

## 1.2. НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

### 1. Введение

В 2001 году экспериментальная программа в области нейтронной ядерной физики в ЛНФ им. И.М. Франка включала традиционные направления исследований: экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитных свойств нейтрона и его бета-распада; изучение процессов нарушения пространственной четности в делении ядер; исследование высоковозбужденных состояний ядра в реакциях захвата тепловых и резонансных нейтронов; получение новых данных для ядерной астрофизики; эксперименты с ультрахолодными нейтронами.

Основная часть этих исследований проводилась на пучках ИБР-30 (в первой половине года), ИБР-2 и ЭГ-5. Однако ряд экспериментов был осуществлен в сотрудничестве с другими ядерными центрами России, Болгарии, Польши, Чехии, Германии, Республики Корея, Франции, США, и Японии.

### 1. Экспериментальные исследования

#### 1.1. *Нарушение пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами*

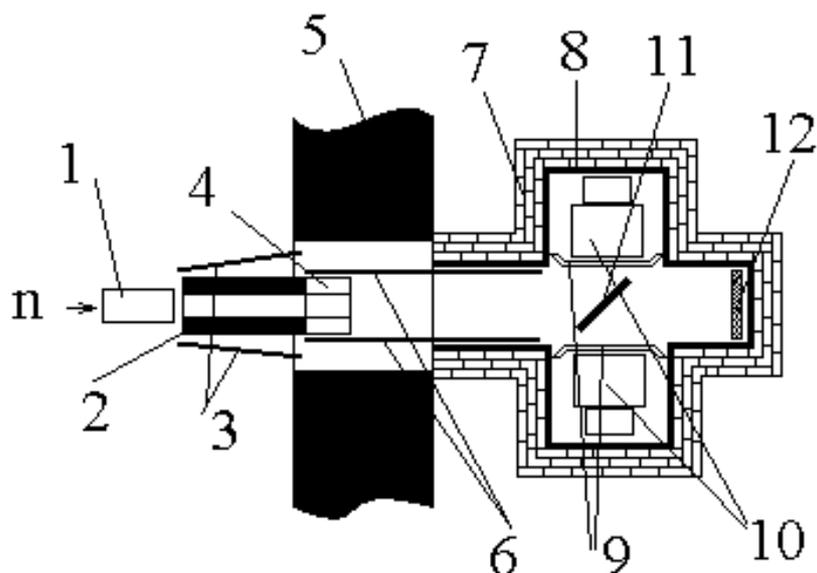
##### 1.1.1 **Нарушение четности в компаунд-ядрах: последние результаты коллаборации TRIPLE**

Нарушение четности в компаунд-ядрах: последние результаты коллаборации TRIPLE. Активность в рамках коллаборации TRIPLE заключалась в анализе предварительно измеренных нарушающих четность асимметрий нейтронных сечений в р-волновых резонансах. Детальные данные по нарушениям пространственной четности вместе с окончательными результатами для  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{123}\text{Sb}$ , и  $^{127}\text{I}$  опубликованы в Phys. Rev. C, v. **64** (2001). Кроме того, всесторонний обзор экспериментов и компиляция всех результатов по нарушению четности, полученных коллаборацией TRIPLE был опубликован в Physics Reports, v. **354**, №3 (2001). Использование статистических методов для определения среднеквадратичного значения слабого матричного элемента для 20 изученных ядер приводит к экспериментальному значению  $1.8 \cdot 10^{-7}$  эВ для средней ширины слабого взаимодействия в компаунд-ядрах, что находится в качественном согласии с теоретическими ожиданиями.

##### 1.1.2 **Измерение $P$ -нечетной асимметрии вылета $\gamma$ -квантов в реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow ^7\text{Li}(o.c.)$**

Существование нейтральных токов в слабых NN-процессах до сих пор не имеет однозначного экспериментального подтверждения. На возможность прямого определения слабых мезонных констант, и, следовательно, вклада нейтрального тока, из значений  $P$ -нечетных корреляций указывает кластерное представление реакций с медленными поляризованными нейтронами на легких ( $A \leq 10$ ) ядрах. При этом величины коэффициентов корреляций лежат на уровне  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$ .

Эксперимент по измерению  $P$ -нечетной асимметрии вида  $\alpha_{pn}(\vec{s}_n \vec{p}_\gamma)$  в реакции  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma(0,478 \text{ МэВ}) \rightarrow ^7\text{Li}(o.c.)$  был проведен на холодных ( $\langle \lambda_n \rangle = 4,7 \text{ \AA}$ ) поляризованных (94%) нейтронах пучка PF1В реактора ИЛЛ коллаборацией ЛНФ-ПИЯФ-ИЛЛ.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1- поляризатор; 2- адиабатический флиппер с борным коллиматором; 3- формирователь градиентного магнитного поля; 4- свинцовый коллиматор; 5- бетонная защита; 6- формирователь ведущего магнитного поля; 7- свинцовая защита; 8- борная резина; 9- катушки Гельмгольца; 10- детекторы; 11- образец; 12- литиевый поглотитель.

Проверка системы была осуществлена в измерениях известных величин  $P$ -нечетной асимметрии в  $(n,\gamma)$  реакции на образцах Cl, Br, Cd. Были проведены основные измерения с образцом  $^{10}\text{B}$  длительностью около 20 суток и несколько «нулевых» экспериментов с алюминиевой фольгой и литиевым поглотителем. Получен результат  $\alpha_{pn}^0 = (25.8 \pm 6.5) \cdot 10^{-8}$ .

Поскольку возможный вклад в измеренное значение от  $P$ -нечетных и  $P$ -четных эффектов на примесных ядрах не может быть более  $10^{-9}$ , а  $P$ -четные асимметрии в исследуемой реакции тождественно равны нулю, то имеется большая вероятность, что обнаруженная асимметрия обусловлена данной реакцией.

Для дальнейших исследований подготовлена многосекционная ионизационная камера с образцами для измерения  $P$ -нечетной корреляции типа  $\alpha_{pn}(\vec{s}_n, \vec{p}_t)$  в реакции  $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ . Проведение эксперимента планируется в 2002 г в ИЛЛ.

### 1.1.3 Современный статус проекта KaTRIn

В рамках подготовки проекта KaTRIn была выполнена проверка получения оптической поляризации  $^3\text{He}$  в слабом магнитном поле. Магнитные экраны из пермаллоя использовались для предотвращения быстрой релаксации поляризации  $^3\text{He}$  на неоднородностях окружающих полей. Вся установка была размещена на в нейтронноводе второго канала реактора ИБР-30 нейтронного средства и использовалась как нейтронный спиновый фильтр.

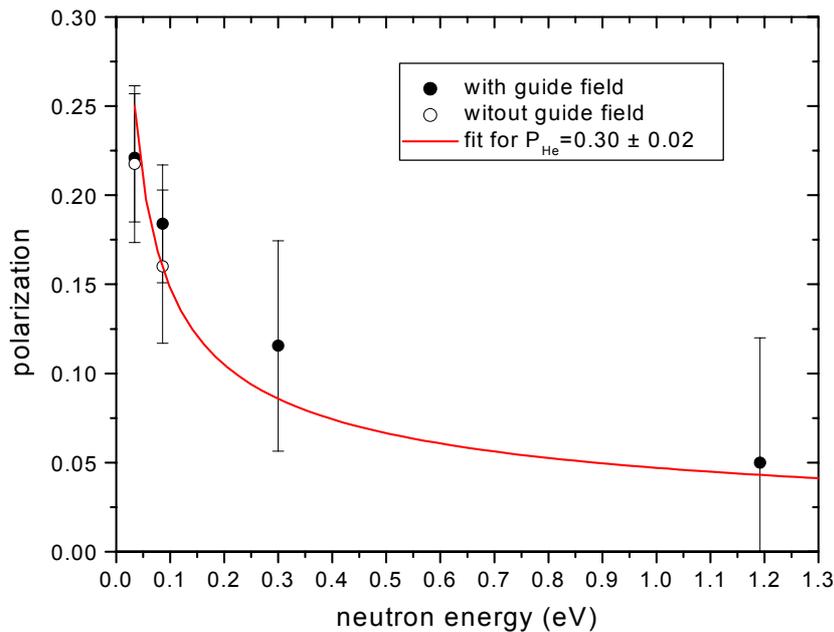
Поляризатор представляет собой сферическую  $^3\text{He}$  ячейку диаметром 3 см. Ячейка была помещена внутри алюминиевого термостата. Оси нейтронного пучка, лазерного луча и магнитного экрана совпадали. Остаточное продольное поле в центре экран, где была размещена ячейка, не превышало 0.05 Гаусс.

Измерение нейтронной поляризации было выполнено методом времени пролета. Если обозначить через  $N_0$  пропускание ячейки с неполяризованным  $^3\text{He}$ , и через  $N$  - с

поляризованным, то нейтронная поляризация будет выражена как  $p_n = \sqrt{1 - \left(\frac{N_0}{N}\right)^2}$ .

Нейтронная поляризация была измерена через 1.5 часа после начала оптической накачки. Перед измерением без поля,  $^3\text{He}$  поляризация была полностью разрушена магнитом, чтобы восстановить начальные условия.

Зависимость нейтронной поляризации от энергии для обоих вариантов показана на **рис. 2**. Замечено, что в “нулевом” поле рубидий и  $^3\text{He}$  поляризуются так же эффективно, как и с направляющим полем.



**Рис. 2.** Зависимость нейтронной поляризации от энергии с направляющим полем и без него.

Так, возможность поляризации  $^3\text{He}$  и нейтронов в почти “нулевом” магнитном поле была подтверждена. Этот опыт будет использован для создания полномасштабной установки KaTRIn.

#### 1.1.4 Поиск и исследование структуры подпороговых нейтронных $p$ - резонансов на изотопах свинца методом комбинированной корреляционной гамма- спектроскопии

В теоретических работах [1,2], подтверждённых экспериментально [3], было обосновано, что в области слабых нейтронных  $p$ - волновых резонансов эффект нарушения пространственной чётности составляет очень большую величину, на много порядков превышая соотношение слабого и сильного взаимодействий в ядрах. Единственным из результатов, который пока не нашёл объяснения, является обнаруженный и измеренный эффект слабого вращения спина при прохождении поляризованных нейтронов через мишень из свинца [4]. В недавних экспериментах [5] было показано, что этот эффект обусловлен

<sup>1</sup> Сушков О.П., Фламбаум В.В. УФН, 1982, т. 136, в. 1, стр. 3

<sup>2</sup> Бунаков В.Е., Гудков В.П. ЖЭТФ, письма, 1982, т. 36, в. 7, стр. 268

<sup>3</sup> Alfimenkov V.P., Borzakov S.B., Vo Van Thuan, Mareev Yu.D., Pikelner L.B., Khrykin A.S., Sharapov E.I. Nucl. Phys., 1983, v. A398, p. 93

<sup>4</sup> Heckel B., Ramsey N.F. et al. Phys. Lett., 1982, v. 119B, p. 298

ядром  $^{204}\text{Pb}$ . Исходя из концепции смешивания  $s$ - и  $p$ -резонансов, можно оценить ожидаемый эффект нарушения чётности. Однако для чётно-чётного магического ядра  $^{204}\text{Pb}$  плотность уровней очень мала, а большое расстояние между резонансами существенно подавляет эффект, так что возникает противоречие между измеренной и ожидаемой его величиной. Можно искать решение в двух направлениях. На одно из них было указано в работе Зарецкого и Сироткина [6], где помимо смешивания компаунд- состояний предполагалось участие потенциального рассеяния в реализации эффекта несохранения. Однако такой подход не встречал поддержку у теоретиков и пока не проявлялся в эксперименте, что, впрочем, может быть связано со значительно большей плотностью уровней у других ядер по сравнению со свинцом. Другое объяснение может быть дано, если у ядра  $^{204}\text{Pb}$  есть  $p$ -резонанс с подходящими параметрами в области энергии ниже энергии связи нейтрона, так называемый «отрицательный резонанс». В этом случае концепция смешивания компаунд-состояний получит существенное подтверждение в противовес механизму потенциального рассеяния. В связи с этим очень важным является обнаружение или, наоборот, опровержение существования близкого отрицательного  $p$ -резонанса.

В качестве метода обнаружения  $p$ -резонанса нами предлагается исследование зависимости интенсивности гамма-линий реакции  $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$  от энергии нейтронов в интервале от тепловых до десятка эВ. При отсутствии резонансов вблизи этой области сечение радиационного захвата нейтронов обусловлено далёкими  $s$ -резонансами и подчиняется «закону  $1/v$ », где  $v$  – скорость нейтронов. Другая зависимость, а именно  $\sigma \sim v$ , имеет место для  $p$ -резонансов. Таким образом, имеется принципиальная возможность разделить вклад  $s$ - и  $p$ -волн в захват нейтронов, а следовательно оценить возможность существования отрицательного  $p$ -резонанса и его параметры. Главная сложность эксперимента заключается в том, что сечение  $p$ -волнового захвата в этой области энергии нейтронов очень мало, можно ожидать, что менее 1% от  $s$ -волнового захвата. Отсюда вытекает требование высокой статистической точности, тщательного выяснения энергетической зависимости сечения и т.д. Это предъявляет повышенные требования к методике эксперимента и измерительной аппаратуре. Тем не менее, возможность разрешить проблему двух подходов к объяснению эффектов нарушения пространственной чётности представляется весьма заманчивой и стимулирует проведённого предлагаемого исследования.

## **1.2. Несохранение четности и интерференционные эффекты в угловых распределениях осколков деления**

### **1.2.1 Интерференционные явления в делении $^{239}\text{Pu}$ резонансными нейтронами**

Более чем пятидесятилетние интенсивные теоретические и экспериментальные исследования процесса деления (как спонтанного, так и вынужденного) не привели до сих пор к достаточно полному пониманию динамики и механизма деления, а также к строгому и однозначному математическому описанию разных его этапов. Причина этого определяется, прежде всего, тем, что ядерное деление представляет собой одно из самых сложных ядерных превращений многочастичной системы, связанное с глубоким перераспределением массы и заряда исходного ядра, образованием сильно деформированных осколков, обладающих высокими спинами и энергиями возбуждения. Другим существенным обстоятельством является то, что в большинстве экспериментов ядерное деление изучается в условиях, когда невозможно получить информацию о базисных амплитудах процесса, характеризующихся четностью  $\pi$ , полным спином делящейся системы  $J$  и его проекцией на ось деления  $K$ .

---

<sup>5</sup> Ermakov O.N., Golub R., Karpikhin I.L., Krupchitsky P.A., Vasiliev V.V., ISSN-9 Proceedings, Dubna, 2000, E3-2000-192, p. 377

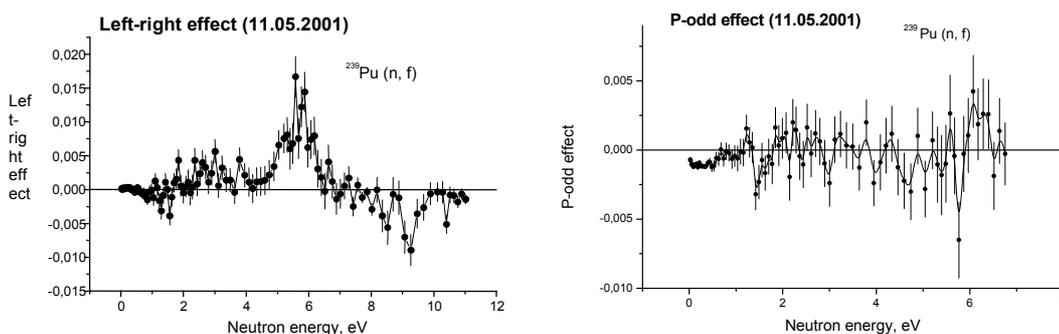
<sup>6</sup> Зарецкий Д.Ф., Сироткин В.К. ЯФ, 1987, 45, в. 5, стр. 1302

В последнее время при участии физиков ЛНФ развивается новый последовательный подход для описания деления, вызванного низкоэнергетическими нейтронами [7], который подобен обычной теории реакций. В принципе это приближение соответствует описанию интерференционных эффектов в делении нейтронами хорошо развитым методам теории ядерных реакций.

Оказалось, что весьма важно получить прямую информацию о зависимости от четности барьера деления для  $J^{\pi}K$  каналов. Уникальные возможности для этой цели дает изучение  $P$ - четных угловых корреляций осколков деления, вызванных интерференцией  $s$ - и  $p$ - резонансных делительных амплитуд. Такие экспериментальные исследования выполнены коллаборацией Дубна - Гатчина на бустере ИБР-30+ЛУЭ-40 для  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  [8,9] и  $^{239}\text{Pu}$ . Получены результаты для двух типов экспериментов. В первом - "вперед--назад" измерена энергетическая зависимость эмиссии осколков вдоль и против импульса неполяризованных нейтронов. Во втором - "право - лево" исследована асимметрия эмиссии осколков деления в плоскости, образованной спином поляризованного нейтрона и его импульсом. Более детальное описание текущего состояния проблемы можно найти в работе «Анализ  $P$ - четных эффектов в анизотропии осколков при делении  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  резонансными нейтронами», приведенной в разделе «Experimental reports» данного отчета.

В 2001 г. на нейтронном бустере ИБР-30 были закончены измерения интерференционных эффектов в делении  $^{239}\text{Pu}$  поляризованными резонансными нейтронами. Была измерена асимметрия вылета легких и тяжелых осколков относительно плоскости импульс нейтрона – спин нейтрона. Эта, так называемая, лево – правая асимметрия не нарушает  $P$ - четность и обусловлена интерференцией  $s$ - и  $p$ - резонансов. Вместе с ранее измеренной асимметрией «вперед – назад» эти результаты позволяют получить полностью отсутствующую пока информацию о  $p$ - волновых резонансах в тяжелых ядрах.

Другой измеренный эффект – нарушающая четность асимметрия вылета осколков по и против направления спина захваченного нейтрона. Такие данные для резонансов плутония получены впервые (рис.3). В настоящее время завершается обработка экспериментальных данных по обоим этим эффектам, и готовятся публикации.

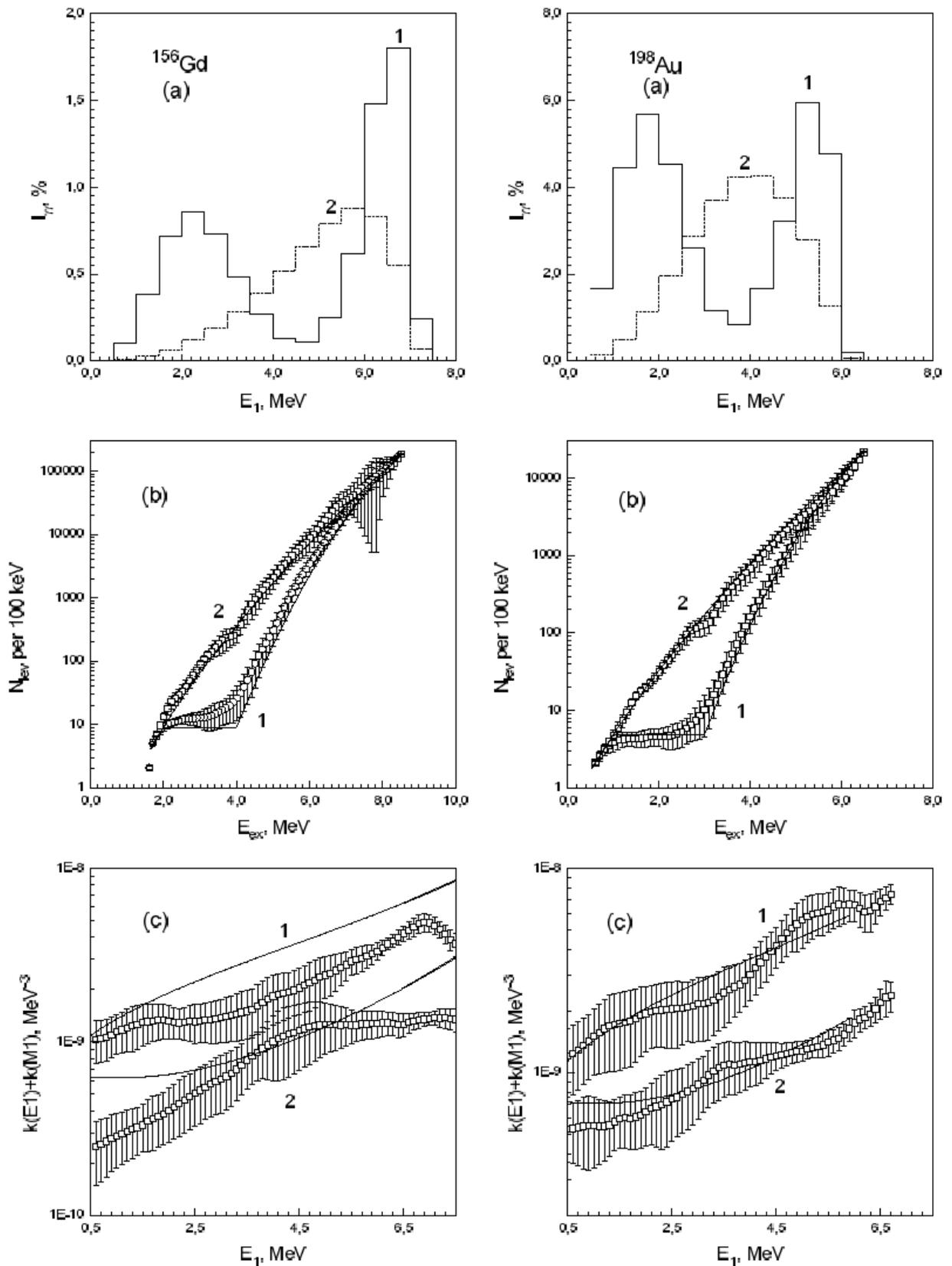


**Рис. 3.** Эффекты лево – правой и нарушающей четность асимметрий при делении ядра  $^{239}\text{Pu}$  резонансными нейтронами.

<sup>7</sup> Barabanov A.L., Furman W.I., Z.Phys. **A357**, 411(1997)

<sup>8</sup> Alfimenkov V.P.} et al. JINR-E3-97-106, Dubna(1997); Alfimenkov V.P., Chernikov A.N., Lason L. et al., Nucl.Phys., **A645**, 31(1999)

<sup>9</sup> Gagarski A.M., Guseva I.S., Goloslavskaya S.P. et al., Preprint PNPI NP-32-1999, 2117, Gatchina(1999)



**Рис. 4.** Интенсивность двухквантовых каскадов (а), рассчитанная с использованием плотностей уровней, показанных сплошными линиями на (б), и радиационных силовых функций (с). Точки с ошибками представляют интервал бесконечного числа плотностей уровней и силовых функций, обеспечивающих точное воспроизведение интенсивностей каскадов, приведенных на (а).

### 1.3. Высоквозбужденные состояния ядер

#### 1.3.1 Исследование двухквантовых гамма - каскадов

Основные усилия в области исследования структуры возбужденных ядерных состояний с использованием методики регистрации двухквантовых каскадов в 2001 году были направлены на анализ источников и оценку вероятной величины систематических ошибок предложенного в ЛНФ метода безмодельной оценки плотности уровней и радиационных силовых функций  $E1$  и  $M1$  переходов в диапазоне энергии связи нейтрона в тяжелых ядрах.

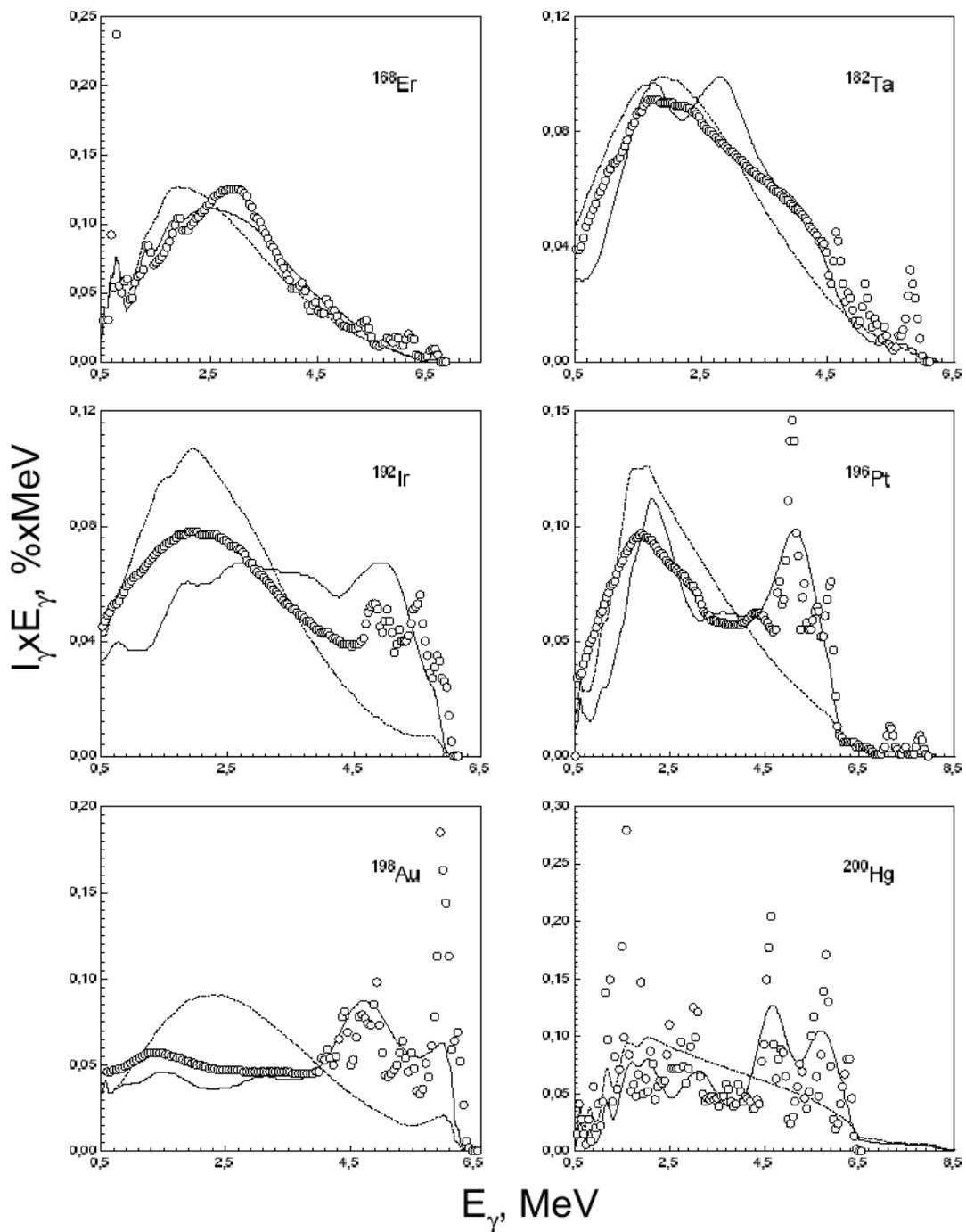
Возможности методики демонстрирует **рис.4**, где приведены два варианта зависимости интенсивности каскадов от энергии их первичного перехода, плотность уровней и сумма радиационных силовых функций, соответствующая им. Там же приведены и оценки интервалов возможных значений искомых параметров, которые позволяют точно воспроизводить интенсивность каскадов (экспериментальную или смоделированную). Хотя интенсивность каскадов может быть воспроизведена с одной и той же точностью бесконечным количеством параметров, но интервал их вариаций достаточно мал. Метод позволил впервые оценить плотность уровней в заданном интервале спинов (суммарную для двух четностей или отдельно для каждой) без привлечения модельных представлений о вероятности эмиссии продукта ядерной реакции (например, испарения нейтрона). Точность соответствующих моделей в области возбуждений выше  $\sim 2$  МэВ и до энергии связи нейтрона реально неизвестна.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что, несмотря на систематические ошибки, наш метод позволяет лучше описать процесс гамма-распада нейтронного резонанса и существенно улучшают точность расчета, например, полного спектра гамма-излучения (особенно в ядрах районов  $N=82$  и  $126$ ) по сравнению с традиционно используемыми для этого моделями плотности уровней и парциальных радиационных ширин (см. **рис. 5**).

Кроме того, было установлено, что энергетическая зависимость радиационных силовых функций  $k(E1)+k(M1)$  первичных и вторичных переходов каскадов отличаются. Было также показано, что это обстоятельство не изменяет существенно сделанное ранее заключение о наличии в деформированных, как минимум, ядрах области энергии возбуждения шириной не менее 2 МэВ с практически постоянной или слабо меняющейся плотностью уровней. Это свидетельствует о принципиальном изменении свойств деформированных ядер в районе энергии возбуждения 3-4 МэВ.

Последние циклы работы ИБР-30 были использованы для изучения фоновых условий регистрации двухквантовых каскадов в делящемся ядре-мишени  $U-235$ . В экспериментах было установлено, что мгновенные кванты деления не препятствуют регистрации двухквантовых каскадов на уровне  $U-236$  с энергией до 1-1.5 МэВ. Это означает, в частности, что можно получать новые прецизионные экспериментальные данные по сечениям захвата и деления для актинидов с помощью этой методики.

Кроме того, можно получить детальную информацию о плотности возбужденных уровней и радиационных силовых функциях дипольных переходов при радиационном захвате нейтрона в четно-нечетных, как минимум, делящихся ядрах-мишенях. Без такой информации невозможно улучшить точность теоретического описания процессов взаимодействия нейтронов с этими важными для практики реакторными материалами. Как результат, изучение двухквантовых каскадов в делящихся ядрах через развитие модельных представлений может обеспечить увеличение точности оцененных сечений взаимодействий нейтронов с энергией от десятков до сотен кэВ.



**Рис. 5.** Экспериментальные (точки) полные спектры гамма-излучения после захвата тепловых или быстрых нейтронов для компаунд-ядер  $^{168}\text{Er}$ ,  $^{182}\text{Ta}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{196}\text{Pt}$ ,  $^{198}\text{Au}$  и  $^{200}\text{Hg}$ . Сплошная и пунктирная линии представляют результаты расчета с использованием метода безмодельного определения плотности уровней и радиационных силовых функций, а также предсказаний обычно используемых для этого моделей, соответственно.

### 1.3.2 Исследования радиационного захвата нейтронов, программа ядерных данных

На 122м пролетной базе ИБР-30 в первой половине 2001 года проведены измерения спектров кратности гамма - квантов в реакциях  $(n,\gamma)$ ,  $(n,f)$  для изотопов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и естественного  $\text{Pb}$  с помощью 16-секционного жидкостного детектора спектрометра ПАРУС. Для изотопа  $^{235}\text{U}$  аналогичные исследования выполнены на спектрометре РОМАШКА на базе 500м. Для  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  измерения времяпролетных спектров кратности гамма-лучей



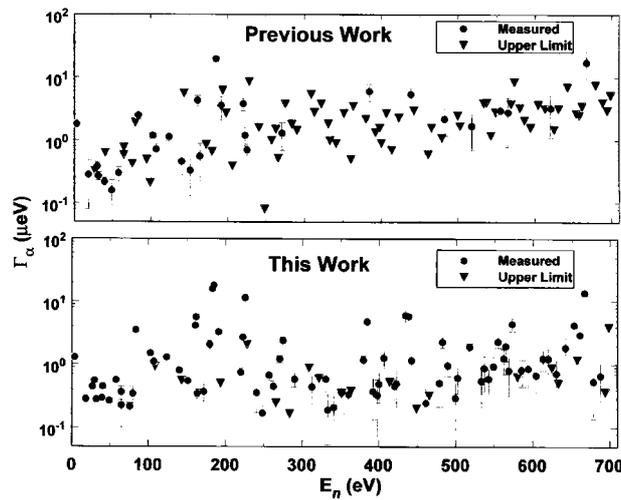
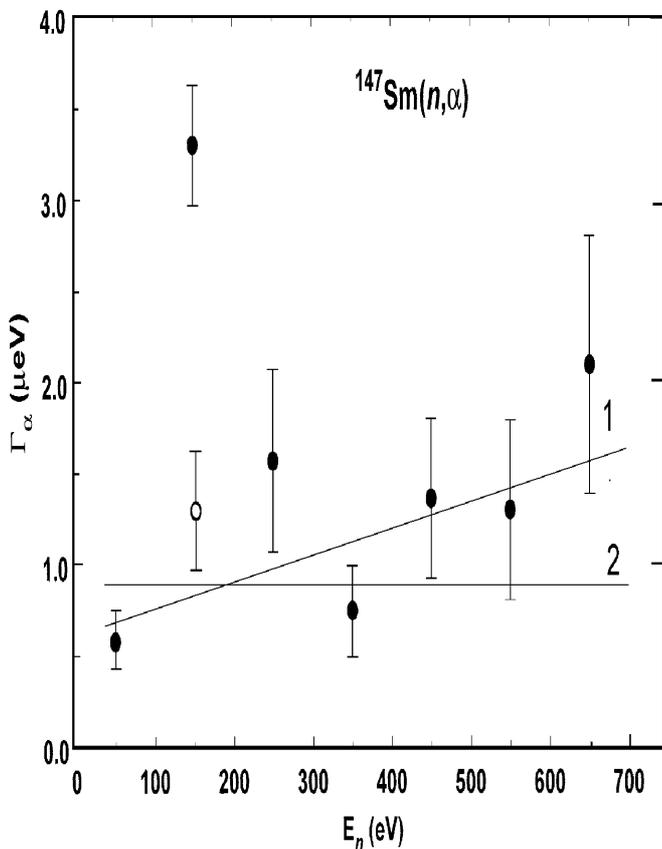


Рис. 6. Полученные в эксперименте значения  $\alpha$ -ширин и данные предыдущих работ.

Другой интересный результат дал анализ средних  $\alpha$ -ширин. Согласно статистической теории ядерных реакций  $\alpha$ -частичная силовая функция  $S_\alpha = \langle \gamma_\alpha^2 \rangle / D$  – величина постоянная, и, следовательно, средняя  $\alpha$ -ширина  $\langle \Gamma_\alpha \rangle = \langle \gamma_\alpha^2 \rangle P$  не должна зависеть от энергетического интервала, так как кинетическая энергия нейтронов мала по сравнению с энергией связи и не сказывается на проницаемости потенциального барьера. Результаты расчетов средних  $\alpha$ -ширин для различных диапазонов приведены на рис. 7.



Как видно, возможно возрастание средних  $\alpha$ -ширин с ростом энергии нейтронов, что в свою очередь указывает на проявление некоторых нестатистических эффектов.

Рис. 7. Значения средних  $\alpha$ -ширин. Открытый кружок – из анализа исключен дублет резонансов около 184 эВ. 1-линейный фит; 2- фит в предположении  $\langle \Gamma_\alpha \rangle = const.$

### 1.4.2 Реакции с быстрыми нейтронами

Получены значения сечений и угловых распределений продуктов реакции  $^{64}\text{Zn}(n,\alpha)$  для  $E_n = 5-7$  МэВ в эксперименте на ускорителе Ван-де-Граафа Института физики тяжелых ионов Пекинского университета (рис.8 и 9).

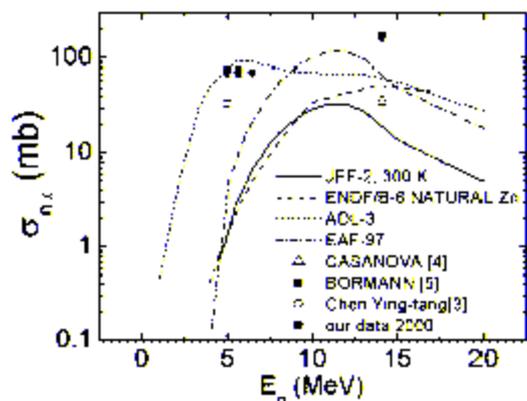


Рис.8. Экспериментальные данные и теоретические оценки сечения реакции  $^{64}\text{Zn}(n,\alpha)^{61}\text{Ni}$ .

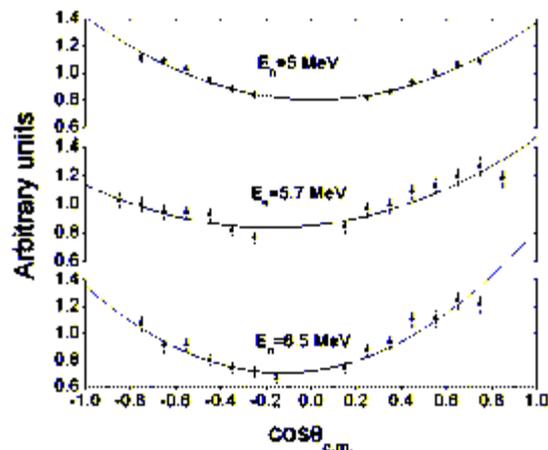


Рис.9. Угловые распределения реакции  $^{64}\text{Zn}(n,\alpha)^{61}\text{Ni}$ .

Разработана систематика сечений реакций (n,p) на быстрых нейтронах на основе положений статистической теории ядерных реакций.

На ускорителе ЭГ-5 ЛНФ оборудован канал для исследований реакций (n,p) и (n, $\alpha$ ) на нейтронах из D-D реакции в диапазоне 3-6 МэВ.

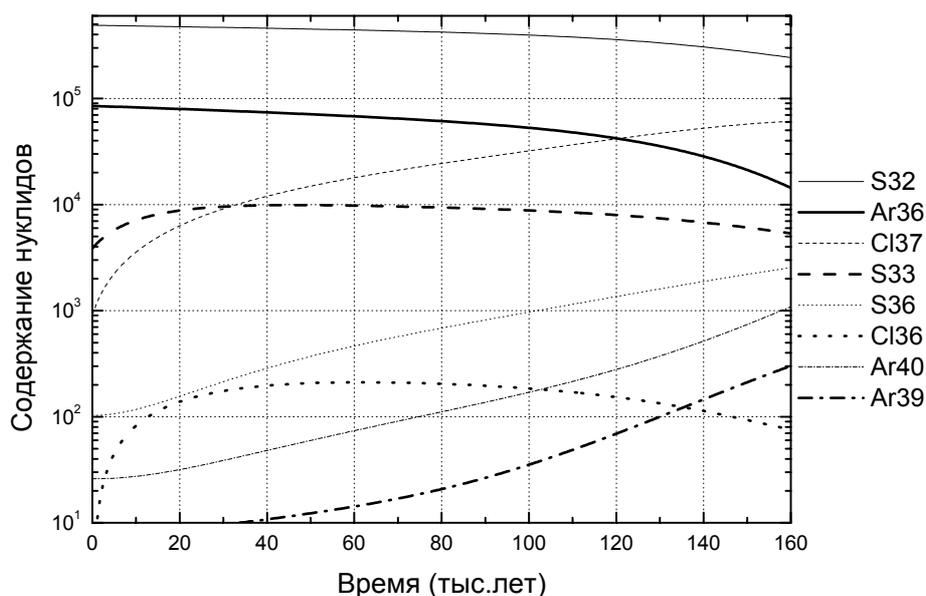
### 1.5. Астрофизические аспекты нейтронной физики

#### 1.5.1 Измерение сечения нейтронного захвата $^{147}\text{Pm}$ для определения плотности нейтронов в s-процессе

Обработаны данные совместного эксперимента (Дубна, Карлсруэ) по определению сечения нейтронного захвата на радиоактивном изотопе  $^{147}\text{Pm}$  при «стандартной» астрофизической температуре  $kT=25$  keV. Изотоп является одной из точек ветвления на пути s-процесса в области Nd-Sm и данные по сечению необходимы для определения нейтронной плотности в s-процессе нуклеосинтеза. Получено сечение  $\langle\sigma_{kT=25\text{keV}}\rangle=685\pm 69$  мб, что почти в два раза ниже теоретических оценок.

#### 1.5.2 Моделирование нейтронного нуклеосинтеза в области серы и хлора при горении гелия в звездах массой $25 M_{\odot}$

В сотрудничестве с учеными Лодзинского университета создана программа для расчета нейтронного нуклеосинтеза на стационарной фазе эволюции звезды – практически постоянные температура, электронная плотность и плотность вещества в зоне горения. Условия характерны для стадии гидростатического горения гелия в массивных звездах, которые считаются основными поставщиками нуклидов слабой компоненты s-процесса. Предполагается, что в таких звездах образуется основная часть нейтроноизбыточных изотопов легких и средних масс. Программа выполнена в рамках компьютерной системы «Математика». Тестовые расчеты для области S-Cl-Ag (рис.10) показали хорошее совпадение результатов с работами других авторов.



**Рис. 10.** Расчетная зависимость распространенности ряда изотопов от времени при горении He.

## 1.6. Физика ультрахолодных нейтронов, нейтронная оптика

### 1.6.1 Исследование процессов сверхмалых передач энергии при взаимодействии ультрахолодных нейтронов с поверхностью твердых веществ

В рамках проектов РФФИ и INTAS продолжалось всестороннее экспериментальное изучение нового явления - сверхмалых передач энергии УХН при взаимодействии с поверхностью твердых веществ. В планах - экспериментальное определение абсолютных значений вероятностей сверхмалого нагрева (в диапазон энергий до 150 нэВ) и охлаждения УХН при взаимодействии с различными веществами, определение зависимости данной вероятности от температуры в диапазоне 100 - 300 К, определение спектральных характеристик процесса: спектра нагретых/охлажденных нейтронов и зависимости вероятности передачи энергии от спектра УХН. В 2001 году было завершено создание нового гравитационного спектрометра, установка перевезена в ИЛЛ (Гренобль, Франция) и смонтирована на пучке PF2.

Проведены тестовые измерения на новой установке, подтверждена работоспособность новой установки как спектрометра ультрахолодных нейтронов с более высокой (до 8 раз) чем в предыдущей установке чувствительностью к малым передачам энергий. Не менее важным результатом является хорошая согласованность вероятности "малого нагрева" УХН, для поверхностей из меди и из нержавеющей стали, полученная в тестовых измерениях с ожидаемыми величинами, определенными из предыдущих измерений.

Определенный интерес представляют результаты тестовых измерений с сапфиром. Полные потери УХН на монокристаллах сапфира оказались значительно больше теоретических, что может быть объяснено поверхностными загрязнениями т.к. образец не обезгаживался предварительно, а "малый нагрев" на образце в диапазон энергий 50-150 нэВ не дал заметного вклада на фоне нагрева на стенках спектрометра.

Созданный гравитационный спектрометр является самым совершенным на сегодняшний день прибором для изучения "малых передач" энергии при взаимодействии УХН с поверхностью твердых тел.

### 1.6.2 Оптика УХН

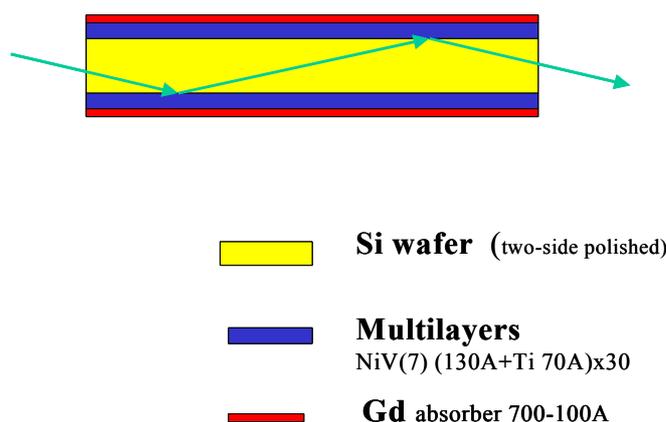
С помощью спектрометра УХН с интерференционными фильтрами начата работа по изучению оптики сильно поглощающих сред. Образцы представляли собой естественный гадолиний с сечением поглощения УХН порядка  $10\text{Mb}$ , нанесенный на кремниевые подложки. Уникальность ситуации состоит в том, что длина поглощения УХН в веществе  $(\rho\sigma)^{-1}$  в этом случае оказывается порядка длины волны нейтрона.

Первоначально в эксперименте планировалось показать, что пропускание тонких образцов Gd не зависит от компоненты скорости, параллельной границе вещества. Именно такой результат предсказывается моделью комплексного оптического потенциала. Однако, наблюдалось заметное отклонение от этого предсказания. Полученный результат пока не находит объяснения.

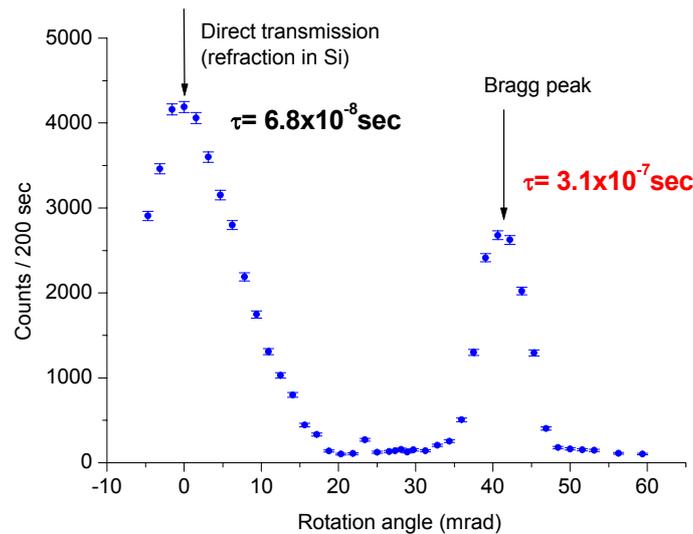
На втором этапе было предпринято систематическое измерение пропускания образцов от (нормальной) скорости нейтрона. И в этом случае полученные результаты находятся в противоречии с предсказаниями теории. Объяснить их методическими причинами тоже не удастся, хотя в силу исключительной трудности эксперимента такую возможность нельзя полностью исключить.

### 1.6.3 Измерение времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами методом ларморовских часов

Работы по измерению времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами методом ларморовских часов велись на спин-эхо спектрометре IN15 в ИЛЛ. Основа метода состоит в том, что с образцом взаимодействует нейтрон, прецессирующий в магнитном поле. Конечное время взаимодействия приводит к появлению добавочного угла прецессии спина. В эксперименте по измерению времени туннелирования нейтрона в резонансе квазисвязанного состояния получен первый результат, доложенный на международной конференции. Зарегистрирована заметная задержка, обусловленная резонансным характером туннелирования. В эксперименте по измерению времени дифракции нейтрона, схема которого представлена на **рис.11**, измерено время пропускания нейтронов через образец в геометрии прямого прохождения и двойного дифракционного отражения. Результат представлен на **рис. 12**.



**Рис. 11.** Схема эксперимента по измерению времени дифракции нейтрона на многослойной структуре.



*Рис. 12. Кривая пропускания в зависимости от угла падения нейтронов.*

### **1.7. Предложение эксперимента по прямому измерению длины рассеяния нейтрона на нейтроне на реакторе ЯГУАР**

Эксперименты по nn-рассеянию напрямую связаны с проблемой зарядовой симметрии ядерных сил. Для тепловых нейтронов сечение рассеяния определяется величиной длины nn-рассеяния, которую сравнивают с длиной pp и np-рассеяния для проверки симметрии изоспина. Длина рассеяния предельно чувствительна к малым различиям ядерных потенциалов. Непрямое определение амплитуды рассеяния нейтрона на нейтроне из ядерных реакций с тремя частицами в конечном состоянии, две из которых нейтроны, долгое время давало противоречивые результаты. Ситуация изменилась в течение последних трех лет после экспериментов в TUNL и LANL, которые обеспечили согласование результатов не прямых измерений амплитуды рассеяния  $a_{nn}$ :  $-18.7 \pm 0.6$  Фм для  $D(n,p)2n$  реакции и  $-18.55 \pm 0.005$  стат.  $\pm 0.3$  сист. Фм для реакции  $D(\pi,\gamma)2n$ .

Эти результаты показывают, что nn-взаимодействие сильнее, чем ядерная часть pp-взаимодействия. Нарушение зарядовой симметрии (Charge Symmetry Breaking — CSB) в масштабе длин рассеяния составляет величину  $\Delta a_{CSB} = a_{pp} - a_{nn} = 1.6 \pm 0.6$  Фм. Существует теоретическое обоснование нарушения зарядовой симметрии, разработанное в, как в терминах мезонно-обменной теории ядерных сил, так и на уровне кварков. В мезонно-обменной теории CSB связано со смешиванием  $\rho$  и  $\omega$  мезонов, в рамках квантовой хромодинамики (КХД) нарушение симметрии происходит благодаря разнице масс  $u$ - и  $d$ -кварков. При этом в обеих теориях предсказываемая степень нарушения варьируется в диапазоне  $0.5 - 2.5$  Фм, в зависимости от конкретной модели теории. Выбор теоретической модели возможен при повышении точности эксперимента, что является новым важным аргументом в пользу прямого измерения сечения nn-рассеяния.

Предложения по прямому измерению длины nn-рассеяния имеют давнюю историю, однако ни одно из них не было осуществлено. Проект направлен на практическую реализацию эксперимента по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне на реакторе ЯГУАР (Снежинск, Россия). Реактор ЯГУАР обеспечивает оптимальные условия для проведения nn эксперимента. Он имеет:

1. Высокую (на уровне  $10^{18} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ ) импульсную плотность потока нейтронов.
2. Сквозной канал, проходящий через центр активной зоны реактора, что позволяет использовать максимальные нейтронные потоки и создает высокую симметрию нейтронных полей, что должно привести к упрощению обработки экспериментальных данных.
3. Возможность помещения в центральный канал замедлителя нейтронов без риска локального перегрева активной зоны реактора вблизи замедлителя.
4. Сравнительно короткий импульс, позволяющий использовать технику времени пролета для отделения тепловых нейтронов от быстрых нейтронов.

Использование высокой плотности потока тепловых нейтронов снижает жесткость требований к фону, т.к. эффект зависит квадратично от плотности потока, а фон линейно.

Целью проекта является создание экспериментальной установки и первое прямое наблюдение рассеяния нейтрона на нейтроне. Определение параметров установки должно дать ответ на главный вопрос — какова максимальная точность измерения амплитуды рассеяния в подобном эксперименте. В рамках данного проекта планируется получить значение амплитуды рассеяния на уровне 5%.

## 2. Теоретические исследования

### 1.8. Слабый нарушающий четность NN-потенциал

На основе характерного слабого нарушающего пространственную четность NN-потенциала, было выполнено аналитическое построение слабого несохраняющего четность однонуклонного потенциала Хартри-Фока  $V_W^{\text{HF}}$ . При этом использовалась общая теоретическая схема, примененная ранее к стандартному сильному NN-взаимодействию.

Были получены общие выражения для всех компонентов слабого однонуклонного ХФ-потенциала  $V_W^{\text{HF}}$ , с учетом изотопической зависимости ( $\tau_{1z}$ -члены) и явные вклады  $\pi$ -,  $\rho$ - и  $\omega$ - мезонов. Установлено, что потенциал  $V_W^{\text{HF}}$  имеет значительно более сложную структуру, чем феноменологические слабые нуклон-ядерные потенциалы, но, тем не менее, включает некоторые особенности, которые имеют прямые феноменологические аналоги. Вычисления коэффициентов при  $(\sigma_1 \hat{k}_1)$  в основном P-нечетном члене потенциала  $V_W^{\text{HF}}$ , сделанные для дважды магических сферических ядер  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{40}\text{Ca}$ , продемонстрировали (для диапазона энергий нуклона  $E = (0 \div 100) \text{ МэВ}$ ) достаточно хорошее соответствие с феноменологическими данными. Соотношения между величинами различных вкладов в  $V_W^{\text{HF}}$  (Хартри и Фоковская части, изоскаляр и компоненты изовектора,  $\pi$ -,  $\rho$ - и  $\omega$ - мезонная часть) изучаются. Исследование других членов потенциала  $V_W^{\text{HF}}$  и радиальных распределений различных компонентов в  $V_W^{\text{HF}}$  будет продолжено.

### 1.9. Свободный бета-распад нейтрона

В этом году были продолжены исследования нейтронного бета-распада. Принимая во внимание, что предыдущие вычисления были полностью основаны на эффективном лагранжиане, описывающем слабые взаимодействия на чисто адронном уровне, современное исследование проведено строго в рамках электрослабой теории Стандартной Модели (теория Вайнберга-Салама). Рассмотрены взаимодействия лептонов ( $e, \nu, \dots$ ), кварков ( $u, d, \dots$ ), калибровочных бозонов ( $\gamma, W^\pm, Z$ ) и бозона Хиггса частиц участвующих в бета-распаде нейтрона. В описании радиационных поправок к бета-распаду нейтрона, использована схема перенормировки электрослабой стандартной модели, в которой электрический заряд и массы калибровочных бозонов, бозона Хиггса и фермионов (лептонов и кварков) используются как физические входные параметры. Эффективные величины, формфакторы, появляются естественным образом для описания сильного взаимодействия. Детальные вычисления

однопетлевых электрослабых радиационных поправок к времени жизни нейтрона и угловому распределению электронов пока в процессе разработки.

### **3. Методика**

#### **3.1. Калибровки детектора быстрых нейтронов HEND**

В 2001 году совместно со специалистами ОРПИ была завершена программа калибровок детектора быстрых нейтронов HEND (High Energy Neutron Detector), предназначенного для работы на борту американского исследовательского аппарата Mars Odyssey 2001 в составе комплекса гамма- спектрометра. Эти работы выполнялись в рамках долгосрочного договора с Институтом космических исследований РАН, в соответствии с которым ОИЯИ занимается разработкой физической концепции прибора, физическим и математическим моделированием его характеристик, калибровками эффективности прибора. Калибровки проводились на одном из трех приборов, изготовленных в ИКИ РАН. Один из приборов был установлен на борту космического аппарата и в настоящее время успешно работает на марсианской орбите, регистрируя нейтронное излучение планеты.

#### **3.2. Разработка и создание новых сцинтилляционных детекторов нейтронов**

Продолжалось сотрудничество с РХЛ ЛЯП в работах по созданию новых детекторов для проведения нейтронных и нейтринных исследований. Синтезированные в РХЛ органические сцинтилляторы с бором и гадолинием тестировались на пучках нейтронов в НЭОФЯ ЛНФ с целью изучения эффективности их применения.

### **4. Аналитические исследования на ИБР-2: нейтронный активационный анализ и радиационные исследования**

Успешное применение ядерной аналитической методик к развитию биотехнологии и биохимии, а именно, к производству селен- и хром- содержащих медицинских препаратов, основано на синее- зеленых водорослях (*Spirulina platensis*) привело к получению двух патентов в соавторстве с грузинскими учеными Тбилисского института физики им. Э. Андроникашвили (Тбилиси, Грузия) и выходу ряда публикаций в признанных международных журналах.

Комбинация вышеупомянутых жизненно важных элементов с белково-содержащими водорослями, названными “пища будущего”, допускает производить препараты с высокими возможностями для лечения широкого спектра болезней: от ишемической болезни сердца до синдрома иммунодефицита (СПИД). Исследования по развитию методики определения содержания элементов в *Spirulina platensis* проводились в группе нейтронного активационного анализа.