

Edited by
Otilia A. Culicov

Translation
Tatyana V. Avdeeva
Helena A. Zhemchugova

Photography
Yurii A. Tumanov
Elena V. Puzynina
Pavel E. Kolesov

Design
Valentina O. Tamonova
Yulia I. Emelina

Post address:
The Frank Laboratory of
Neutron Physics, JINR,
Joliot-Curie str., 6,
Dubna, Moscow reg.,
Russia, 141980.

Web site: <http://flnp.jinr.ru>
Tel.: (7-49621) 65-657
Fax: (7-49621) 65-085
E-mail: belushk@nf.jinr.ru



Frank Laboratory of Neutron Physics
Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка

Возможность исследовать природу окружающего мира за гранью доступного всегда привлекала человека. Чтобы увидеть микропроцессы, происходящие в веществе, был создан микроскоп. Однако для изучения поведения более малых объектов – атомов и молекул, формирующих любое вещество, необходим более эффективный метод. Нейтроны – высокоэффективное средство для изучения вещества, находящегося в конденсированном состоянии (как твёрдых тел, так и жидкостей).

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка (ЛНФ) Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) была создана в 1957 году и имеет более чем полувековой опыт создания и развития нейтронных источников, таких как импульсный реактор на быстрых нейтронах, а также опыт использования нейтронов в фундаментальной и прикладной науке.

Пусть этот буклет послужит для вас проводником в многогранный и захватывающий мир нейтронной физики и познакомит вас с возможностями нашей лаборатории.

Директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка
А.В. Белушкин

FLNP

Frank Laboratory of Neutron Physics

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка

Оптический микроскоп.
Разрешение до ~ 0.2 мкм



Optical microscope.
Resolution down to ~0.2 μm

Электронный микроскоп.
Разрешение до ~ 5 нм



Electronic microscope.
Resolution down to ~ 5 nm

Нейтронный спектрометр.
Разрешение до ~ 0.4 нм



Neutron spectrometer.
Resolution down to ~ 0.4 nm

The possibility to explore the world around us beyond the range of unaided human vision has always attracted people. The invention of the light microscope has enabled us to observe enlarged images of tiny objects, but to study the behavior of even smaller objects, like atoms or molecules, requires more effective methods. Neutrons are a powerful probe to study condensed matter (both solids and liquids).

The Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) was founded in 1957 and has more than half-century long experience in the creation and development of neutron sources, such as the pulsed fast neutron reactor, and experience in using neutrons in fundamental and applied science.

Let this booklet serve you as a guide into the versatile and fascinating world of neutron physics and let it introduce you to the research possibilities of our Laboratory.

Alexander Belushkin
Director of the Frank Laboratory
of Neutron Physics



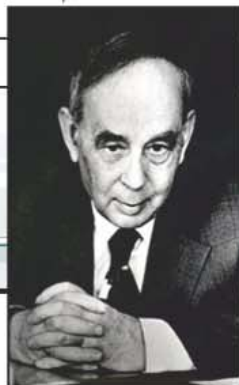
001010100100

В начале было слово, или как всё начиналось...

В конце 1955 года в Обнинском Физико-энергетическом институте (ФЭИ) проходил семинар, на котором обсуждалась работа американских учёных по исследованию зависимости сечения деления урана-235 от энергии нейтронов. В их эксперименте использовался диск с нанесенным на него слоем урана. Он вращался синхронно с прерывателем пучка, а тем временем измерялась возникшая на ободу колеса радиоактивность урана. «Вдруг Дмитрий Иванович [Д.И. Блохинцев, в то время директор ФЭИ] поднимает руку и говорит: «А что, если часть активной зоны реактора закрепить на ободу такого диска, да так, чтобы при каждом обороте эта часть проходила вблизи неподвижной зоны и кратковременно создавала бы сверхкритическую массу?» – так вспоминают начало работы над проектом импульсного реактора на быстрых нейтронах – ИБРа – разработчики теории этого реактора, сотрудники ФЭИ.

Когда в середине 1956 года Д.И. Блохинцеву предложили возглавить организуемый в Дубне международный институт, он поставил условие: соорудить в Дубне новую установку – ИБР. Для проведения физических исследований на этом реакторе была образована Лаборатория нейтронной физики. Её директором был избран лауреат Нобелевской премии И.М. Франк, а заместителем директора – Ф.Л. Шапиро. Пуск ИБРа состоялся 23 июня 1960 года – «колесо» закрутилось...

И.М. Франк



I.M. Frank

Д.И. Блохинцев



D.I. Blokhintsev

Ф.Л. Шапиро



F.L. Shapiro

In the beginning was the Word or how it all began...

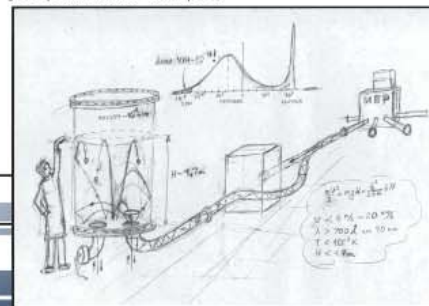
In late 1955 in the Institute of Physics and Power Engineering (IPPE, Obninsk) a seminar was held, where the American scientists' work devoted to the investigation of the neutron energy dependence of uranium-235 fission cross-section was discussed. In the experiment they used a disc with a thin layer of uranium on its surface. While it was rotating simultaneously with the beam chopper, they measured the radioactivity, which appeared at the rim of the wheel. Suddenly Dmitrii Ivanovich (D.I. Blokhintsev, IPPE Director at that time) raised his hand and said, "Why not fix a part of the reactor active zone on the rim of such a disk so that at each revolution this part passes near the stationary zone and creates a supercritical mass for a short time?" These are the recollections of the creators of the theory of this reactor (IPPE scientists) about the beginning of work on the design of the pulsed fast neutron reactor (IBR).

When in the middle of 1956 D.I. Blokhintsev was suggested to head the International Institute being organized in Dubna, he made it a condition that the new IBR facility should be built in Dubna. To carry out physical investigations on this reactor, the Laboratory of Neutron Physics was established. Nobel Prize winner I.M. Frank was elected its Director and F.L. Shapiro was appointed Deputy Director of the Laboratory. The IBR start-up was held on June 23, 1960, and the "wheel" began to turn...

Наши путеводители в наномир Exploring the nanoworld

Реактор ИБР IBR reactor 1960-1968

Первый реактор ИБР: место, где были открыты ультрахолодные нейтроны



The first IBR reactor: the place where ultracold neutrons were discovered

Участники пуска
Июнь, 1960 год



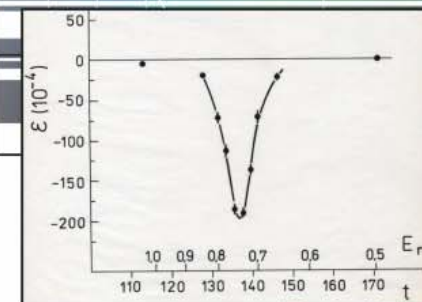
Group of participants of the startup
June, 1960

Реактор ИБР-30 IBR-30 reactor 1969-2000

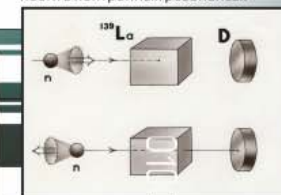
Активная зона реактора



The reactor core



Было обнаружено усиление эффекта нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах



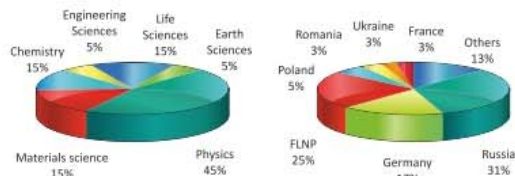
The enhancement of the space parity violation effect in neutron resonances was found

Импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР-2 (1984-2006)

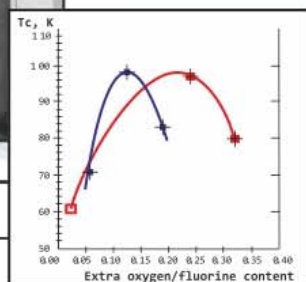
Международный центр нейтронных исследований конденсированных сред. Более 150 экспериментов в год.

Премия правительства РФ в области науки и техники за работу «Высокопоточный импульсный исследовательский реактор ИБР-2» (1996).

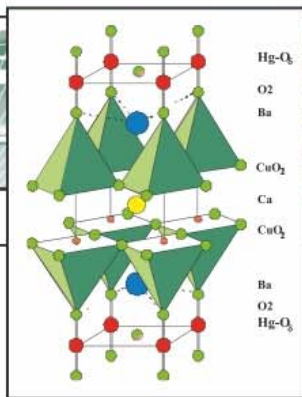
Государственная Премия Российской Федерации (2000) за разработку и реализацию новых методов нейтрографии по времени пролета на импульсных и стационарных ядерных реакторах.



Зависимость заряда от температуры при фазовом переходе Hg-1201 в сверхпроводящее состояние



Charge dependence of temperature in superconducting phase transition in Hg-1201



IBR-2 Pulsed Fast Reactor (1984-2006)

The International Centre for Neutron Research of Condensed Matter. Over 150 experiments per year.

The RF Government Prize in the field of science and technology for the work "The high flux pulsed research reactor IBR-2" (1996).

State Prize of the Russian Federation (2000) for the development and realization of new methods in time-of-flight neutron diffraction studies at pulsed and steady-state nuclear reactors.

Источник Резонансных Нейтронов (ИРЕН) (2008-...)

Этот нейтронный источник на базе ускорителя электронов с маленькой шириной вспышки (порядка 100 нс) является инструментом для нейтронно-физических экспериментов в области разрешенных резонансов, требующих высокого энергетического разрешения.

Характеристики полномасштабного комплекса ИРЕН выведут эту установку в один ряд с лучшими источниками нейтронов этого класса.

Программа исследований на ИРЕН

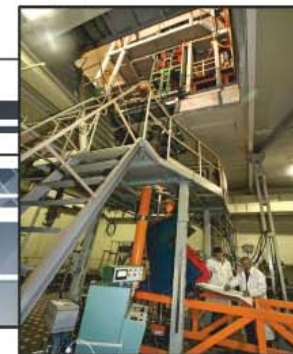
Фундаментальная ядерная физика:

- исследование (n,p) , (n,α) реакций в области энергий до нескольких десятков кэВ (ядерная астрофизика, звездный нуклеосинтез, ядерные данные);
- прецизионное (с точностью до 1%) измерение энергетической зависимости нейтронных сечений (ядерные данные);
- изучение свойств высоковозбужденных состояний ядер;
- исследование подпороговых р-резонансов (нарушение фундаментальных симметрий);
- подготовка экспериментальных методик.

Прикладные исследования:

- использование нейтронного и гамма-активационного анализа в материаловедении, науках о жизни;
- получение радиоактивных изотопов с повышенной радионуклидной чистотой для применения в составе диагностических и терапевтических медицинских препаратов.

Зал ускорителя ИРЕН



IREN accelerator hall

Текущие параметры ИРЕН

Параметры		Parameters
Импульсный ток, А	3.0	Peak current, A
Частота следования, Гц	50	Repetition frequency, Hz
Длительность электронного импульса, нс	100	Electron pulse duration, ns
Энергия электронов, МэВ	30	Electron energy, MeV
Мощность пучка, кВт	0.4	Beam power, kW
Коэффициент размножения	1	Multiplication factor
Выход нейтронов, н/с	10^{11}	Neutron yield, n/s

Current parameters of IREN

Intense Resonance Neutron Source (IREN) (2008-...)

This neutron source built on the basis of an electron accelerator with a small burst width (of the order of 100 ns) is an instrument for neutron experiments in the region of resolved resonances that require high energy resolution.

The parameters of this full-scale IREN facility will bring this instrument to the level of the best neutron sources of this type.

IREN research program

Fundamental nuclear physics

- investigation of (n,p) , (n,α) reactions in the energy range of up to several tens of keV (nuclear astrophysics, stellar nucleosynthesis, nuclear data);
- precision (with an accuracy of 1%) measurement of energy dependence of neutron cross-sections (nuclear data);
- investigation of properties of highly excited atomic nuclei behavior;
- investigation of sub-threshold p-resonances (violation of fundamental symmetries);
- development of experimental techniques.

Applied research

- application of neutron analysis and gamma-activation analysis in materials science and life sciences;
- production of radioisotopes with high radionuclide purity for using in diagnostic and therapeutic drugs.

Модернизированный реактор ИБР-2 (2010 -...)

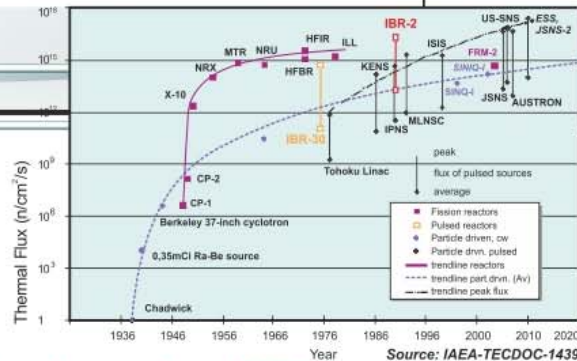
ИБР-2 – нейтронный источник, который по праву можно назвать рекордным, как по показателям интенсивности потока нейтронов в импульсе, так и по техническим решениям, которые дают возможность его получить. Несмотря на большую пиковую мощность в импульсе – 1850 МВт, ИБР-2 потребляет гораздо меньше энергии, чем другие исследовательские реакторы и ускорители. Это означает, что он не только экономически, но и экологически выгоден благодаря низкому расходу природных ресурсов, необходимых для содержания установки. Кроме того, невелики и технологические выбросы, поскольку время эксплуатации топлива в реакторе ИБР-2 – более 15 лет, что в десятки раз превосходит время эксплуатации топлива в аналогичных по мощности стационарных реакторах.

Преимущество реактора импульсного типа по сравнению со стационарным реактором состоит в том, что он позволяет использовать метод времени пролета без потери интенсивности потока нейтронов.

Основные параметры модернизированного реактора ИБР-2

Параметры		Parameters
Средняя мощность, МВт	2	Mean power, MW
Количество тепловыделяющих элементов из PuO ₂	69	Number of fuel elements of PuO ₂
Частота импульсов, Гц	5; 10	Pulse repetition rate, Hz
Полуширина импульса, с	200	Pulse half-width, s
Скорость вращения, об/мин: Основной подвижный отражатель (ОПО) Дополнительный подвижный отражатель (ДПО)	600 300	Rotation rate, rev/min: Main movable reflector (MMR) Auxiliary movable reflector (AMR)
Срок службы подвижного отражателя, ч	55000	Movable reflector service life, hours
Количество спутников при 5 Гц	1	Number of satellites at 5 Hz
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя: усредненная по времени максимум в импульсе	10^{11} n/cm ² /s 10^{14} n/cm ² /s	Thermal neutron flux density from the surface of the moderator: time average burst maximum

Main parameters of the modernized IBR-2 reactor



The IBR-2 modernized reactor (2010 -...)

ИБР-2 can be rightly referred to as a record-breaking neutron source both as to the intensity of neutron flux in pulse and as to the engineering solutions allowing us to achieve it. In spite of the high peak pulse power (1850 MW) IBR-2 consumes far less energy than any other research reactors or accelerators. This means that it is not only economically advantageous, but also ecologically beneficial due to the fact that the consumption of natural resources required for its maintenance is relatively low. What is more, technological emissions are also minor since the fuel service life is more than 15 years, which is ten times longer in comparison with that of stationary reactors with equivalent power.

The advantage of a pulsed reactor as compared to a stationary reactor is that it makes it possible to use the time-of-flight technique without any loss in the intensity of a neutron flux.

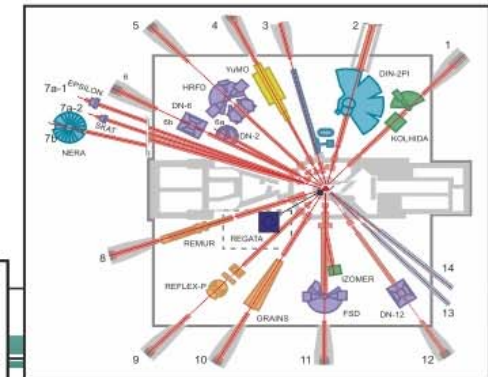
Установки ИБР-2

- Дифракция: ФДВР, ДН-2, ДН-12, ДН-6, СКАТ, ЭПСИЛОН, ФСД;
- Малоугловое рассеяние: ЮМО;
- Рефлектометрия: РЕМУР, РЕФЛЕКС, ГРЭИНС;
- Неупругое рассеяние: ДИН-2ПИ, НЕРА;
- Ядерная физика: ИЗОМЕР, КОЛХИДА;
- Нейтронный активационный анализ: РЕГАТА;
- Облучающая установка.

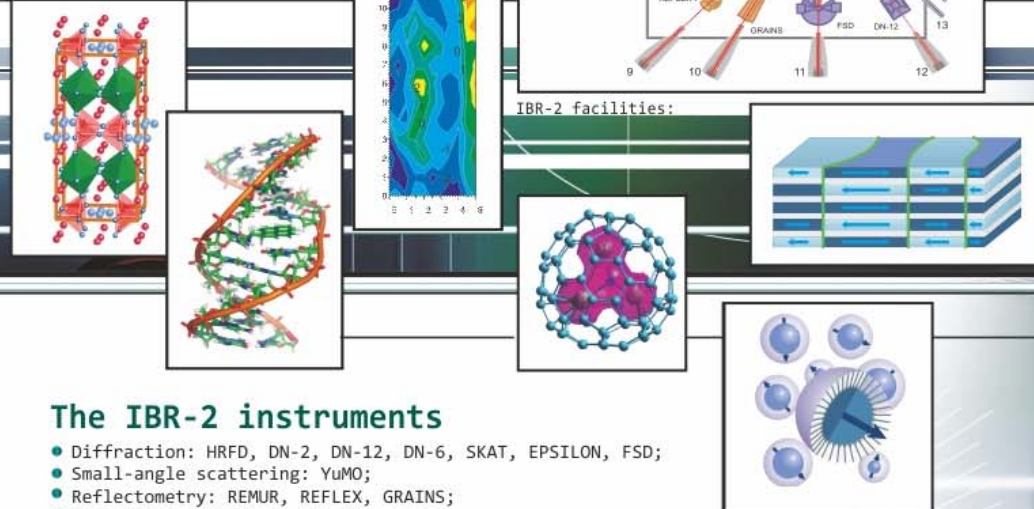
Нейтронные исследования на реакторе ИБР-2

- Физика наносистем;
- Структура и динамика функциональных материалов;
- Комплексные жидкости и полимеры;
- Молекулярная биология и фармакология;
- Структура горных пород и минералов;
- Инженерная диагностика;
- Нейтронно-ядерные исследования;
- НАА в науках о жизни.

Установки ИБР-2:



IBR-2 facilities:



The IBR-2 instruments

- Diffraction: HRFD, DN-2, DN-12, DN-6, SKAT, EPSILON, FSD;
- Small-angle scattering: YuMO;
- Reflectometry: REMUR, REFLEX, GRAINS;
- Inelastic scattering: DIN-2PI, NERA;
- Nuclear Physics: ISOMER, KOLHIDA;
- Neutron Activation Analysis: REGATA;
- Irradiation Facility.

Neutron investigations at IBR-2

- Physics of Nanosystems;
- Structure and Dynamics of Functional Materials;
- Complex Liquids and Polymers;
- Molecular Biology and Pharmacology;
- Structure of rocks and minerals;
- Engineering Diagnostics;
- Neutron-nuclear investigations;
- NAA for Life Sciences.



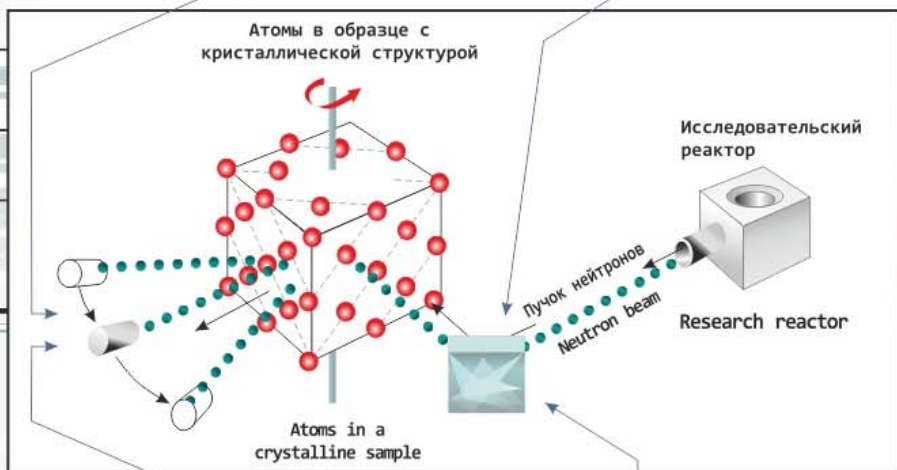
Почему мы используем нейтроны?

Свойство нейтрона	Идеален для
Отсутствие заряда, слабость взаимодействия	<ul style="list-style-type: none"> исследования объемных образцов изучения биологических систем изучения образцов в сложных системах окружения образца экстремальные условия по температуре, давлению, магнитному полю изучения образцов во время химических реакций
Длина волны сравнима с межатомными расстояниями (от 0.1 Å до 1000 Å)	изучения атомной и молекулярной структуры вещества
Наличие магнитного момента	изучения магнитной структуры вещества
Кинетическая энергия сравнима с энергией элементарных возбуждений (МэВ)	изучения атомной и магнитной динамики
Рассеяние на ядрах атомов	использования изотопного замещения и метода вариации контраста
Когерентное и некогерентное рассеяние	изучения коллективных и одночастичных эффектов

Когда нейтроны сталкиваются с атомами в веществе образца, они меняют направление (рассеиваются) – упругое рассеяние

Детекторы регистрируют направления нейтронов, это позволяет получить дифрактограмму, где отображаются позиции атомов относительно друг друга

Кристалл, который «вырезает» нейтроны с определённой длиной волны (энергией) – монохроматические нейтроны



When the neutrons collide with atoms in the sample material, they change direction (are scattered) - elastic scattering

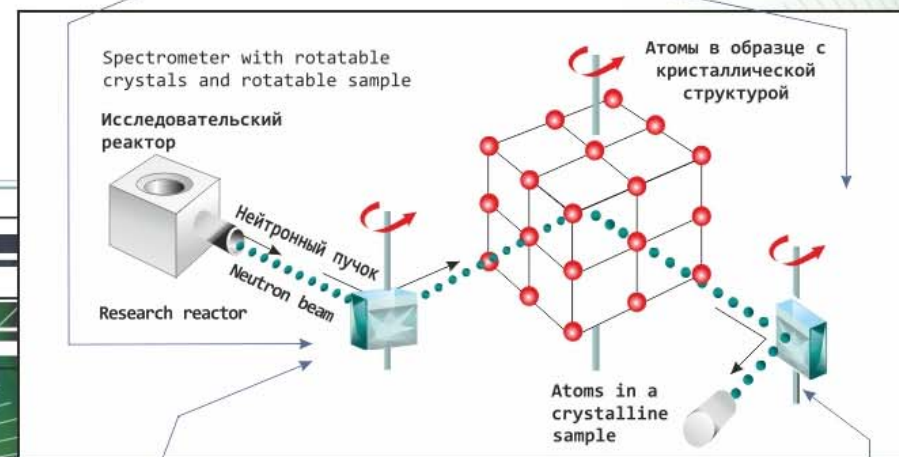
Detectors record the direction of the neutrons and a diffraction pattern is obtained. The pattern shows the positions of the atoms relative to one another

Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) - monochromatized neutrons

Когда нейтроны проникают в образец, атомы начинают или прекращают осциллировать. Если нейтроны образуют фононы или магныны, они передают им свою энергию – неупругое рассеяние

Кристалл, который «вырезает» нейтроны с определённой длиной волны (энергией) – монохроматические нейтроны

Сначала в кристалле-анализаторе фиксируются изменения энергии нейтронов... а затем в детекторе регистрируется количество нейтронов



When the neutrons penetrate the sample they start or cancel oscillations in the atoms. If the neutrons create phonons or magnons they themselves lose the energy -inelastic scattering

Crystal that sorts and forwards the neutrons of a certain wavelength (energy)- monochromatized neutrons

Changes in the energy of the neutrons are first analysed in an analyser crystal... and the neutrons then counted in a detector

Why do we use neutrons?

Properties of the neutron	Ideal for
Absence of charge, weak interaction with matter	<ul style="list-style-type: none"> investigations of bulky samples investigations of biological systems investigations of samples in complex sample environment systems: under extreme conditions of temperature, pressure and magnetic fields investigations of samples during chemical reactions
Wavelength of the order of interatomic distances (from 0.1 Å up to 1000 Å)	investigations of atomic and molecular structure of matter
Magnetic moment	investigations of magnetic structure of matter
Kinetic energy comparable to that of elemental excitations (MeV)	investigations of atomic and magnetic dynamics
Scattering by atomic nuclei	application of isotopic substitution and contrast variation methods
Coherent and incoherent scattering	investigations of collective and single-particle effects



Нейтроны и синхротронное излучение

Нейтроны:

- Пучок частиц (нейтральная субатомная частица).
- Взаимодействие с ядрами и магнитными моментами неспаренных электронов (в образце).
- Рассеяние на всех элементах, в том числе на лёгких, таких как изотопы водорода.
- Большая глубина проникновения (исследования внутренней структуры образцов).
- Менее интенсивный пучок для измерения более крупных образцов.

Применение:

- Магнитные структуры и возбуждения.
- Использование H-D изотопного эффекта при изучении органических структур.
- Исследование объемных образцов (напряжения, возбуждения).
- Спектроскопия низких энергий, например, молекулярные вибрации.

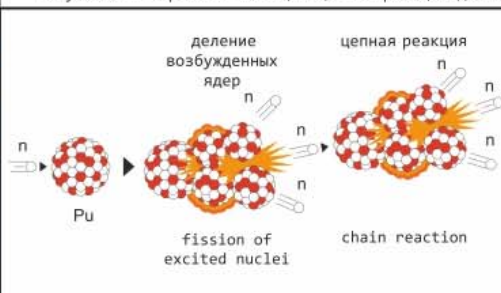
Синхротронное излучение:

- Пучок света (электромагнитная волна).
- Взаимодействие с электронами, окружающими ядро (в образце).
- Рассеяние в основном на ядрах тяжелых элементов.
- Небольшая глубина проникновения (исследования поверхностной структуры образцов).
- Более интенсивный пучок для измерения небольших и ультраразбавленных образцов.

Применение:

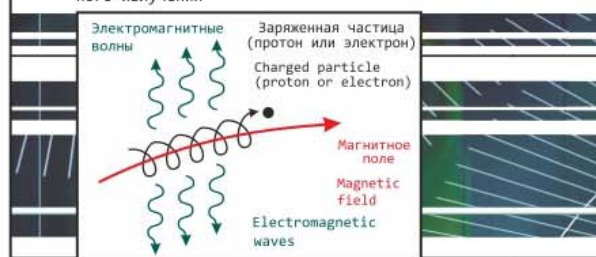
- Структуры белковых кристаллов.
- Быстрые химические реакции.
- Исследования поверхностей (дефекты, коррозия).
- Спектроскопия высоких энергий, например, измерение энергетических уровней электрона.

Получение нейтронов с помощью цепной реакции деления



Production of neutrons by means of chain reaction

Принцип действия источника синхротронного излучения



Principle of operation of a synchrotron source

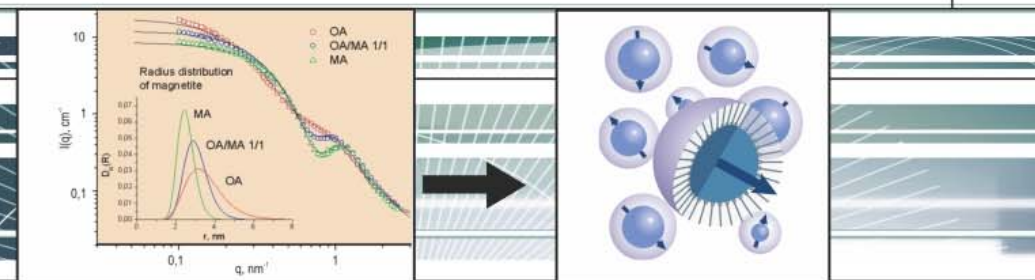
Мы используем нейтроны как инструмент...

... в разработке более эффективных методов борьбы с раком

Диагностика и терапия раковых заболеваний остается одной из самых актуальных проблем современной биомедицины. В последние годы активно проводятся исследования возможности применения магнитных наночастиц в терапии рака, включая доставку и концентрирование лекарственных препаратов с помощью внешнего магнитного поля, использование магнитного материала для создания контрастной среды в магнитно-резонансной томографии, магнитную гипертермию. Помещение комплексных частиц в биологические среды требует детального анализа их поведения в водных растворах для создания агрегационно-устойчивых магнитных жидкостей.

Малоугловое рассеяние нейтронов используется для описания структуры отдельных частиц и их агрегатов в различных условиях. На основе последних структурных исследований с использованием нейтронного рассеяния синтезированы новые виды биосовместимых магнитных жидкостей, которые применяются в настоящее время в развитии методов терапии одной из самых трудноизлечимых злокачественных опухолей мозга – глиобластомы.

Структурная характеристика магнитных жидкостей с помощью малоуглового рассеяния нейтронов. Использование смесей олеиновой (OA) и миристиновой (MA) кислот для первичной стабилизации магнетита в органическом растворителе позволяет регулировать размер и дисперсность наночастиц перед помещением в биологическую среду



Structure characterization of magnetic fluids by means of small-angle neutron scattering. The use of various mixtures of oleic (OA) and myristic (MA) acids for primary magnetite stabilization in organic solvents makes it possible to control the size and dispersion of nanoparticles before introducing them into biological media

Neutrons and synchrotron radiation

Neutrons:

- Particle beam (neutral subatomic particle).
- Interactions with the nuclei and the magnetic moment of unpaired electrons (in the sample).
- Scattered by all elements, also the light ones like hydrogen isotopes.
- Deep penetration depth (bulk studies of samples).
- Less intense beam for measuring larger samples.

Applications:

- Magnetic structures & excitations.
- Organic structures using the H-D isotope effect.
- Bulk studies (strains, excitations).
- Low-energy spectroscopy, e.g. molecular vibrations.

Synchrotron radiation:

- Light beam (electromagnetic wave).
- Interactions with the electrons surrounding the nuclei (in the sample).
- Mainly scattered by heavy elements.
- Small penetration depth (surface studies of samples).
- Very intense beam for measuring small or ultra-dilute samples.

Applications:

- Protein crystal structures.
- Fast chemical reactions.
- Surface studies (defects, corrosion).
- High-energy spectroscopy, e.g. measurements of electron energy levels.

We use neutrons as a tool ...

...to develop more effective methods of treating cancer

Diagnostics and treatment of cancer diseases remain one of the most topical problems of modern biomedicine. In recent years there has been done a lot of research on the possibility of using magnetic nanoparticles in cancer treatment, including delivery and concentration of drugs using external magnetic fields, as well as using magnetic materials for creating a contrast medium for magnetic resonance tomography, and magnetic hyperthermia. The introduction of complex particles into biological media requires a detailed analysis of their behavior in water solutions for aggregate-stable magnetic fluids.

Small-angle neutron scattering is used for structure characterization of separate particles and their aggregates under various conditions. On the basis of the latest structural studies using the neutron scattering new types of biocompatible magnetic fluids have been synthesized. At present, they find application in the development of methods for treating glioblastoma – one of the most intractable brain tumors.

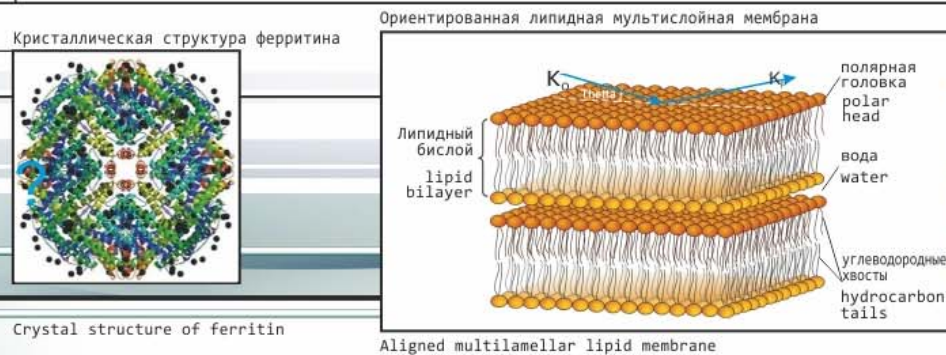
... при разработке лекарственных препаратов от анемии

Анемия, или нехватка железа в организме, - это одна из острых проблем педиатрии и медицины женщин детородного возраста. Железо участвует в переносе кислорода, в окислительно-восстановительных реакциях, является активным центром многих ферментов. Однако, при физиологических pH оно быстро окисляется до формы Fe (III), которая нерастворима в воде, к тому же свободная форма железа Fe (II) высокоактивна и токсична. Поэтому в организме для железа необходимы специальные хранилища, куда железо легко поступит и быстро будет извлечено при необходимости. Одним из таких хранилищ является белок ферритин.

Расшифровка структуры ферритина является одним из необходимых условий для понимания молекулярных механизмов железообменной активности этого белка с целью разработки новых, более эффективных препаратов для лечения разных видов анемии. Метод малоуглового рассеяния нейтронов позволяет получить новую информацию для расшифровки структуры этого белка.

... и улучшения их проникающей способности в организм

При разработке новых лекарств один из важнейших вопросов - это способность лекарств проникать через биологические липидные мембраны. На реакторе ИБР-2 существует возможность исследовать процессы диффузии воды в модельных липидных мембранах в режиме реального времени. Подобные исследования могут быть эффективно применены для изучения физических принципов механизма проникновения лекарственных веществ через биологические липидные мембраны.



... to develop antianemic drugs

Anemia, or deficiency of iron in the human body, is one of the acutest problems of pediatrics and the areas of medicine related to women of reproductive age. Iron takes part in oxidation-reduction reactions and in the process of oxygen transfer; it is an active site of many enzymes as well. However, at a physiologic pH it quickly oxidizes to Fe (III), which is not soluble in water; moreover, the free form of Iron, Fe (II), is highly active and toxic. That is why the human body has a special need for an iron depository, where it can be easily inserted and extracted if necessary. One of such depositories is a ferritin protein.

Determination of ferritin structure is one of the necessary conditions for understanding molecular mechanisms of iron-exchange processes in this protein in order to develop new and more effective drugs for treating various types of anemia. The small-angle neutron scattering technique makes it possible to get new information for the determination of the structure of this protein.

... and to improve their penetrability into the organism

The ability of drugs to penetrate biological lipid membranes is one of the major problems in the development of new drugs. At the IBR-2 reactor the water diffusion processes in model lipid membranes can be studied in real time. These investigations can be efficiently applied to study physical principles of the mechanism of drug penetration through biological lipid membranes.

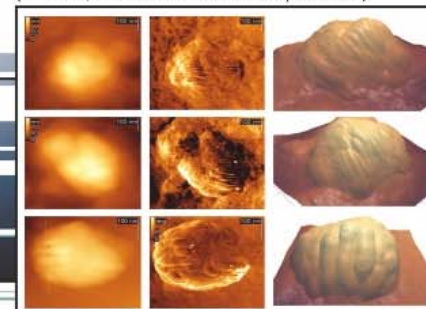
... в изучении процессов старения клеток

Митохондрии входят в состав практически всех типов клеток животных и растений, и основной задачей этих органелл является выработка энергии для различных клеточных процессов. Помимо этого они участвуют в процессе старения, являются важным звеном в клеточной сигнализации. Для того чтобы научиться управлять этими процессами нужно изучать структуру и функции митохондрий, которые взаимосвязаны и в свою очередь зависят от внешних условий (температура, осмотичность среды, сигнальные молекулы и т.д.). В отличие от синхротронного излучения, вызывающего сильные радиационные повреждения живых клеток, использование нейтронного излучения позволяет проводить эксперименты на живых биологических объектах без потери их функциональности. С помощью малоуглового рассеяния нейтронов мы проводим исследования «живых» функционирующих митохондрий, помещенных в специфические инкубационные среды и условия и получаем информацию о распределении белка и липида во внутренней митохондриальной мембране.

... в поиске воды на Марсе и других планетах

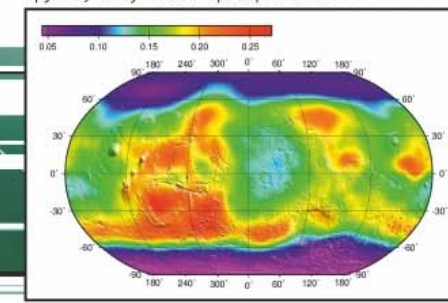
В течение 50 лет после первого полета человека в космос, люди пытаются найти воду на других планетах. Начиная с 1997 г., в сотрудничестве с Российским институтом космических исследований мы создаем концепции, моделируем и осуществляем калибровку разных нейтронных и гамма детекторов. В настоящее время три таких детектора успешно работают в космосе, другие три детектора находятся на разных этапах разработки.

Ультраструктура внутренней мембраны митохондрий (с помощью атомно-силовой микроскопии)



Ultrastructure of the internal membrane of mitochondria (using atomic force microscopy)

Распределение водяного льда в марсианском грунте, полученное прибором HEND



Distribution of water ice in the Martian soil obtained by the HEND detector

... to study cell ageing processes

Mitochondria are a part of practically all types of animal and plant cells and the main task of these organelles is energy production for various cell processes. In addition, they take part in the ageing process and play an important role in cell signaling. In order to find out how to control these processes, one needs to study the structure and functions of mitochondria, which are interrelated and in their turn, depend on the environment (temperature, osmotic conditions of the medium, signaling molecules, etc.) Unlike synchrotron radiation, which causes severe damages to living cells, the use of neutron radiation allows one to conduct experiments on living biological objects without loss in their functionality. Using small-angle neutron scattering we study "living" functioning mitochondria placed under special conditions and in specific incubation media, and obtain information on the protein and lipid distribution in the internal mitochondrial membrane.

... to detect water on Mars and other planets

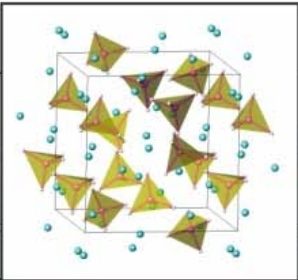
During 50 years since the first human flight into space, people have been trying to detect water on other planets. Since 1997 in collaboration with the Russian Space Research Institute, we have been designing and calibrating various neutron and gamma detectors. At the present time three of them are successfully operating in space and other three are at different stages of development.

... в разработке новых функциональных материалов

Создание новых материалов, обладающих физическими и химическими свойствами, которые изменяются при изменении внешних условий или параметров окружающей среды предсказуемым и управляемым образом, является основной задачей исследований XXI века во многих областях науки и техники. Так, переход на водородную энергетику невозможен без разработки надёжных методов получения, транспортировки и хранения водорода. Перспективным направлением разработок по хранению водорода является химическое «связывание» водорода в кристаллах. Одним из таких перспективных соединений является Li_3BeD_4 , структура которого (представлена на рисунке) была расшифрована специалистами нашей лаборатории.

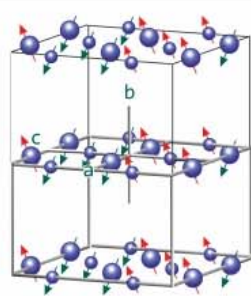
Открытие эффекта колоссального магнетосопротивления повлекло за собой стремительный поиск и изучение обладающих им материалов в связи с возможностью их применения в устройствах нового поколения: от создания магнитной оперативной памяти и производства устройств, снижающих шум в коммуникационных сетях, до измерения линейных углов между предметами посредством использования магнитного поля и специальных сенсоров. Исследование магнитной структуры и магнитных фазовых переходов соединений с эффектом колоссального магнетосопротивления является одной из задач нашей лабораторий.

Кристаллическая структура материала Li_3BeD_4 для хранения водорода



Crystal structure of hydrogen storage material Li_3BeD_4

Магнитная структура сложного оксида марганца, обладающего эффектом колоссального магнетосопротивления, полученная с помощью дифракции нейтронов



Magnetic structure of a complex manganese oxide with colossal magnetoresistance determined by means of neutron diffraction

... to develop novel functional materials

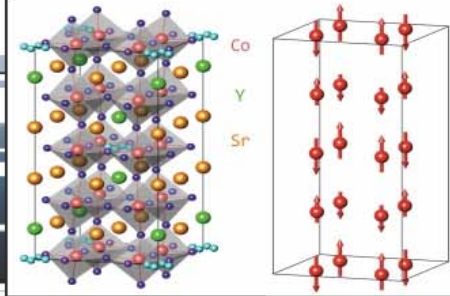
The development of novel materials with physical and chemical properties that vary under changes of external conditions or parameters of the environment in a predictable and controllable way is the main task of the 21st century studies in many areas of science and technology. For example, transition to hydrogen power engineering is impossible without reliable methods of obtaining, transportation and storage of hydrogen. A promising direction in the development of hydrogen storage is the chemical “binding” of hydrogen in crystals. One of such promising compounds is Li_3BeD_4 , whose structure (shown in the figure) has been determined by the specialists of our Laboratory.

The discovery of the colossal magnetoresistance effect resulted in a vigorous search and study of materials with this property in relation to the possibility of using them in a new generation of devices: ranging from the creation of magnetic RAM and noise-reducing devices for communication lines to the measurement of linear angles between objects by means of magnetic fields and special sensors. The study of magnetic structure and magnetic phase transitions of compounds with colossal magnetoresistance is one of the tasks of our Laboratory.

Перспективными видами материалов для применения в качестве электродов твердотельных топливных элементов являются сложные анион-дефицитные оксиды кобальта типа 314 - $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{18.54\delta}$ (или $\text{Sr}_{8.75}\text{Y}_{8.25}\text{CoO}_{21.625\delta/4}$). С помощью нейтронных дифракционных исследований атомной и магнитной структуры этих материалов впервые для перовскитоподобных кобальтитов была установлена прямая связь между зарядовым и спиновым состояниями атомов Co. Это дает возможность управления физическими свойствами материала посредством изменения спинового состояния.

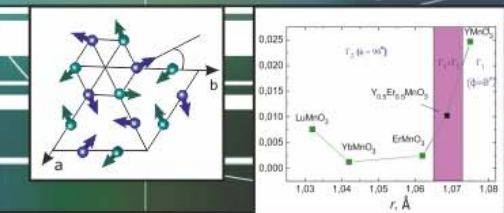
Мультиферроики – соединения, совмещающие в себе одновременно магнитные и сегнетоэлектрические свойства, на основе которых в перспективе возможно создание нового поколения функциональных материалов с возможностью управления магнитными свойствами электрическим полем и наоборот. Такие материалы будут широко востребованы при создании различного рода электронных устройств в области записи и хранения информации, передачи данных, коммуникации. Исследования, проведенные методом нейтронной дифракции, позволили выявить закономерности формирования магнитных свойств на уровне атомного строения одного из наиболее интересных классов мультиферроиков – гексагональных марганитов RMnO_3 (R – редкоземельный элемент).

Кристаллическая (слева) и магнитная (справа) структуры соединения $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{18.5}$. Атомы кислорода (маленькие шарики) занимают заполненные (тёмно-синие), частично заполненные (фиолетовые) и разупорядоченные (голубые) участки



Crystal (left) and magnetic (right) structures of the $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{18.5}$ compound. Oxygen atoms (small balls) occupy filled (dark blue), partially filled (violet) and disordered (light blue) sites

Магнитная структура гексагональных марганитов (слева). Обобщенная магнитная фазовая диаграмма гексагональных марганитов



Magnetic structure of hexagonal manganites (left). Generalized magnetic phase diagram of hexagonal manganites

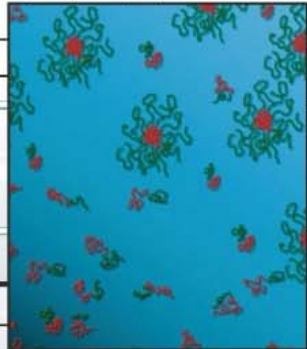
One of the promising materials for application as electrodes in solid fuel elements is complex anion-deficient cobalt oxides such as 314 - $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{18.5+\delta}$ (or $\text{Sr}_{8.75}\text{Y}_{8.25}\text{CoO}_{21.625\delta/4}$). With the help of neutron diffraction studies of atomic and magnetic structures of these materials for the first time the direct relation between the charge and spin states of Co atoms has been revealed for perovskite-like cobaltites. This makes it possible to control physical properties of the material by changing the spin state.

Multiferroics are compounds that simultaneously exhibit magnetic and ferroelectric properties. Multiferroic materials are of great interest because of their potential applications in the creation of a new generation of functional materials making it possible to control magnetic properties by an applied electric field and vice versa. These novel materials hold much promise for the development of various electronic devices for data recording and storage, data transmission and communications. Neutron diffraction studies allowed us to reveal the formation mechanisms of magnetic properties at the nanoscale of one of the most interesting classes of multiferroics – hexagonal manganites RMnO_3 (R – rare-earth element).

Полимеры широко используются в наше время. Легкость, прочность и относительно низкая цена сделали их незаменимыми во многих областях науки и техники. Полимерные цепочки образованы единичными молекулами, которые состоят в основном из водорода, углерода, кислорода и фтора. Нейтроны обладают уникальными свойствами для изучения полимеров, в частности, способностью "маркировать" отдельные молекулы и делать их видимыми с помощью изотопных замещений. Исследователи могут быстро определить, к примеру, насколько хорошо смешиваются какие-то полимеры, какова оптимальная температура смешения, какой состав оптимальной смеси и пр.

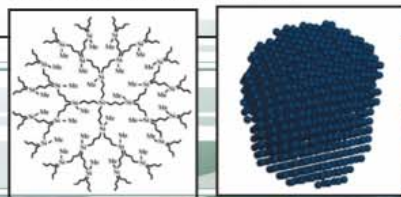
Перспективными полимерными соединениями являются дендримеры, сильно разветвлённые макромолекулы высокой функциональности. Например, дендримеры могут использоваться в качестве нанореакторов для приготовления наночастиц. Анализ кривых малоуглового рассеяния нейтронов для различных типов дендримеров дает информацию об их внутренней структуре (объем, однородность распределения плотности, степень проникновения растворителя), помогая совершенствовать синтез этих сложных объектов.

Водный раствор органических полимерных цепочек



Water solution of organic polymer chains

Структура дендримеров: химическое представление и структура, восстановленная из данных малоуглового рассеяния нейтронов



Structure of dendrimers: chemical representation and structure reconstructed from small-angle neutron scattering data

Polymers are widely used nowadays. Their light weight, durability and relatively low cost made them irreplaceable in many areas of science and technology. Polymer chains are formed by single molecules, which consist primarily of hydrogen, carbon, oxygen and fluorine. Neutrons have unique properties for polymer studies, in particular, the ability to "mark" separate molecules and make them visible by means of isotopic substitutions. Researchers can quickly determine, for example, how well certain polymers mix, what their optimum temperature and proportion are, etc.

Dendrimers (highly branched macromolecules with a high degree of functionality) are very promising polymer materials. For example, dendrimers can be used as nanoreactors to prepare nanoparticles. Analysis of small-angle neutron scattering curves for different types of dendrimers gives information about their inner structure (volume, density distribution homogeneity, degree of solvent penetration) helping to improve the synthesis of these complex objects.

... В создании более надежного мира вокруг нас

Конструкционные материалы и сплавы

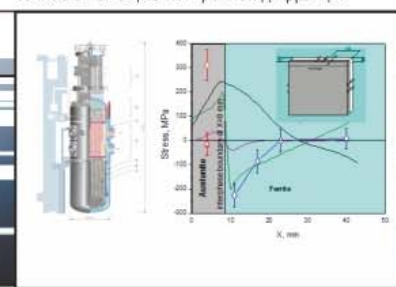
При производстве конструкционных материалов для промышленных нужд и изделий из них возможно возникновение внутренних напряжений в объеме, которые в процессе эксплуатации изделия могут стать причиной его преждевременной поломки. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет эффективно использовать нейтронную дифракцию для неразрушающего контроля внутренних напряжений в конструкционных материалах и промышленных изделиях. Нейтронографические исследования деталей ядерных реакторов – биметаллического адаптера, корпуса реактора, позволили получить информацию о пространственном распределении внутренних напряжений, накопленных в процессе эксплуатации, которая важна для совершенствования технологий реакторостроения.

Геологическая устойчивость

Для разработки новых технологий строительства туннелей и шахт; интерпретации сейсмических данных и построения моделей развития очага землетрясений необходима информация об анизотропии упругих и механических свойств горных пород, которая может быть получена с помощью нейтронного текстурного анализа.

Результаты нейтронографических исследований текстуры и внутренних напряжений образцов горных пород Центральных Альп (Швейцария) в области Готтардского базисного тоннеля имеют важное значение для оценки влияния тоннельных работ на геомеханическое состояние горных цепей, в которых расположен тоннель.

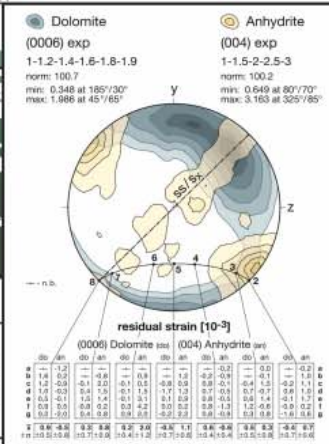
Распределение внутренних напряжений в части реакторного корпуса реактора ВВЭР-1000, полученное с помощью нейтронной дифракции



Distribution of internal stresses in the reactor vessel of the VVER-1000 reactor obtained using neutron diffraction

Residual strain data for seven sample direction attributed to dolomite and anhydrite basal lattice planes, repeated on seven points of measurement following a scan running perpendicular to the foliation plane

Величины остаточных напряжений для семи различных направлений в основных кристаллографических плоскостях в сканировании перпендикулярном плоскости расщепления в доломитах и ангидридах



... for creating a more reliable world around us

Constructional materials and alloys

During the manufacturing or service of industrial products the internal mechanical stresses appear, which can significantly affect their strength and service life period. The high penetrating power of neutrons makes it possible to effectively use neutron diffraction as a method of nondestructive control of internal stresses in constructional materials and industrial products. Neutron diffraction investigations of some components of nuclear reactors such as bi-metal adapter and reactor vessel allowed us to obtain information on the spatial distribution of internal stresses, which is important for improving reactor engineering technologies.

Geological stability

The development of new technologies of building tunnels and mines, as well as the interpretation of seismic data and construction of earthquake source generation models require the information on the anisotropy of elastic and mechanical properties of rocks, which can be obtained using the neutron texture analysis. The results of neutron diffraction studies of texture and internal stresses of rock samples from the Central Alps (Switzerland) in the region of the Gotthard Base Tunnel are of importance to evaluate the influence of the tunnel excavation work on the geomехanical conditions of the mountain ranges surrounding the tunnel.

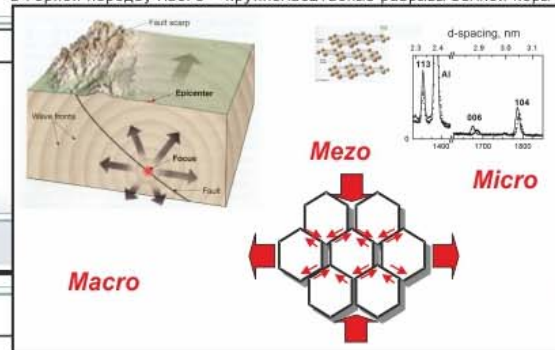
Безопасное хранение отходов

Современный мир сталкивается с необходимостью создания хранилищ радиоактивных отходов и обоснованного выбора мест для строительства ядерных объектов. Это актуальная и очень сложная задача. На помощь в ее решении приходят современные нейтронографические методы, которые при использовании в комплексе с традиционными для геофизики акустическими методами открывают новые возможности для изучения механических и физических свойств, процессов подготовки и реализации разрушения горных пород с целью понимания и предсказания землетрясений и горных ударов.

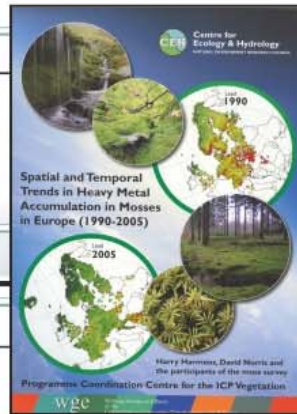
Мониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов в Европе и России

Правильная оценка атмосферных выпадений тяжелых металлов, в том числе и межграничных переносов атмосферных загрязнений, является одной из важнейших задач современного индустриального мира. Один из наиболее эффективных и недорогих способов – это многоэлементный нейтронный активационный анализ мхов-биомониторов с применением GIS технологии для визуализации распространения загрязнения. В рамках международной программы UNECE «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов» мы поддерживаем тесное сотрудничество с коллегами из Албании, Болгарии, Боснии, Белоруссии, Вьетнама, Греции, Македонии, Монголии, Польши, России, Румынии, Сербии, Словакии, Таиланда, Украины, Хорватии и ЮАР.

Три масштабных уровня подготовки землетрясения: Micro – деформация кристаллических решеток и разрыв межатомных связей; Mezo – образование микротрещин в горной породе; Macro – крупномасштабные разрывы земной коры



Three levels of earthquake preparation: Micro – deformation of crystal lattices and breaking of interatomic bonds; Mezo – microcrack development in rocks; Macro – large-scale fractures of the Earth crust



Safe waste storage

The present-day world faces the need to create safe radioactive waste storages, as well as to make a well-argued choice of places where to build nuclear facilities. This is an urgent and very difficult task. Modern neutron diffraction techniques are very helpful in solving this problem and in combination with the acoustic methods traditional for geophysics, open up new possibilities for investigation of mechanical and physical properties of rocks, preparation and realization of the destruction of rocks with the purpose of understanding and prediction of earthquakes and rock bumps.

Monitoring of atmospheric deposition of heavy metals in Europe and in Russia

Correct assessment of atmospheric deposition of heavy metals including the cross-border transfer of atmospheric pollutants is one of the most urgent tasks of the present-day industrial world. One of the most effective and inexpensive ways is the multi-element neutron activation analysis of moss-biomonitors with the use of the GIS technology for visualization of pollution distribution. Within the framework of the International UNECE program "Atmospheric deposition of heavy metals in Europe – estimates based on moss analysis" we maintain close cooperation with our colleagues from Albania, Belarus, Bulgaria, Bosnia, Croatia, Greece, Macedonia, Mongolia, Poland, Romania, Russia, Serbia, Slovakia, the Republic of South Africa, Thailand, Ukraine and Vietnam.

... при изучении фундаментальных свойств конденсированных сред

Структуры новых оксидных материалов

В исследованиях кристаллической и магнитной структуры серии твердых растворов $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ с $x \approx 1$ обнаружены две структурные фазы (высоко- и низкотемпературная) с переходом между ними при $T_c \approx 540$ К. Из данных, полученных при помощи нейтронной дифракции, следует, что ниже $T_c = 625$ К соединение $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ переходит в антиферромагнитное состояние. Это означает, что этот тип анион-дефицитных перовскитов представляет огромный интерес с точки зрения их практического применения.

Новые формы веществ под воздействием высоких давлений

Воздействие высокого давления на вещество вызывает уменьшение межатомных расстояний и изменение потенциальной энергии межатомных взаимодействий, что приводит к образованию новых форм вещества, свойства которых могут быть весьма необычными. В магнитных материалах при сжатии, как правило, стабильность магнитного упорядочения возрастает за счет усиления обменных взаимодействий. На примере сложного оксида – сегнетомагнетика $YMnO_3$ с классическим спином $S=2$ недавно было продемонстрировано, что возможен и обратный эффект: разрушение дальнего магнитного порядка и формирование динамически разупорядоченного состояния, аналогичного состоянию спиновой жидкости, которое, как раньше считалось, может реализоваться только для квантовых магнетиков со спином $S=1/2$.

Иллюстрация антиферромагнитного упорядочения моментов атомов железа в структуре $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ (справа). Элементарная ячейка кристаллической структуры низкотемпературной фазы соединения (слева в той же шкале) (атомы Fe изображены красными шарами)

Спиновые флуктуации в $YMnO_3$ под воздействием давления

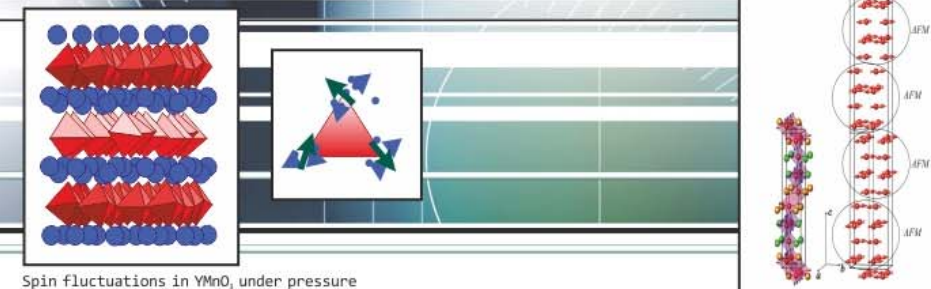


Illustration of the antiferromagnetic ordering of the magnetic Fe moments for the $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ compound (right side). The unit cell of the crystal structure of the low-temperature form (left side - in the same scale) (Fe atoms are shown as red balls)

...to study fundamental properties of condensed matter

The structure of novel oxide materials

In the investigations of crystal and magnetic structures of the $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ solid solution series with $x \approx 1$ two structural phases (high- and low-temperature) with a phase transition between them at $T_c \approx 540$ K have been revealed. It follows from the neutron diffraction data that below $T_c = 625$ K the $Pb_{1-x}Ba_xFe_2O_7$ compound transforms into an antiferromagnetically (AFM) ordered state. This means that this type of anion-deficient perovskites is indeed interesting from the viewpoint of their practical applications.

New forms of substances under high pressures

The effect of high pressures on matter results in a decrease of interatomic distances and a change in the potential energy of interatomic interactions, which leads to the appearance of new forms of matter, the properties of which can be rather unusual. The stability of magnetic order in magnetic materials being compressed increases as a rule, due to the enhancement of exchange interactions. Using a complex oxide (ferroelectromagnet $YMnO_3$, with the classical spin $S=2$) as an example it has been recently shown that the opposite effect is also possible: loss of the long-range magnetic order and formation of a dynamically disordered state, similar to a spin-liquid state, which, as it was believed before, can be realized for quantum magnetism with the spin $S=1/2$ only.

Эффекты взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма в слоистых магнитных наноструктурах

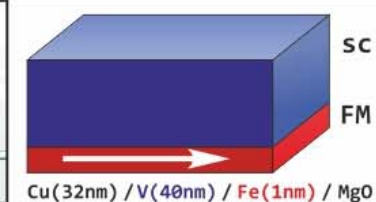
Как известно, сверхпроводимость и магнетизм являются взаимоисключающими явлениями и не могут наблюдаться одновременно в объемных материалах. Эксперименты по нейтронной рефлектометрии показали, что в магнитных слоистых наноструктурах Fe/V сосуществование сверхпроводимости и магнетизма возможно вследствие того, что величины корреляционных длин, характеризующих эти явления, в наноструктурах сопоставимы с толщиной атомных слоев. Наблюдался прямой и обратный эффект близости. Прямой эффект проявлялся в установлении сверхпроводящего параметра порядка в ферромагнетике и в виде уменьшения намагнитченности ферромагнитного слоя. Обратный эффект близости заключался в установлении ферромагнитного порядка в сверхпроводнике и проявился в увеличении вектора намагнитченности сверхпроводящего слоя.

Разработка спинтронных устройств

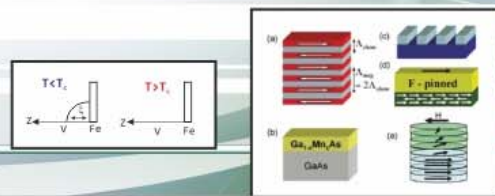
Спинтроника (или спиновая электроника) в настоящее время является быстро развивающимся направлением в науке, технике и производстве. Спинтроника находит применение при разработке принципиально новых магнитно-неколлинеарных и магнитно-некомпланарных гетероструктур, применяемых в наноэлектронике для создания элементов хранения большой ёмкости и быстрой записи информации. Нейтронная рефлектометрия с поляризованными нейтронами (РПН) дает возможность измерить магнитный и ядерный пространственные профили с наноразрешением, что позволяет эффективно проводить исследования объектов спинтроники:

а) структур с гигантским магнитным сопротивлением, (b) ферромагнитных полупроводников GaMnAs, (c) латерально полосовых и точечных структур, (d) ферромагнитных-антиферромагнитных слоев, (e) пружинных структур. РПН позволяет распознавать магнитные и ядерные границы раздела, определять размеры кластеров, определять направление и величину локального вектора намагнитченности.

Возможная поляризация куперовских пар на границе раздела сверхпроводник/ферромагнит



Possible polarization of Cooper pairs at the superconductor/ferromagnet interface



Мы изучаем нейтроны

Прямое измерение рассеяния нейтрона на нейтроне

Для теории ядерных сил необходимо экспериментально проверить указания теории на то, что пары нейтрон-нейтрон и протон-протон взаимодействуют посредством ядерных сил неодинаково.

Мерой силы взаимодействия частиц является сечение рассеяния, которое при малых энергиях есть просто эффективная площадь частицы. Радиус, соответствующий этой площади, уже давно измерен для рассеяния протона на протоне. Для пары нейтронов из-за отсутствия в природе нейтронной мишени известны лишь противоречивые косвенные данные, полученные из реакций на легких ядрах. Физики ЛНФ ОИЯИ предложили решить задачу посредством измерения плотности столкновений тепловых нейтронов в сквозном канале импульсного реактора ЯГУАР, где была смонтирована установка, спроектированная и построенная в ЛНФ. Подобный эксперимент считался технически неосуществимой задачей на стационарных реакторах. Измерения возможны, однако, на импульсных реакторах с мгновенной плотностью потока в 1000 раз превышающей предельное значение на стационарных реакторах. Программа этих измерений осуществляется совместно с физиками из России и США.

На здании реактора ЯГУАР (г.Снежинск) установлена задняя пролётная база экспериментальной установки



The back flight base of the experimental facility is installed on the building of the YAGUAR reactor (Snezhinsk)

Interaction of superconductivity and magnetism in layered magnetic nanostructures

It is well known that superconductivity and magnetism are mutually exclusive phenomena and cannot occur simultaneously in bulk materials. Neutron reflectometry experiments have shown that in Fe/V magnetic layered nanostructures the coexistence of superconductivity and magnetism is possible as a consequence of the fact that the values of correlation lengths, characterizing this phenomena, in nanostructures are comparable to the thickness of atomic layers. The direct and inverse proximity effects were observed. The direct proximity effect consisted in that a ferromagnetic order was set in the superconductor and the magnetization of the ferromagnetic layer decreased. The inverse proximity effect consisted in that a ferromagnetic order was set in the superconductor and the magnetization vector of the superconducting layer increased.

Development of spintronic devices

Spintronics (or spin electronics) is currently a rapidly developing area of science and industry. Spintronics finds application in the development of radically new magnetic noncollinear and magnetic noncoplanar heterostructures used in nanoelectronics for creation of high-capacity storage elements and high-speed data recording devices. The polarized neutron reflectometry (PNR) makes it possible to obtain magnetic and nuclear spatial profiles with nano-resolution, which allows us to effectively study objects of spintronics: a) structures with giant magnetoresistance, (b) ferromagnetic semiconductors GaMnAs, (c) lateral stripe and dot structures, (d) ferromagnetic-antiferromagnetic bilayers, (e) spring structures. PNR also helps to study magnetic and nuclear interfaces, to estimate cluster sizes, to determine the direction and magnitude of the local magnetization vector.

We investigate neutrons

Direct measurement of the neutron-neutron scattering length

For the theory of nuclear forces it is necessary to experimentally verify that neutron-neutron and proton-proton pairs interact by nuclear forces differently.

A measure of the interparticle interaction force is the scattering cross-section, which at low energies is just an effective area of a particle. The radius corresponding to this area has been measured for the proton-proton scattering long ago, while for a neutron-neutron pair only contradictory indirect data are available obtained from the reactions on light nuclei because of the absence of neutron targets in the natural environment. Physicists of FLNP JINR suggested solving the problem by measuring the collision density of thermal neutrons in the through channel of the YAGUAR reactor where a special facility was installed, which was designed and constructed in FLNP. Such an experiment is considered technically unfeasible at steady-state reactors. The measurements are possible, however, at pulsed reactors with the instantaneous flux density exceeding the limit value for steady-state reactors by a factor of 1000. The program of these measurements is carried out in collaboration with the physicists from Russia and the USA.

Ультрахолодные нейтроны

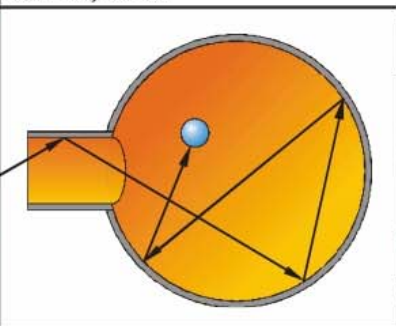
В ЛНФ в 1968 году начаты первые в мире эксперименты с ультрахолодными нейтронами (УХН). УХН – очень медленные нейтроны со скоростями < 5 м/с. Особенностью этих нейтронов, позволяющей выделить их в отдельную группу, является полное отражение таких нейтронов от многих материалов.

Отражение УХН от стенок даёт возможность хранить их в замкнутых вакуумированных камерах в течение нескольких минут. В этих ловушках нейтроны, сталкиваясь (1000-10000 раз) с твёрдыми или жидкими стенками ловушки, взаимодействуют только с тонким приповерхностным слоем вещества стенки ловушки (до 200 Å). Время хранения УХН в ловушках ограничено временем жизни свободного нейтрона, а так же процессами захвата и неупругого рассеяния нейтронов ядрами стенок. УХН чрезвычайно чувствительны к атомарному составу поверхности, поверхностной плотности ядер, к динамике поверхности и к динамике нанообразований на поверхности. На движение УХН существенным образом влияют магнитное и гравитационное поля.

УХН используются для решения вопросов фундаментальной физики: определение времени жизни свободного нейтрона, поиск электрического дипольного момента и электрического заряда нейтрона. Ведутся работы по изучению взаимодействия УХН с наноструктурами.

Специалисты лаборатории традиционно занимают одну из ведущих позиций в мировом научном сообществе по опыту работы с УХН.

Схема ловушки УХН



A schematic diagram of a UCN trap

Ultracold neutrons

In 1968 at the Laboratory of Neutron Physics the world's first experiments with ultracold neutrons (UCN) were started. Ultracold neutrons are very slow neutrons with velocities of < 5 m/s. A peculiar property of ultracold neutrons allowing us to single them out into a separate group is the total reflection of these neutrons from most materials.

The total reflection of ultracold neutrons from walls makes it possible to store them in closed vacuum chambers for several minutes. In these traps while colliding (1000-10000 times) with the solid or liquid trap's walls, neutrons interact only with a thin surface layer of the trap's wall material (up to 200 Å). The UCN storage time in traps is limited by the lifetime of a free neutron, as well as by the processes of radiation capture and inelastic neutron scattering by the nuclei of the wall. UCN are extremely sensitive to the atomic composition of the surface, to the surface density of nuclei, to the dynamics of the surface and nanoformations on the surface. Magnetic and gravitation fields have a significant influence on the movement of UCN.

UCN are used for solving topical problems of fundamental physics, such as evaluation of the lifetime of a free neutron, search for the electric dipole moment and the electric charge of the neutron. The investigations on the interaction of UCN with nanostructures are carried out.

The specialists of the Laboratory traditionally hold one of the leading positions in the world's scientific community as having a wealth of experience in UCN investigations.

Нейтронные реакции для изучения нуклеосинтеза в звездах

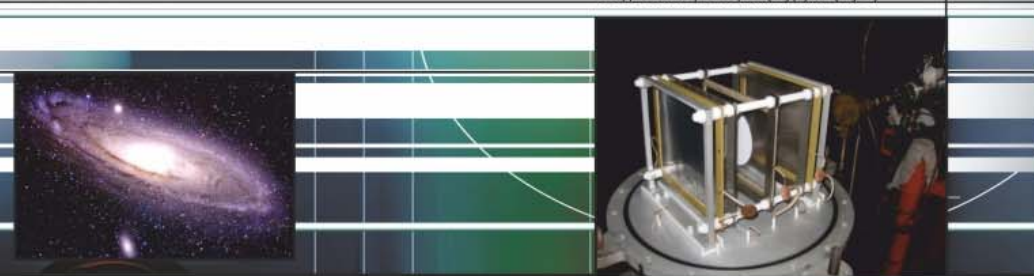
Ядерные реакции с участием нейтронов играют определяющую роль во многих астрофизических процессах, начиная с первых секунд Большого Взрыва и заканчивая стадиями умирания звезд. Вопросами происхождения химических элементов во Вселенной занимается такой раздел науки как ядерная астрофизика. Астрофизики моделируют процессы, происходящие в звездах, и результаты сравнивают с данными наблюдений. Соответствующие сценарии звездного нуклеосинтеза должны объяснять химический и изотопный состав космических объектов.

Для расчетов процессов нуклеосинтеза требуются данные о скоростях ядерных реакций с участием сотен изотопов, большинство из которых радиоактивны. Так как для многих из них прямые измерения невозможны, то используются значения, получаемые на основе моделей ядерных реакций. К сожалению, не для всех типов реакций экспериментальная база данных является достаточно полной, чтобы построить надежную теоретическую модель. Например, для реакций, включающих α -частицы, различные теоретические предсказания могут отличаться в 10 раз. Поэтому очень важными являются измерения сечений реакции (n, α) на широком круге ядер и для широкого диапазона энергий нейтронов.

Такие эксперименты проводятся в ЛНФ на ускорителе Ван-де-Граафа, а также планируются на новом импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН.

Туманность Андромеды (NGC 224) – ближайшая к Млечному Пути большая галактика

Ионизационная камера (внутренняя конструкция), используемая для исследований реакций (n, p) и (n, α)



The Andromeda Nebula (NGC 224) is the nearest large galaxy to the Milky Way

The ionization chamber (internal structure) used for studying the (n, p) and (n, α) reactions

Neutron reactions for studying nucleosynthesis in stars

Nuclear reactions with neutrons play a dominant role in many astrophysical processes starting from the first seconds after the Big Bang and including the dying stages of stars. Nuclear astrophysics is a branch of science, which deals with the questions of the origin of chemical elements in the Universe. Astrophysicists simulate processes occurring in stars and compare the results with the observations. The corresponding scenarios of stellar nucleosynthesis should explain the chemical and isotope composition of space objects.

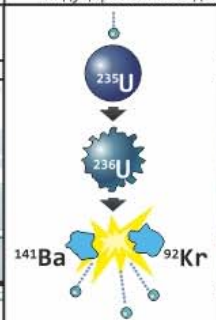
For the calculations of nucleosynthesis processes one needs the data on the rates of nuclear reactions involving hundreds of isotopes, most of which are radioactive. Since for many of them direct measurements are impossible, one uses the values obtained on the basis of nuclear reaction models. Unfortunately, the experimental database is not sufficiently complete for all types of the reactions to construct a reliable theoretical model. For example, for the reactions with α -particles the discrepancy between different theoretical predictions can be as high as a factor of 10. Therefore, measurements of the (n, α) reaction cross sections for a broad range of nuclei and for a wide range of neutron energies are of utmost importance.

Нейтронно-индуцированное деление

Одним из наиболее важных ядерных процессов, протекающих под воздействием нейтронов, является деление ядер. При нейтронно-индуцированном делении тяжелое ядро захватывает нейтрон и распадается на два более легких осколка, которые из-за кулоновского отталкивания разлетаются, приобретая большую кинетическую энергию. При делении почти всегда испускаются несколько нейтронов (которые в свою очередь могут индуцировать очередное деление) и гамма-квантов. В редких случаях при делении может испускаться альфа-частица, которая обычно формируется между двумя основными осколками и испускается перпендикулярно направлению разлета осколков. Такое деление называют тройным делением. Образование легкой частицы очень наглядно демонстрируется в опыте с мыльными пузырями (см. рис. внизу), в котором маленькая капелька образуется всегда, в отличие от деления ядер, где легкая частица образуется в менее 1% случаев. Еще более редким (а возможно, и вовсе не существующим) является деление ядра на четыре осколка или три осколка сравнимой массы.

Несмотря на то, что процесс деления является одним из наиболее изученных, до сих пор не существует единой теории, позволяющей полностью и всесторонне описать это явление. В настоящее время изучение и поиск именно экзотических видов деления ядер, таких как тройное, пожалуй, представляет наибольший интерес. Исследования различных аспектов деления ведутся в ЛНП в сотрудничестве с ведущими научными центрами России и мира.

Типичная схема нейтронно-индуцированного деления



A typical scheme of neutron-induced fission

Иллюстрация тройного деления



An illustration of ternary fission

Neutron-induced fission

One of the most important nuclear processes induced by neutrons is nuclear fission. During the neutron-induced fission a heavy nucleus captures a neutron and then decays into two lighter fragments, which due to the Coulomb repulsion acquire high kinetic energy while coming apart. Fission is almost always accompanied by the emission of several neutrons (which, in their turn, are able to induce further fission) and gamma-quanta. In rare cases an alpha-particle can be emitted during the fission, which is usually formed between the two main fragments and emitted perpendicular to the fragment separation direction. This type of fission is usually called ternary fission. The light particle formation is very vividly demonstrated by an experiment with soap bubbles (see the figure), where a small bubble is always produced in contrast to the nuclear fission, where a light particle appears in less than 1% of cases. More rare (perhaps not existing at all) is fission of a nucleus into four fragments or three fragments of comparable mass.

Despite the fact that fission is one of the most extensively studied processes, there is still no unified theory capable of describing the phenomenon comprehensively. It is the study and search for these extraordinary types of nuclear fission (such as ternary fission) that hold the greatest interest today. Investigations of various aspects of fission are carried out in FLNP in cooperation with the leading scientific centers of Russia and other countries.

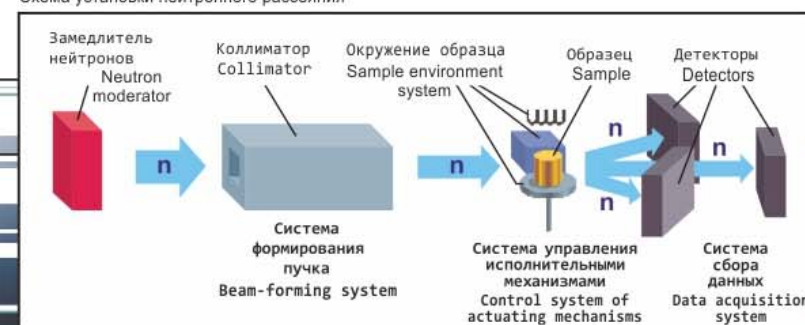
Мы создаем и развиваем свои установки

... симулированные модели нейтронных спектрометров

Нейтронный спектрометр является довольно сложным инструментом. Нейтроны рождаются в активной зоне реактора, далее замедляются до нужных энергий (скоростей) замедлителем, потом нейтронный пучок поступает в систему формирования пучка для придания ему требуемых параметров и проводки нейтронов от замедлителя к образцу. Далее происходит рассеяние нейтрона на образце (исследуемом материале). После этого нейтроны регистрируются детектором или набором детекторов нейтронов. По полученным зарегистрированным спектрам восстанавливается необходимая информация об исследуемом образце.

Самый эффективный подход для проектирования, расчета и оптимизации спектрометров является моделирование методом Монте-Карло. Мы успешно разрабатываем и моделируем новые приборы и спектрометры, а также разрабатываем новые методики в нейтронной спектроскопии.

Схема установки нейтронного рассеяния



Layout of a neutron scattering instrument

We develop and improve our instruments

... simulated models of neutron spectrometers

A neutron spectrometer is a rather complex instrument. Neutrons are born in the reactor core, next they are slowed down to the required energies (velocities) by a moderator, then the neutron beam comes to the beam-forming system, where it acquires the required parameters and after that neutrons are guided from the moderator to the sample. Then neutrons are scattered by the sample (material under study). After that neutrons are registered by a neutron detector or a set of neutron detectors. The required information about the sample under study is reconstructed from the obtained spectra.

The most effective approach to designing, calculation and optimization of spectrometers is the Monte Carlo simulation. We successfully design and simulate new devices and spectrometers as well as develop new techniques in neutron spectroscopy.

... источники холодных нейтронов

Уже больше полвека наши ученые изучают нейтроны и используют их для исследования строения веществ и материалов. Для этого пригодны нейтроны, движущиеся с малой скоростью – сотни и тысячи метров в секунду. Такие нейтроны называют медленными, в отличие от быстрых нейтронов, излучаемых реактором, которые имеют скорость в десятки тысяч км/с. Медленные нейтроны получают путем замедления быстрых в устройствах, называемых замедлителями.

В последние 15 лет мы изучили свойства множества материалов для того, чтобы создать наилучший замедлитель для модернизированного реактора ИБР-2.

Остановили свой выбор на смеси ароматических углеводородов – мезитилена и м-ксилола, которая показала наилучшие параметры. Нейтроны замедляются в мелких шариках из замороженной смеси.

... специализированные прерыватели нейтронных пучков

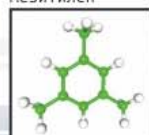
В различных экспериментах требуется направить на образец нейтроны определенной энергии (скорости). Поскольку время пролета пучка нейтронов через прерыватель пропорционально их энергии, время открывания окна определяет энергию нейтронов, попадающих на образец. Эти задачи решаются механическими системами, пропускающими на образец нейтроны строго определенное время, примерно 1-10 мс. Точность стабилизации составляет от 20 до 250 мкс.

Шарики замедляющего материала в камере замедлителя при 50 К (~27 000 шт.)



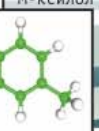
Beads of moderator material in the moderator chamber at 50 K (~27 000 pcs)

Мезитилен



Mesitylene

М-ксилол



m-xylene

Фурье-прерыватель на 11 пучке реактора ИБР-2



Fourier chopper on beam 11 of the IBR-2 reactor

... cold neutron sources

For over half a century our scientists have been investigating and using neutrons to study the structure of substances and materials. It is done with the help of neutrons moving at low velocities – hundreds and thousands of meters per second. Such neutrons are called slow, in contrast to fast neutrons emitted by reactors with velocities of tens of thousands km/s. Slow neutrons are obtained by slowing down fast ones in devices called neutron moderators.

In the last 15 years we have studied the properties of many materials in order to create the best neutron moderator for the modernized IBR-2 reactor.

We set our choice on a mixture of aromatic hydrocarbons – mesitylene and m-xylene, which showed the best parameters. Neutrons are slowed down in small beads of frozen mixture.

... specialized neutron beam choppers

In various experiments it is necessary to direct neutrons of a particular energy (velocity) to the sample under study. Since the neutron beam time of flight through the chopper is proportional to the neutron energy, the window opening time determines the energy of neutrons incident on the sample. This problem is solved by mechanical systems that allow neutrons to pass to the sample in a strictly determined period of time of about 1-10 ms. The stabilization accuracy is from 20 to 250 μs.

... нейтроноводы и нейтрон-оптические элементы

Для проводки пучков тепловых (холодных) нейтронов от активной зоны реактора до спектрометра используются нейтроноводы.

Задача нейтроновода – транспортировка тепловых (холодных) нейтронов до заданного места с сохранением плотности потока на основе полного отражения от гладкой зеркальной поверхности. Изогнутые нейтроноводы (радиус кривизны ~1 км) позволяют отделить тепловые (холодные) нейтроны (отражающиеся от поверхности) от быстрых нейтронов (не отражающиеся).

... детекторы нейтронов

Чрезвычайно важная часть спектрометра – это детекторы нейтронов. Детекторы – это приборы для регистрации нейтронов. С помощью детекторов определяют интенсивность потока нейтронов, его энергетический спектр, пространственное и угловое распределение. На спектрометрах ИБР-2 используются различные типы детекторов – нейтронные счетчики (газонаполненные точечные детекторы), сцинтилляционные детекторы и газонаполненные позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД).

Каждый детектор по-своему уникален и должен стабильно и надежно работать в интенсивных радиационных потоках и отвечать главным требованиям: большая скорость счета, высокая эффективность регистрации и разрешение.

В ЛНФ имеется необходимая инфраструктура для разработки, изготовления и испытания ПЧД, создана так же линейка одно- и двухкоординатных ПЧД.



1D ПЧД



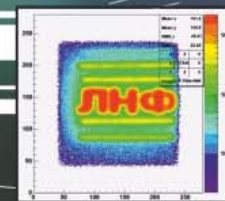
2D ПЧД



1D PSD

2D PSD

Координатный спектр 2D монитора. Прямой пучок перекрыт кадмиевой маской с буквами "ЛНФ"



Coordinate spectrum of a 2D monitor. A cadmium mask with letters "ЛНФ" ("FLNP") is placed in the direct beam

... neutron guides and neutron-optical elements

To guide thermal (cold) neutrons from the reactor core to a spectrometer, neutron guides are used.

The function of neutron guides is to transport thermal (cold) neutrons to the destination and maintain the flux density constant owing to the total reflection off a smooth mirror-like surface. Curved neutron guides (radius of curvature ~1 km) make it possible to separate thermal (cold) neutrons (reflected off the surface) from fast ones (non-reflected).

... neutron detectors

Neutron detectors are an extremely important constituent part of a spectrometer. Detectors are the devices for registering neutrons. With the help of detectors the intensity of a neutron flux, its energy spectrum, spatial and angular distribution are determined. Detectors of various types are used at the IBR-2 spectrometers – neutron counters (gas-filled point detectors), scintillation detectors and gas-filled position-sensitive detectors (PSD).

Each detector is unique in its own way and must be stable and reliable in operation in intense radiation fluxes and meet the main requirements: high counting rate, high registration efficiency and resolution.

FLNP has proper infrastructure for designing, production and testing of PSD. Also, a series of 1D and 2D PSD has been developed.

... системы окружения образца

Каждый из спектрометров, расположенных в экспериментальных залах ИБР-2, имеет в своем составе самое разнообразное оборудование и ориентирован на решение определенного класса задач. Например, можно выделить целый класс устройств – так называемые системы окружения образца, которые позволяют создавать на исследуемом образце определенные условия (температуру, давление, магнитное поле и др.). Оборудование для этих целей либо приобретается в специализированных фирмах, либо разрабатывается в самих нейтронных центрах, в том числе и в нашем. При этом важно, чтобы это оборудование было максимально унифицировано, по крайней мере, в отношении систем управления и интерфейсов.

... системы автоматизированного управления и сбора данных с нейтронных спектрометров

Для успешной реализации программы научных исследований ключевое значение имеют характеристики и параметры систем сбора данных (ССД) и информационно-вычислительной инфраструктуры.

Во всех созданных в ЛФ ПЧД системах используются разработанные нами унифицированные ССД-блоки, встраиваемые в РС. Для ПЧД и точечных детекторов разрабатывается новое поколение быстродействующих ССД-блоков, которые будут подключаться к РС с помощью USB-интерфейса и волоконно-оптической линии связи.

Мы разрабатываем программное обеспечение для всех спектрометров, позволяющее управлять работой механизмов спектрометров, контролировать работу устройств окружения образца и вести сбор и накопление данных, а также проводить предварительную обработку и визуализацию накопленных данных. Разработанное нами программное обеспечение позволяет работать на спектрометрах удаленно из любой точки мира, имеющей выход в интернет.

Блок сбора и накопления данных с ПЧД

Шафтный криостат (диапазон регулируемых температур 2.3-3000 К)



Shaft cryostat (regulated temperature range – 2.3-3000 K)



PSD data acquisition and accumulation block

... sample environment systems

Each spectrometer in the IBR-2 experimental halls has various types of equipment that is targeted at dealing with specific tasks. For example, among this equipment a whole class of devices may be noted – the so-called sample environment systems, which makes it possible to create certain conditions at the sample under investigation (temperature, pressure, magnetic field, etc). The equipment for these purposes is either purchased in specialized firms or developed directly in neutron centers, including our Laboratory. Here, it is of importance that the equipment should be unified to the maximum extent, at least, in relation to the control systems and interfaces.

... automatic control and data acquisition systems for neutron spectrometers

For successful realization of scientific research programs the characteristics and parameters of data acquisition (DAQ) systems and of the information infrastructure are of key importance.

Unified PC's built-in DAQ blocks developed by us are used in all PSD systems designed and constructed in FLNP. For PSD and point detectors a new generation of fast DAQ blocks are being designed, which will be connected to PC via an USB interface or fiber-optic lines.

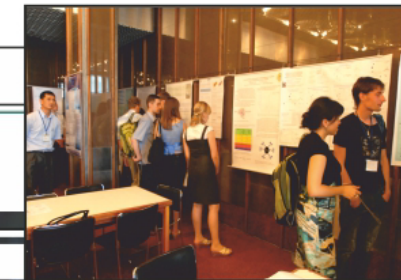
We also design software for all spectrometers, which makes it possible to control the mechanisms of spectrometers and sample environment devices, perform data acquisition and accumulation as well as to preprocess and visualize the accumulated data. Our software allows remote control over the spectrometers from any place in the world where there is an Internet access.

Мы делимся нашими знаниями

Мы поддерживаем активный обмен информацией между учеными, организуя регулярные конференции по нейтронным исследованиям в области нанотехнологий и физики конденсированного состояния (Международные семинары по исследованиям на импульсном реакторе ИБР-2) и в области ядерной нейтронной физики (Международный семинар по взаимодействию нейтронов с ядрами).

Мы участвуем в организации традиционных школ для молодых исследователей, студентов, аспирантов и кандидатов наук из стран СНГ: Высшие курсы по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования наносистем» (СИН-нано).

Организуем международные школы «Современная нейтронография: фундаментальные и прикладные исследования функциональных и наноструктурированных материалов» и «Приборы и методы экспериментальной ядерной физики. Электроника и автоматика экспериментальных установок».



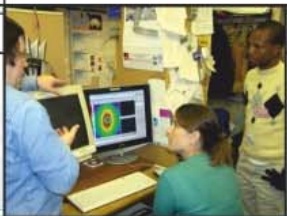
We share our knowledge

We support active information exchange between scientists by organizing regular conferences on neutron investigations in the field of nanotechnologies and condensed matter physics (International Seminars on investigations at the IBR-2 reactor) and in the area of neutron physics (International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei).

We contribute to organization of traditional schools for young scientists, graduates, PhD students and PhD candidates from CIS countries: Higher Courses on advanced methods of research in nanosystems and materials "Synchrotron and Neutron Investigations of Nanosystems" (SYN-nano).

We organize international scientific schools "Modern Neutron Diffraction Studies: Interdisciplinary Research of Nanosystems and Materials", and "Instruments and Methods of Experimental Nuclear Physics. Electronics and Automatics of Experimental Facilities".

Участвуем в проведении летних студенческих практик для студентов и аспирантов из ассоциированных стран и стран-участниц ОИЯИ организованных совместно с Учебно-научным центром ОИЯИ.



Проводится традиционный совместный семинар ОИЯИ-Румыния «Нейтронная физика для исследования ядер, конденсированного состояния вещества, медицины и биологии» для укрепления сотрудничества между ЛНФ ОИЯИ и Румынией и привлечения новых поколений студентов к научной работе после окончания учебы.



Alin Poheanta © 2011

We take part in the organization of summer student training courses for graduates and PhD students from JINR Associated Member Countries and JINR Member States held by the JINR University Centre.

A traditional Joint Seminar JINR-Romania on neutron physics for investigations of nuclei, condensed matter and life sciences is held to consolidate collaboration between FLNP JINR and Romania and to attract new generations of students to scientific research after graduation.

Наши специалисты участвуют в Научных школах для учителей физики из стран-участниц ОИЯИ, представляя им наши установки и научные достижения.



Our specialists take part in scientific schools for teachers of physics from JINR Member States presenting them our instruments and our scientific achievements.

Мы приглашаем использовать наши установки

Политика пользователей ЛНФ

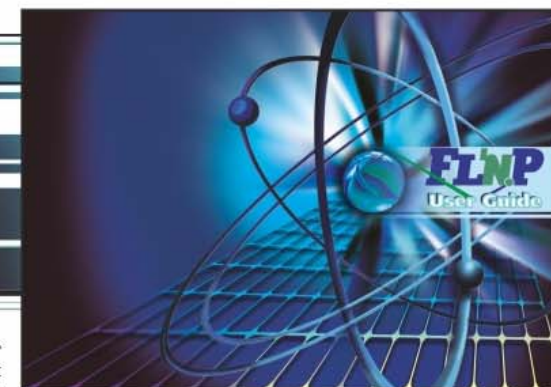
Время для измерений на реакторе ИБР-2 распределяется между внутренними пользователями и остальным научным сообществом в соотношении 35% (внутренние заявки) : 55% (внешние обычные заявки) : 10% (внешние срочные заявки). Допуск к экспериментам на спектрометрах ИБР-2 для любого пользователя предоставляется только на основании заявления. Существует два вида заявлений: обычные и срочные. Для первого вида заявлений существует крайний срок подачи и процесса рассмотрения для выделения времени на эксперимент. Для второго вида не существует крайнего срока подачи; сотрудник, ответственный за соответствующую установку, в исключительных случаях дает разрешение на выполнение эксперимента. Заявки оцениваются отборочной комиссией, время для проведения эксперимента выделяется в соответствии с научной ценностью заявки.

Дополнительная информация на www.ibr2user.ru

Студенты из стран-участниц ОИЯИ и из других стран выполняют на наших установках экспериментальную часть дипломных, магистерских и кандидатских работ



Students from JINR Member States and other countries carry out the experimental part of their diploma, Master's degree and PhD theses at our instruments



We invite users to conduct experiments at our instruments

FLNP User Policy

The neutron beam time at the IBR-2 reactor is distributed between the internal users and general scientific community in the ratio of 35% (internal proposals) : 55% (external ordinary proposals) : 10% (external urgent beam time requests). The access to experiments on the IBR-2 spectrometers for all users is given only on application basis. There are two kinds of applications: ordinary applications and fast access applications. For the first category there is a deadline for proposal submission and review process for beam time allocation. For the second category there is no deadline for submission, the respective instrument responsible in exceptional cases may grant permission for carrying out the experiment. The proposals are peer-reviewed and rated and beam time for experiments is allocated on the basis of scientific merit of the proposal.

Additional information is at www.ibr2user.ru

Содержание

Contents

В начале было слово, или как всё начиналось...	3	In the beginning was the Word or how it all began...
Наши путеводители в наномир	4	Exploring the nanoworld
Реактор ИБР 1960-1968		IBR reactor 1960-1968
Реактор ИБР-30 1969-2000		IBR-30 reactor 1969-2000
Импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР-2 (1984-2006)	5	IBR-2 Pulsed Fast Reactor (1984-2006)
Источник Резонансных Нейтронов (ИРЕН)(2008- ...)	6	Intense Resonance Neutron Source (IREN)(2008- ...)
Модернизированный реактор ИБР-2 (2010- ...)	7	The IBR-2 modernized reactor (2010- ...)
Комплекс спектрометров на реакторе ИБР-2	8	The IBR-2 spectrometers' complex
Почему мы используем нейтроны?	9	Why do we use neutrons?
Нейтроны и синхротронное излучение	11	Neutrons versus synchrotron radiation
Мы используем нейтроны как инструмент...	12	We use neutrons as a tool...
... в разработке более эффективных методов борьбы с раком		...to develop more effective methods of treating cancer
... при разработке лекарственных препаратов от анемии	13	... to develop antianemic drugs
... и улучшения их проникающей способности в организм		...and to improve their penetrability into the organism
... в изучении процессов старения клеток	14	... to study cell ageing processes
... в поиске воды на Марсе и других планетах		... to detect water on Mars and other planets
... в разработке новых функциональных материалов	15	...to develop novel functional materials
... в создании более надежного мира вокруг нас	18	...for creating a more reliable world around us
... при изучении фундаментальных свойств конденсированных сред	20	...to study fundamental properties of condensed matter
Мы изучаем нейтроны	22	We investigate neutrons
Прямое измерение рассеяния нейтрона на нейтроне		Direct measurement of the neutron-neutron scattering length
Ультрахолодные нейтроны	23	Ultracold neutrons
Нейтронные реакции для изучения нуклеосинтеза в звездах	24	Neutron reactions for studying nucleosynthesis in stars
Нейтронно-индуцированное деление	25	Neutron-induced fission
Мы создаем и развиваем свои установки	26	We develop and improve our instruments
... симулированные модели нейтронных спектрометров		... simulated models of neutron spectrometers
... источники холодных нейтронов	27	... cold neutron sources
... специализированные прерыватели нейтронных пучков		... specialized neutron beam choppers
... нейтроноводы и нейтрон-оптические элементы	28	... neutron guides and neutron-optical elements
... детекторы нейтронов		... neutron detectors
... системы окружения образца	29	... sample environment systems
... системы автоматизированного управления и сбора данных с нейтронных спектрометров		... automatic control and data acquisition systems for neutron spectrometers
Мы делимся нашими знаниями	30	We share our knowledge
Мы приглашаем использовать наши установки	32	We invite users to conduct experiments at our instruments
Политика пользователей ЛНФ		FLNP User Policy

