

НОВЫЕ УСТАНОВКИ В ИЯИ РАН ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИИ НЕЙТРОНОВ ПО ВРЕМЕНИ ИХ ЗАМЕДЛЕНИЯ В СВИНЦЕ

А. А. Алексеев, Ю. В. Белоусов, А. А. Бергман, А. Н. Волков, О. Н. Гончаренко, С. Н. Грачев, М. В. Казарновский, В. Л. Матушко, Г. К. Матушко, В. И. Мостовой, А. В. Новиков, С. А. Новоселов, С. С. Паржицкий¹, Ю. П. Попов¹, Ю. Я. Стависский, Ю. М. Шейнов

В 50-х годах в лаборатории И. М. Франка ФИАН был создан первый в мире нейтронный спектрометр по времени замедления (СВЗ) в свинце на основе реакции $T(d,n)^4He$. В ИЯИ РАН работает первый СВЗ (установка ПИТОН) и создается Большой СВЗ, в которых нейтроны генерируются в реакции скалывания под действием пучка протонов Московской мезонной фабрики. В статье излагаются эксперименты на ПИТОНЕ, работы по созданию Большого СВЗ, программа экспериментов на обеих установках.

В начале 50-х годов по инициативе И.М. Франка в Лаборатории атомного ядра ФИАН было создано новое направление нейтронной физики – изучение взаимодействия с веществом нейтронов от импульсного источника. Реализация этого направления оказалась возможной благодаря созданию интенсивных (до $\sim 10^8$ нейтр./с) импульсных нейтронных источников на основе реакции $D + T$ и разработке соответствующей электронной аппаратуры. Одной из главных проблем явилось исследование нестационарного замедления нейтронов в тяжелой среде и разработка оригинального метода нейтронной спектрометрии по времени замедления в свинце.

¹Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, ОИЯИ, Дубна.

Е. Л. Фейнберг (сообщение на семинаре, 1944 г.) в возрастном приближении показал, что нейтроны от импульсного источника, упруго замедляясь в тяжелой среде, группируются вблизи некоторой средней энергии

$$\bar{E} = \frac{m}{2} \left(l_s \frac{A+1}{t+t_0} \right)^2 = \frac{180}{(t+0,5)^2}, \quad (1)$$

где t – время, прошедшее с момента импульса, A – массовое число ядер среды, l_s – средний пробег нейтронов до рассеяния, m – масса нейтрона; постоянная t_0 определяется спектром нейтронов, упруго замедляющихся в начальный момент времени (вторая часть равенства (1) определяет связь \bar{E} [кэВ] и t [мкс] в случае реакции скалывания, вызываемой протонами промежуточной энергии в свинце). Ф. Л. Шапиро (доклад на семинаре в ФИАНе, 1950 г.; изложено в [1]) исследовал возможность использования этого эффекта для спектрометрии нейтрон-ядерных реакций путем измерения зависимости от t скорости образования продуктов изучаемой реакции в исследуемом образце. Он показал, что спектрометр по времени замедления (СВЗ) нейтронов в свинце имеет ряд достоинств:

- 1) светосила на 3-4 порядка выше светосилы спектрометра по времени пролета при равном разрешении и интенсивности нейтронного источника;
- 2) возможность измерений сечений в широкой области энергий от долей эВ до десятков кэВ; примерное постоянство разрешения в этой области;
- 3) удобство измерений сечений реакций: слабое влияние рассеяния нейтронов в образце, малый γ -фон при измерении сечений радиационного захвата.

В то же время, область применения СВЗ ограничена относительно невысоким разрешением по энергии ($\Delta E/\bar{E} \geq 30\%$ при $E \leq 50$ кэВ).

Первый в мире СВЗ на основе реакции $D + T$ как источника нейтронов (СВЗ первого поколения) имел среднюю интенсивность генерации нейтронов $S \simeq 2 \cdot 10^8$ нейтр./с [2]. На нем были выполнены экспериментальные исследования [3 – 5] замедления нейтронов от импульсного источника в тяжелых средах², проводились и проводятся до настоящего времени измерения сечений нейтрон-ядерных реакций. В дальнейшем были созданы СВЗ второго поколения на основе высокоэнергетических электронных ускорителей как фотоядерных источников нейтронов (ФРГ, Япония, Индия, Польша, США). Наиболее светосильные из них: RINS (США) [9] и CULS (Япония) [10], соответственно $S \sim 10^{12}$

²Одновременно была построена строгая теория нестационарного замедления нейтронов в тяжелых средах [2, 6 – 8].

и 10^{11} нейтр./с. Однако возможности применения электронных пучков для генерации нейтронов ограничены из-за сильного нагрева мишени (порядка 10^{-9} Дж/нейтр.), и возникает проблема ее охлаждения, так как использование воды может заметно ухудшить энергетическое разрешение. Стависский [11] и независимо Мур с сотрудниками [12] предложили использовать в качестве источников нейтронов для СВЗ реакцию скалывания, инициируемую протонами сильноточных ускорителей – мезонных фабрик. В таких СВЗ – СВЗ третьего поколения S может быть в $10^2 - 10^4$ раз больше, чем в СВЗ второго поколения. В ИЯИ РАН работает первый в мире СВЗ третьего поколения – установка ПИТОН и создается Большой СВЗ, в которых нейтроны генерируются пучком протонов линейного ускорителя Московской мезонной фабрики (ЛУ ММФ).

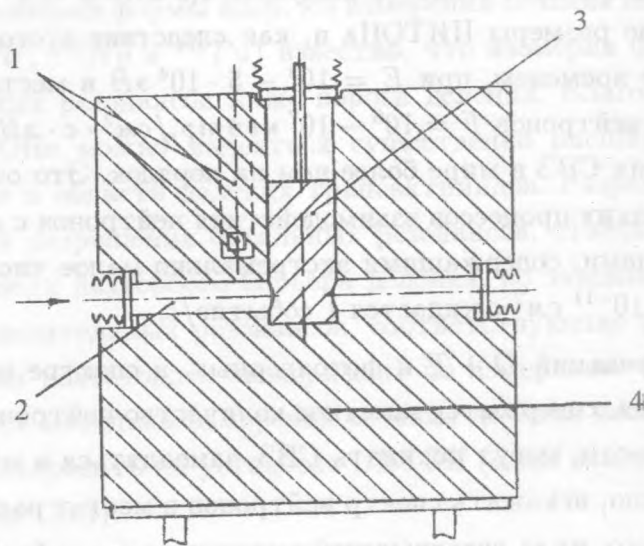


Рис. 1. Установка ПИТОН. 1 – экспериментальные каналы, 2 – ионопровод для пучка протонов, 3 – мишень, 4 – свинцовый куб.

ПИТОН – СВЗ третьего поколения (запущен в 1994 г.) предназначался, в основном, для исследования характеристик СВЗ с интенсивными источниками нейтронов, основанными на реакции скалывания, и отработки методик их эксплуатации. Он представляет собой куб из сверхчистого (99,99%) свинца общим весом ≈ 15 т (рис. 1). Через центр куба проходит ионопровод пучка протонов (с энергией 160 – 600 МэВ) ЛУ ММФ. Источник нейтронов – дистанционно управляемая мишень (свинцовый цилиндр диаметром 190 мм в стакане из нержавеющей стали) на время измерений вводится в пучок протонов через

вертикальный вакуумированный канал. Мишень снабжена змеевиком воздушного охлаждения, позволяющим снять до 400 Вт тепла, что соответствует $S \approx 7 \cdot 10^{13}$ нейтр./с. Формирование коротких (0,2 – 4,0 мкс) импульсов протонов из макроимпульса длительностью 70 мкс осуществляется с помощью прерывателя на основе отклоняющих пластин, расположенного после форинжектора ускорителя. Для размещения образцов и детекторов в ПИТОНе имеются 3 сквозных горизонтальных и 2 вертикальных канала, позволяющих использовать повышенный (в каналах, близких к мишени) или пониженный (в удаленных каналах) поток жестких (с энергией $E > 50$ МэВ) нейтронов в момент протонного импульса. Согласно расчетам, при уже достигнутых параметрах пучка протонов ($E_p = 450$ МэВ, средний ток $I_p \approx 100$ мкА), частоте повторения протонных импульсов 50 гц и длительности импульса 0,5 мкс $S \approx 4 \cdot 10^{13}$ нейтр./с. Поэтому, несмотря на малые размеры ПИТОНа и, как следствие этого, быстрое затухание потока нейтронов со временем, при $E = 10^2 - 5 \cdot 10^4$ эВ в местах размещения образцов плотность потока нейтронов $F = 10^6 - 10^7$ нейтр./см² · с · эВ, что превышает потоки нейтронов в лучших СВЗ в мире более чем на порядок. Это открывает новые возможности изучения редких процессов взаимодействия нейтронов с ядрами и/или измерения сечений σ с образцами, содержащими экстремально малое число N исследуемых ядер: при $N\sigma \approx 10^{-10} - 10^{-11}$ см² ожидается 1 событие/с.

В отличие от реакций $D + T$ и фотоядерных, в спектре нейтронов, образуемых в реакции скалывания, содержится заметное количество нейтронов с $E \geq 50$ МэВ. Такие нейтроны, в частности, могут покидать СВЗ, замедляться в материале пола и стен, и, возвращаясь обратно, искажать спектр нейтронов в местах расположения исследуемых образцов. Кроме того, из-за сверхвысокой интенсивности нейтронных потоков γ -лучи и ядра отдачи в момент импульса могут вызывать нестабильность работы детекторов. Исследование роли этих эффектов было одной из основных методических задач, решаемых на ПИТОНе. Эксперименты показали, что эти эффекты не приводят к заметному ухудшению разрешающей способности СВЗ:

1) при длительности протонного импульса ≈ 4 мкс в измерениях сечений реакции $Cu(n, \gamma)$ наблюдаемая ширина на полувысоте пика резонансов при 280 и 530 эВ составляет 37-40%, что согласуется с данными, полученными на СВЗ в ФИАНе; из этих экспериментов следует также, что в диапазоне времен t , соответствующем $\bar{E} < 5$ кэВ отсутствуют дополнительные источники фона;

2) измерения сечения реакции $Mn(n, \gamma)$ в области резонанса при 336 эВ, обладающего большой шириной рассеяния ($\Gamma_n = 22$ эВ) и в 20 раз меньшей шириной захвата,

продемонстрировали заметное увеличение экспериментальной ширины резонанса в сечении реакции, что обусловлено эффектом многократного рассеяния в образце и, как показали оценки, также согласуется с экспериментами на СВЗ в ФИАНе.

Кроме того, показано, что с помощью делительных камер со слоями ^{235}U и ^{238}U малой массы (десятки мкг) можно определять соответственно временную зависимость импульса быстрых нейтронов и F при $10^2 \text{ эВ} \leq E \leq 10^4 \text{ эВ}$.

Из проведенных на ПИТОНе экспериментов следует, что эта установка может эффективно использоваться при изучении редких процессов и для экспериментов с малым количеством исследуемых ядер (например, радиоактивных). Это позволило разработать следующую программу экспериментов на ней.

а) Исследования изомерии формы ядер. Из измерений сечения деления ряда тяжелых ядер (в частности, ^{234}U , ^{237}Np и ^{240}Pu) известно, что изомерия формы проявляется в виде групп делительных резонансов ниже порога деления. Благодаря очень большим значениям F в ПИТОНе можно надеяться существенно расширить круг исследуемых ядер, в том числе в области далеких трансактинидов. Разрешающая способность СВЗ недостаточна для разрешения отдельных резонансов, отвечающих уровням энергии основной ямы модели двугорбого барьера деления, но заведомо должна позволить обнаружить группы делительных резонансов, соответствующие уровням второй ямы. К настоящему времени подготовлен эксперимент по измерению сечения деления ядер ^{240}Pu ; разрабатывается методика измерения сечения деления изомера ядер ^{235}U , которую планируется апробировать на установке ПИТОН (сами измерения предполагается проводить на Большом СВЗ).

б) Измерения сечений деления, необходимые для расчетов трансмутации радиоактивных отходов адовой энергетики.

в) Измерения сечений реакций (n, γ) , данные о которых необходимы для расчета s -процесса нуклеосинтеза в звездах, а также других нейтрон-ядерных реакций, когда требуются высокоинтенсивные потоки нейтронов. После ввода в строй Большого СВЗ ПИТОН будет также использоваться для методических работ, связанных с подготовкой экспериментов на обеих установках.

Работа по созданию в ИЯИ РАН Большого СВЗ на основе импульсного пучка протонов ЛУ ММФ, ведется уже ряд лет. Были проведены детальные расчеты нейтронных спектров как функций времени замедления в местах расположения исследуемых образцов, влияния на них конструкционных материалов и наличия воды вблизи мишени. В настоящее время подготовлен проект Большого СВЗ в виде параллелепипеда с за-

круглыми ребрами из сверхчистого свинца с размерами $2 \times 3 \times 2 \text{ м}^3$, горизонтально лежащего на стальной платформе перпендикулярно пучку. Для подавления фона от нейтронов, рассеянных от пола и стен, он защищен экраном из B_4C и полиэтилена толщиной 6 см. На расстоянии 70 см от его торца в специальной шахте расположена мишень из свинца (охлаждаемая воздухом) или вольфрама (охлаждаемая жидким галлием). Введение в строй накопителя-группирователя пучка протонов ЛУ ММФ позволит сгруппировать в короткие импульсы весь ток протонов (до $I_p = 100 \text{ мкА}$) и даст $S \simeq 6 \cdot 10^{15} \text{ нейтр./с}$. Соответственно, при измерении сечений реакций, 1 событие/с ожидается при $N\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-12} \text{ см}^2$ (N – число исследуемых ядер). Экспериментальные каналы расположены на различных расстояниях от мишени. Наиболее удаленные каналы предназначены для измерений в области $E \geq 10 \text{ кэВ}$ с улучшенным разрешением, но при существенно меньшем F . Около мишени в призме имеются вертикальные шахты для размещения систем, предназначенных для специальных экспериментов (например, исследования эффектов, квадратичных относительно потока нейтронов, в частности, для измерения сечения взаимодействия нейтронов с радиоактивными ядрами, образованными в самом спектрометре) и отработки технологий трансмутации радиоактивных отходов ядерной энергетики и производства изотопов для прикладных целей.

Таким образом, запуск Большого СВЗ ММФ не только существенно расширит возможности спектрометрии нейтрон-ядерных реакций в области энергий до 50 кэВ, но и позволит решать важные и актуальные прикладные задачи.

На Большом СВЗ помимо исследований по программе, аналогичной программе для ПИТОНа, но с более широким кругом изучаемых ядер, планируется провести еще ряд исследований:

а) измерение энергетической зависимости сечения деления ядра изомера ^{325}U (период полураспада 26,1 мин) на установке, подобной использованной при измерении сечения деления $^{325}\text{U}^m$ тепловыми нейтронами [13];

б) отработку технологий производства изотопов для нужд медицины в специально созданном мишенном устройстве под действием пучка протонов ЛУ ММФ. Такой метод позволяет [14] эффективно нарабатывать в больших количествах нейтронодефицитные изотопы ^{123}I , ^{201}Tl и ^{82}Sr . Оценки показали также, что при взаимодействии со свинцом протонов с $E_p = 600 \text{ МэВ}$, с сечением $\sim 50 \text{ мбн}$ образуются ядра ^{188}Pt , для извлечения которых из расплавленного свинца разработана удобная технология.

в) отработку технологий трансмутации отходов ядерной энергетики и производства

изотопов для прикладных целей путем облучения быстрыми нейтронами, образуемыми в реакции скалывания, образцов, расположенных в контейнерах в отдельной шахте (например, методом, предложенным Рубиа [15]).

В заключение авторы выражают благодарность Международному научному фонду (ISF) и Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку изложенного цикла работ. Авторы искренне признательны Ж.-А. Джилкибаеву, О. А. Лангер, Г. К. Матушко, В. А. Федченко и Ю. М. Шейнову, принимавшим участие в работе по данному направлению на ее отдельных этапах.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Лазарева Л. Е., Фейнберг Е. Л., Шапиро Ф. Л. ЖЭТФ, **29**, 381 (1955).
- [2] Бергман А. А., Исаков А. И., Мурин И. Д. и др. Труды Женевской конференции, 1955 г. **4**, 166 (1957).
- [3] Bergman A. A., Isaakov A. I., Kazarnovskiy M. V. et al. In: Pulsed Neutron Research. IAEA Symposium, Karlsruhe, **1**, 671 (1965).
- [4] Шапиро Ф. Л. Докторская диссертация. Труды ФИАН, **24**, 3 (1964).
- [5] Исаков А. И. Труды ФИАН, **24**, 68 (1964).
- [6] Казарновский М. В. Труды ФИАН, **11**, 176 (1957).
- [7] Казарновский М. В. Атомная энергия, **4**, 539 (1958).
- [8] Джилкибаев Ж.-А., Казарновский М. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 15 (1981).
- [9] Slovacek R. E., Cramer D. S., Bean E. V. et al. Nucl. Sci. Eng., **62**, 455 (1977).
- [10] Nasagome Y., Kobayashi K., Yamamoto S. et al. Lead Slowing-Down Spectrometer Coupled to Electron Linac (1). JAERI 92-027, 1992, p. 375.
- [11] Stavisky Yu. Ya. Investigation with Neutrons on the Base of Moscow Meson Factory. Nuclear Energy. Bulgarian Academy of Science, N 25, Sofia, 1987.
- [12] Moore M. S., Koehler P. E., Michaudon A. et al. In: Capture Gamma-Ray Spectroscopy. Ed. by R. W. Hoff. AIP Conference Proceeding, **238**, N.-Y. 953 (1991).
- [13] Мостовой В. И., Устров Г. И. Атомная энергия, **57**, 241 (1984).

- [14] Жуиков Б. Л., Зеленский А. Н., Ильинов А. С. и др. В Сб. Труды Международного семинара по физике промежуточных энергий (СССР, Москва, 1989 г., 27-30 ноября) INES-89. 1, 279 (1990).
- [15] Rubbia C. Resonance Enhanced Neutron Captures for Element Activation and Waste Transmutation. CERN/LNC/97-04(EET).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 8 июля 1998 г.