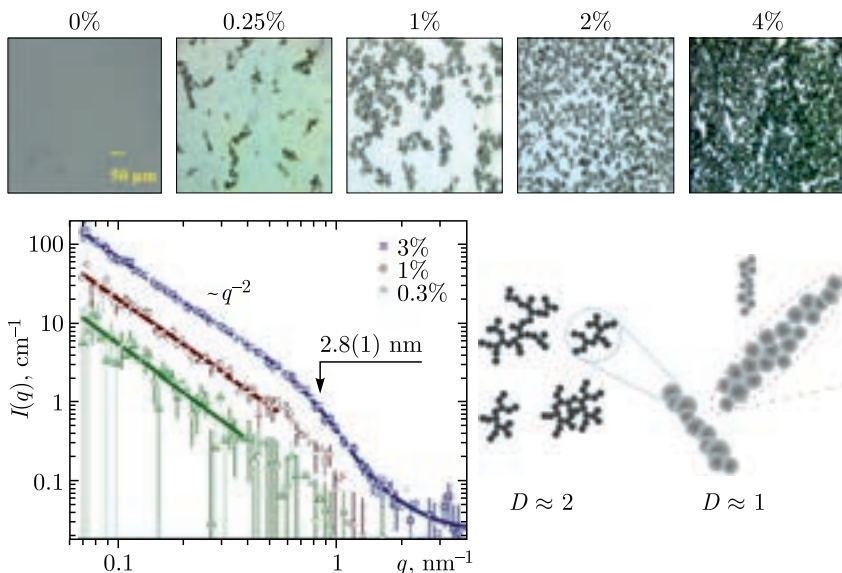


Neutron diffraction patterns (left) and spin arrangement of the modulated magnetic structures of Mn_2O_3 oxide (right)

magnetic manganese ions in the A and B positions of the perovskite structure. A study of structural, magnetic and ferroelectric properties of this material has been performed. The existence of two modulated antiferromagnetic phases ($T_{N1} \approx 100$ K, $T_{N2} \approx 50$ K) was established and their magnetic structure was determined. In the low-temperature antiferromagnetic phase an appearance of the spin-induced spontaneous ferroelectric polarization was detected.

- Cong J., Zhai K., Chai Y., Shang D., Khalyavin D.D., Johnson R.D., Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Abakumov A.M., Tserlin A.A., Dubrovinsky L., Xu X., Sheng Z., Ovsyannikov S.V., Sun Y. Spin-Induced Multiferroicity in the Binary Perovskite Manganeite Mn_2O_3 // Nat. Commun. 2018. V. 9. P. 2996.

Over the last few decades the colloid systems based on nematic liquid crystals and nanoparticles, having potential possibilities for variation of the physical and chemical properties of thin layers of liquid crystals for storage and visualization of information, have been extensively studied. The features of the diamond nanoparticles aggregation in composites based on nematic liquid crystals were analyzed using the small-angle neutron scattering and polarization microscopy methods. It is found that the composite system possesses the multilevel structural organization, like water dispersions of nanodiamonds. The diamond nanoparticles are composed into fractal clusters with dimensionality of 2, substantially less than the one for initial dispersions (2.3). The clusters form the quasi-linear aggregates, enabling generation of continuous network at concentrations above 1 mass %. The



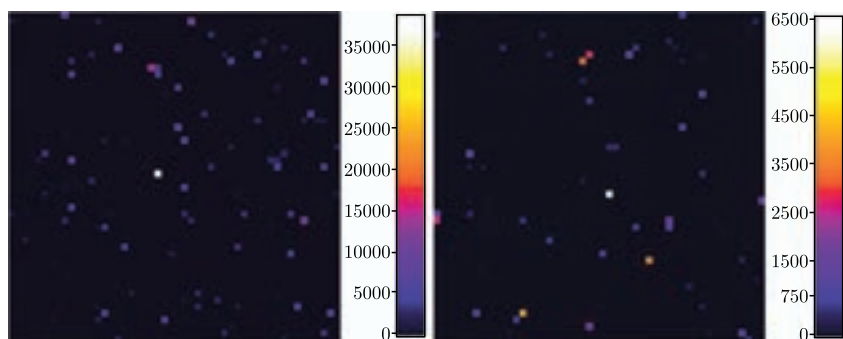
Structural organization of liquid crystal suspension with nanodiamonds. The polarization microscopy results (top), small-angle neutron scattering results (bottom left), and schematic presentation of the formed clusters and aggregates (bottom right)

relationship between the layer thickness and the aggregation process is also considered.

- *Tomytko S. V., Tomchuk O. V., Ivankov O. I., Ryukhtin V. V., Bulavin L. A., Avdeev M. V.* Multilevel Structure of Diamond Nanoparticles — Liquid Crystal Composites // *Materials Today: Proc.* 2018 (submitted).

In collaboration with the Institute of General Physics of RAS, at JINR FLNP, results were obtained that demonstrate for the first time the possibility of detecting highly contrast CARS signals from thionitrobenzoic acid reporter molecules, TNB, immobilized to gold nanoparticles deposited on the surface of new plasmon-active metamaterials based on nanostructured facet surface dielectric film of CeO_2 deposited on the Al sublayer.

The spatial distribution of CARS signals from an area of the sample surface was registered at two pump wavelengths $\lambda_p = 932$ and 900 nm. Selected values of λ_p correspond to the Raman shifts of 1.333 cm^{-1} (resonant with one of the TNB molecule Raman-active transitions) and 1.714 cm^{-1} (nonresonant). Studies have shown that



CARS-signal spatial distribution for unmodified Au-NPs on CeO₂ surface of 40 × 40 μm

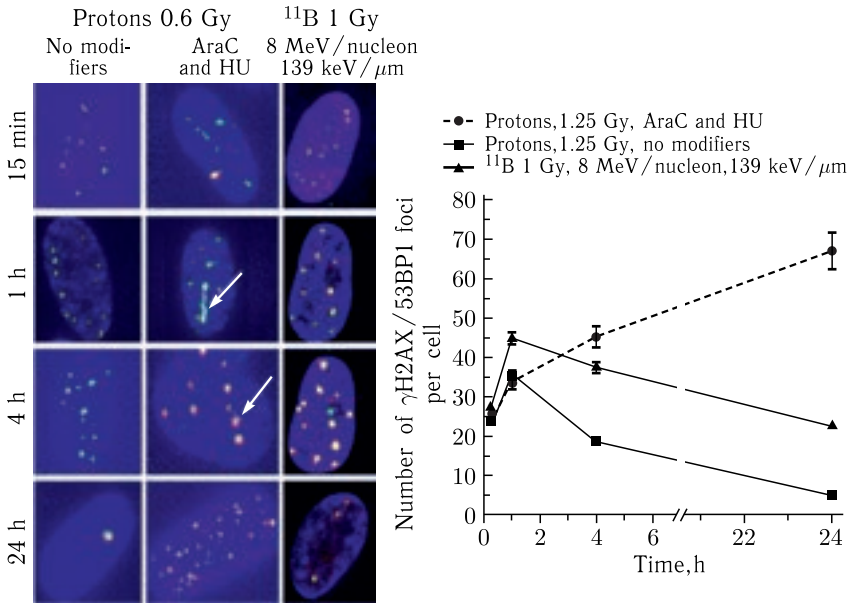
with Raman-resonant laser excitation of TNB/Au-NP-conjugates, intense CARS signals can be generated at laser powers that do not destroy the conjugates.

- *Arzumanyan G. M., Mamatkulov K. Z., Smirnov V. V., Fabelinsky V. I. et al.* Surface-Enhanced Micro-CARS Mapping of a Nanostructured Cerium Dioxide/Aluminum Film Surface with Gold Nanoparticle-Bound Organic Molecules // *J. Raman Spectroscopy*. 2018. V. 49(7). P. 1145–1154.

RADIATION AND RADIOBIOLOGICAL RESEARCH

A fundamentally new technique of increasing the biological effectiveness of medical proton beams and γ -therapy facilities has been developed. The method allows increasing the biological effectiveness of proton exposure to that of carbon ion exposure. The approach is based on the application the officinal preparation 1- β -D-arabinofuranosylcytosine (AraC), which is used in oncological practice for the treatment of hematopoietic system cancer. It has been established that if the preparation is introduced before human cell exposure to ionizing radiation, DNA single-strand breaks are transformed into lethal double-strand ones. The proposed approach provides a significant increase in the biological effectiveness of proton beams and γ -therapy facilities, thereby bringing the areas of the therapeutic use of proton and carbon ion accelerators much closer to each other.

- *Krasavin E.A., Boreyko A.V., Chausov V.N., Ilyina E.V., Kozhina R.A., Kulikova E.A., Kuzmina E.A., Smirnova E.V., Timoshenko G.N., Tiunchik S.I., Zadnepryanets M.G.* The Influence of DNA Synthesis Inhibitors on the Biological



Images of individual $\gamma\text{H2AX}/53\text{BP1}$ foci and kinetics of their formation and elimination in human cell nuclei for exposure to Bragg peak protons and 8 MeV/nucleon boron ions under normal conditions and in the presence of a radiomodifier

Effectiveness of a Modified Bragg Peak Proton Beam // JINR Preprint P19-2018-48. Dubna, 2018.

ACCELERATOR TOPICS

From February to April, the accelerator run at the basic element of the currently developing NICA complex — the superconducting synchrotron Nuclotron — was performed at extracted ion beams $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$ and $^{78}\text{Kr}^{26+}$.

During the run:

- for the first time in the world practice, a non-structural mode of slow extraction of an accelerated beam from the superconducting synchrotron was implemented using HF noise to improve the quality and uniformity of the bunch;

- the new source of multicharged ions Krion-6T, which is essential for the heavy-ion program of the NICA complex, has demonstrated extremely stable and reliable work;

- for the first time in Russia, krypton ions with the energy of 3.1 GeV/nucleon were accelerated and extracted from the ring,

the possibility of stable operation of the Nuclotron with the field of 18 kG level was demonstrated.

- *Sidorin A. et al.* Status of the Nuclotron // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 49–51.
- *Butenko A. V. et al.* Progress of the NICA Complex Injection Facility Development // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 75–77.
- *Donets E. D. et al.* Emittance Measurement on Krion-6T Ion Source by Pepper-Pot Method // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia. 2018. P. 207–210.

Phase 1 of construction of the Factory of Superheavy Elements is complete, including the manufacture of the experimental hall, the new heavy-ion accelerator DC-280 (with the ion intensity one order of magnitude higher than that of any existing accelerator in the world), and the highly efficient gas-filled recoil separator. The goal of the construction of the Factory is the synthesis of new superheavy elements with $Z = 119$ and 120 and further studies of the properties of SHE earlier discovered at JINR (^{114}Fl , ^{115}Mc , ^{116}Lv , ^{117}Ts , ^{118}Og). First experiments are planned to be conducted in April–May 2019.



Gas-filled recoil separator of the SHE Factory

The Precision Laser Inclinometer (PLI) is a unique instrument which made possible the registration of angular microseismic oscillations. Designed and created at JINR, the professional PLIs



DC-280 accelerator

are now undergoing complex tests at CERN (Switzerland) and at Garni Geophysical Observatory (Armenia). In 2018, the frequency range of the instrument was extended to 12.5 Hz, and the minimum spectral oscillations density of $2.4 \cdot 10^{-11}$ rad/Hz^{1/2} was recorded in the frequency range of 0.01–4 Hz. The influence of angular oscillations on the divergence of the collider beams focuses in the collision area is investigated. A specialized metrology laboratory has been created at JINR DLNP for the scientific group that developed PLI.

- *Azaryan N., Budagov J. et al.* The Minimization of the Long Term Noises of the 24-Bit ADC for the Precision Laser Inclinator. JINR Preprint P13-2018-47. Dubna, 2018.
- *Azaryan N., Budagov J. et al.* Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events // Part. Nucl. (submitted).

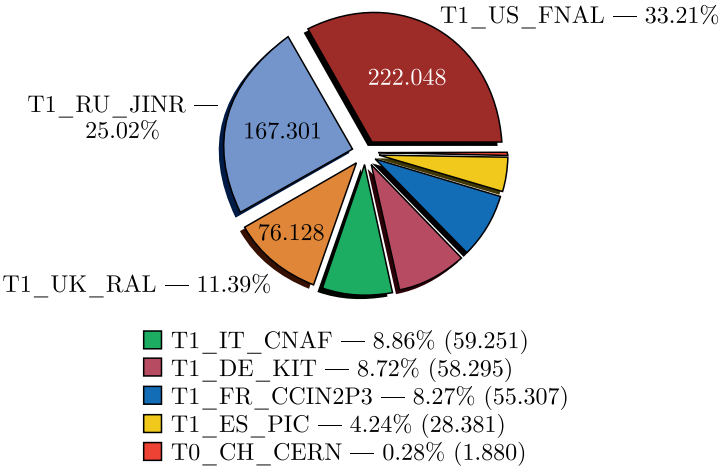
INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER PHYSICS

A new computation component — supercomputer “Govorun” — was included into the Multifunctional Information and Computing Complex (MICC) in 2018. It is based on both CPU and GPU NVIDIA V100 components which allows carrying out resource-intensive parallel computations that require various computation architectures. The CPU part of the supercomputer is supported by the Russian JSC “RSC Technologies” and is based on liquid cooling. Currently, the supercomputer is used for massive-parallel and resource-intensive tasks for the NICA mega-project.

More than 6600 tasks in different fields of study (theoretical computations and experimental data processing for the NICA) were performed during July–November 2018.

- “Govorun” Supercomputer. http://hlit.jinr.ru/about_govorun/

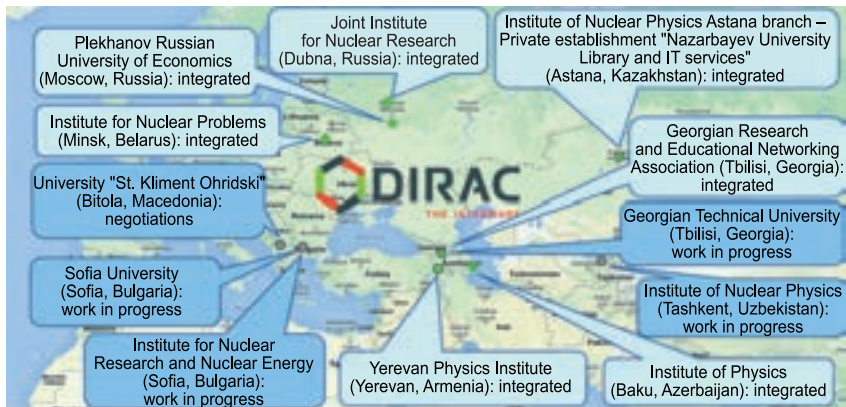
MICC also includes Tier1 center for processing and storage of data from the CMS (CERN) which is one of the seven world centers for data storage and processing. The figure shows contribution of Tier1 centers for the CMS during 2018. Tier1 at JINR holds the second place in the world — it processed more than 150 million events, which exceeds the number of events processed by the world grid centers by 24%.



Contribution of the 1st level world centres to processing of experimental data from CMS (in millions of processed events) in 2018

JINR participates in many research projects in which one of the key factors is computation resources. In order to use the local computation resources more efficiently, each organization that participates in the project develops cloud infrastructure. Currently, cloud infrastructure of each collaborating organization of the JINR Member States is being integrated into a distributed platform based on DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) (see the figure).

Over the last few decades, active research in the field of materials irradiation by high-energy heavy ions has been carried out. At present, the following approaches are used for the mathematical modeling of these processes: a thermal spike model and a molecular dynamics method. In this work, an approach has been developed



which is based on a continuous-atomistic model that consists of the combination of a thermal spike model and a molecular dynamics method. Based on the developed approach, processes in the nickel target exposed to 700 MeV uranium ions were investigated. In order to solve the equations of the continuous-atomistic model, a software complex has been developed and tested on the HybriLIT heterogeneous cluster.

- *Batgerel B. et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 173. P. 03005.*

EDUCATIONAL ACTIVITIES

In 2018, over 400 students of the JINR-based departments of MSU, MIPT, MEPHI, Dubna State University, and the universities of the JINR Member States were trained at the JINR University Centre. JINR laboratories welcomed more than 300 students from the universities of Belarus, Kazakhstan, Russia, and Ukraine for summer internship.

Over 140 representatives of Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, Cuba, the Czech Republic, Egypt, Mongolia, Poland, Romania, Serbia, Slovakia, and South Africa took part in the three stages of the annual International Student Practice.

Sixty-three participants of the Summer Student Programme 2018 from Belarus, Brazil, Bulgaria, China, Cuba, Egypt, Germany, Italy, Kazakhstan, Poland, Romania, Russia, Serbia, Ukraine, and Uzbekistan spent 4–8 weeks doing research projects at JINR laboratories.

Scientific Schools for Physics Teachers from the JINR Member States held at JINR and CERN brought together 47 teachers

and 13 school students from Azerbaijan, Belarus, Bulgaria, India, Kazakhstan, Moldova, Russia, and Ukraine.

In Moscow, at the VIII Russian National Science Festival NAUKA 0+ “MEGASCIENCE: Russia in the World — Russia for the World”, JINR staff members gave lectures and presented theme stands, which featured models of existing and future JINR facilities, at two exhibition sites. The programme for younger school students included master classes, lectures, experimental demonstrations in physics, chemistry, and robotics.

Montenegro hosted 50 undergraduate and postgraduate students from Albania, Bosnia, Bulgaria, Croatia, Greece, Hungary, Macedonia, Montenegro, Romania, and Serbia at the International School on Nuclear Methods for Environmental and Life Sciences (NMELS'18) organized by UC, FLNP, and DLNP. Lectures on nuclear and related methods for ecological studies of various ecosystems were delivered by the outstanding scientists from JINR and scientific centres of Greece, Macedonia, Montenegro, Norway, Poland, Romania, Serbia, and South Africa.

The JINR UC participated in the organization and running of the Physics Days, the 7th Tournament of the Open Upper Volga Cybernetics Network “CyberDubna-2018”, the 30th Interregional Computer School named after V.Volokitin and E.Shirkova, the International Educational Event “Open Lab”, the olympiads in physics and mathematics. The University Centre also organized introductory, popular science, virtual lectures, as well as excursions for students, school students, and teachers from the JINR Member States and other countries.

GENERAL DATA ON THE NUMBER OF PUBLICATIONS BY JINR STAFF MEMBERS (from 18.12.2017 to 12.12.2018)

- Books — 11:

Ignatovich V. Electromagnetic Waves and My Adventures along Pages about EPR Paradox: Photons in Condensed Matter and in Fundamental Physics. — Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2018. — 65 p.: ill. — Bibliogr.: p. 61–65.

Ignatovich V. Quantum Mechanics Illustrated with Neutrons: Non Relativistic Theory. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 144 p.: ill. — Bibliogr.: p. 137–144.

Namsrai Kh. Handbook in Differential Equations and Applications to Physics. — Ulaanbaatar: Univ. of the Humanities, [2018]. — 215 p. — Bibliogr.: p.207–208.

The Joint Institute for Nuclear Research in the ATLAS Experiment. 1992–2015 / Vadim Aleksandrovich Bednyakov, Yulian Aramovich Budagov, Viktor Vasilievich Kukhtin, Nikolaj Artemievich Rousakovich, Aleksandr Pavlovich Cheplakov, Georgij Aleksandrovich Shelkov, Evgenij Vladimirovich Khramov. — Dubna: JINR, 2018. — 280 p.: col. ill. — (JINR; 2017-45). — Bibliogr.: p.240–280.

Bogoliubov N.N., Bogoliubov N.N., Jr. Introduction into Quantum Statistical Mechanics. — M.: URSS, 2018. — 384 p. — (MSU classical manual). — Bibliogr.: end of papers.

Bogoliubov N.N., Shirkov D.V. Introduction into Quantum Field Theory: Manual. — Ed.6 corr. and suppl. — M.: URSS, 2018. — 643 p.: ill. — (MSU classical manual). — Bibliogr.: p.642–643.

Ignatovich V. Quantum Mechanics Illustrated with Neutrons: Non Relativistic Theory. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 154 p.: ill. — Bibliogr.: p.147–154 (in Russian).

Ignatovich V. Electromagnetic Waves and My Adventures along Pages about EPR Paradox: Photons in Condensed Matter and in Fundamental Physics. — Beau Bassin: Lambert Acad. Publ., 2018. — 67 p.: ill. — Bibliogr.: p.63–67 (in Russian).

Isaev A.P., Rubakov V.A. Groups and Symmetries Theory: Finite Groups. Groups and Lie Algebras. — M.: URSS, 2018. — 491 p.: ill. — Addit. ed. — Bibliogr.: p.482–485.

Strokovsky E.A. Physics of Atomic Nucleus and Elementary Particles: Kinematics Basics: Manual. — Ed.3 corr. and suppl. — M.: Yurait, 2018. — 361 p.: ill. (Bachelor Academic course). — Bibliogr.: p.349–361.

Frank I.M. Scientific Works: in two volumes. Vol.1 / Comp.: A. I. Frank. — M.: Nauka, 2018. — 478 p.: ill. — Bibliogr.: end of chap.

- Journal papers — 867
- Publications in conference Proceedings — 639
- Preprints — 56
- Abstracts of theses — 10
- Total: 1583

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Теоретическая физика	3
Экспериментальная физика	6
Физика частиц	6
Физика тяжелых ионов высоких энергий	9
Физика тяжелых ионов низких энергий	10
Нейтронная ядерная физика	10
Физика конденсированных сред	12
Радиационные и радиобиологические исследования	15
Ускорительная тематика	16
Информационные технологии и вычислительная физика	18
Образовательная деятельность	20
Общие данные о количестве публикаций сотрудников ОИЯИ	21
Theoretical Physics	23
Experimental Physics	26
Particle Physics	26
High Energy Heavy Ion Physics	29
Low Energy Heavy Ion Physics	30
Neutron Nuclear Physics	30
Condensed Matter Physics	32
Radiation and Radiobiological Research	35
Accelerator Topics	36
Information Technology and Computer Physics	38
Educational Activities	40
General Data on the Number of Publications by JINR Staff Members	41

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

Подписано в печать 4.02.2019.

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

Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,97. Тираж 170 экз. Заказ № 59601.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/