**Приложение 3.**

***Форма открытия (продления) Проекта / (Подпроекта КИП)***

 **УТВЕРЖДАЮ**

 **Директор Института**

 **“ “ \_\_\_ 2023 г.**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ**

**ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА**

**ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта (далее КИП)**

**1.1. Шифр темы / КИП** (для продлеваемых проектов) *– шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

«Нейтронная ядерная физика»

**1.2.**  **Шифр проекта / подпроекта КИП** (для продлеваемых проектов и подпроектов)

**1.3. Лаборатория**

**ЛНФ**

**1.4. Научное направление**

**Ядерная физика**

**1.5. Наименование проекта / подпроекта КИП**

**Исследование взаимодействия с нейтронов с ядрами и свойств нейтрона.**

**1.6. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП**

**Седышев П.В., Швецов В.Н.**

**1.7. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель проекта/ подпроекта КИП)**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Ядерные процессы, индуцированные медленными, резонансными и быстрыми нейтронами, традиционно исследуются в ЛНФ ОИЯИ. Взаимодействие нейтронов с атомными ядрами представляет интерес как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

Комплексное использование базовых установок ЛНФ – импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН, импульсного реактора ИБР-2 и электростатического генератора ЭГ-5 – позволяет проводить широкий спектр ядерно-физических исследований в широком диапазоне энергий нейтронов – от холодных нейтронов до ~14 МэВ, а использование внешних источников нейтронов, таких как n\_TOF (ЦЕРН), позволяет расширить диапазон энергий до нескольких сот МэВ. Фундаментальные исследования, проводимые в Отделении ядерной физики ЛНФ, включают нарушение пространственной и временной симметрии, изучение механизма ядерных реакций, структуры атомных ядер, процессов деления, индуцированных нейтронами, нейтронно-индуцированных реакций с вылетом легких частиц, свойств нейтрона как элементарной частицы, свойств ультрахолодных и очень холодных нейтронов, квантово-механических эффектов с участием нейтронов.

В ЛНФ также были разработаны исследовательские программы для прикладных исследований, таких как получение ядерных данных для ядерных технологий, энергетики и трансмутации, нейтронно-активационный анализ на тепловых и эпитепловых нейтронах, нейтронно-активационный анализ на мгновенных гамма-квантах, элементный анализ с использованием нейтронных резонансов, элементный анализ на быстрых нейтронах, анализ тонких пленок на пучках электростатического ускорителя.

**2.2. Научное обоснование (**цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Научная программа проекта «Исследование взаимодействия с нейтронов с ядрами и свойств» будет реализовываться в рамках четырех **подпроектов**:

* 1. *Ядерные реакции с нейтронами*
	2. *ЭНГРИН*
	3. *Физика УХН и ОХН*
	4. *Прикладные исследования*
1. **Подпроект «Ядерные реакции с нейтронами».**

Основные задачи, которые планируется решать в рамках данного подпроекта:

* Изучение свойств нейтронных резонансов, поиск и исследование эффектов нарушения четности и эффектов, указывающих на нарушение Т-инвариантности.
* Всестороннее исследование процесса деления ядер: изучение TRI и ROT эффектов в делении; измерение массово-энергетических и угловых распределений осколков, мгновенных нейтронов и гамма-квантов; измерения запаздывающих нейтронов и гамма-квантов; поиск редких и экзотических мод деления (четверное и пятерное деление; деление на три осколка сравнимой массы).
* Исследование индуцированных нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц.
* Получение данных для ядерной энергетики и астрофизики: измерение интегральных и дифференциальных нейтронных сечений, угловых корреляций в области энергии от холодных нейтронов до сотен МэВ.

* 1. Изучение свойств нейтронных резонансов, поиск и исследование эффектов нарушения четности и эффектов, указывающих на нарушение Т-инвариантности.

Нейтронный резонанс – это долгоживущий уровень очень сложной системы, компаунд-ядра. К резонансам возник интерес сразу же после их обнаружения, пусть первоначально он имел преимущественно прикладной характер. В частности, предметами изучения стали не только характеристики резонансов, но и статистические свойства этих характеристик (расстояний между резонансами, ширин резонансов). Однако это изучение сложности на количественном уровне до сих пор главным образом основано только на данных, полученных для s-волновых резонансов. О характеристиках p-волновых резонансов большинства ядер, даже таких как положения и полные ширины, известно очень мало. Более того, лишь для единичных p-волновых резонансов, возбуждаемых при взаимодействии нейтронов с ядрами со спинами, отличными от нуля, установлены парциальные нейтронные ширины, соответствующие заселению (и распадам) через волны $p\_{1/2}$ и $p\_{3/2}$, так что статистический анализ этих парциальных ширин вообще невозможен.

Но даже для s-волновых резонансов картина не так однозначна. Относительно недавняя экспериментальная работа [1], в которой были обнаружены значительные отклонения распределений s-волновых нейтронных ширин от стандартных ожиданий, вызвала длительную дискуссию. В работе [2] было предложено решение этой проблемы, которое увязывается с некоторыми специальными свойствами изотопов 192,194Pt, исследовавшихся в [1]. Есть и другие опубликованные примеры необычных статистических зависимостей характеристик s-волновых резонансов.

Сложность компаунд-ядерных состояний нетривиальным образом обнаруживается в так называемом динамическом усилении эффектов нарушения пространственной чётности (P-чётности) в нейтронных резонансах тяжёлых ядер. Эффекты обусловлены малыми составляющими ядерных сил, неинвариантными относительно пространственной инверсии и обусловленными нарушением P-чётности в слабых взаимодействиях. Эти силы смешивают s- и p-волновые резонансы, и это смешивание обнаруживается в многочисленных характерных эффектах во взаимодействии поляризованных нейтронов с ядрами, как в упругом, так и неупругих (радиационном и делительном) каналах. Динамическое усиление даёт фактор масштаба 103, тогда как некоторые факторы («структурного» или «кинематического» характера), возникающие при проведении измерений непосредственно в p-волновом резонансе, дают дополнительное усиление в отдельных случаях до 103. Таким образом, в низкоэнергетическом взаимодействии нейтронов с тяжёлыми ядрами было обнаружено множество P-нечётных эффектов величиной от 10-4 и выше, т.е. значительно более явно выраженных, нежели, например, во взаимодействии нейтронов с лёгкими ядрами или света с атомами, где соответствующие характерные эффекты имеют масштаб 10-7 – 10-8.

Отметим, что дополнительные факторы усиления P-нечётных эффектов в p-волновых резонансах стимулировали поиск таких резонансов и измерение в них наиболее простого P-нечётного эффекта - зависимости полного сечения взаимодействия от спиральности падающих нейтронов («нейтронного дихроизма»). Наиболее полная сводка измерений такого рода, выполненных на 20 изотопах, приведена в обзорной статье [3]. Для обработки этих данных использовались стандартные статистические подходы (например, равенство средних парциальных ширин, соответствующих волны $p\_{1/2}$ и $p\_{3/2}$ волнам), хотя, как выше уже было замечено, их применимость к p-волновым резонансам экспериментально не обоснована.

Как известно, слабые взаимодействия не сохраняют P, CP, T-четности волновых функций объектов, участвующих в них. В настоящее время хорошо известны явления, не сохраняющие P-четность, которые наблюдаются при слабых распадах свободных адронов, при β-распаде радиоактивных ядер и в ядерных реакциях. Нарушение CP-четности (или, что эквивалентно T-инвариантности) четности изучено существенно хуже и наблюдалось только в распадах K0 и B0-мезонов. В то же время, нарушение T-инвариантности должно приводить к наличию электрических дипольных моментов (ЭДМ) нейтронов, электронов и других простых систем, но их поиски пока не привели к успеху. Весьма вероятно, что в ядерных взаимодействиях могут существовать малые силы, нарушающие T-инвариантность и дополнительно нарушающие P-чётность (более вероятный вариант), либо сохраняющие P-чётность (вариант маловероятный, но категорически не отвергаемый). Если в ближайшие годы будет обнаружен ЭДМ некоторой элементарной системы, то это будет скорее свидетельством в пользу 1-го варианта, но даже это не «закроет» окончательно 2-ю возможность. В любом случае обнаружение ЭДМ, например, нейтрона, повлечёт за собой интенсификацию поиска независимых указаний на нарушение T-инвариантности в ядерных взаимодействиях при низких энергиях, а вовсе не отказ от таких поисков (любой прорыв приводит к увеличению числа исследований с целью расширения зоны прорыва).

Понятно, что малые T-неинвариантные силы, как малые P-нечётные, могут быть обнаружены только по специфическим эффектам, которые возникают из-за смешивания ядерных состояний под действием этих сил. Поэтому ясно, что динамическое усиление любого смешивания состояний тяжёлых ядер (масштаба 103!) ставит T-неинвариантные эффекты в нейтронных резонансах на первое место по важности в списке всех прочих способов поиска ядерных взаимодействий, нарушающих T-инвариантность. К настоящему времени уже известен не только перечень основных эффектов в нейтронных резонансах, но есть и понимание на качественном уровне, почему нарушение T-инвариантности приводит к этим эффектам. А именно, в любом случае нарушение T-инвариантности влечёт за собой нарушение детального баланса, т.е. равенства амплитуд переходов из состояния A в состояние B и наоборот. Так, в частности, если T-неинвариантные силы нарушают P-чётность, то они нарушают равенство амплитуд переходов из s- в p-состояния и наоборот, тогда как T-неинвариантные и P-чётные силы нарушают равенство амплитуд переходов из состояний $p\_{1/2}$ в $p\_{3/2}$ и наоборот. При этом в обоих случаях нарушение равенства амплитуд может проявляться лишь в появлении у них относительной фазы, так что любые эффекты, чувствительные к подобным фазам, становятся чувствительными к T-неинвариантным силам.

Это означает, что помимо «чистых» и достаточно сложных методов исследования T-инвариантности в p-волновых резонансах путём поиска так называемых 3-векторных и 5-векторных корреляций в полном сечении взаимодействия поляризованных нейтронов с ориентированными (поляризованными или выстроенными) ядрами, до определённого уровня точности возможны поиски T-неинвариантных эффектов более простыми методами, чувствительными к упомянутым выше T-неинвариантным фазовым множителям. К наиболее простым способами такого рода могут быть отнесены поиски асимметрии «вперёд-назад» в испускании гамма-квантов после захвата нейтронов в p-волновом резонансе, где в случае T-неинвариантных и P-чётных сил «ось» задаётся импульсом падающих нейтронов [4], тогда как в случае T-неинвариантных и P-нечётных сил «ось» задаётся направлением спина падающих нейтронов; см, например, [5].

Вообще же следует особо отметить, что изучение угловых корреляций в радиационном захвате нейтронов в p-волновых резонансах представляет собой необыкновенно широкое и благодатное поле деятельности, до сих пор мало разработанное. Даже в простейшем случае, когда нейтроны неполяризованы, а ядра не ориентированы, измерение углового распределения гамма-квантов может дать не только информацию об нейтронных амплитудах (в том числе парциальных, связанных с волнами $p\_{1/2}$ и $p\_{3/2}$) и гамма-амплитудах во входном и выходном каналах, но и о положении соседних s-волновых резонансов (информация такого рода содержится в асимметрии испускания гамма-квантов относительно импульса падающих нейтронов), в том числе в области «отрицательных» энергий (ниже энергии связи нейтрона). Более того, может быть получена информация об интерференции нескольких соседних s-волновых резонансов, если воспользоваться формулами, выходящими за пределы стандартного приближения изолированных брейт-вигнеровских резонансов. Использование поляризованных нейтронов (не говоря уже о поляризации или выстраивании ядер) только расширит возможности данного метода. Более того, подобное предварительное тщательное изучение всех характеристик выбранного p-волнового резонанса и соседних s-волновых резонансов необходимо для правильной интерпретации результатов последующих исследований эффектов, обусловленных нарушением T-инвариантности.

Такие исследования угловых корреляций в радиационном захвате нейтронов в p-волновых резонансах ядер 139La, 117Sn и 81Br, нацеленные на будущие поиcки T-неинвариантных эффектов, в частности, недавно начаты в Японии [6-9]. В 1980-е годы похожие исследования были выполнены в ЛНФ на p-волновых резонансах ядер 113Cd и 117Sn, но у них не было продолжения, хотя без этих исследований не было бы работы [4].

Возобновление подобных исследований на уже известных p-волновых резонансах (см. список изотопов, изученных в [3]) могло бы стать началом широкой программы изучения компаунд-ядерных состояний со следующим (неполным) списком целей:

- измерение характеристик p-волновых резонансов, в том числе с целью последующей проверки соответствия распределений этих характеристик стандартным статистическим моделям,

- исследование эффектов интерференции как p- и s-волновых резонансов, так и s-волновых резонансов друг с другом, с выходом за пределы упрощённого приближения изолированных брейт-вигнеровских резонансов,

- изучение характеристик «отрицательных» s-волновых резонансов, проявляющихся в интерференции с р-волновыми резонансами, близкими к тепловой точке,

- поиск T-неинвариантных эффектов.

Исследования угловых распределений гамма-квантов будут начаты на неполяризованных нейтронах, но последующее развитие в сторону добавления поляризации нейтронов, спиновой ориентации ядер-мишеней и измерений наблюдаемых в упругом канале взаимодействия нейтронов с ядрами, в том числе полных сечений взаимодействия, представляют несомненный интерес. Для резонансов на ядрах актинидов в число измеряемых величин могут быть также включены наблюдаемые в канале деления.

Литература

[1] P.E.Koehler, F.Becvar, M. Krticka, J.A.Harvey, K.H.Guber. Anomalous Fluctuations of s-Wave Reduced Neutron Widths of 192,194Pt Resonances. - Phys. Rev. Lett., 2010, v. 105, 072502, 4 pp.,

[2] P.Fanto, G.F.Bertsch, Y.Alhassid. Neutron width statistics in a realistic resonance-reaction model. - Phys. Rev. C, 2018, v. 98, 014604, 5 pp.,

[3] G.E.Mitchell, J.D.Bowman, S.I.Penttilä, E.I.Sharapov. Parity violation in compound nuclei: experimental methods and recent results. - Physics Reports, 2001, v. 354, iss. 3, p. 157-241.

[4] A.L.Barabanov, E.I.Sharapov, V.R.Skoy, C.M.Frankle. Testing T-odd, P-even interactions with gamma rays from neutron p-wave resonances. - Phys. Rev. Lett., 1993, v. 70, iss. 9, p. 1216-1219,

[5] E.D.Davis, C.R.Gould, G.E.Mitchell, E.I.Sharapov. Bounds on P-odd T-odd interactions from polarized neutron capture with unpolarized targets. - Phys. Rev. C, 2004, v. 69, 015501, 6 pp.

[6] T.Okudaira, S.Takada, K.Hirota, A.Kimura, M.Kitaguchi et al. Angular Distribution of gamma-rays from Neutron-Induced Compound States of 140-La. - Phys. Rev. C, 2018, v. 97, 034622, 15 pp.,

[7] T.Okudaira, H.M.Shimizu, M.Kitaguchi, K.Hirota, C.C.Haddock et al. Measurement of the angular distribution of γ-rays after neutron capture by 139-La for a T-violation search. - EPJ Web Conf. , 2019, v. 219, 09001,

[8] S.Endo, H.M.Shimizu, M.Kitaguchi, H.Katsuya, T.Yamamoto et al. Measurement of the angular distribution of γ-rays emitted from the compound state after neutron capture by 81-Br for a search of T-violation. - EPJ Web Conf., 2019, v. 219, 09003,

[9] J.Koga, S.Takada, T.Yoshioka, H.M.Shimizu, K.Hirota et al. Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted in the 117-Sn(n, γ) reaction for a T-violation search. - EPJ Web Conf., 2019, v. 219, 09004.

* 1. Исследование TRI и ROT эффектов в делении

Изучение ядерного деления в (n,f)-реакциях с ориентированными или поляризованными мишенями и поляризованными нейтронами выявило интересные особенности этого процесса. Эти исследования проводились на импульсных источниках нейтронов в резонансной области и на высокопоточных исследовательских реакторах для энергий нейтронов вблизи тепловой точки. По угловым распределениям осколков деления ориентированных ядер определялись (J,K) квантовые числа переходных состояний в седловой точке для отдельных резонансов сечения в 235U(n,f) [1]. Для этой же реакции спин-зависимые сечения деления были получены при исследовании поляризованных мишеней 235U при облучении поляризованными нейтронами [2]. Новое направление исследований было начато открытием нарушения четности в реакциях деления [3]. В этих экспериментах регистрировались осколки, параллельные и антипараллельные спину нейтрона σn . Несохранение пространственной четности (PNC) проявляется в асимметрии углового распределения осколков в зависимости от псевдоскалярного произведения (σn · pLF ) относительно импульса легкого осколка pLF. При наблюдаемой асимметрии около 10-4 в реакции 235U(n,f ) величина эффекта PNC оказалась неожиданно велика. Это происходит из-за смешивания состояний s1/2 и p1/2 вблизи P-резонансов, которые иначе не видны. После успешного наблюдения нарушения фундаментальных законов физики, таких как PNC при делении, возникла идея, нельзя ли также проверить инвариантность к обращению времени [4]. По аналогии с поиском нарушения инвариантности к обращению времени при распаде свободных поляризованных нейтронов необходимо проанализировать тройную корреляцию между спином нейтрона σn и импульсами осколков и тройных частиц, испускаемых в тройном делении. Были проведены несколько серий экспериментов, в основном, на высокопоточных реакторах ИЛЛ в Гренобле и FRM-II в Гархинге, в результате которых были наблюдены ожидаемые корреляции, однако надежда найти нарушение инвариантности относительно обращения времени не оправдалась. Однако были обнаружены и тщательно изучены два различных явления, которые получили названия ROT и TRI эффекты [5,6]. Эффект ROT объясняется коллективным вращением составного ядра вплоть до разрыва. Эффект TRI отражает влияние вращающегося ядра на вероятность испускания тройных частиц. Было показано, что оба эффекта присутствуют параллельно с разными весами для всех изученных актинидов.

Большинство экспериментов проводились на пучках холодных поляризованных нейтронов, что ограничивало интерпретацию результатов с точки зрения определения (J,K) квантовых чисел для переходных состояний в седловой точке. В 2018 г. впервые удалось провести измерение ROT-эффекта для гамма-квантов в делении 235U в низколежащем резонансе 0,3 эВ. Полученные результаты согласуются с теорией, однако для дальнейшего изучения квантово-механических свойств процесса деления целесообразно продолжение этих работ с целью получения данных для более высоколежащих резонансов, а также для других ядер. В частности, в качестве кандидатов было предложены ядра 241Am и 245Cm [7].

Такие эксперименты могут быть начаты на пучке поляризованных нейтронов реактора ИБР-2. Несмотря на большую длительность импульсов реактора, разрешающая способность времяпролетной методики позволяет на пролетных базах порядка 15-30 м разрешать низколежащие резонансы до нескольких электронвольт. Дальнейшие работы могут быть продолжены на внешних источниках нейтронов, таких как nTOF (ЦЕРН) CSNS (Китай) или ESS (Швеция).

Литература

[1] R. I. Schermer, L. Passell, G. Brunhart, C. A. Reynolds, L. V. Sailor, and F. J. Shore, Phys. Rev. 167, 1121 (1968).

[2] M. S. Moore, J. D. Moses, G. A. Keyworth, J. W. T. Dabbs, and N. W. Hill, Phys. Rev. C 18, 1328 (1978).

[3] G. V. Danilyan, B. D. Vodennikov, V. P. Dronyaev, V. V. Novitsky, V. S. Pavlov, and S. P. Borovlyev, JETP Lett. 26, 186 (1977).

[4] K. Schreckenbach, J. van Klinken, and J. Last, in Time Reversal Invariance and Parity Violation in Neutron Reactions: Proceedings of the 2nd International Workshop, Dubna, Russia, May 4–7, 1993, edited by C. R. Gould, J. D. Bowman, and Y. P. Popov (World Scientific Publishing Company, Singapore, 1994), p. 187.

[5] P. Jesinger, A. Kötzle, A. Gagarski, F. Gönnenwein, G. Danilyan, V. Pavlov, V. Chvatchkin, M. Mutterer, S. Neumaier, G. Petrov, V. Petrova, V. Nesvizhevsky, O. Zimmer, P. Geltenbort, K. Schmidt, and K. Korobkina, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 440, 618 (2000).

[6] F. Gönnenwein, M. Mutterer, A. Gagarski, I. Guseva, G. Petrov, V. Sokolov, T. Zavarukhina, Y. Gusev, J. von Kalben, V. Nesvizhevski, and T. Soldner, Phys. Lett. B 652, 13 (2007).

[7] [I. Guseva](https://inspirehep.net/authors/2055289), [Yu. Gusev](https://inspirehep.net/authors/1007188), Nucl.Phys.A 1030 (2023) 122592

* 1. Исследование индуцированных нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц.

Измерение сечений нейтронно-индуцированных реакций с вылетом заряженных частиц представляет интерес в нескольких областях науки и технологии. Так данные требуются для различных конструкционных материалов, поглотителей нейтронов и других приложений ядерной технологии. Потребности в точности и диапазоне энергий варьируются в пределах 1-10 процентов и от тепловых до 8, а иногда и до 20 МэВ, соответственно.

Будут продолжены работы по измерению сечений реакций (n,p), (n,α) на различных изотопах. Эксперименты имеют значение как для фундаментальной ядерной физики, так и для ядерной астрофизики (уточнение параметров глобального α-частичного потенциала, используемого в расчетах различных астрофизических сценариев). В астрофизике сечения реакции (n,α) очень важны для сценариев нуклеосинтеза элементов. Полагают, что большинство элементов тяжелее железа производятся при захвате нейтронов и бета-распадах (s- и r– процессы), тогда как редкие протон-избыточные изотопы – в основном в реакциях фотодиссоциации (p-процесс). Измерения реакции (n,α) необходимы для лучшего понимания s-процесса в случае легких ядер, а для тяжелых – для конструирования α-частичного потенциала, используемого для расчетов реакций, происходящих в p-процессе. Постановка экспериментов возможна на ИРЕН (En=th-100 кэВ); электростатических ускорителях ЭГ-5 ЛНФ, ЭГ-4.5 ПКУ, Пекин (En=3-6 МэВ); тандем ускоритель HI-13 CIAE, Пекин (En=8-11 МэВ) и CSNS в Китае.

В ядерной физике остаются актуальными задачи по обнаружению и измерению нейтронных резонансов, в частности, их α-ширин. В качестве первоочередной представляется задача по выяснению природы аномалии нейтронных резонансов в реакции 147Sm (n,α)144Nd. Исследование этой реакции началось в ЛНФ им. И.М.Франка ОИЯИ в 70-х годах прошлого века, когда было обращено внимание на аномально большое значение α-ширины резонанса с Е0 = 184 эВ, которое существенно искажало статистическое распределение полных α-ширин. Дальнейшие эксперименты показали, что в этой реакции и α-ширины, усредненные по интервалам 200 - 500 эВ, не являются константой, а указывают на заметный их рост с ростом энергии нейтронов, что явно противоречит статистической теории компаунд-состояний атомного ядра. В последние годы в ORNL, Ок-Ридже, 30 лет спустя, измерения полных α-ширин были продолжены в более широком диапазоне энергий нейтронов, но пока без амплитудного анализа α-частиц. Измерения в Ок-Ридже подтвердили аномальную природу резонанса с Е0 = 184 эВ в реакции 147Sm (n,α)144Nd, а также выявили еще несколько новых аномальных резонансов при более высоких энергиях. Кроме того было обнаружено, что для резонансов со спинами 4- и Еn > 300 эВ средние значения α-ширин втрое больше, чем для резонансов со спинами 3-, хотя по теории должно быть наоборот, поскольку для резонансов со спинами 4- наиболее интенсивный α-распад в основное состояние конечного ядра 144Nd со спином 0+ запрещен законом сохранения момента и четности. И действительно, для области энергии Еn < 300 эВ резонансы со спином 4- имеют средние значения α-ширин втрое меньшее, чем для резонансов со спинами 3-. Сейчас неизвестны механизмы, которые могли бы объяснить такое увеличение α-ширин для резонансов со спинами 4-. Для выяснения природы этих аномалий (возможно, что это новое явление в нейтронной физике) было бы крайне важно проанализировать энергетический спектр α-частиц в этих резонансах или измерить усредненные парциальные сечения этой реакции в амплитудных окнах, соответствующих α-переходам в основное и возбужденные состояния конечного ядра. Это может стать одной из приоритетных задач для светосильного нейтронного источника по времени пролета CSNS (China spallation neutron source). Также интерес представляют измерения спектров α-частиц в резонансах и других изотопов. В случае принятия программы (n,α) предстоит большая работа по созданию ряда специальных детекторов (кроме спектрометрии нейтронов необходима еще и спектрометрия α-частиц – продуктов реакции), изготовлению образцов и адаптации на пучке модуля регистрации и накопления многомерной информации. Предварительные испытания аппаратуры могут быть выполнены на пучках нейтронов установки ИРЕН ЛНФ ОИЯИ.

Экспериментальное изучение угловых и поляризационных корреляций и угловых распределений продуктов ядерных реакций, получение более полной спектроскопической информации о р-резонансах, в частности, значений и знаков амплитуд ширин входного и выходного каналов реакции, необходимых как для интерпретации результатов исследований Р-нечетных эффектов, так и для проверки адекватности используемого формализма в рамках концепции составного ядра представляется важной задачей. Целью предлагаемых исследований является проведение цикла измерений Р-четных корреляций вперед-назад и анизотропии угловых распределений в реакциях 14N(n,p)14C и 35Cl(n,p)35S в широкой области энергии нейтронов, включающей низколежащие р-волновые резонансы, и анализ данных совместно с определенными ранее Р-нечетными и Р-четными лево-правыми корреляциями. Измерение всех указанных корреляций дает возможность определить амплитуды ширин для различных спинов каналов реакции и матричный элемент слабого взаимодействия. Поскольку результаты большинства экспериментов по изучению явления нарушения пространственной четности в реакциях с поляризованными нейтронами интерпретируется в двухуровневом приближении, особое внимание будет уделено анализу корреляций в рамках стандартной резонансной теории. Эксперименты, специально посвященные определению значений и знаков амплитуд ширин для разных спинов каналов путем измерения Р-четных угловых корреляций в радиационном захвате на 117Sn и 113Cd, выявили существенную несогласовку данных. Так как амплитуды ширин связаны с нейтронной шириной квадратично, из подгонки к экспериментальным данным для каждого коэффициента получаются два набора значений амплитуд ширин. Характерным оказалось то, что один набор значений, полученный в измерениях одного коэффициента, достаточно точно описывает другой коэффициент количественно, но дает знак, обратный наблюдаемому эффекту, а другой набор, при верном знаке, дает слишком завышенное значение. Следует подчеркнуть, что такое несоответствие оказалось общим для обоих ядер. Указание на подобную неопределенность в значениях и знаках амплитуд ширин каналов с моментами 1/2, 3/2 было замечено нами и в реакции 35Cl(n,p)35S. Из-за экспериментальных погрешностей без проведения дополнительных измерений утверждать, что несоответствие установлено однозначно, пока преждевременно. Выяснение причин неадекватности аналитического описания реальному процессу крайне важно как для правильной интерпретации результатов исследований Р-нечетных эффектов, так и для планирования будущих экспериментов по поиску нарушения Т-четности. Измерения предполагается провести на ИРЕН, также на ЭГ-5 и ЭГ-4.5 с использованием 7Li и 3H нейтрон-генерируюших мишеней, соответственно, и на CSNS при необходимости.

Измерение сечения реакции деления (n,f) в области энергии нейтронов 1-20 МэВ планируется провести на нескольких изотопах с использованием детекторов на базе специальной ионизационной камеры (GIC) и Time Processing Chamber (TPC).

1. **Подпроект ЭНГРИН**

Подпроект «Эмиссия Нейтронов и Гамма-квантов в Реакциях, Индуцированных Нейтронами» (ЭНГРИН) нацелен на экспериментальное изучение свойств мгновенных нейтронов и гамма-квантов деления, индуцированного резонансными нейтронами. Исследование свойств мгновенных нейтронов деления (МНД) представляет огромный интерес для общего понимания процесса деления и распределения энергии возбуждения между фрагментами деления (ФД) в частности. Исследования МНД в реакциях деления при низких энергиях проводятся в ОИЯИ на протяжении более 20 лет. Основным объектом этих исследований являлись МНД в реакциях 252Cf(sf) и 235U(nres,f) в области разрешенных резонансов. В реакции 235U(nres,f) наблюдались флуктуации в массовых и энергетических распределениях ФД в зависимости от энергии резонансных нейтронов [1,2]. Аналогичные флуктуации множественности МНД в зависимости от энергии нейтронов также наблюдались в [3]. Целью данного проекта является исследование корреляций между вариациями множественности МНД и массово-энергетических распределений (МЭР) в делении, индуцированном резонансными нейтронами. Эта задача приобрела особый интерес после публикации результатов работы [4], где было обнаружено отсутствие вариаций множественности МНД в наиболее сильных резонансах реакции 235U(nres,f).

 Эксперименты в рамках подпроекта планируются на 2м канале установки ИРЕН. Экспериментальная установка была создана в рамках проекта в 2021-23 гг и состоит из 32 модулей нейтронных детекторов с жидким сцинтиллятором BC501, расположенных таким образом, чтобы торцы детекторов располагались на поверхности сферы диаметром 1000 мм и с центром, совпадающим с центром ионизационной камеры (ИК). Величина геометрической эффективности регистрации МНД равна 0.18. В качестве спектрометра фрагментов деления может быть использована позиционно-чувствительная ионизационная камера [5], позволяющая измерение кинетических энергий, масс фрагментов деления и ориентации оси деления (углов оси деления по отношению к осям декартовой системы координат с началом в центре ИК). При этом ось пучка нейтронов проходит через геометрический центр ИК, а нейтронные детекторы располагаются компактно вокруг оси пучка нейтронов. Исследования МНД и МЭР предъявляют противоположные требования к делящейся мишени: в первом случае целесообразно использовать сравнительно толстую мишень для увеличения выхода нейтронов. Во втором же необходима тонкая мишень, обеспечивающая выход из нее осколков деления и возможность их раздельной регистрации. Таким образом, исследования корреляций вариаций полной кинетической энергии с МНД удобно разделить на два эксперимента: в первом эксперименте измеряются вариации МНД с «толстой» мишенью, а корреляции массово-энергетических распределений и множественности МНД измеряются с тонкой мишенью и позиционно-чувствительной ионизационной камерой.

 Для выполнения эксперимента предполагается воспользоваться сконструированной в ЛНФ двойной ионизационной камерой (ДИК) деления с «толстой» (0.5мг/см2) мишенью диаметром 17 см. Препарат из 235U (99.999% обогащения) нанесен на обе стороны катода из алюминиевой фольги. Катод расположен в центре цилиндра из нержавеющей стали на одинаковом расстоянии 12 мм от фланца и дна цилиндра. Для анализа вариаций числа МНД в сильных резонансах с точностью около 3%, достаточно 240 часов (2 недели) измерений с толстой мишенью (230 мг) при интенсивности потока резонансных нейтронов ~2\*1011н/сек. Для измерения вариаций массово-энергетических распределений с точностью ~3% потребуется около 50 недель измерений с «тонкой» мишенью (1 мг) и указанной выше интенсивностью потока нейтронов. Примерно 50-70 недель необходимо для разработки аппаратных и программных средств измерений и подготовки канала №2 ИРЕН.

Литература

1. Zeinalov Sh.S., Florek M., Furman W.I., Kriatchkov V.A., Zamyatnin Yu. S., Neutron energy dependence of 235U(n,f) mass and TKE distributions around 8.77 eV resonance VII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclear, Dubna: JINR, -1999. -E3-1999-212. –P. 258-262.
2. A. Gook, W. Geerts, F.-J. Hambsch, S. Oberstedt, M. Vidali, Sh. Zeynalov, A position sensitive twin ionization chamber for fission fragment and prompt neutron correlation experiments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A830 (2016) 366.
3. R.E. Howe, T.W. Phillips, C.D. Bowman, Phys. Rev. C 13, 195 (1976).
4. Alf Gook, Franz-Josef Hambsch, and Stephan Oberstedt. EPJ Web of Conferences 1, 05001 (2016).
5. Sh. Zeynalov, P. Sedyshev, V. Shvetsov, O. Sidorova, Position sensitive twin ionization chamber for nuclear fission investigations, Applications of Nuclear Techniques (CRETE17), International Journal of Modern Physics: Conference Series, Vol. 48 (2018) 1860123 DOI: 10.1142/S2010194518601230.
6. **Подпроект «Физика УХН и ОХН»**

В рамках деятельности по изучению физики ультрахолодных и очень холодных нейтронов (УХН и ОХН) можно выделить три основных направления: исследование квантовых явлений в нейтронной оптике; исследование взаимодействия медленных нейтронов с алмазными наночастицами и исследование взаимодействия холодных нейтронов с интеркалированным графитом.

* 1. Нейтронная оптика.

В ЛНФ имеется многолетний опыт исследований квантовых явлений в нейтронной оптике [1-18]. В ряду теоретических результатов [1-11] имеется несколько, послуживших базой для последующих экспериментов. Нестационарная дифракция нейтронов на движущейся решетке [3] наблюдалась в экспериментах [12-14]. Это явление легло в основу идеи о временной фокусировке нейтронов [15], получившей экспериментальное подтверждение в [16] и нового подхода к эксперименту по проверке принципа эквивалентности [17]. Что касается гипотезы о И. М. Франка [1] о возможности нестационарной передачи энергии нейтрону при дифракции на поверхностных волнах, то она получила экспериментальное подтверждение в 1987 году [19]. Недавно сотрудниками ЛНФ был осуществлен более детальный эксперимент по наблюдению дифракции нейтронов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [18].

Продолжение развития этого направления исследований в рамках проекта предлагаемой темы является актуальным.

Планируется продолжить работы по изучению нестационарной дифракции на ПАВ. Научные цели такого исследования изложены ниже. Прежде всего, современная техника рефлектометрических экспериментов позволяет с высокой точностью измерять в геометрии отражения угловое распределение и абсолютные амплитуды дифрагированных волн как первого, так и более высоких порядков. Измерения будут проведены для широкого набора образцов, в которых возбуждаются как бегущие, так и стоячие поверхностные волны. Сравнение экспериментальных данных с результатами квантового расчета представляет несомненный интерес. При этом предполагается, что частоты волн могут достигать величин порядка Гигагерц. Передаваемая нейтронам энергия будет достигать величины порядка 4 мкэВ. Передача нейтронам такой большой энергии в результате нестационарного воздействия ранее не наблюдалась.

Проведение эксперимента с предельно высоким частотами колебания вещества позволит также получить ответы еще на два важных вопроса. Прежде всего сам факт наблюдения эффекта нестационарной дифракции в геометрии отражения свидетельствует, о том, что время формирования отраженной волны в веществе по крайней мере меньше периода колебания поверхности. Вместе с тем вопрос о времени отражения нейтронных и рентгеновских волн в условиях превышения углом скольжения критического угла полного внутреннего отражения сегодня остается открытым [20-21]. Любая экспериментальная информация, проливающая свет на эту проблему, является очень важной.

Второе важное обстоятельство состоит в том, что при возбуждении на поверхности вещества ПАВ в колебательное движение вовлекается относительно толстый слой вещества, в котором и формируется отраженная волна. При этом вещество движется с периодически меняющимся ускорением, величина которого достигает гигантских величин. В частности, при частоте ПАВ в сотни МГц это ускорение достигает значения 108g. Поэтому экспериментальное исследование дифракции нейтронов на ПАВ можно рассматривать также как чувствительный тест для проверки справедливости общепринятых законов нейтронной оптики в случае больших ускорений [22].

Помимо исследования нестационарной дифракции на ПАВ в рамках предлагаемой темы предполагается предпринять работы, направленные на развитие нейтронной спиновой интерферометрии (НСИ) с ультрахолодными нейтронами (УХН) [10]. Физическая основа явления тесно связана с квантовой картиной прецессии спина в присутствии как постоянного магнитного поля, так и возмущающего потенциала, с которым нейтрон взаимодействует. Технически речь идет о создании миниатюрного спин-эхо спектрометра УХН, что представляет собой довольно трудную задачу. Некоторые пути ее решения намечены в работе [23]

Помимо задачи собственно создания такого спектрометра для УХН мы планируем использовать развитую методику НСИ как для фундаментальных исследований, так и для создания новых методов прикладных исследований. В частности, для измерения времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами планируется использовать метод ларморовских часов. Этот метод был предложенный в качестве теоретического приема в вычисления времени рассеяния нейтрона в работах [24, 25] а много позже возможность его практического применения была продемонстрирована в экспериментах с холодными нейтронами [23, 26]. Поскольку чувствительность метода пропорциональна кубу длины волны, использование УХН в такого рода экспериментах откроет совершенно новые экспериментальные возможности.

Еще одна возможность, возникающая благодаря развитию техники НСИ с УХН, состоит в возможности нового подхода к проблеме фазового контраста в нейтронной оптике [23, 27].

* 1. Исследование взаимодействия нейтронов низких энергий с алмазными наночастицами.

При проведении исследований структуры вещества, в том числе и магнитной структуры, особенно важны нейтроны низких энергий, так называемые холодные нейтроны, с длиной волны более 0,4 нм, или энергией меньшей 5 мэВ. Большая длина волны таких нейтронов позволяет применять их для исследования структурных особенностей размерами от долей нанометра и более.

Для извлечения нейтронов из нейтронных источников, например активной зоны реактора, часто используются отражатели нейтронов, которые позволяют значительно (в некоторых случаях многократно) поднять интенсивность нейтронных пучков, доступных для проведения научных исследований. Однако, в настоящее время эффективных отражателей холодных нейтронов нет нигде в мире. Одним из инновационных решений, предложенных участниками нашей группы, является разработка отражателей нейтронов на основе порошков детонационных наноалмазов (ДНА). Применение таких отражателей наиболее эффективно для нейтронов в диапазоне энергий от ~0,3 мкэВ до ~5,0 мэВ. В течение последних 15 лет нашей группой был выполнен целый пласт, как теоретических, так и экспериментальных исследований по созданию таких отражателей [28–35].

В зависимости от решаемых научных задач диапазон энергий холодных нейтронов обычно делится на две области: от ~0,3 мкэВ до ~0,1 мэВ – очень холодные нейтроны (ОХН); и от ~0,1 мэВ до ~5,0 мэВ – холодные нейтроны (ХН). Теоретические оценки показывают, что для каждого из этих диапазонов энергий можно получить эффективные отражатели из ДНА несколько разных типов. Для ОХН можно получить отражатели с коэффициентом отражения (альбедо) ~99.5% даже при нормальном падении нейтронов на поверхность порошка ДНА [36]. Для ХН эффективное отражение возможно только при падении нейтронов под малым скользящим углом к поверхности порошка ДНА – менее 5 градусов. При этом угол отражения оказывается близок к углу падения – т. н. квази-зеркальное отражение [37].

В результате комплексных исследований с участием сотрудников ЛНФ, были разработаны технологии и методы, позволившие существенно улучшить качество порошков ДНА: понизить концентрации примесей, уменьшающих альбедо нейтронов, и примесей, которые активируются в интенсивных нейтронных полях. Чтобы снизить содержание химически связанного водорода в 30 раз (источника основных потерь ОХН и ХН), был предложен и реализован метод замещения с поверхности наноалмазов атомов водорода на атомы фтора [38]. При этом структура порошка и отдельных наночастиц в результате такой процедуры не изменяются [39]. Были также проведены процедуры структурных изменений ДНА: разбиение больших кластеров ДНА на отдельные наночастицы (деагломерация) [40] и сепарация ДНА по размерам [41]. Все перечисленные модификации порошков ДНА потенциально должны улучшить альбедо наноалмазных отражателей ОХН и ХН.

Научные задачи, которые планируется решить по данному направлению исследования в рамках проекта:

1. Определение оптимальных технологий синтеза и модификаций порошков ДНА для создания наноматериалов с заранее известными свойствами, которые позволят создать на их основе наиболее эффективные отражатели ОХН и ХН. Запланированные работы позволят дать ответ на вопрос о том, какие порошки ДНА обладают наибольшим альбедо на данный момент, чтобы использовать их в полномасштабных отражателях, а последние – в конструкциях источников ОХН и ХН [42].
2. Определение оптимальной плотности порошков ДНА для достижения максимального альбедо ОХН и ХН. Дело в том, что концентрации наночастиц в порошке ДНА низкой плотности может оказаться недостаточно для эффективного отражения ОХН и ХН. В то же время, при повышении плотности порошка падает вероятность рассеяния нейтронов на большие углы, в связи с уменьшением вероятности рассеяния на отдельных наночастицах. При этом растет вероятность рассеяния на малые углы, за счет увеличения вероятности рассеяния на агломератах (крупных кластерах «слипшихся» частиц), размеры которых будут расти по мере увеличения плотности порошка, а углы рассеяния будут уменьшаться. Таким образом, должен существовать оптимум плотности порошка, который давал бы максимальное отражение при фиксированных размерах образцов ДНА.
3. Развитие моделей расчета транспорта ОХН и ХН в материале наноалмазных отражателей. Сотрудниками ЛНФ ранее уже были предложены модели транспорта нейтронов низких энергий в нанодисперсных средах. Такие модели реализованы в виде оригинальных расчетных комплексов [43, 44], которые требуют предварительного создания структурной модели порошка ДНА [45]. Алгоритм формирования структурой модели порошка ДНА также был ранее предложен: он основывается на данных малоуглового рассеяния нейтронов. Для увеличения производительности расчетов транспорта ОХН и ХН в материале наноалмазных отражателей сложных геометрий требуется интегрировать предложенные модели и алгоритмы в существующие программы моделирования взаимодействия нейтронов с веществом (Geant4, MCNP и др.).
4. Расширение области применимости разработанных моделей на диапазон тепловых нейтронов. Для таких нейтронов немаловажных процессом взаимодействия с ДНА является дифракция на кристаллической решетке, которая не учитывается в существующих сейчас моделях транспорта ОХН и ХН. Уровень влияния этого механизма на распространение нейтронов никем пока не был оценен. По этой причине на данный момент невозможно моделировать квази-зеркальное отражение от порошков ДНА нейтронов с длинами волн ниже брэгговского предела для алмаза ~0,4 нм [35]. Запланированные исследования с тепловыми нейтронами позволят оценить влияние брэгговской дифракции на алмазных нанокристаллитах и создать новые модели, учитывающие этот вклад в транспорте нейтронов.
5. Исследование устойчивости отражателей ДНА к внешним воздействиям. Предполагалось, что в результате фторирования порошки наноалмаза становятся гидрофобными, что подтверждалось результатами термогравиметрии. Однако, выполненные через три года дополнительные измерения по регистрации и анализу мгновенных гамма-квантов показали существенное, в 6 раз, увеличение химически связанного водорода в образцах. Дополнительно это было подтверждено результатами комбинационного рассеяния света и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Таким образом, требуется изучить механизм обратного замещения фтора на водород на поверхности наноалмазов, насколько порошки наноалмазов при фторировании сохраняют свои физико-химические характеристики и насколько они стабильны при воздействии окружающей среды (температуры, влажности, элементного состава атмосферы).
6. Изучение радиационной стойкости порошков наноалмазов при их облучении высокими дозами гамма-квантов и быстрыми нейтронами. Поскольку порошки наноалмаза планируется применять в качестве отражателей нейтронов, а это связано с размещением оборудования вблизи активной зоны реактора, такое размещение приводит к значительным радиационным нагрузкам, вызванным как большим потоком гамма-квантов, так и облучением нейтронами высоких энергий (быстрыми нейтронами).
	1. Исследование взаимодействия холодных нейтронов с интеркалированным графитом.

Брегговское рассеяние на кристалле возможно только в случае, если длина волны излучения не превышает двойного расстояния между кристаллическими плоскостями. Обычно в природных кристаллах межплоскостное расстояние не превышает ~2 Å, поэтому нейтроны с длиной волны более ~4 Å перестают на них рассеиваться. Именно благодаря этому свойству такие нейтроны выделяются в отдельную группу, называемую холодными нейтронами. Однако можно создавать искусственные кристаллы, у которых межплоскостное расстояние может быть в несколько раз больше. Обычно, при производстве таких кристаллов за основу берется монокристалл графита и между его кристаллическими плоскостями внедряются атомы другого вещества, которые раздвигают плоскости графита. Таким образом получается интеркалированный графит, который может эффективно рассеивать холодные нейтроны. Однако, такие кристаллы не являются в достаточной мере радиационно-стойкими, чтобы их можно было использовать вблизи активной зоны реактора.

Не так давно появилась технология внедрения между плоскостями графита цельной плоскости (или двух плоскостей) атомов фтора. Такой материал представляется перспективным в качестве отражателя холодных нейтронов, который можно использовать в сильных полях ионизирующего излучения. Исследование такого материала является одним из потенциальных направлений деятельности.

Литература:

1. И. М. Франк, Сообщения ОИЯИ Р4-8851, Дубна (1975)

2. V.I. Luschikov and A.I. Frank. JETP Letters 28 (1978) 560.

3. A.I.Frank, V.G.Nosov. Physics Letters A. v.188 (1994) 120-124.

4. A.I.Frank, V.G.Nosov Physics of Atomic Nuclei, v.57, N6 (1994) 968-974

5. A.I.Frank, V.G.Nosov*.* Annals of the New York Academy of Science V. 755 (1995) 293-302

6. A.I.Frank, D.B. Amandzholova. Annals of the New York Academy of Science V. 755 (1995) 858-860.

7. V.G.Nosov, A.I.Frank. J.cPhys. Soc. Jpn. v 65, Suppl. A (1996) 13-18.

8. D.B. Amandzholova, V.G. Nosov, A.I. Frank, Surface Investigation X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 12, № 9 (1997) 1081-1092.

9. Frank A. I., Balashov S. V., Bodnarchuk V. I. et al.Proc. SPIE Vol. 3767 (1999) 360-371.

10. V.G. Baryshevskii, S.V. Cherepitsa, A.I. Frank. Phys. Lett. A 153 (1991) 299-302.

11. A.V. Kozlov, A.I. Frank.Physics of Atomic Nuclei. v.58 (2005) 1104-1119.

12. A.I. Frank, S.N. Balashov, I.V. Bondarenko et al. Physics Letters A 311 (2003) 6-12.

13. А. И. Франк, П. Гельтенборт, Г.В. Кулин и др. Сообщения ОИЯИ P3-2004-207, Дубна (2004)

14. G. V. Kulin, A. I. Frank, S. V. Goryunov et al. Phys. Rev. A 93 (2016) 033606

15. A.I.Frank and R.Gähler. Physics of Atomic Nuclei, v.63 (2000) 545-547.

16. S.N. Balashov, I.V. Bondarenko, A.I. Frank et al*.* Physica B, 350 (2004) pp. 246-249

17. A.I. Frank, P.Geltenbort, M.Jentschel et al. JETP Letters, 2007, Vol. 86. No. 4, pp. 225–229.

18. G. V. Kulin, A. I. Frank, V. A. Bushuev et al. Physical Review B 101 (2020) 165419.

19. W. A. Hamilton, A. G. Klein, G. I. Opat, and P. A. Timmins. Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 277.

20. V. A. Bushuev, A.I.Frank. Physics – Uspekhi, 61 (10) (2018) 952-964.

21. В.А. Бушуев, А.И.Франк. Материалы XXIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Том 1 (2019) 434-435.

22. A.I. Frank. JETP Letters 100 (2014) 613.

23. A.I. Frank, I.Anderson, I.V. Bondarenko et al. Physics of Atomic Nuclei 65 (2002) 2009-2020

24. A.I. Baz’, Sov. J. Nucl. Phys. 4 (1967) 182.

25. V.F. Rybachenko, Sov. J. Nucl. Phys. 5 (1967) 635

26. A.I.Frank, I.V. Bondarenko, V.V. Vasil’ev et al. JETP Letters, 75 (2002) 705-709.

27. С. В. Масалович. ЖТФ 62 (1992) 164

28. V. V. Nesvizhevsky, M. Dubois, Ph. Gutfreund, E. V. Lychagin, A. Yu. Nezvanov, and K. N. Zhernenkov., Phys. Rev. A 97, 023629 (2018).

29. V. A. Artem’ev, V. V. Nesvizhevsky, and A. Y. Nezvanov, Proceedings of the XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, 23 (2018).

30. V. A. Artem’ev, A. Y. Nezvanov, and V. V. Nesvizhevsky, Crystallogr. Rep. 61, 84 (2016).

31. V. A. Artem’ev, V. V. Nesvizhevsky, A. Y. Nezvanov, and A.L. Proskuryakov, Proceedings of the XXIII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, 111 (2016).

32. A. R. Krylov, E. V. Lychagin, A. Yu. Muzychka, V. V. Nesvizhevsky, G. V. Nekhaev, A. V. Strelkov, and A. S. Ivanov., Crystallography Reports 56(7), 102 (2011).

33. E. V. Lychagin, A. Yu. Muzychka, G. V. Nekhaev, V. V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K. V. Protasov, A. V. Strelkov, Physics Letters B 67, 186 (2009).

34. V. V. Nesvizhevsky, E. V. Lychagin, A. Y. Muzychka, A. V. Strelkov, G. Pignol, and K. V. Protasov Nucl. Instrum. Meth. A 595, 631 (2008).

35. Bosak A., Dubois M., Korobkina E., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Nesvizhevsky V., Nezvanov A., Saerbeck T., Schweins R., Strelkov A., Turlybekuly K., Zhernenkov K., Materials 16, 703 (2023).

36. V. V. Nesvizhevsky, E. V. Lychagin, A. Y. Muzychka, A. V. Strelkov, G. Pignol, and K. V. Protasov Nucl. Instrum. Meth. A 595, 631 (2008).

37. R. Cubitt, E. V. Lychagin, A. Yu. Muzychka, G. V. Nekhaev, V. V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K. V. Protasov, A. V. Strelkov., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 622,182 (2010).

38. V. Nesvizhevsky, U. Koster, M. Dubois, N. Batisse, L. Frezet, A. Bosak, L. Gines, O. Williams, Carbon 130, 799e805 (2018).

39. A. Bosak, A. Dideikin, M. Dubois, O. Ivankov, E. Lychagin, A. Muzychka, G. Nekhaev, V. Nesvizhevsky, A. Nezvanov, R. Schweins, A. Strelkov, A. Vul’, and K. Zhernenkov, Materials 13(15), 3337 (2020).

40. A. Aleksenskii, M. Bleuel, A. Bosak, A. Chumakova, A. Dideikin, M. Dubois, E. Korobkina, E. Lychagin, A. Muzychka, G. Nekhaev, V. Nesvizhevsky, A. Nezvanov, R. Schweins, A. Shvidchenko, A. Strelkov, K. Turlybekuly, A. Vul’, and K. Zhernenkov, Nanomaterials 11, 1945 (2021).

41. A. Aleksenskii, M. Bleuel, A. Bosak, A. Chumakova, A. Dideikin, M. Dubois, E. Korobkina, E. Lychagin, A. Muzychka, G. Nekhaev, V. Nesvizhevsky, A. Nezvanov, R. Schweins, А. Shvidchenko, A. Strelkov, K. Turlybekuly, А. Vul’ and K. Zhernenkov, Nanomaterials 11, 3067 (2021).

42. Chernyavsky S., Dubois M., Korobkina E., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Nesvizhevsky V., Nezvanov A., Strelkov A., Zhernenkov K., Review of Scientific Instruments 93, 123302 (2022).

43. Незванов А.Ю., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618099 Российская Федерация. Заявитель и правообладатель А.Ю. Незванов. – № 2015614757; заявл. 04.06.2015; зарегистр. 30.07.2015. – 1 с.

44. Незванов А.Ю., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612455 Российская Федерация. Заявитель и правообладатель А.Ю. Незванов. – № 2015663305; заявл. 30.12.2015; зарегистр. 29.02.2016. – 1 с.

45. Незванов А.Ю., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662675 РФ. Заявитель – А.Ю. Незванов; правообладатель – ОИЯИ. – № 2020661661; заявл. 05.10.2020; зарегистр. 16.10.2020. – 1 с.

1. **Подпроект « Прикладные исследования»**

*Аналитические исследования на установке РЕГАТА*

В рамках проекта планируется продолжение работ по мониторингу качества воздуха и состояния водных объектов стран-участниц ОИЯИ, используя целый ряд аналитических методов, в частности нейтронный активационный анализ на установке РЕГАТА реактора ИБР-2. Также будет развивается направление нанотоксикология, где в качестве объектов исследования будут использованы микроорганизмы, растения и животные. Особое внимание будет уделено разработке методов очистки вод и почв, а также оценке качества продуктов питания. Метод нейтронного активационного анализа обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими методами элементного анализа, среди, которых стоит отметить его высокую чувствительность и селективность, простоту подготовки проб к анализу и возможность определения более 50 химических элементов в широком диапазоне концентраций.

В результате выполнения проекта:

- будут получены новые данные по экологическому состоянию изучаемых регионов, выявлены ареалы загрязнений на исследованных территориях и проведено сравнение с ранее полученными данными;

- будет изучен процесс накопления накопление наночастиц в органах животных и сегментах растений, а также оценено их влияние на здоровье изучаемых живых объектов;

- будут предложены новые экологически дружелюбные методы ремедиации почв и водных объектов.

*Прикладные исследования на установке ИРЕН*

Исследование объектов культурного наследия физико-химическими методами имеет важное значение как с научной, так и с практической точки зрения. Возможностей традиционных методов гуманитарных наук в названной области к настающему времени недостаточно, поэтому искусствоведы, реставраторы и археологи всё чаще объединяют свои научные усилия с физиками и химиками. Проанализированные результаты естественнонаучных исследований открывают новые возможности и подходы к изучению объектов культурного наследия. Кроме того, в рамках современного метода научной реставрации исключена возможность подготовки реставрационных проектов без предварительного изучения памятников инструментальными методами.

К настоящему времени в ЛНФ ОИЯИ накоплен значительный опыт по исследованию объектов культурного наследия различного происхождения. Будет продолжено использование нейтронных методов для изучения монументальной живописи, строительных материалов прошлого, археологических артефактов, экологических, геологических и иных образцов. Для проведения массового многоэлементного нейтронного активационного анализа будут использованы возможности установки ИРЕН и реактора ИБР-2. Элементный состав по короткоживущим изотопам будут определять с применением пневмотранспортной системы РЕГАТА-2 на установке ИРЕН. Облучение образцов для элементного анализа по средне- и долгоживущим изотопам будут проводить с помощью установки на 3-м канале реактора ИБР-2, а также непосредственно на поверхности замедлителя установки ИРЕН. Кроме того, для полностью неразрушающего активационного анализа на мгновенных гамма квантах будут использовать канал 11б реактора ИБР-2.

Еще один достаточно оригинальный метод абсолютно неразрушающего элементного и изотопного анализа образов – метод по анализу нейтронных резонансов. Метод основан на регистрации нейтронных резонансов при радиационном захвате и измерении выхода продуктов реакции в этих резонансах. При этом необходим импульсный источник резонансных нейтронов (в нашем случае ИРЕН) и применение спектрометрии нейтронов по времени пролета. Планируется продолжение совместной исследовательской работы по изучению материалов, предоставленных Институтом археологии РАН и другими организациями. В рамках данных исследований планируются работы по созданию многосекционного пластикового сцинтилляционного детектора. Для сбора и предварительного анализа данных будет использован оцифровщик ЦРС - 2/6/32.

Наряду с нейтронными методами определения элементного состава будет использован рентгено-флуоресцентный анализ. Для повышения эффективности решения поставленных задач будут применять взаимодополняющие методы инфракрасной и рамановской спектроскопии, оптической и поляризационной микроскопии, химического микроанализа и некоторые другие с применением дополнительного лабораторного оборудования.

В рамках темы запланированы методические работы по определению потенциальных возможностей проведения гамма активационного анализа с применением пневмотранспортной системы РЕГАТА-2 и активационного анализа на мгновенных гамма квантах на 6-м канале установки ИРЕН, а также создание соответствующих методик.

*Прикладные работы на ускорителе ЭГ-5*

Имеющийся в ЛНФ ОИЯИ электростатический ускоритель ЭГ-5 после модернизации будет способен генерировать пучки легких заряженных частиц **(p,d,α)** с высокой стабильностью характеристик (энергии до 4,1 МэВ, ток до 250 мкА, параметры можно менять в широких пределах в зависимости от потребностей эксперимента). С использованием этой установки можно решать следующие задачи:

1. Получать интенсивные (около 109 n/сек) потоки быстрых нейтронов с помощью реакций d(d,n)3He, d(t,n)4He, 7Li(p,n)7Be
2. Выполнять элементный анализ поверхностных слоев различных объектов с помощью пучков α-частиц, используя неразрушающие методики RBS, ERD и PIXE.
3. Проводить имплантацию ионов в поверхностные слои различных материалов

Данные о характеристиках реакций, индуцированных быстрыми нейтронами, представляют значительный интерес для изучения механизмов ядерных реакций, структуры атомных ядер, проведения расчетов при создании новых установок для ядерной энергетики. Получение ядерных данных и развитие ядерно-физических методик элементного анализа является одной из приоритетных задач проекта. Возможно создание установки для неразрушающего элементного анализа на мгновенных характеристических гамма-квантах, испускаемых продуктами ядерных реакций с быстрыми нейтронами. Ее преимуществом будет является возможность изменять спектр нейтронного излучения в широких пределах, как за счет изменения энергии налетающих заряженных частиц, так и путем замены производящей мишени, что позволит исследовать энергетическую зависимость сечений и использовать ее для уточнения результатов определения элементного состава.

Высокая интенсивность нейтронного потока позволяет выполнять исследования радиационной стойкости различных объектов, в том числе, электронных компонентов на новых физических принципах, разрабатываемых группой. В рамках подпроекта также предполагается изучать влияние нейтронного облучения на объекты живой (липидные мембраны, зерна злаковых культур, плесневых грибов) и неживой природы (кремниевые многослойные архитектуры, оксидные керамики, металлы, сверхпроводящие сплавы).

С использованием ЭГ-5 на пучках α-частиц можно получать профили концентраций элементов с разрешением по глубине до 10 нанометров. Имеется уникальная возможность исследования слоистых структур с помощью методик RBS, ERD и PIXE, которая особенно перспективна для исследования многослойных высокотемпературных сверхпроводниковых систем. Ведутся работы по исследованию процессов ионной имплантации поверхности твердых тел.

**Ожидаемые научные результаты:**

* Уточнение характеристик известных резонансов, обнаружение ранее неизвестных. Измерение сечений реакций и корреляций продуктов в резонансной области с точностью, достаточной для исследования P- и T-нечетных эффектов.
* Выполнение экспериментов по исследованию TRI и ROT эффектов в делении, измерению массово-энергетических и угловых распределений осколков, мгновенных нейтронов и гамма-квантов; поиску редких и экзотических мод деления, как с использованием ИБР-2, так и сторонних источников.
* Проведение экспериментальных и теоретических исследований нейтрон-ядерных реакций в широком диапазоне энергий налетающих частиц.
* Исследование картины нестационарной дифракции нейтронов на поверхностных акустических волнах. Проверка справедливости общепринятых законов нейтронной оптики в случае больших ускорений.
* Развитие моделей расчета транспорта ОХН и ХН в материале наноалмазных отражателей и расширение области их применимости на диапазон тепловых нейтронов.
* Изучение структуры графитов после их интеркалирования и измерение сечений рассеяния холодных нейтронов интеркалированными графитами.
* Получение данных для ядерной энергетики и астрофизики: измерение интегральных и дифференциальных нейтронных сечений, угловых корреляций в области энергии от холодных нейтронов до сотен МэВ.
* Изучение радиационной стойкости различных материалов, в том числе, перспективных для применения в качестве отражателей и замедлителей нейтронов. Исследование радиационной стойкости электронных компонентов, в том числе, работающих на новых физических принципах.
* Получение новых данных и мониторинг экологической обстановки в отдельных регионах стран-участниц ОИЯИ с помощью НАА.
* Исследование влияния нейтронного облучения на свойства живых объектов
* Исследование слоистых структур, в том числе, высокотемпературных сверхпроводников с помощью методик RBS, ERD и PIXE.
* Выполнение элементного анализа различных объектов культурного наследия.

**Ожидаемые методические результаты:**

* Развитие методики нейтронной спиновой интерферометрии с УХН.
* Определение оптимальных технологий синтеза и модификаций веществ для использования в качестве отражателей УХН и ХН.
* Разработка методов очистки вод и почв, оценки качества продуктов питания.
* Изучение процессов накопления наночастиц в органах животных и растений, оценка их влияния на здоровье изучаемых живых объектов.
* Разработка методики неразрушающего элементного анализа на мгновенных гамма-квантах. Усовершенствование существующих методик активационного анализа на тепловых и резонансных нейтронах.
* Выполнение работ по созданию электроники и датчиков ионизирующих излучений на новых физических принципах.

Полученные в ходе реализации проекта фундаментальные результаты будут иметь важное значение для понимания механизмов нейтрон-ядерных реакций и развития теоретических представлений об этих процессах. Исследование P- и T-нечетных эффектов даст информацию о величине вклада слабого взаимодействия в ядерные силы и может служить альтернативным методом определения коэффициента смешивания Vud СКМ-матицы. Получение новой информации о ROT и TRI-эффектах, а также экзотических модах деления позволит прояснить особенности одного из этапов этого процесса - разрыва делящегося ядра на фрагменты. Данные, полученные при выполнении нейтронно-оптической части проекта, будут необходимы для создания новых замедлителей и отражателей нейтронов. Кроме того, они позволят существенно продвинуться в разработке методов нейтронной микроскопии и исследованиях магнитной структуры различных объектов.

Выполнение прикладной программы проекта будет способствовать прогрессу экологических, материаловедческих, археологических и нанотехнологических исследований. Создаваемые и модернизируемые методики элементного и структурного анализа будут востребованы во многих отраслях человеческой деятельности.

**Риски**

**ССВУ анализ**

 Выполнение проекта предполагается силами коллектива ОЯФ ЛНФ, имеющего большой опыт в изучении нейтрон-ядерных реакций и проведении прикладных исследований. В его состав входит как большое число молодых (до 35 лет, 44 человека), так и более опытных (77 человек) сотрудников. Многие имеют степени кандидатов и докторов наук. В распоряжении коллектива имеется значительное число детекторов различных типов, позволяющих регистрировать практически любые продукты нейтрон-ядерных взаимодействий. Некоторое оборудование (детекторные сборки, ионизационные камеры, мишени для ускорителей, оцифровщики, устройства автоматизации) может быть создано силами коллектива. Это, бесспорно, является сильной стороной проекта.

 В ходе программы исследований предполагается использование большого числа объектов научной инфраструктуры как ЛНФ ОИЯИ (ИБР-2, ИРЕН, ЭГ-5, ТАНГРА), так и сторонних организаций: n\_TOF (CERN), ЭГ-4.5 (Пекинский университет, Китай), ускорители HI-13 (CIAE, Китай), что может привести к рискам сокращения научной программы из-за изменений международной обстановки, что можно отнести к умеренно слабой стороне проекта. В то же время, значительная часть экспериментов может быть проведена на установках, имеющихся в ОИЯИ.

Установки, имеющиеся в ЛНФ, нуждаются в текущем ремонте, модернизации и сертификации, что может быть фактором, затрудняющим выполнение проекта. Тем не менее, к настоящему моменту отсутствуют значительные проблемы в приобретении критически необходимых компонентов для проведения ремонтных работ и проведения сертификации объектов научной инфраструктуры, поэтому в случае осложнений можно ожидать лишь замедления исследований.

**2.3. Предполагаемый срок выполнения**

Сроки выполнения проекта: 2024 – 2028 гг.

Научная программа проекта будет планомерно реализовываться в течение указанного периода.

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

В ходе выполнения проекта планируется сотрудничество с другими лабораториями ОИЯИ: ЛИТ, ЛТФ, ЛЯР, ЛЯП, ЛФВЭ, ЛРБ.

Потребности в ресурсах МИВК:

|  |  |
| --- | --- |
| **Вычислительные ресурсы** | **Распределение по годам** |
| **1 год** | **2 год** | **3 год** | **4 год** | **5 год** |
| Хранение данных (ТБ)- EOS- Ленты |  |  |  |  |  |
| Tier 1 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| Tier 2 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| СК «Говорун» (ядро-час)- CPU- GPU |  |  |  |  |  |
| Облака (CPU ядер) |  |  |  |  |  |

**2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации:**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Страна или****международная****организация** | **Город** | **Институт или****лаборатория** | **Участники** | **Статус** |
| Австралия | Мельбурн | Ун-т | Клейн А.Г. + 3 чел. | Совместные работы |
| Австрия | Инсбрук | Ун-т | Цайлингер + 1 чел. | Совместные работы |
| Азербайджан | Баку | БГУ | Гаджиева С.Р. | Совместные работы |
| ИГГ НАНА | Гусейнов Д.А. | Совместные работы |
| ИРП НАНА | Самедов О.А. | Совместные работы |
| Албания | Тирана | UT | Лазо П. + 3 чел. | Совместные работы |
| Армения | Ереван | НИЦИКН | Симонян А.Е.Ханзатян Г.А. | Протокол |
| Беларусь | Минск | БГУ | Ксеневич В.К. + 2 чел. | Совместные работы |
|  |  | НИИ ЯП БГУ | Максименко С.А. + 2 чел. | Совместные работы |
| НПЦ НАНБ по материаловедению | Игнатенко О.В. + 3 чел. | Совместные работы |
| Германия | Майнц | JGU | Рис Д. | Совместные работы |
| Мюнхен | TUM | Кленке Й., Лауэр Т.  | Совместные работы |
| Грузия | Тбилиси | AIP TSU | Джапаридзе Г. + 4 чел. | Совместные работы |
| Сапожникова Н.А. | Протокол |
| TSU | Шетекаури Ш. + 5 чел. | Совместные работы |
| Египет | Александрия | Ун-т | Бадави М.С. + 3 чел. | Совместные работы |
| Гиза | CU | Шериф М. | Совместные работы |
| Каир | NRC | Ибрагим М. + 3 чел. | Совместные работы |
| Шибин-эль-Ком | MU | Эль Самман Х. + 5 чел. | Совместные работы |
| Эль-Мансура | MU | Саллах М. + 2 чел. | Совместные работы |
| Индия | Варанаси | BHU | Кумар А. + 3 чел. | Совместные работы |
| Италия | Рим | ENEA | Карта М. + 2 чел. | Совместные работы |
| Казахстан | Алма-Ата | ИЯФ | Глущенко В.Н. | Совместные работы |
|  | Астана | ЕНУ | Ленник С.Г. | Протокол |
| Омарова Ню + 5 чел. | Совместные работы |
| Кызылорда | КазНИИР | Дуйсембеков Б.А. | Протокол |
| Китай | Пекин | IHEP CAS | Чаи Зифанг + 3 чел. Чжан Гуахуэй + 5 чел. | Совместные работы Совместные работы |
| Сиань | NINT | Сун Чжаохуэ + 3 чел. |  |
| МАГАТЭ | Вена | МАГАТЭ | Фесенко С. | Совместные работы |
| Молдова | Кишинев | ИМБ АНМ | Рудь Л.Б. | Протокол |
| ИХ | Чокырлан А.Г. | Протокол |
| Монголия | Улан-Батор | CGL | Балжинням Н. + 2 чел. | Обмен визитами |
| Совместные работы |
| NRC NUM | Хуухэнхуу Г. + 3 чел. | Совместные работы |
| Польша | Вроцлав | UW | Косиор Г. + 5 чел. | Совместные работы |
| Гданьск | GUT | Бизюк М. + 4 чел. | Совместные работы |
| Краков | INP PAS | Годзик Б. + 4 чел. | Совместные работы |
| Юрковски Я. + 1 чел. |  |
| Лодзь | UL | Анджеевски Ю. + 3 чел. | Совместные работы |
| Люблин | UMCS | Жук Е. + 3 чел.Ясиньская Б. + 7 чел. | Совместные работы |
| Ополе | UO | Вацлавек М. + 5 чел. | Совместные работы |
| Отвоцк (Сверк) | NCBJ | Мияновский С. | Совместные работы |
|  |  | Поланский А. + 2 чел. |  |
| Познань | AMU | Блащак З. + 4 чел. Навроцик В. + 4 чел. | Совместные работы |
| Республика Корея | Пхохан | PAL | Ким Г. + 3 чел. | Совместные работы |
| Сеул | Dawonsys | Ким Донг Су | Совместные работы |
| Тэджон | KAERI | Чанг Д. | Совместные работы |
| Россия | Архангельск | САФУ | Есеев М.К. | Протокол |
| Борок | ИБВВ РАН | Цельмович В.А. + 2 чел. | Совместные работы |
| Владикавказ | СОГУ | Лабриненко Ю.В.Тваури И.В. | Совместные работы |
| Воронеж | ВГУ | Вахтель В.М.Кадменский С.Г. + 3 чел. | Совместные работы |
| Гатчина | НИЦ КИ ПИЯФ | Воробьев А.С. + 3 чел.Воронин В.В. + 10 чел. | Совместные работы |
| Грозный | ЧГПУ | Оказова З.П. | Совместные работы |
| Долгопрудный | МФТИ | Рогачев А.В. | Протокол |
| Дубна | Гос. ун-т "Дубна" | Моржухина С.В. + 5 чел.Сеннер А.Е. + 3 чел. | Совместные работы |
| Диамант | Сыроватская Т.Н. | Совместные работы |
| Екатеринбург | УрФУ | Кружалов А.В. + 5 чел. | Совместные работы |
| Иваново | ИГХТУ | Гриневич В.И.Дунаев А.М. | Совместные работы |
|  |
| Ижевск | УдГУ | Бухарина И.Л.Зубцовский Н. | Совместные работы |
| Иркутск | ЛИН СО РАН | Ходжер Т.В. | Совместные работы |
| Москва | АО "МНРХУ" | Серегина Е.И. | Протокол |
| ВНИИА | Боголюбов Е.П. + 1 чел. | Совместные работы |
| ГИИ | Царевская Т.Ю. | Протокол |
| ГИН РАН | Ляпунов С.М. + 3 чел. | Совместные работы |
| ИА РАН | Вдовиченко М.В. | Протокол |
| ИКИ РАН | Митрофанов И.Г. + 5 чел. | Совместные работы |
| ИОФ РАН | Михайлова Г.Н. | Совместные работы |
| ИТЭФ | Беда А.Г.Данилян Г.В. + 3 чел. | Совместные работы |
| ИФХЭ РАН | Сафонов А.С. + 3 чел. | Совместные работы |
| МГМУ | Каралкин П.Д. | Протокол |
| МГУ | Бацевич В.А. + 2 чел. | Совместные работы |
| Белохин В.С. | Протокол |
| Бушуев В.А. | Совместные работы |
| Краснушкин А.Б. + 1 чел. | Совместные работы |
| НИИЯФ МГУ | Третьякова Т.Ю. + 2 чел. | Протокол |
| Чувильский Ю.М. + 1 чел. | Совместные работы |
| НИЦ КИ | Барабанов А.Л. + 2 чел. | Совместные работы |
| ФИЦ “Почвенный ин-т” | Болотов А.Г. | Протокол |
| Москва, Троицк | ИЯИ РАН | Джилкибаев Р.М. | Протокол |
| Кузнецов В.Л. | Совместные работы |
| Нижн. Новгород | ИФМ РАН | Салащенко Н.Н.Чхало Н.И. + 1 чел. | Совместные работы |
| Обнинск | ФЭИ | Грудзевич О.Т. + 10 чел. | Совместные работы |
| Пермь | ПГНИУ | Гатина Е.Л. | Соглашение |
| С.-Петербург | Ботанический сад БИН РАН | Ткаченко К.Г. + 3 чел. | Совместные работы |
|  | НИИФ СПбГУ | Бунаков В.Е. + 1 чел. | Совместные работы |
| РИ | Смирнов А.Н. + 1 чел. | Совместные работы |
| СПбГЛТУ | Алексеев А.С. + 10 чел. | Совместные работы |
| СПГУ | Василенко Т.А. | Протокол |
| ФТИ им. А.Ф. Иоффе | Вуль А.Я. + 5 чел. | Совместные работы |
| Севастополь | ИнБЮМ | Мильчакова Н.А. + 2 чел. | Совместные работы |
| Тула | ТулГУ | Горелова С.В. | Совместные работы |
| Румыния | Бая-Маре | TUCN-NUCBM | Тодоран Р. + 3 чел. | Совместные работы |
| Бухарест | IFIN-HH | Гита Д. | Совместные работы |
| Дима О.Михай О. | Протокол |
| Пантелика А. + 3 чел.Сетнеску Р. | Совместные работы |
| IGR | Дулиу О. | Протокол |
| INCDIE ICPE-CA | Мирела М. + 5 чел. | Совместные работы |
| UB | Груя И.Дулиу О.Жила А.Лазану И.Тудора А. | Совместные работы |
| UPB | Фикай А. | Протокол |
| Галац | UG | Энэ А. + 3 чел. | Совместные работы |
| Клуж-Напока | INCDTIM | Соран Н.Л. | Совместные работы |
| Констанца | UOC | Белк М. + 2 чел. | Совместные работы |
| Мэгуреле | ISS | Потлог П.М. | Совместные работы |
| NIMP | Бадика П. + 6 чел.Станкулеску А. + 4 чел. | Совместные работы |
| Орадя | UO | Опреа А. + 3 чел.Филип С. | Совместные работы |
| Питешти | ICN | Преда М. | Совместные работы |
| Рымнику-Вылча | I.C.S.I. | Куруя М. + 3 чел.Опря К.Штефанеску И. | Совместные работы |
| Сибиу | ULBS | Бондреа И. | Протокол |
| Чисеа Д. + 8 чел. | Совместные работы |
| Тимишоара | UVT | Штеф М. + 4 чел. | Совместные работы |
| Тырговиште | VT | Бамвак М.Бамкута И.Радулеску К.Сетнеску Т. | Совместные работы |
| Стихи С. + 4 чел. | Протокол |
| Яссы | NIRDTP | Чирах Х.+ 2 чел. | Совместные работы |
|  | UAIC | Кармен М. + 5 чел. | Совместные работы |
| СевернаяМакедония | Скопье | UKiM | Стафилов Т. + 3 чел. | Совместные работы |
| Сербия | Белград | IPB | Аничич М. + 5 чел. | Совместные работы |
| Ун-т | Попович Д. | Совместные работы |
| Нови-Сад | UNS | Крмар М. + 3 чел. | Совместные работы |
| Словакия | Братислава | CU | Кучерка Н. + 5 чел. | Совместные работы |
| Холи К. | Совместные работы |
| IEE SAS | Гуран Е. |  |
| IP SAS | Климан Я. + 3 чел. | Совместные работы |
| Словения | Любляна | GeoSS | Шайн Р. | Совместные работы |
| США | Дарем, NC | Duke | Гоулд К. + 2 чел.Торноу В. | Договор |
| Лос-Аламос | LANL | Систрем С. + 5 чел. | Совместные работы |
| Ок-Ридж | ORNL | Келер П. | Совместные работы |
| Таиланд | Хатъяй | PSU | Бонгсуван Т. | Совместные работы |
| Турция | Чанаккале | COMU | Кошкун М. + 3 чел. | Совместные работы |
| Узбекистан | Ташкент | ИЯФ АН РУз | Артемов С.В. | Совместные работы |
| Финляндия | Йювяскюля | UJ | Тржаска В. | Совместные работы |
| Оулу | UO | Керонен А. + 3 чел. | Совместные работы |
| Франция | Гренобль | ILL | Гельтенборт П.Йенчель М.Несвижевский В. | Совместные работы |
| LPSC | Протасов К.В. + 2 чел. | Совместные работы |
| Кадараш | CC CEA | Соул Р. + 5 чел. | Совместные работы |
| Сакле | LLB | Лерой С. + 2 чел. | Совместные работы |
| Страсбург | IPHC | Стуттже Л. + 2 чел. | Совместные работы |
| Хорватия | Загреб | Oikon IAE | Спирич З. + 5 чел. | Совместные работы |
| RBI | Валкович + 2 чел. | Совместные работы |
| ЦЕРН | Женева | ЦЕРН | Киавери Э. + 12 чел. | Совместные работы |
| Чехия | Острава | VSB-TUO | Янчик П. | Совместные работы |
| Прага | CEI | Кучера Я. + 2 чел. | Совместные работы |
| CTU | Штекл И. + 15 чел. | Совместные работы |
| Ржеж | CVR | Патрик М. | Протокол |
| Швейцария | Виллиген | PSI | Лаусс Б. | Совместные работы |
| Шмидт-Веленбург Ф. | Совместные работы |
| ЮАР | Беллвилл | UWC | Петрик Л. + 5 чел. |  |
| Претория | UNISA | Софианос С. | Совместные работы |
| Стелленбос | SU | Безюденот Ж. + 3 чел. | Совместные работы |
| Япония | Киото | KSU | Кимура И. + 3 чел. | Совместные работы |
| Цукуба | KEK | Масуда Я. + 5 чел. | Совместные работы |

**2.6. Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN).*

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№****п/п** | **Категория****работника** | **Основной персонал,** **Сумма FTE** | **Ассоциированный** **Персонал****Сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 55 |  |
| 2. | инженеры | 35 |  |
| 3. | специалисты | 10 |  |
| 4. | служащие | 0 |  |
| 5. | рабочие | 2 |  |
|  | **Итого:** | **102** |  |

**3.2. Доступные кадровые ресурсы**

**3.2.1. Основной персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Категория работников**  | **ФИО** | **Подразделение** | **Должность**  | **FTE** |
| Научные работники | Лычагин Е.В. | ЛНФ | директор лаборатории |  |
| Копач Ю.Н. | ЛНФ | зам. директора лаборатории по научной работе |  |
| Швецов В.Н. | ЛНФ | нач. отделения |  |
| Седышев П.В. | ЛНФ | зам. нач. отделения |  |
| Федоров Н.А. + 58 чел. | ЛНФ | нач. сектора |  |
| Кулин Г.В. + 18 чел. | ЛНФ | нач. сектора |  |
|  | Зиньковская И. + 23 чел. | ЛНФ | нач. сектора |  |
| Специалисты | Пятаев В.Г. + 28 чел. | ЛНФ | главный инженер установки |  |
| Рабочие |  |  |  |  |
|  |  |

**3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Категория работников**  | **Организация-партнер** | **Сумма FTE** |
| Научныеработники |  |  |
| инженеры |  |  |
| специалисты |  |  |
| рабочие |  |  |
| **Итого:**  |  |  |

**4. Финансовое обеспечение**

**4.1. Полная сметная стоимость проекта/ подпроекта КИП**

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

4635 тыс. долл.

**4.2. Внебюджетные источники финансирования**

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков - общий объем.

**Руководитель проекта (подпроекта КИП)** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дата представления проекта (подпроекта КИП) в ДНОД: \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дата решения НТС лаборатории: \_\_\_\_\_\_\_\_\_ номер документа: \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Год начала проекта (подпроекта КИП): 2024 г.

(для продлеваемых проектов) –– год начала работ по проекту: \_\_\_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта / Подпроекта КИП**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Наименования затрат, ресурсов,** **источников финансирования** | **Стоимость (тыс. долл.)****потребности в ресурсах** | **Стоимость,** **распределение по годам**  |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
|  | Международное сотрудничество (МНТС) | 410 | 65 | 65 | 75 | 90 | 100 |
| Материалы  | 1000 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы) | 2755 | 425 | 525 | 555 | 600 | 650 |
| Пуско-наладочные работы |  |  |  |  |  |  |
| Услуги научно-исследовательских организаций  | 75 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Приобретение программного обеспечения | 410 | 70 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Проектирование/строительство |  |  |  |  |  |  |
| Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)* |  |  |  |  |  |  |
| **Необходимые ресурсы** | **Нормо-час** | Ресурсы |  |  |  |  |  |  |
| * сумма FTE,
 | 945000 | 189000 | 189000 | 189000 | 189000 | 189000 |
| * ускорителя/установки (ЭГ-5 и ИРЕН),
 | 12500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| * реактора ИБР-2
 | 12500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| **Источники финансирования** | **Бюджетные средства** | Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета 4, 5, 6, 10, 11)* | 4635 | 775 | 875 | 925 | 995 | 1065 |
| **Внебюджет (доп.смета)** | Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчикамиДругие источники финансирования  |  |  |  |  |  |  |

Руководитель проекта (подпроекта КИП) \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП**

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

**Исследование взаимодействия с нейтронов с ядрами и свойств нейтрона**

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

**ИВНЯСН**

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

 «Нейтронная ядерная физика»

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

П.В.Седышев, В.Н.Швецов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| СОГЛАСОВАНО |  |  |  |
| ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |  |
|  |  |  |  |  |
| ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_ДАТА |