

Н. Кучерка, Е. В. Лычагин, В. Л. Аксенов

Научные перспективы и возможности будущего нейтронного источника ОИЯИ

В ОИЯИ за более чем 60-летний период деятельности накоплен богатый опыт фундаментальных и прикладных исследований по ядерной физике. Основными областями исследований являются физика частиц, физика ядра и физика конденсированного состояния вещества с использованием ядерных методов. Две последние области развиваются в рамках научной программы Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка (ЛНФ), которая на протяжении многих лет включала проектирование, разработку и построение нейтронных источников [1], исследование свойств нейтронов [2] и использование нейтронов в исследованиях конденсированных сред [3]. Как результат, создана хорошо зарекомендовавшая себя программа пользователей, позволяющая ученым из стран-участниц ОИЯИ и других стран проводить междисциплинарные исследования [4]. Важной темой обсуждений будущего развития ЛНФ сегодня является

проект нового источника нейтронов, что нашло отражение в дискуссиях на недавних заседаниях консультативных и руководящих органов ОИЯИ.

В настоящее время основной базовой установкой ЛНФ является импульсный реактор с высоким потоком и периодическим режимом работы ИБР-2М [5]. Данный источник нейтронов есть результат почти полной модернизации в 2006–2010 гг. его предшественника ИБР-2. Срок службы ИБР-2М, как ожидается, закончится в 2032–2035 гг. (в зависимости от условий эксплуатации) [6]. Поскольку время жизненного цикла крупномасштабного объекта ограничено, уже сегодня существует явная необходимость приступить к рассмотрению будущих направлений нейтронных исследований в ОИЯИ.

Нейтроны в ядерной физике. С самого своего зарождения нейтронная ядерная физика продемонстри-

N. Kučerka, E. V. Lychagin, V. L. Aksenov

Scientific Perspectives and Possibilities of the JINR Future Neutron Source

The Joint Institute for Nuclear Research (JINR) over the last more than 60 years has accumulated rich experience in basic and applied research in nuclear physics. The main fields of research are particle physics, nuclear physics, and physics of condensed state of matter using nuclear methods. The latter two areas are being developed within the scientific program of the Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP), which for many years included the design, development and construction of neutron sources [1], investigation of neutron properties [2], and utilization of neutrons in condensed matter research [3]. A broad spectrum of activities gave rise to a comprehensive and well-established user program allowing the scientists from the JINR Member States and all over the world to perform their investigations in related scientific fields [4]. At pres-

ent, the important issue in the discussion of the future development of FLNP is the project of a new neutron source, which was reflected in the discussions at recent meetings of various JINR advisory and governing bodies.

At the present time, the center piece of FLNP is a powerful high-flux pulsed reactor of periodic operation IBR-2M [5]. It is the result of almost complete modernization of its predecessor IBR-2 in 2006–2010, and its service life is expected to expire in 2032–2035 (depending on exploitation conditions) [6]. Considering the time of the life cycle of large-scale facilities, there is a clear need today to start contemplating future directions of neutron research at JINR.

Neutrons in Nuclear Physics. Since its emergence, neutron nuclear physics has demonstrated its effective-

рвала свою эффективность, став основой ядерной энергетики, инструментом изучения ядерной структуры и свойств фундаментальных взаимодействий. Задачи, стоявшие перед этой областью исследований в начале XXI в. [7], во многом актуальны и сегодня. Они перекликаются с вопросами, которые были сформулированы международным научным сообществом при обсуждении перспектив развития ядерной физики [8]. Прецизионное определение свойств нейтрона, параметров его распада и нейтронных сечений, изучение процессов индуцированного нейтронами деления и процессов ядерных реакций с нейтронами являются важными и иногда уникальными источниками информации для решения проблем космологии, изучения свойств Вселенной на ранней стадии образования, свойств ядерной материи и фундаментальных взаимодействий. Ядерные нейтронные методы (как, например, активационный анализ) получили широкое применение в качестве мощного аналитического подхода в экологических, биологических исследованиях и археологии. Широко известно применение этих методов при исследовании поверхности планет Солнечной системы. Также большие перспективы имеет их применение в ряде отраслей промышленности. Не исчерпа-

ло своего значения изучение сечений взаимодействия нейтронов с ядрами для нужд ядерной энергетики.

Исследования в ЛНФ в области ядерной физики всегда имели широкий спектр направлений и были открыты новым тематикам. Такой подход позволил провести работы по обнаружению ультрахолодных нейтронов (УХН) [9], которые в дальнейшем оказались очень эффективным инструментом для изучения фундаментальных взаимодействий. Последнее десятилетие показало, что направление исследований с УХН является чрезвычайно перспективным. Эти нейтроны стали использоваться для исследований квантовых систем и поиска «новой физики» за рамками Стандартной модели (новых типов взаимодействий, зеркальных миров и т. п.). Новые интенсивные источники УХН позволят значительно повысить уровень исследований и, возможно, сделать УХН инструментом изучения физики поверхности.

Ряд направлений, упомянутых выше, имеют сравнительно долгую историю и предъявляют высокие требования к параметрам источника нейтронов, в первую очередь к высокой интенсивности нейтронов. Рост интенсивности позволяет не только повысить темп набора статистики, но и исследовать систематические эффекты на новом уровне, что является

ness, becoming the basis of nuclear power engineering and a tool for studying the nuclear structure and properties of fundamental interactions. The tasks that this area of research faced in the early XXI century [7] are still of particular importance. They echo the questions that were formulated by the international scientific community when discussing the prospects for the development of nuclear physics [8]. High-precision determination of neutron properties, parameters of its decay and neutron cross sections, studies of neutron-induced fission and nuclear reactions with neutrons are valuable and sometimes unique sources of information for solving cosmology problems, studying the properties of the Universe at an early stage of its formation, properties of nuclear matter and fundamental interactions. Nuclear neutron methods (such as activation analysis) have found wide application as a powerful analytical method in environmental, biological research and archeology. These methods are widely known to be used to study the surface of planets of the Solar System. The application of these methods in a number of industries holds much promise. The study of cross sections for interactions of neutrons with nuclei for the needs of nuclear power engineering is still of considerable significance.

Research activities carried out at FLNP in the field of nuclear physics have always covered a wide range of research areas and have been open to new topics. This approach made it possible to perform studies on the detection of ultracold neutrons (UCN) [9], which later proved to be a very effective tool for studying fundamental interactions. The last decade has shown that research with UCN is extremely promising. These neutrons have started to be used for studying quantum systems and searching for “new physics” outside the Standard Model (search for new types of interactions, mirror worlds, etc.). New intense UCN sources will allow us to bring these studies to a new level and perhaps make UCN a tool for studying surface physics.

A number of research areas mentioned above have a relatively long history and impose high requirements for the parameters of the neutron source, primarily for the high neutron intensity. The increase in intensity makes it possible not only to improve the rate of statistics collection but also to study systematic effects at a new level, which is an important factor for high-precision experiments. New prospects for increasing the accuracy of experiments are also associated with the possibility of creating high-inten-

важным фактором для высокоточных экспериментов. Открывающиеся перспективы для повышения точности экспериментов связываются и с возможностью создания на новом источнике нейтронов высокоинтенсивных источников УХН и очень холодных нейтронов. В сочетании с импульсным режимом работы источника это открывает дополнительные методические возможности, например, для измерения времени жизни нейтрона. На этапе разработки источника можно заложить ряд конструктивных решений, которые позволят проводить измерения в оптимальной геометрии (нейтрон-нейтронное рассеяние, нейтрон-антинейтронные осцилляции), а в период создания источника — подготовить необходимую инфраструктуру (например, устройства для поляризации ядерных мишеней и нейтронов).

Нейтроны в исследованиях конденсированных сред. Физика конденсированного состояния (ФКС) объединяет исследования фундаментальных свойств вещества, возникающих в результате взаимодействия большого числа атомов и электронов. Сложный характер этих взаимодействий приводит к особенностям строения различных материалов, которые интересны во многих областях физики, химии, биологии, геологии и астрономии, а также практически во всех техни-

ческих областях. Самым примечательным примером является изобретение транзистора, которое отмечено Нобелевской премией по физике 1956 г. (У. Шокли, Д. Бардин и У. Браттен). Появление транзисторов и последующее изобретение интегральной схемы в 1958 г. стали отправной точкой для экспоненциального увеличения вычислительной мощности компьютеров, известного как закон Мура. Существует постоянное взаимодействие между фундаментальной наукой и технологическими приложениями, которое напрямую задействует ФКС по самому широкому кругу вопросов [10].

Увеличение населения в мире определяет рост потребности в экологических технологических альтернативах истощающимся невозобновляемым ресурсам. Поскольку масштабы и актуальность этих и других проблем общества становятся все более очевидными, возникают новые вызовы и задачи для исследований в ФКС.

Можно заметить, что многие из поставленных вопросов практически совпадают с направлениями исследований по ФКС, проводимых в ОИЯИ (см. рисунок). Не случайно экспериментальная работа по данным направлениям выполняется в основном в ЛНФ с использованием нейтронного рассеяния.

sity sources of ultracold neutrons and very cold neutrons on the new neutron source. In combination with the pulsed mode of operation of the source, this opens up new methodological possibilities, for example, for measuring the neutron lifetime. At the stage of developing the source, a number of design solutions can be built in, which will allow measurements to be carried out in the optimal geometry (neutron–neutron scattering, neutron–antineutron oscillations), and during the construction of the source the necessary infrastructure can be prepared (for example, devices for polarization of nuclear targets and neutrons).

The Niche of Neutrons in Condensed Matter Physics. Condensed matter physics (CMP) explores the fundamental properties of matter and their origins resulting from the interactions of a large number of atoms and electrons. The intricate nature of these interactions results in properties of materials that allow the CMP to have an impact on other fields of physics, chemistry, biology, geology, and astronomy, as well as nearly all fields of engineering. The far most notable example is the invention of the transistor which was recognized by the 1956 Nobel Prize in physics given to W. Shockley, J. Bardeen, and W. Brattain.

The transistor and the invention of the integrated circuit in 1958 was the starting point for an exponential increase in the computational power known as Moore’s law. There is a persistent interplay between the fundamental science and technological applications which directly involves CMP in a wide range of issues [10].

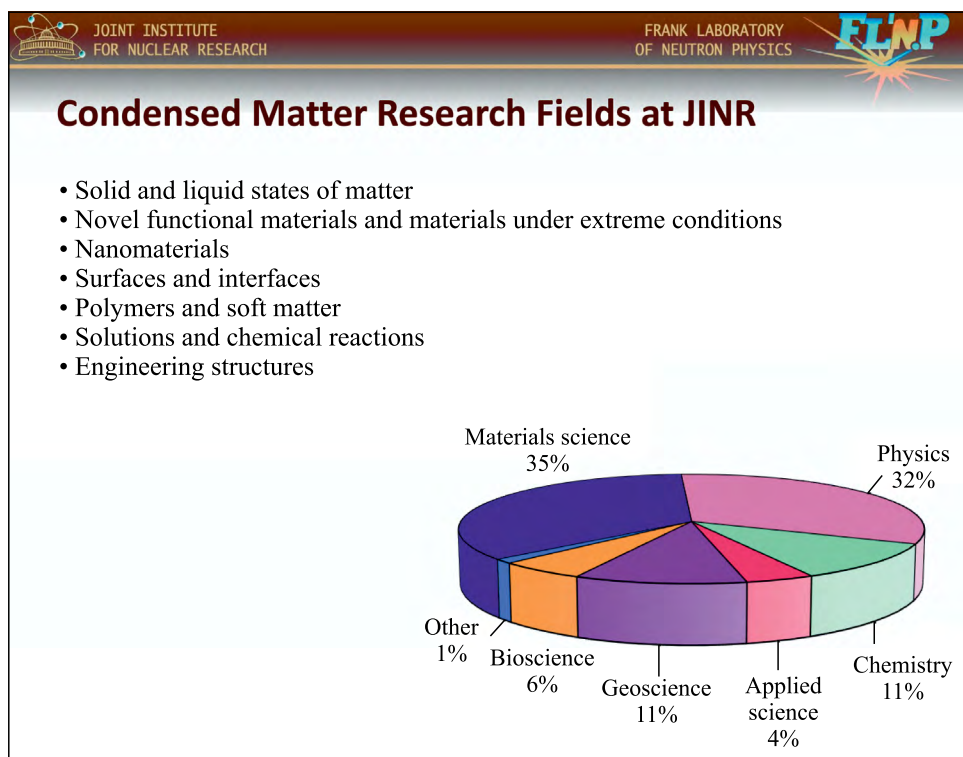
In view of the problem of the growing world population, there is a pressing need for sustainable technological alternatives to depleting nonrenewable resources. As the magnitude and urgency of this and other societal problems become increasingly evident, clear challenges and opportunities emerge for CMP research. Intriguingly, many of the questions posted overlap well with the research directions of condensed matter investigations performed at JINR (see the figure). Not by accident, the experimental work is conducted mostly at FLNP using neutron scattering techniques.

FLNP is a place where a new type of reactor was born and where the produced neutrons are utilized in fundamental and applied research. Among many scattering techniques available at the facility in the past and present, the time-of-flight approach and high-resolution Fourier diffraction belong to the top developments recognized

ЛНФ — это место, где зародился новый тип реакторов и где получаемые нейтроны используются в фундаментальных и прикладных исследованиях. Среди многих подходов, разработанных и реализованных в ЛНФ, можно отметить несколько революционных, таких как метод времяпролетной дифракции нейтронов и метод дифракции Фурье с высоким разрешением, признанные во всем мире. Естественно, что развитие дифракции в полной мере соответствует научным интересам лаборатории. Исторически статические и динамические структурные исследования принадле-

жали к наиболее успешным областям исследований. В качестве ярких примеров можно указать следующие достижения. Так, нейтронная дифракция образцов при высоких давлениях привела к открытию новых магнитоэлектрических материалов с сегнетоэлектрической поляризацией, вызываемой внешним магнитным полем [11], нейтронография в режиме реального времени помогла прояснить ряд важных технических процессов в литий-ионных батареях [12], а неупругое рассеяние нейтронов дополняло исследования многих химических соединений крайне важной информацией

Экспериментальные исследования конденсированных сред в ОИЯИ, проводимые в ЛНФ с использованием нейтронного рассеяния, и их распределение по различным научным направлениям



Experimental condensed matter investigations performed at FLNP JINR using neutron scattering techniques. The pie chart illustrates their distribution among different scientific fields

world-wide. It is of course natural that the development of diffraction fully corresponds to the scientific interests of the Laboratory. Historically, static and dynamic structural studies belonged to the most successful research fields in the Laboratory. In particular, the neutron diffraction of the samples at high pressures has led to the discovery of new magnetoelectric materials with ferroelectric polarization induced by an external magnetic field [11], neutron diffraction in a real-time mode has helped to reveal engineering improvements to the lithium-based batteries [12], and inelastic neutron scattering has complemented studies

of many chemical compounds with their dynamic properties [13]. The outstanding results obtained over the years could be attributed to the unique in the world and very specific source of neutrons that operates at the Laboratory.

Dubna Fourth-Generation Neutron Source. The FLNP has proposed a project of a new fourth-generation neutron source with record parameters to be included to the strategic development plan of JINR in order to continue the high-quality research performed in the directions of condensed matter physics using nuclear methods and

об их динамических свойствах [13]. Выдающиеся результаты получены благодаря действующему источнику нейтронов в ЛНФ.

Дубненский источник нейтронов четвертого поколения. Для удовлетворения в будущем потребностей в нейтронных исследованиях по физике конденсированных сред и ядерной физике ЛНФ предложила включить в план стратегического развития ОИЯИ проект нового нейтронного источника четвертого поколения с рекордными параметрами. Новый источник должен заменить исследовательский реактор ИБР-2М после истечения срока его службы. Научная программа для будущего источника составлена с учетом его передовых параметров и особенностей проведения экспериментов, которые невозможно или сложно выполнить на существующих источниках. Она включает в себя широкий спектр исследований конденсированных сред с особым акцентом на «мягкое» вещество и биологические объекты, а также амбициозные эксперименты по ядерной физике и физике фундаментальных взаимодействий, такие как изучение структуры и стабильности нейтроноизбыточных ядер, нейтрон-антинейтронных колебаний, измерение электрического дипольного момента нейтрона, исследование квантовых эффектов в физике УХН и т. д.

neutron physics. The new source will replace the IBR-2 research nuclear facility after the expiration of its service life. The scientific program for the future source is drawn up with the consideration of its high parameters and the possibility of conducting experiments that are either impossible or difficult to perform on existing sources. Among them are a wide range of condensed matter studies with a focus on soft matter and biological objects, as well as ambitious experiments in nuclear physics and fundamental interactions, such as the structure and stability of neutron-rich nuclei, neutron–antineutron oscillations, neutron electric dipole moment, quantum physics using UCN, etc.

Список литературы / References

1. FLNP — History of Reactors; <http://flnph.jinr.ru/en/history/history-of-reactors>.
2. *Lychagin E. V. et al.* Neutron Physics at JINR: 60 Years of the I. M. Frank Laboratory of Neutron Physics // *Phys.Usp.* 2016. V. 59, No. 3. P.254–263.
3. *Aksenov V.L., Balagurov A.M., Kozlenko D.P.* Condensed Matter Research at the Modernized IBR-2 Reactor: From Functional Materials to Nanobiotechnologies // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P.627–646.
4. Frank Laboratory of Neutron Physics / Ed. O. A. Culichov. [http://newuc.jinr.ru/img_sections/file/Practice2014/EU/Culichov-for%20students-July%202014%20\[.pdf](http://newuc.jinr.ru/img_sections/file/Practice2014/EU/Culichov-for%20students-July%202014%20[.pdf).
5. *Shvetsov V.N.* Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research // *Quantum Beam Science.* 2017. V. 1, No. 1.
6. *Aksenov V.L.* A 15-Year Forward Look at Neutron Facilities in JINR. *JINR Commun.* E3-2017-12. Dubna, 2017.
7. *Аксенов В.Л.* Нейтронная физика на пороге XXI века // *ЭЧАЯ.* 2000. Т. 31, № 6. С. 1303–1342.
8. *Aksenov V.L.* Neutron Physics Entering the XXI Century // *Part. Nucl.* 2000. V. 31, No. 6. P. 1303–1342.
9. *NuPECC, Long Range Plan 2017* // *Perspectives in Nuclear Physics.* 2017. <http://www.nupecc.org/lrp2016/Documents/lrp2017.pdf>.
9. *Shapiro F.L.* Electric Dipole Moments of Elementary Particles // *Sov. Phys. — Usp.* 1968. V. 11, No. 3. P. 345.
10. *Tsymbal E., Dowben P.* Grand Challenges in Condensed Matter Physics: From Knowledge to Innovation // *Frontiers in Physics.* 2013. V. 1. P. 32.
11. *Ovsyannikov S. V. et al.* Charge-Ordering Transition in Iron Oxide Fe₄O₅ Involving Competing Dimer and Trimer Formation // *Nature Chemistry.* 2016. V. 8, No. 5. P. 501–508.
12. *Bobrikov I.A. et al.* Structural Evolution in LiFePO₄-Based Battery Materials: In-Situ and Ex-Situ Time-of-Flight Neutron Diffraction Study // *J. of Power Sources.* 2014. V. 258. P. 356–364.
13. *Natkaniec I. et al.* Computationally Supported Neutron Scattering Study of Parent and Chemically Reduced Graphene Oxide // *J. Phys. Chem. C.* 2015. V. 119, No. 32. P. 18650–18662.