

Федеральное агентство научных организаций РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 115070610042

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ  
директор ИЯИ РАН д.т.н.  
Л.В.Кравчук  
19 января 2016 года



ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В ТОМ  
ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ  
ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ  
(промежуточный за 2015 год)  
0031-2014-0068

Научный руководитель  
заместитель директора по научной работе  
д.ф.-м.н.



А.В.Фещенко  
19 января 2016 года

Москва 2016

Федеральное агентство научных организаций РФ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 115070610042

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ

директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В ТОМ  
ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ  
ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ  
(промежуточный за 2015 год)  
0031-2014-0068

Научный руководитель  
заместитель директора по научной работе  
д.ф.-м.н.

А.В.Фещенко  
19 января 2016 года

Москва 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



А.В.Фещенко (реферат, введение,  
разделы 1-4, заключение)

19.01.2016

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Коптелов Э.А. (разделы 1-3)  
19.01.2016



д.ф.-м.н. Недорезов В.Г. (раздел 3)  
19.01.2016



к.ф.-м.н. Конобеевский Е.С. (раздел 3)  
19.01.2016

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 47 с., 16 рис.

НАНОСТРУКТУРА, НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ, ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТРАНСМУТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ, ВРЕМЯПРОЛЁТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР, НЕЙТРОННЫЙ ДИФФРАКТОМЕТР, БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Запуск источника нейтронов ИН-ЛУЭ. Запущен источник нейтронов на основе электронного пучка линейного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрам-бериллиевой фотонейтронной мишени и замедлителя-формирователя спектра нейтронов. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых - 0.5–5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Изменение спектра нейтронов достигается изменением конфигурации бериллиевой мишени и в некоторых случаях применением специальных фильтров. В настоящее время начаты работы по нейтроно-активационному анализу при плотности потока  $\sim 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что позволяет, например, определять содержание золота в образце с содержанием  $\sim 1 \text{ г/т}$ . ИЯИ РАН.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Реферат                                                                                                                   | 3  |
| Введение                                                                                                                  | 5  |
| Основные результаты                                                                                                       | 6  |
| 1 Лаборатория нейтронных исследований                                                                                     | 6  |
| 2 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров | 35 |
| 3 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8                                             | 41 |
| Заключение                                                                                                                | 46 |

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

получение прецизионных данных по рассеянию и реакциям с участием протонов, нейтронов, гамма-квантов, легких и делящихся ядер, спектрам нейтронов деления и других данных, необходимых для ядерной энергетики и других приложений;

развитие на этой основе троичного ядерно-физического комплекса: создание мощных источников синхротронного, нейтронного и иных ядерных излучений;

разработка новых прецизионных методов детектирования элементарных частиц;

исследования и разработки устройств детектирования излучений и высокотемпературных, радиационно-стойких систем для ядерно-физических комплексов и перспективных технологий;

использование методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред;

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Лаборатория нейтронных исследований

#### 1 СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ д.ф.-м.н. Э.А. Коптелов

|                                  |                      |
|----------------------------------|----------------------|
| Алексеев Андрей Алексеевич       | н.с.                 |
| Аксенов Сергей Николаевич        | м.н.с.               |
| Гаврилюк Александр Григорьевич   | с.н.с., к.ф.-м.н.    |
| Латышева Людмила Николаевна      | н.с.                 |
| Лебедь Юлия Борисовна            | н.с., к.б.н.         |
| Литвин Василий Сергеевич         | м.н.с. к.ф.-м.н.     |
| Клементьев Евгений Станиславович | с.н.с., к.ф.-м.н.    |
| Кузнецов Валерий Леонидович      | с.н.с., к.ф.-м.н.    |
| Кузнецова Евгения Васильевна     | с.н.с., к.ф.-м.н.    |
| Садыков Равиль Асхатович         | зав.сект., к.ф.-м.н. |
| Сидоркин Станислав Федорович     | зав.сект., к.ф.м.н.  |
| Семенов Алексей Алексеевич       | с.н.с., к.ф.-м.н.    |
| Соболевский Николай Михайлович   | зав.сект, д.ф.-м.н.  |
| Трунов Дмитрий Николаевич        | м.н.с.               |
| Коптелов Эдуард Алексеевич       | зав. ЛНИ, д.ф.-м.н.  |

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Научная и научно-организационная деятельность Лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН направлена на проведение и развитие работ по выполнению Государственного задания, в том числе разработку и оснащение научным оборудованием импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 (spallation типа) на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода, разработку и реализацию программы фундаментальных и прикладных исследований на базе Нейтронного комплекса (включая облучательное устройство мишенно-ловушечного узла на прямом канале протонов – установку РАДЭКС с времяпролетным нейтронным спектрометром, импульсный нейтронный источник ИН-06, спектрометр по времени замедления в свинце СВЗ-100), подбор и подготовку необходимых высококвалифицированных научных и инженерно-технических кадров

В состав *Лаборатории нейтронных исследований* входят:

Расчетно-теоретический сектор.

Сектор конденсированных сред.

Сектор импульсных нейтронных источников, включая группу нейтрон-ядерных взаимодействий.

Сектор электроники и технического обеспечения.

Основные задачи лаборатории и входящих в нее секторов определены Государственным заданием на 2015 год.

Ниже приведены результаты работ сотрудников ЛНИ ИЯИ РАН в 2015 году.

## 1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1.1 Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред

Руководитель работ Э.А. Коптелов

1.1.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН. Расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.

Исполнители:

Заведующий сектором ЛНИ, кфмн С.Ф. Сидоркин

Зав. сектором ЛНИ Н.М. Соболевский, н.с. Л.Н. Латышева.

Продолжены расчетно-теоретические работы по поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния  $^{237}\text{Np}$ . Определены основные физико-технические особенности этих мишеней в сочетании с теплоносителями и конструкционными материалами, оптимальные форма и другие параметры, условия применимости такой мишени. Ведутся обсуждения основных результатов со сторонними организациями.

Продолжены работы по исследованиям возможных конфигураций ADS стенда применительно ко второму свободному боксу радиационной защиты нейтронного комплекса. В частности, проводится моделирование поведения расплавов жидких солей на основе  $\text{LiF-NaF-KF}$  в экспериментальных каналах такого стенда (трансмутация в жидких солях), которые могли бы быть установлены вместо  $\text{PbBi}$  вставок. Продолжаются исследования других конфигураций стенда с целью демонстрации его возможностей и привлечения сторонних организаций к его созданию.

Был проведен комплекс предварительных переговоров с потенциальными зарубежными инвесторами по созданию ADS стенда. Определены первоочередные организационные шаги и проводились переговоры с представителями Российских организаций корпорации РОСАТОМ (НИКИЭТ, ГСПИ, НИИАР, ФЭИ и др.) по их возможному участию в создании стенда.

Подготовлена к публикации в 2016 году издательством Springer International Publishing Switzerland глава под названием «Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russia Academy of Sciences» в сборнике «Thorium Energy for the World». Авторы: С.Ф. Сидоркин, А.Д. Рогов, Л.И. Пономарев, Э.А. Коптелов

Сектор импульсных источников нейтронов принимал участие по изучению радиационной обстановки в экспериментальном комплексе в последнем сеансе работы ускорителя на нейтронный комплекс. Полученные данные необходимы для получения лицензии для постоянной работы экспериментального комплекса и дальнейшей работы комплекса.

Обеспечивались текущие работы на нейтронном комплексе, как во время сеанса, так и в период подготовки к сеансу. В частности, была сконструирована и создана новая защитная пробка экспериментального канала на установке РАДЭКС, проведена подготовка и замена одного из петряновских фильтров в системе специальной вентиляции. Проведена работа по комплексной проверке спец. вентиляции и другого оборудования. Составлен перечень отказов оборудования для последующего ремонта и устранения отмеченных отказов в случае открытия финансирования.

По результатам работ, направленных на дальнейшее развитие транспортного кода SHIELD как инструмента компьютерного моделирования процессов взаимодействия частиц и ядер с веществом, подготовлены публикация:

К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, Н.М.Соболевский, А.В.Юдин. *Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах*. Известия РАН сер. Физическая, **79** (2015) 432-435. Английский вариант: K.V.Manukovskii, O.G.Ryazhskaya, **N.M.Sobolevskii**, and A.V.Yudin. *Generation of Neutrons by Cosmic Ray Muons in Different Materials*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **79** (2015) 397–400.

К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, Н.М.Соболевский, А.В.Юдин. *Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах*. Ядерная Физика, принято в печать.

В работе показано, что потоки фоновых нейтронов, генерируемые мюонами космических лучей в элементах подземных экспериментальных установок и в окружающем грунте, существенно зависят от индивидуальных нейтронных свойств материалов (при низких энергиях  $E_n < 20$  MeV). Потоки нейтронов не могут быть описаны простой универсальной зависимостью от массового числа материала типа  $\sim A^\alpha$ .

#### 1.1.2 Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий

Исполнитель:

рук.группы н.с. А.А.Алексеев.

Разработана методика регистрации актов деления нейтронами атомных ядер существующих в малом количестве, имеющих малый период полураспада. Проведены исследования фоновых регистраций эквивалентных реальным актам деления. Предложены способы их устранения.

Изучались энергетические характеристики нейтронного спектра формирующегося после нейтронной "вспышки" в интервалах времени замедления близких к моменту образования нейтронного потока.

Определена форма линии спектрометра СВЗ-100 с использованием делительных и захватных резонансов.

#### 1.1.3 Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов и дифрактометра на эпитепловых нейтронах

Для времяпролетного спектрометра «Гибрид» был разработан модуль для исследования магнитного рассеяния нейтронов на малые углы. Из-за низких значений магнитного формфактора для f- и d-элементов необходимо обеспечить малые значения модуля переданного импульса  $|Q|$  при высоких переданных энергиях. Данный модуль предполагает использование дополнительных коллиматоров, которые также были разработаны.

Для времяпролетного нейтронного спектрометра «Глобус» были разработаны радиальные коллиматоры нового фасеточного типа, позволяющие сильно уменьшить фон от рассеяния нейтронов в фильтре из поликристаллического бериллия.

Для трех приборов было проведено Монте-Карло моделирование и оптимизированы геометрические параметры установок.

Было проведено согласование доступных для исследований областей в Q-E пространстве для установок Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, планируемых к запуску приборов реактора ПИК (ПИЯФ) и установок на источнике нейтронов ИБР-2 в ОИЯИ. ИЯИ РАН будет перекрывать преимущественно высокоэнергетическую область (тепловые, горячие и эпитепловые нейтроны).

#### 1.1.4 Оптимизация нейтронных исследований на Нейтронном комплексе ИЯИ РАН. Модернизация детекторных систем.

Разработка и создание прототипов больших газовых и сцинтилляционных позиционно-чувствительных нейтронных детекторов.

Исполнитель:  
Зав.сектором Р.А.Садыков

#### 1.1.5 Исследования и разработки устройств детектирования излучений для ядерно-физических комплексов и перспективных технологий

Исследовано влияние на временное и энергетическое разрешение спектрометра СВЗ-100 протонного импульса длительностью 1 мкс и 2 мкс. Проведена оценка эффективности использования протонного пучка при этих длительностях протонного импульса.

Исполнитель:  
рук. группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев.

#### 1.1.6 Математическое моделирование ядерных реакций и процессов взаимодействия частиц с веществом. Использование результатов в высокотехнологичных приложениях и фундаментальных исследованиях

Проведено Монте-Карло моделирование фото-нейтронного источника тепловых нейтронов на базе электронного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН (совместно с ЛАЯ и ЛФЯР ИЯИ), результаты представлены на конференции:

A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, **L.Latysheva**, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin<sup>1</sup>, S.Sidorkin<sup>1</sup>, **N.Sobolevsky**, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev. *Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and ( $\gamma,n$ ) reactions*. **Invited talk** at the NUFRA2015 International Conference, Kemer, Turkey, October 6-11, 2015.

<http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/>

Представлены результаты расчетно-теоретического обоснования конструкции источника нейтронов на основе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8 ИЯИ, вместе с предварительными результатами измерения потоков нейтронов. Дан обзор работ по расчетной оптимизации импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 ИЯИ в интересах физики твердого тела. Представлено предложение по созданию уникального ADS-стенда во втором боксе источника ИН-06.

В работе V.T.Taasti, H.Knudsen, M.H.Holzscheiter, **N.Sobolevsky**, B.Thomsen, N.Bassler. *Antiproton annihilation physics in the Monte Carlo particle transport code SHIELD-HIT12A*. Nucl.Instr.Meth. **B347** (2015) 65–71

транспортный код SHIELD-HIT существенно развит с целью описания взаимодействия пучка антипротонов с веществом. Это достигнуто за счет уточнения антипротон-ядерных сечений и замены Z-закона Ферми-Теллера для поглощения остановившихся отрицательных частиц более современной теорией. Получено удовлетворительное согласие с результатами коллаборации AD-4/ACE по измерению кривой Брэгга в воде на пучке антипротонов в ЦЕРН.

#### 1.1.7. Развитие статистических моделей мультифрагментации, испарения, деления, Ферми-развала для описания дезинтеграции возбужденных ядер

Анализ новых экспериментальных данных по образованию фрагментов в ядерных реакциях с целью уточнения уравнения состояния (ЕoS) ядерной материи. Применение ЕoS при субъядерной плотности для описания процессов взрыва суперновых и нейтронных звезд.

#### 1.1.7 Публикации:

H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical study of projectile fragmentation in the  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  reactions at 1 GeV/nucleon.* Phys. Rev. **C91** (2015) 034605 (8 pages)

A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation.* Phys. Rev. **C92** (2015) 014610 (11 pages).

N.Buyukcizmeci, A.Ergun, H.Imal, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Investigation of isotope composition of nuclear fragments with angular momentum and Coulomb effects in peripheral  $^{84}\text{Kr}+^{112,124}\text{Sn}$  collisions at 35 A MeV.* Nuclear Science and Techniques **26** (2015) S20507 (6 pages), (Chinese Academy of Sciences)

R.Ogul, H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical Study of Projectile Fragmentations in Relativistic Heavy-Ion Reactions.* EPJ Web of Conference, **93** (2015) 02022 (Proceedings of CGS15, Dresden.) <http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2015/12/contents/contents.html>

V.A.Karnaukhov, S.P.Avdeyev, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, P.A.Rukoyatkin, V.I.Stegaylov, H.Oeschler, **A.S.Botvina**. *Expansion time of hot nuclei produced by a relativistic deuteron beam.* Phys. At. Nuclei, **78**, No.5 (2015) 574-578 (Yad. Fiz. **78**, No.7-8 (2015) 618-622).

Выполнен анализ новых экспериментальных данных по образованию фрагментов и изотопов в ядерных реакциях с целью уточнения уравнения состояния (EoS) ядерной материи и улучшение описания ядер в звездной среде при субъядерной плотности. Учен эффект внешнего длиннодействующего Кулоновского потенциала на фрагментацию и мультифрагментацию возбужденных ядер, что ведет к наблюдаемой пространственной и изотопической асимметрии в выходе фрагментов.

#### 1.1.8 Развитие статистических моделей распада гиперъядерной материи, образующейся в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Анализ захвата гиперонов возбужденными ядрами и распада таких ядер

Исполнители: зав. сектором ЛНИ Н.М.Соболевский, с.н.с. А.С.Ботвина, н.с. Л.Н.Латышева

#### 1.1.8 Публикации

**A.S.Botvina**, J.Steinheimer, E.Bratkovskaya, M.Bleicher, J.Pochodzalla. *Formation of hypermatter and hypernuclei within transport models in relativistic ion collisions.* Phys. Lett. **B742** (2015) 7-14.

**A.S. Botvina.** *Formation mechanisms of hypernuclei.* Invited talk at the Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation (from basic research to applications) - NUFRA2015. Kemer (Antalya), Turkey, October 4 - 11, 2015. <http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/>

В работах представлено развитие статистических и динамических (коалесцентных) моделей образования и распада гиперъядерной материи в обычные ядра и гиперядра в адрон- и ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Выполнено моделирование захвата гиперонов возбужденными ядрами и распада таких гиперядер.

1.1.9 Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред

Исполнители: зав. сектором ЛНИ Р.А.Садыков, с.н.с Е.С. Клементьев, с.н.с А.Г. Гаврилюк

Введен в строй специальный виброустойчивый криостат для мессбауэровского спектрометра. Диапазон измерения данного криостата до 4.2 К. При данной температуре были проведены измерения в течение недели на тестовом образце альфа Fe. Криостат успешно выдержал испытание и держал вакуум в течение всего периода измерения. Для визуального наблюдения положения образца была проведена реконструкция криостата и заменены окна с бериллиевых на пластиковые. Так же была проведена работа по устранению вибраций на образце, которые влияют на эксперимент. Для этого были применены вибропоглощающие прокладки под сам криостат, детектор, вибратор и штوك образца.

*Сеанс 2015 на нейтронном источнике:*

Была проведена подготовка к сеансу на нейтронном источнике ИН-06 и РАДЭКС. В процессе подготовки был запущен считыватель пластин ImagePlate. В ходе сеанса, с помощью данных пластин, были померяны профили пучка установки «Кристалл». Также был испытан кольцевой детектор на твердотельных детекторах.

Статьи за 2015

Anatoly Vasilievich Tsvyashchenko, Ph.D.; Aleksei Menushenkov; Vladim Sidorov; Alla Petrova; Liudmila Fomicheva; Olga Chernysheva; Sergei Axenov; Yulya Lebed'; Sergei Bud'ko; Liling Sun ; Zhongxian Zhao. High Pressure Synthesis of a New Phase of YbAg<sub>2</sub>: Structure, Valence of Yb and Properties ARTICLE in JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS 650, 2015

*В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров.* Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов. Письма в Журнал технической физики, 2015, том 41, вып. 18, с. 96-

А.А. Алексеев, Р.А. Садыков, Е.С. Клементьев, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, Ю.В. Григорьев, Э.А. Коптелов. Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 ИЯИ РАН, Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2015, №3, стр. 5-10.

В 2015 году нами была определена (методами рентгеноструктурного анализа) кристаллическая структура новой фазы высокого давления  $\text{YbAg}_2$  – интерметаллида с промежуточной валентностью ( $\text{Yb}^{+2,8}$ ). ( $\text{YbAg}_2$  синтезирован Цвященко А.В). Исследованы его физические свойства (относится к ферми-жидкостям). Соединения иттербия (элемента с заполненной оболочкой из 14 f-электронов) могут обладать различными физическими свойствами в зависимости от химического окружения.

Проводилось исследование – обзор экспериментальных работ о нарушении флуктуационно-диссипационной теоремы (нарушение линейной зависимости характеристической частоты релаксации от величины статической диэлектрической проницаемости) в переохлажденных жидкостях. Изучалось поведение переохлажденных жидкостей-глассформеров, таких как пропилен-гликоль, глицерин, нарушение ФДТ наблюдается в пропиленгликоле при повышенных давлениях  $>1.5$  GPa.

Также проведено исследование фазовых переходов в элементарном боре.

M. V. Kondrin, V. V. Brazhkin, and **Y. B. Lebed**. *Fluctuation-dissipation theorem and the dielectric response in supercooled liquids*, The Journal of Chemical Physics, (2015), 142.

A.V. Tsvyashchenko, A.P. Menushenkov, V.A. Sidorov, A.E. Petrova, L.N. Fomicheva, O.V. Chernysheva, **Yu.B. Lebed**, S.N. Axenov, S.L. Bud'ko, Liling Sun, Zhongxian Zhao. *High pressure synthesis of a new phase of  $\text{YbAg}_2$ : Structure, valence of Yb and properties*. The Journal of Alloys and Compounds (2015) 295-298.

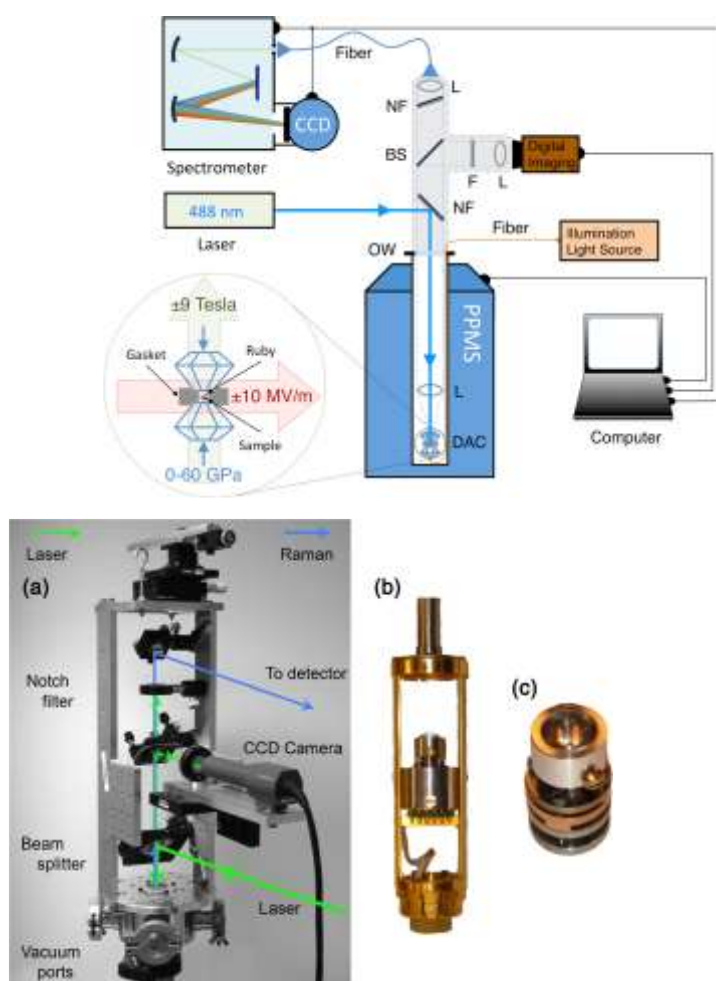
Создана уникальная экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты по изучению комбинационного рассеяния света и люминесценции в коммерческой PPMS системе (PPMS- Physical Properties Measurement System) от фирмы Quantum Design в экстремальных условиях высоких давлений, криогенных температур и сильных магнитных полей. Установка позволяет измерять КР спектры и спектры люминесценции в диапазоне давлений 0-100 ГПа, температур 4.8-300 К и магнитных полей 0-9 Тесла.

Экспериментально обнаружена сверхпроводимость в плотной фазе Рашба-полупроводника  $\text{BiTeCl}$ . Сверхпроводимость возникает после подавления максимального сопротивления, или волны зарядовой плотности, при достижении давления 13 ГПа и сохраняется до давления 51 ГПа, максимального давления достигнутого в эксперименте.

Экспериментально обнаружен трёхкратный рост  $T_c$  в сверхпроводящей фазе  $KFe_2As_2$  при высоких давлениях, обусловленный сильными электронными корреляциями при фазовом переходе первого рода с большим скачком объёма в тетрагональной фазе.

#### Развёрнутое описание.

1) Создана уникальная экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты по изучению комбинационного рассеяния света и люминесценции в коммерческой PPMS системе (PPMS- Physical Properties Measurement System) от фирмы Quantum Design [1]. Используя эту экспериментальную установку, можно исследовать газообразные, жидкие и твердые материалы, в объемной форме или в форме тонкой плёнки в экстремальных условиях. Установка в частности очень хорошо подходит для исследования спин-решеточного взаимодействия в сильно коррелированных оксидах переходных металлов с использованием нескольких различных экстремальных воздействий: сильного магнитного и электрического поля, высокого давления, криогенных температур. Более подробно схема установки приведена на рисунке 1. В работе также представлены результаты тестовых измерений проведённых на этой установке в различных веществах при высоких давлениях, криогенных температурах и в сильных магнитных полях.



(a)

(b)

Рисунок 1 - Схема (a) и фотографии элементов (b) конструкции экспериментальной оптической установки для измерения спектров КР и спектров люминесценции, созданной на базе стандартной PPMS системы от фирмы Quantum Design.

(2) Слоистые, нецентросимметричные теллуругалиды висмута рассматриваются в качестве возможных кандидатов для топологических изоляторов. Давление, как полагают, является существенным фактором для индуцирования и тонкой подстройки топологического порядка в этих системах. В экспериментах по измерению электросопротивления и рамановского рассеяния [2], мы обнаружили сверхпроводимость в двух фазах высокого давления  $\text{BiTeCl}$  с различными особенностями нормального состояния, характеристик носителей, и с различным поведением первого критического поля (см. Рисунок 2). Сверхпроводимость возникает, когда максимум сопротивления или волна зарядовой плотности подавляется приложенным давлением, а затем сохраняется до самого высокого давления 51 ГПа, достигнутого в эксперименте. Огромный рост сопротивления, на три порядка, указывает на возможное достижение топологического порядка в плотной изолирующей фазе. Этот результат не только обогащает семью сверхпроводников на базе топологических изоляторов, но и пролагает дорогу по поиску топологической сверхпроводимости в теллуругалидах висмута.

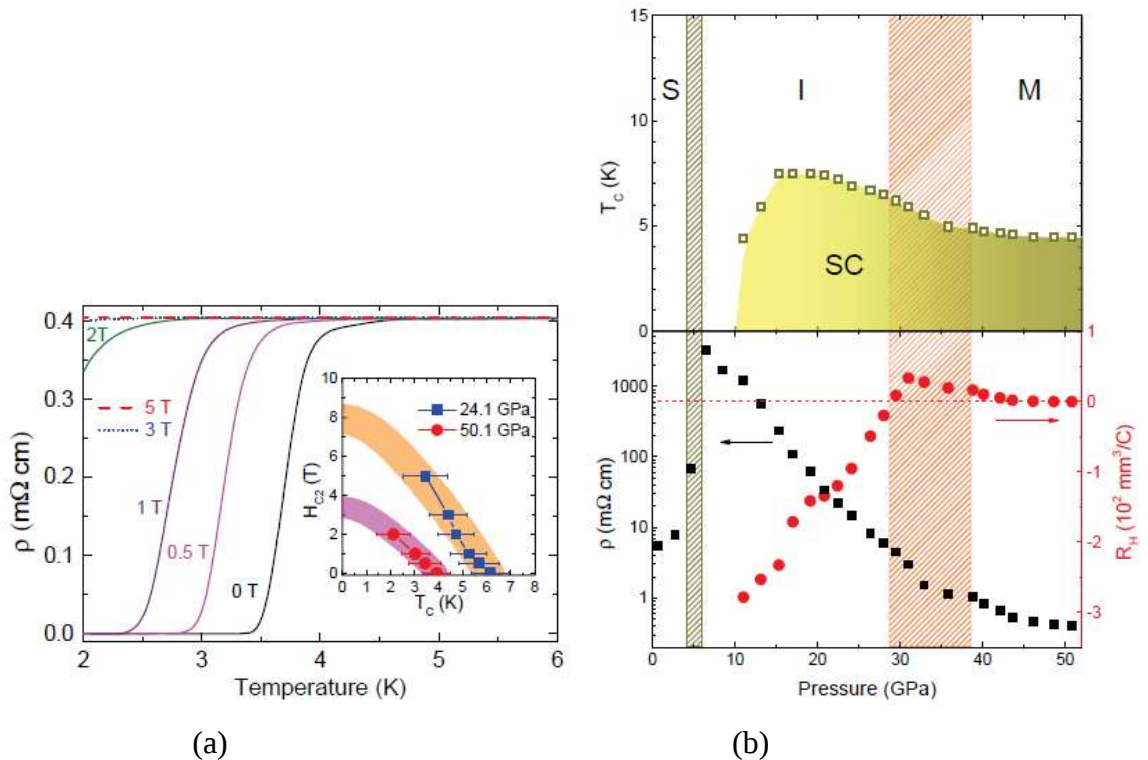


Рисунок 2. (a) Температурная зависимость сопротивления  $\text{BiTeCl}$  при различных магнитных полях и давлении 50.1 ГПа. Врезка: Верхнее критическое поле  $H_{C2}$  для давлений 24.1 ГПа и 50.1 ГПа, соответственно.  $T_c$  определяется из падения сопротивления

перехода до уровня 90 %. Цветные области представляют расчет  $H_{C2}$  из теории WHH.

**(b)** Фазовая диаграмма  $\text{BiTeCl}$  под давлением (верхняя панель) и зависимость от давления сопротивления и коэффициента Холла, измеренные при 10 К (нижняя панель). Пунктирные области представляют границы двух фазовых переходов. Две фазы высокого давления имеют большую область перекрытия.

(3) Сверхпроводимость с высокой критической температурой ( $T_c$ ) сверхпроводников обычно реализуется путем применения химического допирования или приложения давления, которое вызывает аналогичное впрыскивание носителей заряда, либо электронов или дырок в родительскую матрицу сверхпроводника. В случае химического допирования, сверхпроводимость ведет себя асимметрично с максимальной  $T_c$  для оптимального дырочного допирования, и часто выше, чем в случае оптимального электронного легирования для той же материнской матрицы. Интересен вопрос, на который пока нет ответа, могут ли электронные носители производить более высокую  $T_c$ , чем дырки в таких ВТСП? В данной работе показано [3], что приложение давления может управлять типом сверхпроводимости в  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  от дырочной к электронной после прохождения V-образного режима, или режима колебаний, о котором сообщалось ранее. Максимальное  $T_c$  в области электронного сверхпроводника в три раза превосходит начальное значение  $T_c=3.5$  К или среднее значение  $T_c$  в состоянии дырочной сверхпроводимости в области низкого давления. Структурный переход происходит с коллапсом из тетрагональной фазы в тетрагональную же, когда тип носителей изменяется при сжатии. Наши результаты однозначно показывают, что переключение типа носителей обеспечивает новый путь дальнейшего улучшения сверхпроводимости, с сильным ростом  $T_c$ . Мы полагаем, что сильные электронные корреляции в  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  привели к неожиданному усилению сверхпроводимости в тетрагональной фазе высокого давления.

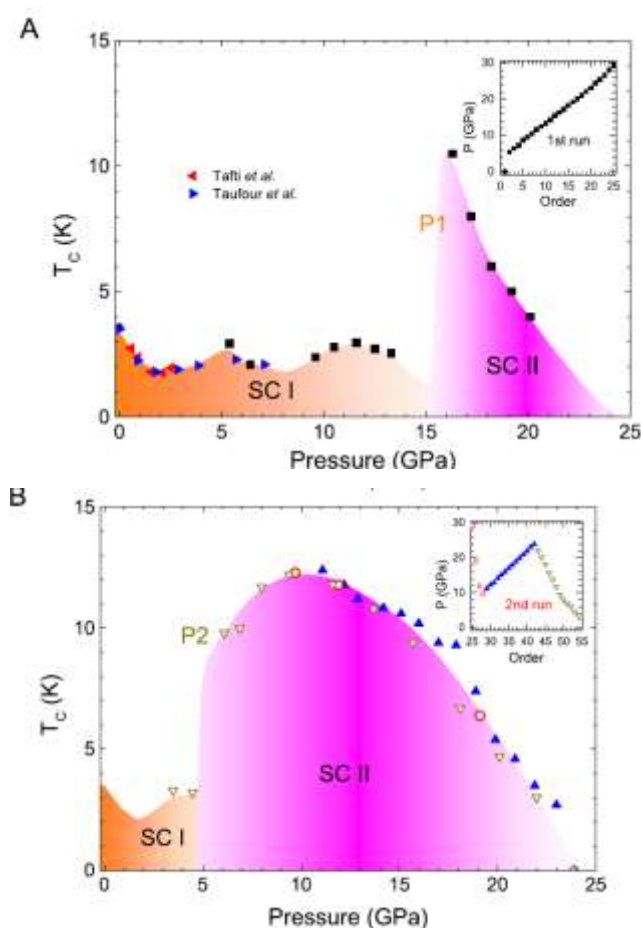


Рисунок 3. Фазовая диаграмма  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  при высоких давлениях:

(а) Изменение  $T_c$  в первом цикле, когда давление возросло до 30 ГПа. Во вставке показана предыстория изменения давления в цикле. Две сверхпроводящих фазы SC I и SC II разделены границей в точке P1. для сравнения приведены значения  $T_c$  из литературы.

(б) Вариация с давлением  $T_c$  во втором цикле (предыстория изменения давления показана во вставке) после сброса давления от 30 ГПа. Фазы SC I и SC II разделены границей в точке P2.

#### 1.1.9 Литература

[1] M. Hud, P. Lazor, R. Mathieu, **A. G. Gavriluk**, V. V. Struzhkin, " PPMS-based set-up for Raman and luminescence spectroscopy at high magnetic field, high pressure and low temperature ", EPJ (Euro Physics Journal) Techniques and Instrumentation **3**, (2015). DOI 10.1186/10.1140/epjti/s40485-015-0014-x.

[2] Jian-Jun Ying, Viktor V. Struzhkin, Alexander F. Goncharov, Ho-Kwang Mao, Fei Chen, Xian-Hui Chen, **Alexander G. Gavriluk**, Xiao-Jia Chen, "Superconductivity in Dense Rashba Semiconductor  $\text{BiTeCl}$ ", Submitted to [arXiv:1501.06203](https://arxiv.org/abs/1501.06203), (2015).

[3] Jian-Jun Ying, Ling-Yun Tang, V.V. Struzhkin, Ho-Kwang Mao, **A.G. Gavriluk**, Ai-Feng Wang, Xian-Hui Chen, Xiao-Jia Chen, "Tripling the critical temperature of  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  by carrier switch", Submitted to [arXiv:1501.00330](https://arxiv.org/abs/1501.00330), (2015).

#### 1.1.10 Радиационное материаловедение

Исполнитель: С.н.с. ЛНИ А.А. Семенов

1. Для исследования поведения материалов ядерных и термоядерных реакторов проведено моделирование с помощью ланжевеновского термостата квантового распределения энергии спинов в рамках классической схемы, используемой в молекулярной динамике.

Полученные результаты представлены в работе С. Н. Woo, Haohua Wen, A. A. Semenov, S. L. Dudarev and Pui-Wai Ma “Quantum heat bath for spin-lattice dynamics”. – *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, p. 104306.

2. В рамках классической теории фазовых переходов первого рода разрабатывалась теория зарождения новой фазы при наличии макроскопических градиентов химических потенциалов веществ в исходной фазе. Полученные результаты готовятся к публикации в виде статьи “*Non-equilibrium formulation of Zeldovich-Frenkel equation for homogeneous nucleation via long-range diffusion*” в *Phys. Rev. E*.

#### 1.1.11 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами

Исполнитель: С.н.с. ЛНИ В.Л. Кузнецов

Предложен новый способ измерения когерентной длины сечения рассеяния нейтронов в области резонансных энергий. В связи с этим проводились исследования взаимодействия при дифракции нейтронов на монокристаллах бромида калия (на трёх образцах данного кристалла, отличающихся размерами) в области р-резонанса брома-81.

Исследования выполнялись на 1-ом канале ИБР-2м в течение 9 циклов работы реактора совместно с ЛНФ ОИЯИ.

По результатам экспериментальных исследований был сделан стендовый доклад на 23-ем Международном Семинаре [1]. В докладе были приведены итоги выполнения следующих работ:

- 1) исследование параметров пучка нейтронов;
- 2) измерение параметров нейтронных счетчиков, предназначенных для эксперимента;
- 3) измерение топографии монокристаллов бромида калия;
- 4) исследование возможности измерения нейтронно-оптического потенциала в дифракции.

По резонансам In и Ta была определена времяпролетная база, которая была 28,56 метра (см. Рисунок1).

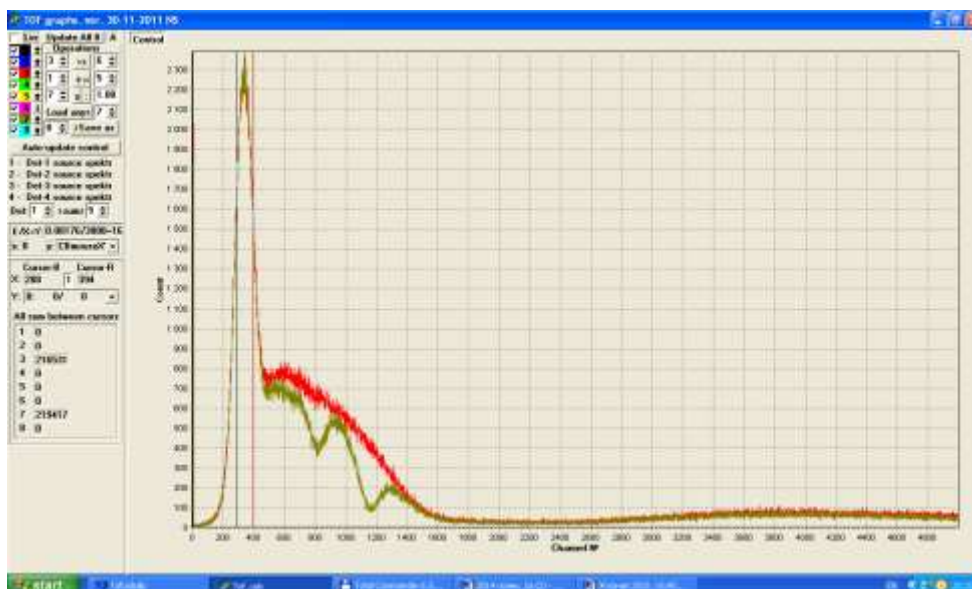


Рисунок 1 - Определение пролетной базы по резонансам In и Ta.

Горизонтальное распределение интенсивности пучка нейтронов, падающих на кристалл, представлено на рисунке 2. Такое сложное распределение обусловлено элементами установки «КОЛХИДА», расположенной на 12-ти метровой базе.

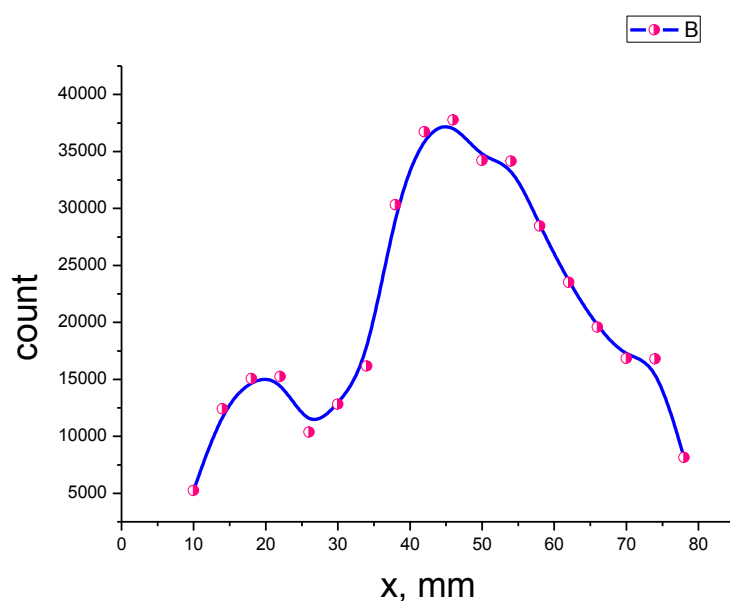


Рисунок 2 - Распределение интенсивности пучка нейтронов по горизонтали на 30-ти метровой базе.

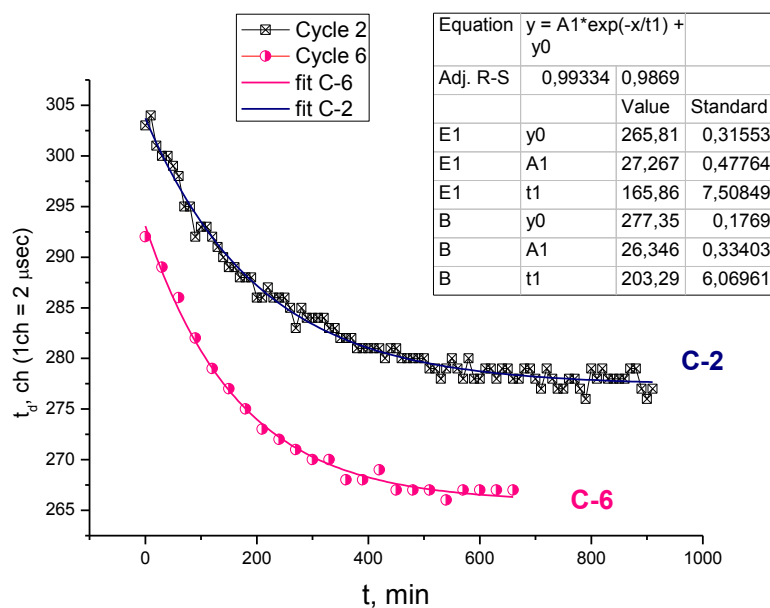


Рисунок 3 - Время вспышки относительно старта. Квадратики – начало 2-го цикла, красные кружочки – начало 6-го цикла.

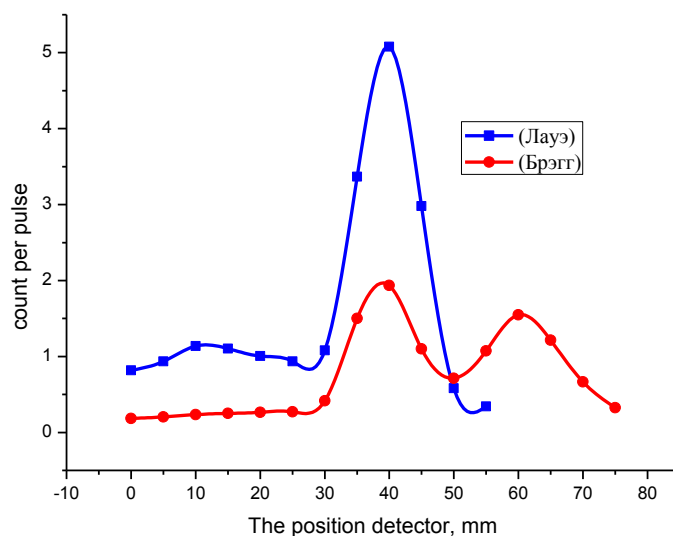


Рисунок 4 - Распределение пучка нейтронов дифракции на детекторе, измеренное в геометрии Лауэ – красная линия и в геометрии Брэгга – голубая линия.

#### 1.1.11 Публикации:

1. E.V. Kuznetsova, V.L. Kuznetsov, P.V. Sedyshev. Test of the prototype setup for the study of spatial effects of parity violation in neutron diffraction at the 1-st channel of the IBR-2. Стеновой доклад на: **Seminar XXIII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-23**, Dubna, May 25-29, 2015, Dubna. ("isinn"@jinr.ru)

## 1.2 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце

Руководитель д.ф-м.н. Коптелов Э.А.

### 1.2 Важнейшие результаты, полученные в 2015г

Выполнено математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100.

Проведены измерения нейтронных и  $\gamma$ -полей снаружи биологической защиты спектрометра СВЗ-100 после её модернизации (усиления) в соответствии с выработанными рекомендациями при параметрах протонного пучка подаваемого на мишень спектрометра -- 0.6 мкА среднего тока и энергии протонов – 209 МэВ.

Определено отрицательное влияние нейтронного гало на разрешение СВЗ-100, с целью уменьшения влияния фоновых нейтронов, увеличен диаметр ионопровода на участке возле мишени.

Выработаны требования к характеристикам детекторов способных выделять сигналы от  $\alpha$ -частиц на фоне электромагнитных помех.

Построен график зависимости энергетического разрешения спектрометра СВЗ-100 от энергии замедляющихся нейтронов. Проводится сравнение с подобными зарубежными установками. LANSCE - СВЗ в Лос-Аламосе, масса свинцового тела 20 т.

TARS - эксперимент на СВЗ в ЦЕРНе, масса свинцового тела 300 т.

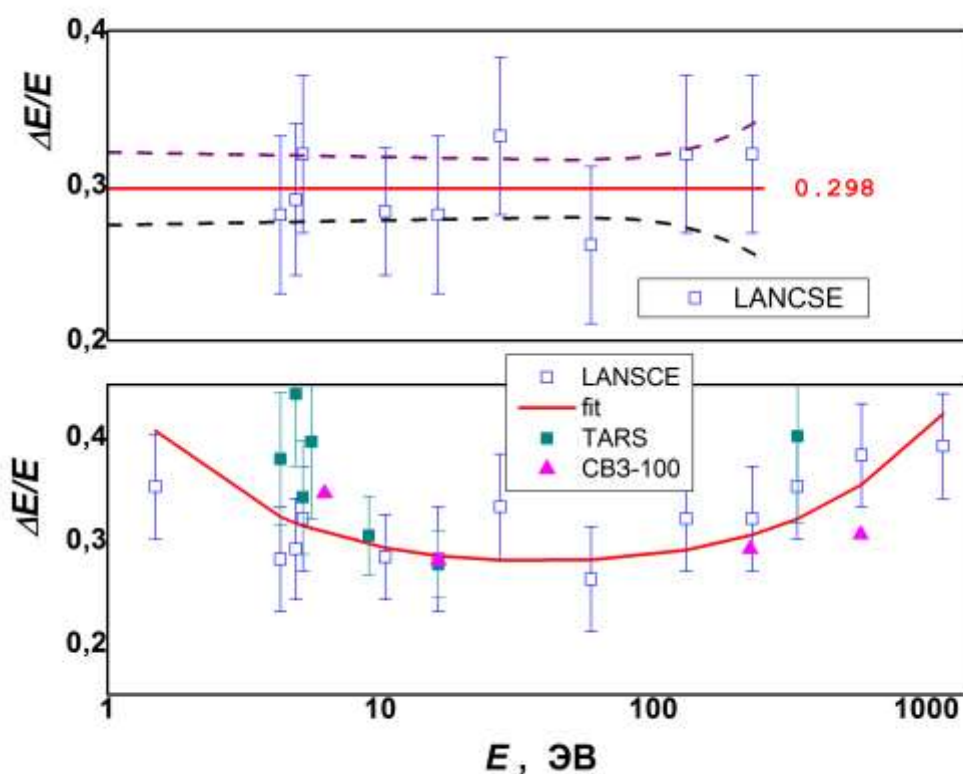


Рисунок - Энергетическое разрешение  $\Delta E/\bar{E}$  в функции средней энергии нейтронов  $E$ .  
(□) – данные LANSCE ; (■) – данные эксперимента TARS; (▲) – данные эксперимента СВЗ-100. Вверху: линия – среднее значение разрешения на интервале от 4.3 до 230 эВ; штриховые линии – границы погрешности ( $\pm \sigma$ ); внизу: красная линия – расчет.

## 1.2 Публикации:

Л.Н.Латышева, Н.М.Соболевский, Э.А.Коптелов, Р.Д.Илич. *Математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100 ИЯИ РАН. Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, №11.

Продemonстрировано влияние энергетического разрешения СВЗ-100 на форму нейтронных сечений. Разработанная модель позволяет установить соответствие экспериментальных данных, полученных на нейтронных спектрометрах разными методами и с разным разрешением.

А.А.Алексеев, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Рябов. *Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод*. Препринт ИЯИ РАН 1413/2015.

Предложен и обоснован спектрометр гибридного типа, сочетающий сильные стороны методики времени замедления нейтронов в свинце и методики времени пролёта нейтронов.

А.А. Алексеев, А.А. Бергман, А.И. Берлев, Э.А. Коптелов, В.С. Шорин\*. *Детектор  $\gamma$ -лучей радиационного захвата нейтронов для спектрометра по времени замедления в свинце СВЗ-100*. Препринт ИЯИ РАН 1404/2015.

Описана конструкция пропорционального ионизационного счетчика для исследования радиационного захвата нейтронов на спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН. Измерены характеристики  $\gamma$ -счетчика и спектрометрического канала регистрации.

## 1.3 Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц

Руководители: д.ф.-м.н Коптелов Э.А., д.ф.-м.н. Соболевский Н.М.

Соисполнители: ОИЯИ, Мюкатекс

### 1.3 Важнейшие результаты, полученные в 2015 г

Продолжены расчетно-теоретические работы по поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния 237. Продолжено дальнейшее развитие транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования процессов взаимодействия частиц с веществом.

### 1.3 Публикации:

Н.М.Соболевский. *Алгоритм запоминания дерева адронного каскада в транспортном коде SHIELD*. Препринт ИЯИ РАН 1398/2015, Москва, 2015, 15 с.

Подготовлена к публикации в 2016 году издательством Springer International Publishing Switzerland глава под названием «Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russia Academy of Sciences» в сборнике «Thorium Energy for the World». Авторы: С.Ф. Сидоркин, А.Д. Рогов, Л.И. Пономарев, Э.А. Коптелов

Таблица 1 - Ожидаемые значения мощности стенда для протонов с энергиями 300-600 МэВ и различных комбинаций мишеней:

| Average proton current $I_p$ ( $\mu$ A)                  | Multiplication $M$ ( $k_{eff}$ ) | Average power of blanket, $P$ (MW), for proton energy 300–600 MeV |      |      |      |                                                    |      |      |      |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|----------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                          |                                  | W (plates) or PbBi target                                         |      |      |      | Natural uranium target (cylindrical fuel elements) |      |      |      |
|                                                          |                                  | 300                                                               | 400  | 500  | 600  | 300                                                | 400  | 500  | 600  |
| 100                                                      | 10 (0.90)                        | 0.36                                                              | 0.58 | 0.83 | 1.04 | 0.51                                               | 0.81 | 1.14 | 1.46 |
|                                                          | 20 (0.95)                        | 0.73                                                              | 1.16 | 1.66 | 2.08 | 1.02                                               | 1.62 | 2.29 | 2.91 |
| 150                                                      | 10 (0.90)                        | 0.55                                                              | 0.88 | 1.25 | 1.56 | 0.77                                               | 1.22 | 1.72 | 2.18 |
|                                                          | 20 (0.95)                        | 1.10                                                              | 1.75 | 2.50 | 3.12 | 1.54                                               | 2.44 | 3.44 | 4.36 |
| 200                                                      | 10 (0.90)                        | 0.73                                                              | 1.16 | 1.66 | 2.08 | 1.03                                               | 1.62 | 2.29 | 2.91 |
|                                                          | 20 (0.95)                        | 1.47                                                              | 2.32 | 3.32 | 4.16 | 2.05                                               | 3.25 | 4.58 | 5.82 |
| 250                                                      | 10 (0.90)                        | 0.92                                                              | 1.46 | 2.08 | 2.60 | 1.28                                               | 2.03 | 2.86 | 3.64 |
|                                                          | 20 (0.95)                        | 1.83                                                              | 2.91 | 4.16 | 5.20 | 2.57                                               | 4.06 | 5.72 | 7.28 |
| 300                                                      | 10 (0.90)                        | 1.09                                                              | 1.75 | 2.50 | 3.12 | 1.54                                               | 2.43 | 3.43 | 4.37 |
|                                                          | 20 (0.95)                        | 2.19                                                              | 3.5  | 5.00 | 6.24 | 3.08                                               | 4.86 | 6.86 | 8.74 |
| Neutron yield, $Y$ (n/p)                                 |                                  | 3.5                                                               | 5.6  | 8    | 10   | 4.9                                                | 7.8  | 11   | 14   |
| Importance of the primary neutrons, $\alpha \approx 1.3$ |                                  |                                                                   |      |      |      |                                                    |      |      |      |

### 1.4 Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН

Руководитель д.ф-м.н Коптелов Э.А.

#### 1.4 Важнейшие результаты, полученные в 2015 г

1. Создан кольцевой детектор тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов.

Проведены испытания в сеансе декабря 2015 года.

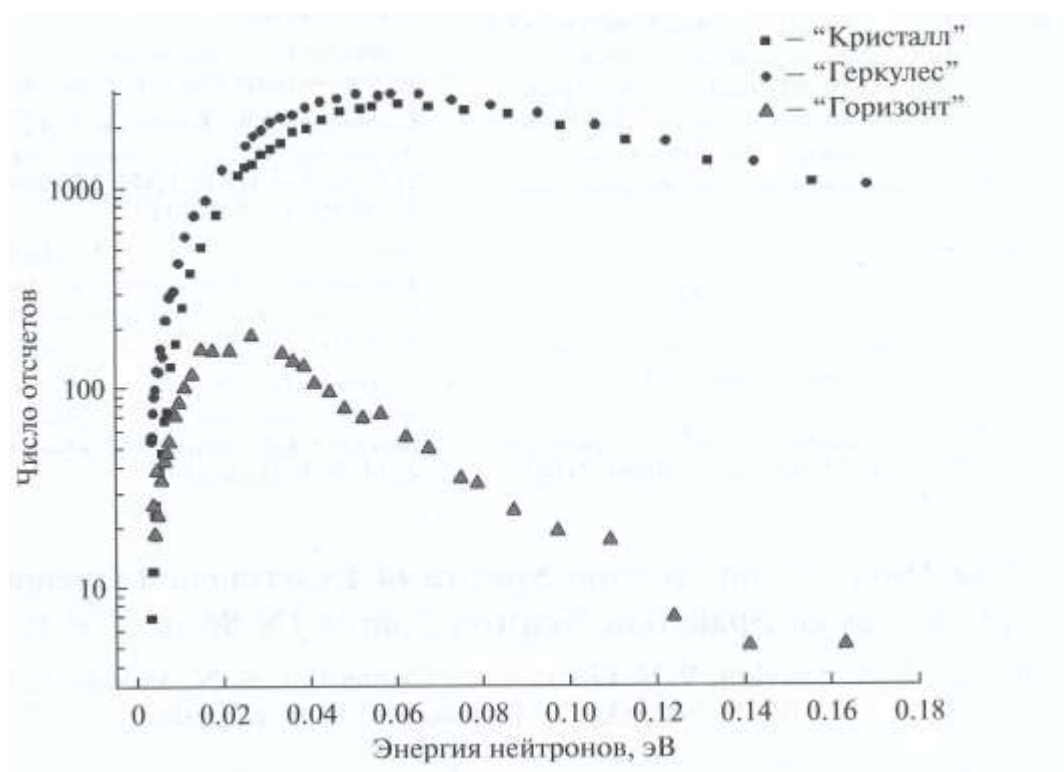


2. Проведены измерения профилей нейтронных пучков установок «Геркулес» и «Кристалл», имеющих нейтронные концентраторы на источнике ИН-06, с помощью твердотельных запоминающих пластин.

#### 1.4 Публикации:

А.А.Алексеев, Р.А.Садыков, В.С.Литвин, Е.С.Клементьев, С.Н.Аксенов, Д.Н.Трунов, Н.М.Соболевский, С.Ф.Сидоркин, Э.А.Коптелов. *Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 Института ядерных исследований РАН. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, № 3, с. 5-10.

В Институте ядерных исследований РАН (г. Троицк) введен в эксплуатацию импульсный нейтронный источник ИН\_06 (spallation source). Измерены спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника, предназначенного для исследований конденсированных сред, наносистем и функциональных материалов. Сравнение расчетных и экспериментальных нейтронных спектров показывает их хорошее совпадение. Приводятся данные по плотности нейтронных потоков при заданных параметрах работы линейного ускорителя протонов, являющегося драйвером нейтронного источника ИН\_06.



## Сравнение спектров нейтронов импульсного источника ИН-06 для установок «Кристалл», «Геркулес», «Горизонт»

### 1.5 Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов

Руководитель Садыков Равиль Асхатович

С помощью радиоизотопного источника проведены испытания новых счетчиков нейтронов и прототипов двухкоординатного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/LiF и лавинных фотодиодов (твердотельных фотоумножителей) и световодов из оргстекла [1-3]. Эти счетчики также были испытаны на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС и ИН-06. По результатам направлена публикация в Rev. Scient. Instr., и в журнал «Кристаллография» [4] (выходит в 2016 г. )

С помощью детектирующих пластин «Image plate» Получены профили пучков нейтронов на установках «Кристалл» и «Горизонт».

Методами малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (совместно с ИК РАН) и нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура наноматериала — диэлектрика с высокой теплопроводностью на основе высокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия [5].

Также методом малоуглового рассеяния нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура водно-масляных эмульсий и взвесей наноалмазов в воде.

Разработка сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. — ЛИТВИН В.С., МАРИН В.Н., КАРАЕВСКИЙ С.Х., ТРУНОВ Д.Н., АКСЕНОВ С.Н., САДЫКОВ Р.А. — НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ — 2015 — 16 - 20 февраля 2015 г. — НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИФИ" — Москва. <http://nsession.mephi.ru/prog/01/01.htm>

New type of scintillation detectors of thermal neutrons based on ZnS(Ag) /LiF and avalanche photodiodes. MARIN V.N., NEDOREZOV V.G., LITVIN V.S., AXENOV S.N., STOLYAROV A.A., TRUNOV D.N., SADYKOV R.N. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Moscow, Troitsk <http://indico.inr.ru/event/4/contributions>

A neutron detector with WLS-fibers readout and SiPM. LITVIN Vasily, KARAEVSKY Sergey, SADYKOV Ravil. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015 <http://indico.inr.ru/event/4/contributions>

Нейтронная радиография.

Во время сеанса работы ускорителя, проходившего с 7 по 23 января были измерены профили прямого пучка на установках “КРИСТАЛЛ” и “ГОРИЗОНТ”. Профили были

получены при помощи пластин для нейтронной и гамма радиографии FUJI BAS IP 2025 с разрешением 50 мкм.

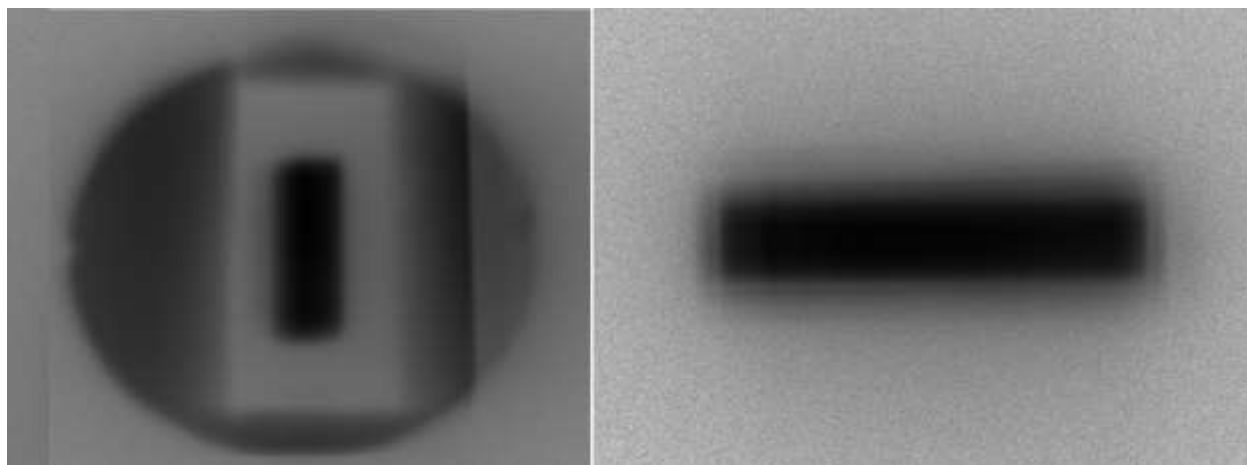


Рисунок 1 - Профиль прямого пучка

На рисунке 1 показаны полученные профили прямого пучка. Слева показан профиль установки “КРИСТАЛЛ”, справа профиль установки “ГОРИЗОНТ”

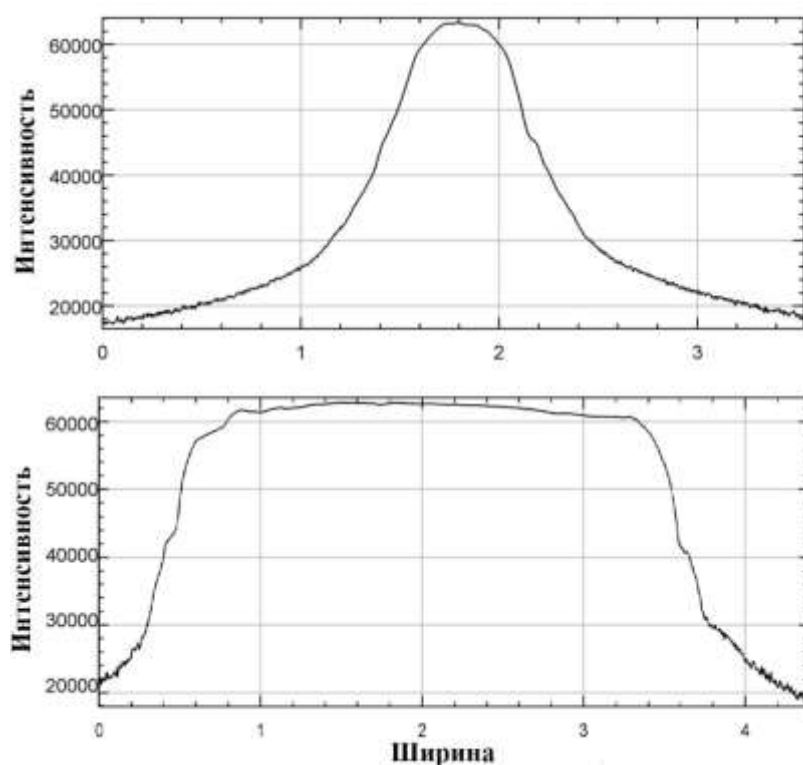


Рисунок 2 - Сечения профиля установки “ГОРИЗОНТ”

В дальнейшем планируется произвести сравнение смоделированных спектров и полученных экспериментально. На рисунке 2 показаны сечение профиля прямого пучка. Сверху показано вертикальное сечение, справа – горизонтальное сечение. Это требуется для того что бы оценить правильности установки и калибровки нейтронных коллиматоров на этих двух установках.

В лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН проведена разработка кольцевого детектора тепловых нейтронов на основе твердотельных счетчиков на основе сцинтиллятора  $\text{ZnS(Ag)/LiF}$  эффективностью 70%. Причиной такого замещения гелиевых счетчиков сцинтилляционными является резко возросший дефицит изотопа  $\text{He-3}$ , тем более, что в силу особенности конструкции твердотельные счетчики также являются нечувствительными к  $\gamma$ -фону.



Рисунок 1 - Кольцевой детектор.

Конструкция самого детектора сделана из борного пластика с внешним диаметром 560 мм. На внутреннем диаметре кольца расположены 12 твердотельных счетчиков. По плоской части кольца размещена электроника, обслуживающая счетчики.

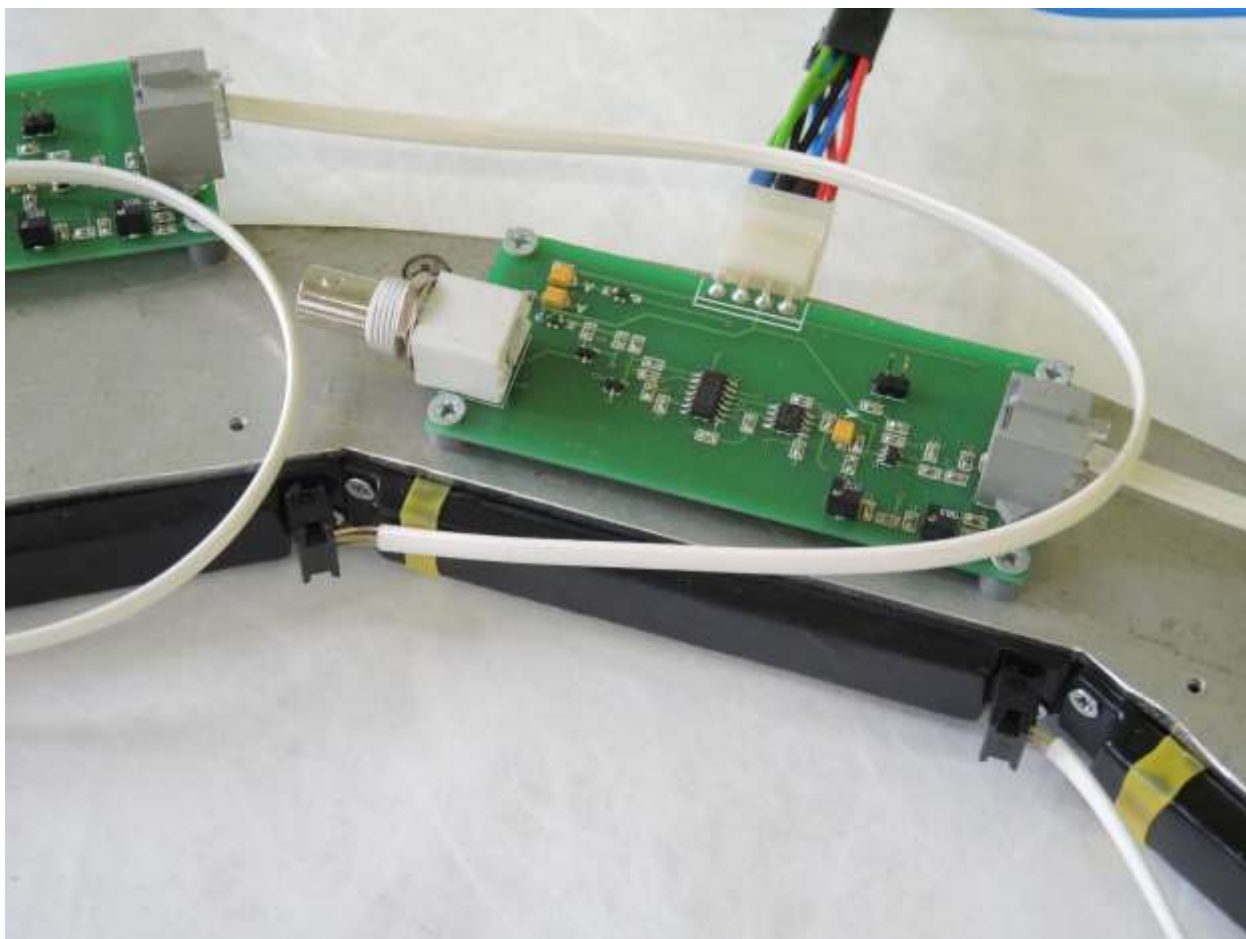


Рисунок 2 - Размещение счетчиков и электроники на кольце.

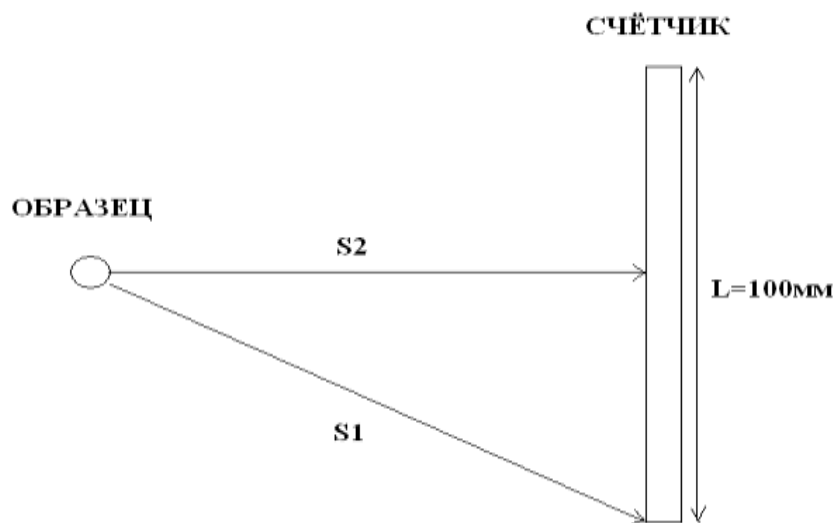
Кольцевой счетчик работает совместно с время –пролетной электроникой.

В сеансе в декабре 2015года на импульсном источнике РАДЕКС были проведены тесты кольцевого счетчика :

1. измерялся фон.
2. Были получены дифрактограммы от технического алмаза.

Кольцевой детектор размещался под углом 90 градусов относительно образца.

Разрешение по времени пролета:



Для теплового нейтрона с  $\lambda=1.8\text{Å}$   $v=2500$  м/сек, соответственно:

Временное разрешение-2 мксек.

Перекрываваемый телесный угол:

$$\Omega = \frac{Nab}{4\pi R^2} = \frac{16 \times 100 \times 15}{12.56 \times 252^2} = \frac{2400}{797610.24} \approx 0.03 \text{стерад},$$

где N-число счетчиков, а и b-линейные размеры счетчика, R-радиус кольцевого детектора.

*Статьи в иностранных реферируемых журналах*

1. V.T.Taasti, H.Knudsen, M.H.Holzscheiter, **N.Sobolevsky**, B.Thomsen, N.Bassler. *Antiproton annihilation physics in the Monte Carlo particle transport code SHIELD-HIT12A*. Nucl.Instr.Meth. **B347** (2015) 65–71.
2. H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical study of projectile fragmentation in the  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  reactions at 1 GeV/nucleon*. Phys. Rev. **C91** (2015) 034605 (8 pages)
3. A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation*. Phys. Rev. **C92** (2015) 014610 (11 pages).
4. N.Buyukcizmeci, A.Ergun, H.Imal, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Investigation of isotope composition of nuclear fragments with angular momentum and Coulomb effects in peripheral  $^{84}\text{Kr}+^{112,124}\text{Sn}$  collisions at 35 A MeV*. Nuclear Science and Techniques **26** (2015) S20507 (6 pages), (Chinese Academy of Sciences)
5. **A.S.Botvina**, J.Steinheimer, E.Bratkovskaya, M.Bleicher, J.Pochodzalla. *Formation of hypermatter and hypernuclei within transport models in relativistic ion collisions*. Phys. Lett. **B742** (2015) 7-14.
6. The effect of hydrostatic pressure up to 1.61 GPa on the Morin transition of hematite-bearing rock: Implications for planetary crustal magnetization //Bezaeva N.S., Demory F., Rochette P., Sadykov R.A., Gattacceca J., Gabriel T., Quesnel Y.//B журнале Geophysical Research Letters, издательство American Geophysical Union (United States), том 42.2015, DOI: 10.1002/2015GL066306
7. M. V. Kondrin, V. V. Brazhkin, and Y. B. Lebed. Fluctuation-dissipation theorem and the dielectric response in supercooled liquids, The Journal of Chemical Physics, (2015), 142
8. Journal of Alloys and Compounds(2015) 295-298. High pressure synthesis of a new phase of YbAg<sub>2</sub>: Structure, valence of Yb and properties A.V. Tsvyashchenko , A.P. Menushenkov, V.A. Sidorov, A.E. Petrova,L.N. Fomicheva, O.V. Chernysheva, Yu.B. Lebed, S.N. Axenov, S.L. Bud'ko, Liling Sun, Zhongxian Zhao.
9. C. H. Woo, Haohua Wen, A. A. Semenov, S. L. Dudarev and Pui-Wai Ma, "Quantum heat bath for spin-lattice dynamics". – Phys. Rev. B, 2015, vol. 91, p. 104306.
10. Matthias Hud, Peter Lazor, Roland Mathieu, **Alexander G Gavriliuk** and Viktor V Struzhkin " PPMS-based set-up for Raman and luminescence spectroscopy at high magnetic field, high pressure and low temperature ", EPJ Techniques and Instrumentation **3**, (2015).

*Статьи в российских реферируемых журналах*

1. К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, **Н.М.Соболевский**, А.В.Юдин. *Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах*. Известия РАН сер. Физическая, **79** (2015) 432-435.
2. А.А.Алексеев, Р.А.Садыков, В.С.Литвин, Е.С.Клементьев, С.Н.Аксенов, Д.Н.Трунов, **Н.М.Соболевский**, С.Ф.Сидоркин, Э.А.Коптелов. *Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИИ-06 Института ядерных исследований РАН*. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 3, с. 5-10.
3. . **Л.Н.Латышева**, **Н.М.Соболевский**, Э.А.Коптелов, Р.Д.Илич. *Математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100 ИЯИ РАН*.

Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 11

4. . V.A.Karnaukhov, S.P.Avdeyev, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, P.A.Rukoyatkin, V.I.Stegaylov, H.Oeschler, **A.S.Botvina**. *Expansion time of hot nuclei produced by a relativistic deuteron beam*. Phys. At. Nuclei, **78**, No.5 (2015) 574-578 (Yad. Fiz. **78**, No.7-8 (2015) 618-622).

5. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов - В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып 18, стр. 96-101

6. I. S. Lyubutin, **A. G. Gavrilyuk**, Yu. A. Davydova, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. N. Sul'yanov, S. S. Starchikov, S. N. Akseonov, K. V. Glazyrin, "Equation of state and structural phase transitions in iron-based Ba<sub>3</sub>TaFe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>14</sub> langasite at high hydrostatic pressures", JETP Letters **100(12)**, 798-806 (2015).

### Препринты

1. . **Н.М.Соболевский**. *Алгоритм запоминания дерева адронного каскада в транспортном коде SHIELD*. Препринт ИЯИ РАН 1398/2015, Москва, 2015, 15 с.

2. . **N.Sobolevsky**, A.Botvina, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, **L.Latysheva**, R.Ogul. *Decomposition of the absorbed dose by LET in tissue-equivalent materials within the SHIELD-HIT transport code*. arXiv:1512.04867v1 [nucl-th] 7 Dec 2015 <http://arxiv.org/abs/1512.04867>

3. H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical study of projectile fragmentation in the reactions  $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$  at 1 GeV/nucleon*. arXiv:1403.4786v1 [nucl-th].

4. A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation*. arXiv:1408.2840v1 [nucl-th].

5. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов - В.Н. Марин, Р.А. Садыков, В.Г. Недорезов, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров — Препринт ИЯИ РАН, 2015, 12 стр.

6. **А.А.Алексеев**, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов, "Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод". Препринт ИЯИ РАН 1413/2015, Москва

7. **А.А.Алексеев**, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов, "Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод". Препринт ИЯИ РАН 1413/2015, Москва  
*Участие в конференциях*

1. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, **L.Latysheva**, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, **N.Sobolevsky**, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev. *Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and ( $\gamma,n$ ) reactions*. **Invited talk** at the NUFRA2015 International Conference Kemer, Turkey, October 6-11, 2015. [http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Sobolevsky\\_nufra2015.pdf](http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Sobolevsky_nufra2015.pdf)

2. **L.Latysheva**, **N.Sobolevsky**. *The SHIELD-HIT code for hadron therapy: decomposition in LET of dose fields in tissue and BNCT option*. **Poster talk** at the

- NUFRA2015 International Conference Kemer, Turkey, October 6-11, 2015.  
[http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Latysheva\\_nufra2015.pdf](http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Latysheva_nufra2015.pdf)
3. R.Ogul, H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, **A.S.Botvina**, W.Trautmann.  
*Theoretical Study of Projectile Fragmentations in Relativistic Heavy-Ion Reactions.*  
 EPJ Web of Conference, **93** (2015) 02022 (Proceedings of CGS15, Dresden.)  
<http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2015/12/contents/contents.html>
4. **A.S.Botvina**. *Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions: New opportunities for AFTER@LHC. Invited talk* at the International Workshop "Probing the Strong Interaction at A Fixed Target Experiment with the LHC beams", Les Houches School, January 12 - 17, 2014, Les Houches, France.  
<https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=8591>
5. **A.Botvina**. *Statistical approach for supernova matter and nuclear multifragmentation*. Talk at the ATHENA Brussels workshop on Astrophysics. January 27 - 28, 2014 - Universite Libre de Bruxelles - Belgium. <http://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/meetings/athena-brussels-meeting/hprogram-new.php>
6. **A.Botvina**, J.Pochodzalla, M.Bleicher, E.Bratkovskaya, K.Gudima, J.Steinheimer. *Hypernuclei and hypermatter in relativistic heavy-ion reactions. Invited talk* at the International SPHERE workshop, Prague, Czech Republic, September 9-11, 2014. [http://rafael.ujf.cas.cz/sphere2014/presentations/Botvina\\_SPHERE\\_2014.pdf](http://rafael.ujf.cas.cz/sphere2014/presentations/Botvina_SPHERE_2014.pdf)
7. **A.Botvina**. *Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions*. Strangeness in Quark Matter, SQM2015, JINR, Dubna, Russia July 6-11, 2015.  
<http://sqm.jinr.ru/images/sampledData/Speakers.pdf> <https://indico-new.jinr.ru/getFile.py/access?contribId=295&sessionId=18&resId=0&materialId=slides&confId=34>
8. **A.S. Botvina**, M.Bleicher, E.Bratkovskaya, N.Buyukcizmeci, K.Gudima, I.Mishustin, J.Pochodzalla, A.Sanchez-Lorente, J.Steinheimer. *Formation mechanisms of hypernuclei. Invited talk* at the Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation (from basic research to applications) - NUFRA2015. Kemer (Antalya), Turkey, October 4 - 11, 2015. [http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Botvina\\_nufra2015.pdf](http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Botvina_nufra2015.pdf)
9. Разработка сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. ЛИТВИН В.С., МАРИН В.Н., КАРАЕВСКИЙ С.Х., ТРУНОВ Д.Н., АКСЕНОВ С.Н., САДЫКОВ Р.А. // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ, 2015, 16 - 20 февраля 2015 г., НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИФИ"/Москва.  
<http://nsession.mephi.ru/prog/01/01.htm>
10. New type of scintillation detectors of thermal neutrons based on ZnS(Ag)/LiF and avalanche photodiodes. MARIN V.N., NEDOREZOV V.G., LITVIN V.S., AXENOV S.N., STOLYAROV A.A., TRUNOV D.N., SADYKOV R.N. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Moscow, Troitsk, Abstracts, Poster Session / 22, Page 49. <http://indico.inr.ru/event/4/contributions>
11. A neutron detector with WLS-fibers readout and SiPM. LITVIN Vasily, KARAEVSKY Sergey, SADYKOV Ravil. // International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Abstracts, Poster Session / 22, Page 5. <http://indico.inr.ru/event/4/contributions> (стендовый доклад)
12. Конференция «Дифракция нейтронов – 2015», 18-19 фев., 2015 г., Гатчина, Орлова Роща, ПИЯФ НИЦ КИ. <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/difrakciya-nejtronov-2015/about> Р.А.Садыков «Многоцелевая дифракционная и радиографическая установка».

13. Конференция «Дифракция нейтронов – 2015», 18-19 фев., 2015 г., Гатчина, Орлова Роща, ПИЯФ НИЦ КИ. <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/difrakciya-nejtronov-2015/about> Р.А. Садыков «Камеры высокого давления для дифракции нейтронов»

14. I.S. Lyubutin, **A.G. Gavriliuk**, I.A. Trojan, S.S. Starchikov, Yu.A. Davydova, P.G. Naumov, V.V. Struzhkin, A.I. Chumakov, and R. Rüffer, “ High-Pressure Magnetic and Structural Transitions in Multiferroics of the Langasite Family Observed by Three Mössbauer Methods TMS, NFS and SMS”, International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME 2015), Hamburg, Germany, 13 – 18 September 2015, Abstracts p. 157 (**Poster session**).

15. **G. Gavriliuk**, I. S. Lyubutin, A. A. Mironovich, S. G. Ovchinnikov, V. V. Struzhkin, “Interplay between Kondo effect and superconductivity in pnictide superconductors”, 13-я Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», ИФВД РАН, Троицк, Московская обл., 05 июня 2015 г. Тезисы докладов стр. 11 (**Устный**).

патент №155572 Держатель камеры высокого давления для рентгеновского дифрактометра, авторы: Садыков Равиль Асхатович, Гаврилюк Александр Григорьевич, Аксенов Сергей Николаевич, Лебедь Юлия Борисовна, Кузнецов Вячеслав Иванович. (RU). Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 18 сент 2015 г. Патентообладатель-ИЯИ РАН.

## 2 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров

Научный руководитель: А.В.Андреев.

Соисполнители: ЛФЯР и ЛНИ ИЯИ РАН

Основные исполнители:

Зуев С.В., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Мордовской М.В, зав.сект., кфмн

Поташев. С.И., снс, кфмн

Исполнители

Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

### 2 Реферат

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ГАММА СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ КАМЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, АКТИВНАЯ И ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК.

Исследования по теме направлены на разработку методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров. В процессе исследований также проводятся работы по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием тепловых и быстрых нейтронов высокоинтенсивного компактного W-Be фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5.

### 2 Введение

В рамках Приоритетного направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Рациональное природопользование» и Критических технологий Российской Федерации – «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» и «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» актуальным является использование разрабатываемых методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров для нейтронно-

активационного анализа (НАА), который получил широкое распространение в анализе высокочистых веществ и геологических проб.

НАА и инструментальные методы, которые используются при анализе, имеют преимущества из-за их высокой чувствительности, производительности и относительной дешевизны. При этом большое значение для определения содержания нано и микро примесей в веществах имеет наличие интенсивных источников нейтронов и высокоэффективных прецизионных гамма-спектрометров, работающих в условиях малого естественного фона.

В процессе НАА проводят облучение образцов нейтронами, которые получают, используя дорогостоящие установки – реакторы, нейтронные генераторы, микротроны и др., что существенно повышает стоимость анализа. Внимание, обращаемое в последнее время на развитие аналитических методов, в значительной мере связано с сокращением числа исследовательских реакторов, возросшими требованиями к радиационной безопасности и проблемами с лицензированием при работе на них.

При этом в последние два десятилетия новые ядерно-физические методы анализа практически не разрабатывались. В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес использование для НАА фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 - 10 МэВ и низкофоновых гамма-спектрометров. Так как плотность потока нейтронов фотонейтронных источников обычно не превышает  $\sim 10^9$  нейтрон/с·см<sup>2</sup>, то это диктует необходимость помимо обеспечения максимальной плотности потока нейтронов для облучения образцов, использовать гамма-спектрометр с минимальными фоновыми характеристиками, чтобы также обеспечить возможность определения элементов с низкими содержаниями в образцах. Достаточно низкая плотность потока нейтронов имеет при этом и свои преимущества, т.к. позволяет проводить неразрушающий анализ и измерения практически сразу после облучения образцов из-за достаточно низкой их активности, а также размещать измерительную установку вблизи от источника нейтронов из-за низкого фона при его работе. Это обстоятельство делает предложенную процедуру анализа значительно радиационно-безопасной, чем анализ с использованием ядерного реактора. Всё это удешевляет анализ и делает его безопасным, как для исполнителей анализа, так и для персонала помещений, расположенных в непосредственной близости к лаборатории, выполняющей такой анализ. Тем самым устраняются основные недостатки НАА – необходимость использования ядерных реакторов, а также проблемы, связанные с хранением и утилизацией радиоактивных отходов.

## 2 Основные результаты

В качестве источника нейтронов в процессе разработки методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров применялся фотонейтронный W-Be-источника тепловых нейтронов. Фотонейтронный источник запущен на электронном пучке линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН в 2015 году (рис. 3.6). Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых - 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных).



Рисунок 2.6 - W-Be-фотонейтронный источник на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

В результате моделирования получен спектр нейтронов фотонейтронного источника внутри рабочей полости источника. Спектр характеризуется наличием нейтронов помимо тепловых, также быстрых (более 100 кэВ) и промежуточных (резонансных) энергий. Проведены измерения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника и на выходе наклонного измерительного нейтронного канала методом нейтронно-активационного анализа с эталонными образцами Cd, Cu, In, Mn, Sc, Zn и др. (рис. 2.7). Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника составила  $\sim 10^7$  нейтрон/см<sup>2</sup>с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выводном канале источника. Исследовано влияние

нейтронных фильтров из различных материалов ( $B_4C$ ,  $Cd$ ,  $Li_2CO_3$ ) на соотношение тепловых и быстрых нейтронов на выходе измерительного канала источника.

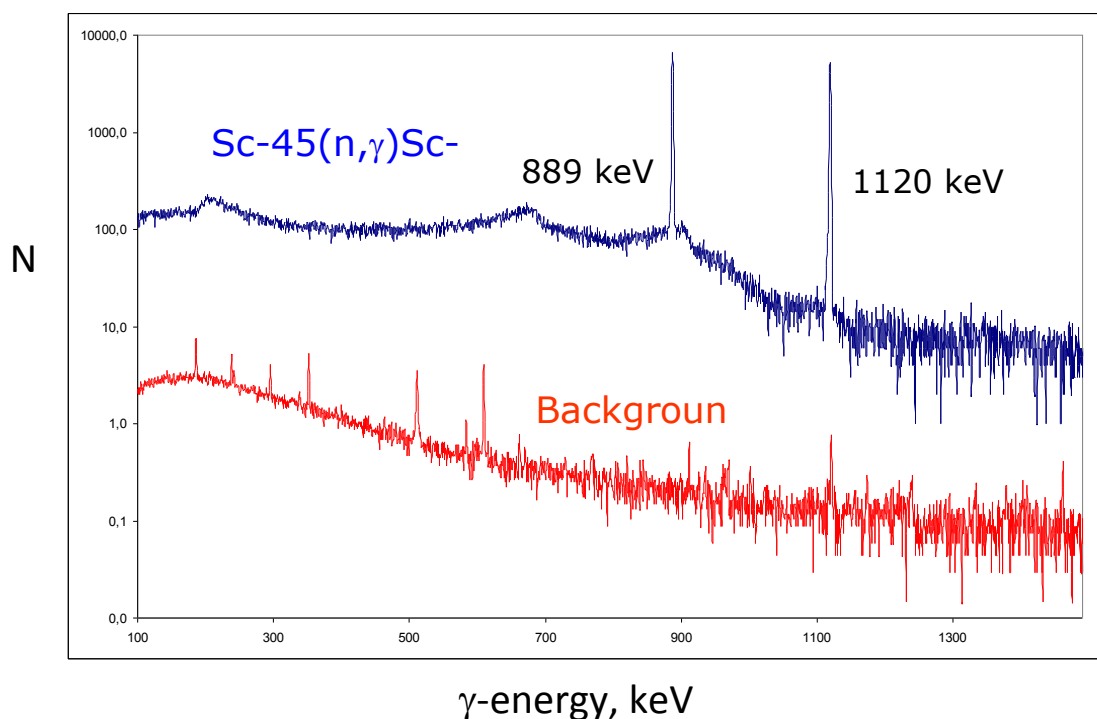


Рисунок 2.7 - Гамма-спектр активированного образца  $Sc$ . Плотность потока тепловых нейтронов в камере на 1 мкА –  $N = 0.63 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\mu\text{A}^{-1}$

Исследования проводились с использованием низкофонового гамма спектрометра на базе детектора из особоочистого германия с «пассивной» защитой (рис. 3ю8).



Рисунок 2.8 - Камера гамма-спектрометра на базе детектора из особоочистого германия с «пассивной» защитой (верхняя часть защиты сдвинута)

Проводились работы по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками. Исследовались образцы материалов аэрозольных фильтров, предназначенных для отбора проб аэрозолей в процессе аэрологических измерений. Определялись фоновые составляющие, которые могут вносить вклад в дальнейшие измерения с аэрозольными пробами. Образцы фильтров из кварцевого волокна и стекловолокна облучались потоком тепловых нейтронов в рабочей камере фотонейтронного источника. Активность образцов была измерена в низкофоновой камере с помощью  $\gamma$ -спектрометра из особоочистого германия. Результаты нейтронно-активационного анализа показали на отсутствие заметных фоновых вкладов для кварцевых фильтров и характерное для фильтров из стекловолокна присутствие в  $\gamma$ -спектрах сильных линий от распада  $^{24}\text{Na}$ . Проведен нейтронно-активационный анализ атмосферных аэрозолей, отбираемых на специальные аналитические фильтрующие материалы НИИФХИ с помощью беспилотных средств пробоотбора (ЦАО, МАИ). Разработаны и опробованы методики измерения сверхмалых содержаний элементов в аэрозольных пробах. Отработана методика идентификации, определения периода полураспада и выполнения высокочувствительного определения содержания радиоактивных и стабильных нерадиоактивных элементов. Идентификация линий была проведена по результатам определения энергии и периода полураспада для наблюдаемых линий и также по результатам НАА для эталонных образцов  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ . Результаты нейтронно-активационного анализа указывают на возможность уверенного определения содержания  $\text{Na}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Mn}$  в атмосферных аэрозолях.

По результатам анализа  $^{41}\text{K}$  в аэрозольном фильтре и образцов  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaHCO}_3$ , получены независимые оценки плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника, которые совпали с измерениями методом нейтронно-активационного анализа с эталонными образцами  $\text{Cd}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Zn}$  и др.

Начаты работы по НАА с облучением в источнике золотосодержащих геологических образцов и измерениями в низкофоновой камере (рис. 3). Достигнуты нижние пределы определения элементов:  $\text{Au} \sim 0.1$  г/т.,  $\text{As} \sim 10^{-3}$  % масс,  $\text{Sb} \sim 10^{-3}$  % масс,  $\text{Mn} \sim 10^{-4}$  % масс при облучении в источнике при плотности потока нейтронов  $\sim 10^7$  нейтрон/с·см<sup>2</sup> и времени активации  $\sim 3$  часа. Отработаны методики относительного, компараторного и К0-методов

определения содержаний примесей в пробах методом НАА, созданы соответствующие программы для расчетов.

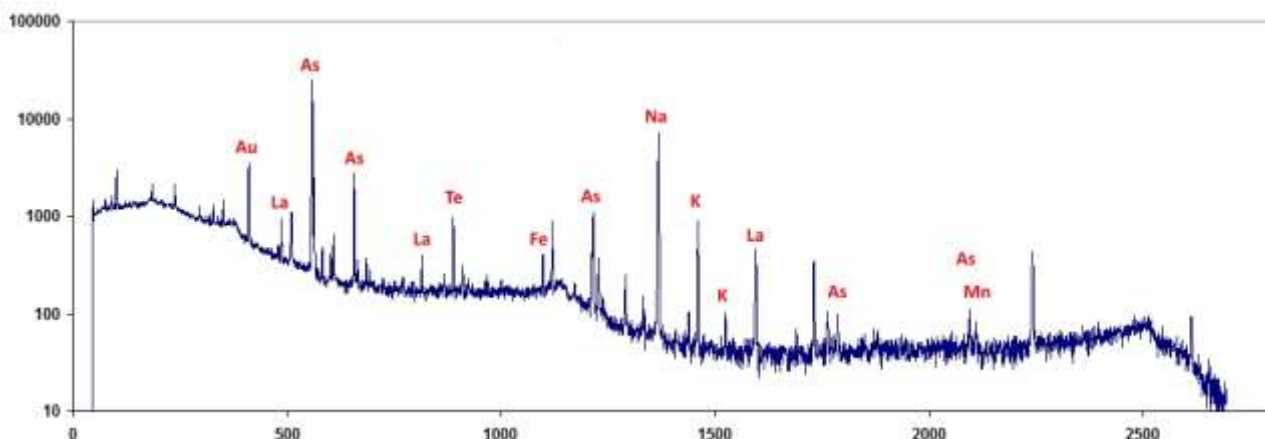


Рисунок 2.9 - Гамма-спектр активированного геологического образца (число импульсов – энергия гамма-квантов в кэВ. Время активации – 3 часа, плотность потока тепловых нейтронов  $\sim 10^7$  нейтрон /с·см<sup>2</sup>)

## 2 Публикации

1. С.И.Поташев, А.И.Драчев, А.А. Афонин, С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н.Марин, В.И.Разин, Е.С. Конобеевский Гибридный двухкоординатный детектор медленных нейтронов с чувствительными слоями из бора-10 размерами 400 мм×400 мм. ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН 1416/2015 Декабрь 2015

2. С.И.Поташев, В.Н. Марин, А.А. Афонин, С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.И.Разин, Р.А. Садыков, Е.С. Конобеевский. Газовый позиционно-чувствительный детектор медленных нейтронов с чувствительной областью 400 мм×400 мм. ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН 1415/2015 Декабрь 2015

## Доклады на международных конференциях

1. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, L.Latysheva, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and ( $\gamma$ ,n) reactions // Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation 2015, NUFRA 2015, 4-11 October 2015, Kemer (Antalya), Turkey, Book of Abstracts, p. 45.
2. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Pletnikov E.V., Sitnikov N.M., Zuyev S.V. / Neutron activation analysis of aerosol filters at photoneutron source of INR RAS // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 254.
3. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, M.Mordovskoy, G.Solodukhov, S.Zuyev / Neutron-Activation Analysis of Materials at IN-LUE Neutron Source // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS.

### 3 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8

Научные руководители: Г.В.Солодухов, А.В.Андреев.

ЛАЯ ИЯИ РАН совместно с ЛФЯР и ЛНИ ИЯИ РАН

Отв. исполнители:

Громов А.М.,

Пономарев В.Н.

Зуев С.В., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Мордовской М.В., снс, кфмн

### 3 Реферат

ТЕПЛОВЫЕ И БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ,  
ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ.

Исследования по теме направлены на создание высокоинтенсивного компактного W-Be-фото-нейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрамовой тормозной мишени, фото-нейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов. Источник предполагается использовать для проведения работ по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием тепловых и быстрых нейтронов.

### 3 Введение

Сокращение парка больших и дорогостоящих ядерно-физических установок, таких как ядерные реакторы и нейтронные генераторы, диктует необходимость создания новых, современных, универсальных, компактных, мобильных и, в то же время, достаточно экономичных ядерно-физических установок для широкого круга современных задач.

В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес создание фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 - 10 МэВ.

Такие источники могут обеспечить поток тепловых нейтронов порядка  $10^8 - 10^9$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения.

### 3 Основные результаты

Совместно с ЛФЯР и ЛНИ создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов, проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в измерительной

полости источника (в центре замедлителя). Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов, электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка  $10^8$  нейтрон/см<sup>2</sup>с. Оптимизирована схема W-Be-фотонейтронного источника (см. рис. 2.10).

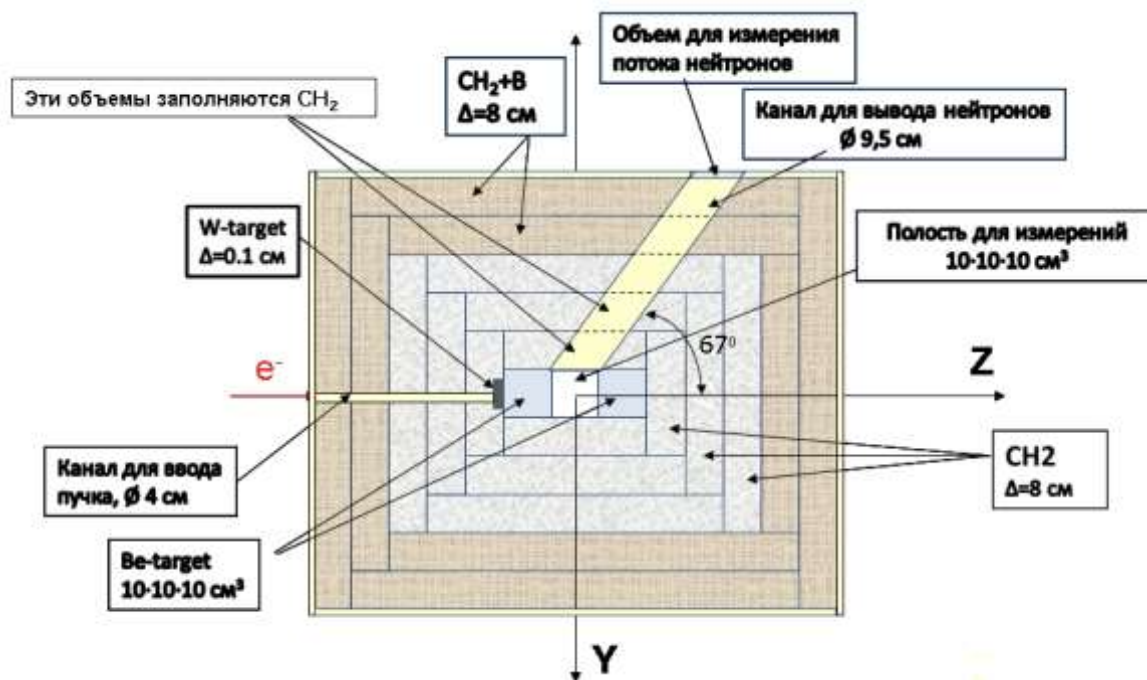


Рисунок 2.10 - Оптимизированная схема W-Be-фотонейтронного источника

С учетом результатов моделирования изготовлен фотонейтронный W-Be-источник тепловых нейтронов. Монтаж источника был проведен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 (см. рис. 2.11). Все работы по изготовлению источника проводились силами исполнителей темы.



Рисунок 2.11 - Промышленный ускоритель электронов ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН

Для оптимального использования источника были проведены работы по модернизации линейного ускорителя электронов: установлен дополнительный удлинитель вакуумпровода, проведена юстировка пучка, установлено дополнительное охлаждение вольфрамовой мишени. В результате модернизации ускорителя ток пучка электронов увеличен с 10 до 40 мкА. Также увеличена продолжительность непрерывной работы ускорителя.



Рисунок 2.12 - W-Be-фотонейтронный источник на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Фотонейтронный источник запущен на электронном пучке линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН в 2015 году (рис. 3). Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). В результате моделирования получен спектр нейтронов фотонейтронного источника внутри рабочей полости источника. Спектр характеризуется наличием помимо тепловых, также быстрых (более 100 кэВ) и промежуточных нейтронов (резонансных энергий). Проведены измерения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника и на выходе выведенного нейтронного канала методом нейтронно-активационного анализа с эталонными образцами Cd, Cu, In, Mn, Sc, Zn и др. Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника составила  $\sim 10^7$  нейтрон/см<sup>2</sup>с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выведенном канале источника. Исследовано влияние нейтронных фильтров из различных материалов (B<sub>4</sub>C, Cd, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) на соотношение тепловых и быстрых нейтронов на выходе измерительного канала источника. Начаты работы по нейтронно-активационному анализу с использованием нейтронов фотонейтронного источника.

Фотонейтронный источник нейтронов включен в состав Уникальной научной установки ИЯИ РАН «Радиационный комплекс на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ».

Результаты работы доложены на Международных конференциях NUFRA 2015 [1], NUCLEUS 2015 [2] и EMIN-2015 [3].

### 3 Доклады на международных конференциях

1. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, L.Latysheva, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and ( $\gamma$ ,n) reactions // Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation 2015, NUFRA 2015, 4-11 October 2015, Kemer (Antalya), Turkey, Book of Abstracts, p. 45.
2. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M. Gromov A.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. / W-Be photoneutron source of INR RAS // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 252.

3. A.Andreev, Yu.Burmistrov, E.Konobeevski, L.Latysheva, M.Mordovskoy, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, S.V.Zuyev / Multipurpose compact W-Be photoneutron source IN-LUE of Institute for Nuclear Research RAS // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Запуск источника нейтронов ИН-ЛУЭ. Запущен источник нейтронов на основе электронного пучка линейного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрам-бериллиевой фотонейтронной мишени и замедлителя-формирователя спектра нейтронов. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых - 0.5–5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Изменение спектра нейтронов достигается изменением конфигурации бериллиевой мишени и в некоторых случаях применением специальных фильтров. В настоящее время начаты работы по нейтроно-активационному анализу при плотности потока  $\sim 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что позволяет, например, определять содержание золота в образце с содержанием  $\sim 1 \text{ г/т}$ . ИЯИ РАН.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.