

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-11

Д15-96-11

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ -РЕАКЦИИ
ПРИ УЛЬТРАНИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ
СТОЛКНОВЕНИЯ ДЕЙТРОНОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Z-ПИНЧА

Направлено в журнал «NIM»

1996

В.М.Быстрицкий, В.М.Гребенюк, С.С.Паржицкий, Б.М.Сабилов, В.А.Столупин
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Т.Л.Булгаков, Г.А.Месяц, А.А.Синебрюхов, В.А.Синебрюхов
Институт электрофизики РАН, г.Екатеринбург, Россия

А.В.Лучинский, В.И.Махрин, Н.А.Ратахин, С.А.Сорокин, С.А.Чайковский
Институт сильноточной электроники СО РАН, г.Томск, Россия

Вит.М.Быстрицкий
Калифорнийский университет, США

А.Гула, Я.Возняк, М.Филипович
Институт физики и ядерной техники, г.Краков, Польша

1. Введение

Изучение сильных взаимодействий между легкими ядрами в области ультранизких энергий представляет значительный интерес. Это обусловлено тем, что появляется реальная возможность проверки фундаментальных симметрий при ультранизких энергиях в сильных взаимодействиях таких, как зарядовая симметрия, четность и др. К настоящему моменту существуют только данные о длинах pn -, nd -, pHe -рассеяний в различных спиновых состояниях; данные же о длинах pp -, pd -, pHe -рассеяний, а также о фазах и вероятностях рассеяния отсутствуют. Кроме исследования ядерных сил в указанной области энергий большой интерес представляет собой: а) изучение некоторых динамических загадок (например, существование слабосвязанных состояний или резонансов в малоадронных системах); б) исследование процесса радиационного захвата в реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ с точки зрения изучения структуры обменных мезонных токов /1/ (достаточно большой их вклад в данной области энергий); в) измерение характеристик ядерных реакций с целью разрешения ряда проблем, существующих в астрофизике. Например, при анализе распространенности легких ядер в звездах и Галактике значение сечений ядерных реакций для астрофизической области энергий (\approx кэВ) получают путем экстраполяции ядерных сечений, полученных при более высоких энергиях, при этом полагается отсутствие резонансов или какого-либо другого аномального поведения сечений ядерных реакций в данной области энергий /2,3/. В таблице 1 приведены существующие в настоящее время экспериментально измеренные значения сечений ядерных реакций для легких ядер /4-8/.

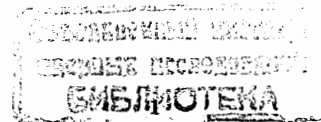


Таблица 1. Экспериментальные значения сечений

Реакция	Энергия столкновения (кэВ)	Измеренные значения сечений (10^{-24}см^2)	Работа
p+d	16.7	$4.2 \cdot 10^{-8}$	[4]
d+d \rightarrow $^3\text{He} + n$	3.4	$1.7 \cdot 10^{-6}$	[5]
$\rightarrow t + p$	2.98	$2.5 \cdot 10^{-7}$	[6]
d+t	5.0	$5.3 \cdot 10^{-4}$	[7]
t+t	17.1	$7 \cdot 10^{-4}$	[8]

Применение классических ускорителей для измерения сечений данных процессов неприемлемо из-за низкой интенсивности пучков ускоренных частиц протонов и дейтронов. Согласно теоретическим вычислениям диапазон значений сечений исследуемых реакций в указанной области энергий столкновения составляет $10^{-32} - 10^{-45} \text{см}^2$ /9/ (см. таблицу 2).

Таблица 2. Расчетные значения сечений

Реакция	Энергия продуктов реакции (МэВ)	Расчетные значения сечений (10^{-24}см^2)	Энергия столкновения (кэВ)
p + d \rightarrow $^3\text{He} + \gamma$	$E_\gamma = 5.5$	$1 \cdot 10^{-21}$ $1 \cdot 10^{-13}$	0.4 1.6
d + d \rightarrow $^3\text{He} + n$ $\rightarrow t + p$	$E_n = 2.46; E_{He} = 0.8$ $E_p = 3.0; E_t = 1.0$	$2 \cdot 10^{-16}$ $3 \cdot 10^{-8}$	0.6 2.4
d + d $\rightarrow \alpha + \gamma$	$E_\gamma = 23.8$	$4 \cdot 10^{-23}$ $7 \cdot 10^{-15}$	0.6 2.4

В работах /9-11/ нами был предложен метод измерения сечений ядерных реакций в области ультранизких энергий с использованием высокоинтенсивных ионных потоков, генерируемых в течение имплозии лайнера (интенсивность ионных потоков в указанной области энергий, получаемых таким методом, составляет $\approx 10^{20}$ частиц в импульсе). Проведение экспериментов в предлагаемой постановке позволит существенно понизить верхнюю границу диапазона измерения сечений исследуемых процессов ($\sigma \approx 10^{-38} - 10^{-42} \text{см}^2$).

Целью настоящей работы является измерение сечения dd-реакции при средней энергии дейтронов ≈ 440 эВ с использованием Z-пинча.

2. Метод измерения

Для измерения сечения dd-реакции был использован поток дейтронов, генерируемый при имплозии плазменного лайнера. Суть метода получения высокоинтенсивных потоков дейтронов заключается в следующем (см.рис. 1). К лайнеру (сверхзвуковая газовая струя дейтерия, инжектируемая в вакуум через сопло Лавала с электромагнитным клапаном) прикладывается импульс напряжения, который ионизует его. Затем при протекании тока по лайнеру, он ускоряется к оси под действием возникающего магнитного поля. При этом относительные флуктуации энергии ускоренных дейтронов на конечной стадии сжатия лайнера составляют $\approx 20\%$.

Следует отметить трудности принципиального характера, свойственные предлагаемой методике. Главной из них является то, что на конечной стадии сжатия лайнера из-за развития ряда неустойчивостей в нем возможно появление дейтронов с энергией до нескольких сотен кэВ. Поскольку сечения исследуемой реакции в данном диапазоне энергий дейтронов составляют $10^{-28} - 10^{-30} \text{см}^2$, то выход продуктов dd-реакции, обусловленный высокоэнергетической компонентой дейтронов, может быть сравним с выходом реакции в интересующем нас диапазоне энергий.

Возможны два пути решения этой проблемы. Первый из них /12/ заключается в том, что расположив на оси лайнера твердотельную дейтериевую мишень (например, из дейтерированного полиэтилена) конечного диаметра, мы не достигнем фазы максимального сжатия лайнера и тем самым не допустим развития неустойчивостей в плазме (умеренная степень сжатия меньше 10). Второй метод заключается в стабилизации лайнера внешним аксиальным магнитным полем /13,14/.

Эксперимент проводился в ИСЭ СО РАН на сильноточном наносекундном ускорителе с параметрами: ток - 750 кА, напряжение - 700 кВ, время нарастания тока до максимального значения 60 нс.

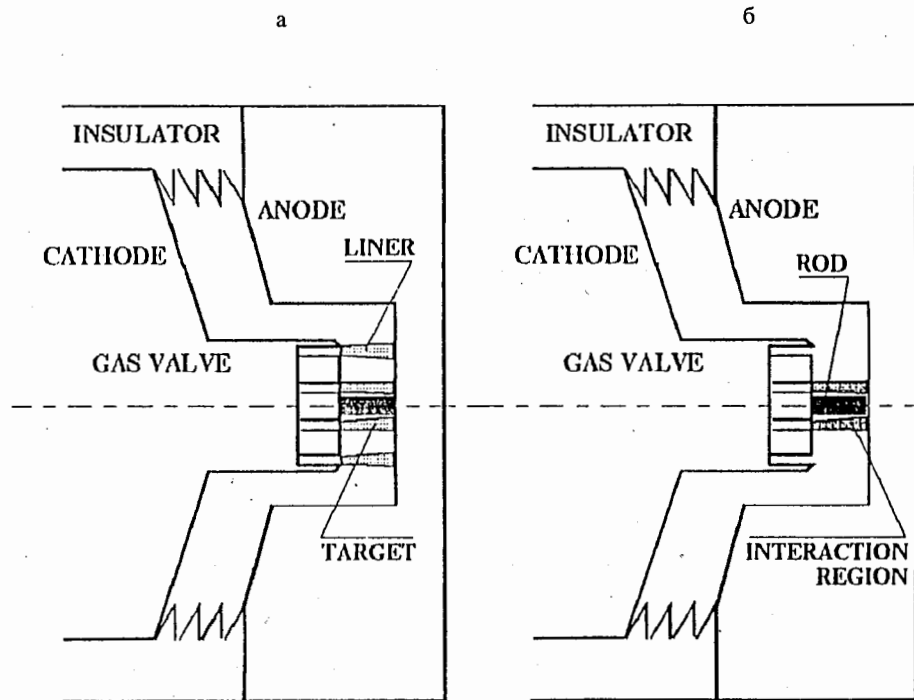


Рис. 1. Двухкаскадный газовый лайнер.
 а — исходное положение лайнера;
 б — момент взаимодействия лайнера с мишенью

Экспериментальная установка включала в себя мощный сильноточный наносекундный генератор, нагрузочный модуль ускорителя и аппаратуру для регистрации продуктов dd-реакции (см. рис. 2).

В этом эксперименте использовался двухкаскадный газовый лайнер (внутренний каскад использовался в качестве мишени). Регистрация нейтронов dd-реакции производилась двумя типами детекторов: сцинтилляционными спектрометрами с использованием методики по времени пролета (4 спектрометра) и детекторами тепловых нейтронов, заполненными BF_3 и помещенными в полиэтиленовый замедлитель (6 детекторов). Сцинтиллятор нейтронного детектора был выполнен в виде параллелепипеда с размерами $100 \times 100 \times 750$ мм и просматривался с двух сторон фотоумножителями типа XP-2020.

Диагностическая аппаратура для контроля процесса ускорения лайнера включала в себя детектор мягкого рентгеновского излучения, фотоэлектронный регистратор с электронно-оптическим преобразователем и dB/dt - зонды.

В данной постановке эксперимента /9-11/ сечение dd-реакции с образованием нейтронов определяется так:

$$\sigma_{dd} = \frac{N_n}{I_d n_t d \varepsilon_n} \quad (1)$$

где N_n - число зарегистрированных нейтронов, I_d - полное число ускоренных дейтронов лайнера, падающих на мишень; n_t - плотность дейтронов мишени; d - пробег дейтрона в мишени; ε_n - эффективность регистрации нейтронов.

Величина I_d определяется энергетикой генератора, эффективностью передачи энергии генератора в лайнер и скоростью, до которой необходимо разогнать лайнер. В 0-мерной модели сжатия лайнера величина I_d может быть найдена из выражения для массы лайнера на единицу длины:

$$M(\text{г/см}) = 2 \cdot 10^{10} I^2(\text{МА}) \ln(R/r)/v^2(\text{см/с}). \quad (2)$$

где M - масса лайнера на единицу длины; I - ток ускорителя; R, r - начальный и конечный радиусы лайнера; v - скорость лайнера на конечной стадии сжатия.

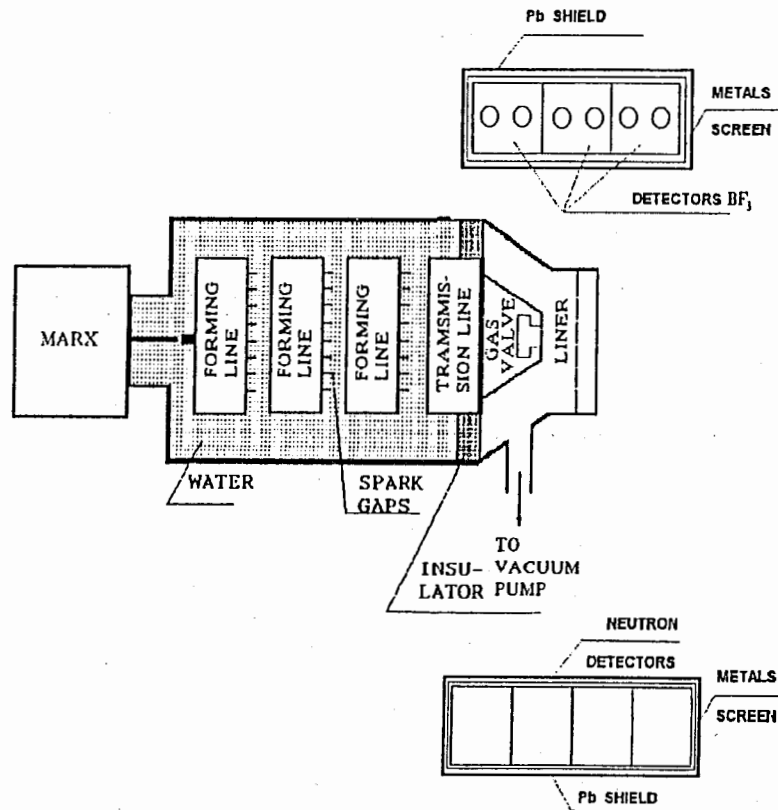


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

3. Проведение эксперимента

На начальной стадии исследований нами был проведен методический эксперимент с целью тестирования работы ядерно-физической регистрирующей аппаратуры в сильных полях γ -квантов и электромагнитного излучения. Два различных типа лайнеров служили нагрузкой ускорителя: гелиевый и дейтериевый. Время максимальной имплозии составляло для обоих лайнеров от 60 до 100 нс.

Результаты данного эксперимента свидетельствовали о том, что при отсутствии высокого напряжения на ФЭУ уровень наводок не превышал 10 мВ.

Следующим этапом исследований являлось измерение загрузки детекторов нейтронов, обусловленной мощным рентгеновским излучением лайнера. При срабатывании ускорителя ("выстреле") сигнал со сцинтилляционного детектора нейтронов без использования свинцовой защиты имеет амплитуду ~ 20 В при длительности ~ 40 нс, причем время появления сигнала соответствовало, как и следовало ожидать, моменту сжатия гелиевого лайнера (рис. 3б). Далее детектор был окружен свинцовой защитой толщиной 5 см, что позволило, как видно из рис. 3в, практически полностью подавить загрузку нейтронного спектрометра рентгеновским излучением и тем самым четко идентифицировать сигнал, обусловленный регистрацией нейтронов dd-реакции (дейтериевый лайнер). Для подавления загрузки детектора тепловых нейтронов рентгеновским излучением он также был окружен свинцовой защитой толщиной 1,2 см.

Дальнейшие исследования динамики сжатия лайнера позволили нам выбрать такие условия, при которых выход продуктов dd-реакции за счет развития неустойчивостей в Z-пинче был существенно ниже порога чувствительности детектирующей системы. При этом использовался двухкаскадный газовый лайнер из смеси D_2+N_2 (молекулярные концентрации дейтерия и азота в смеси D_2+N_2 составляли 17% и 83% соответственно). Наружный каскад представлял собой полую струю газа диаметром 27 мм и толщиной 3 мм. Сопло внутреннего каскада формировало струю газа наружным диаметром 13 мм вокруг стержня

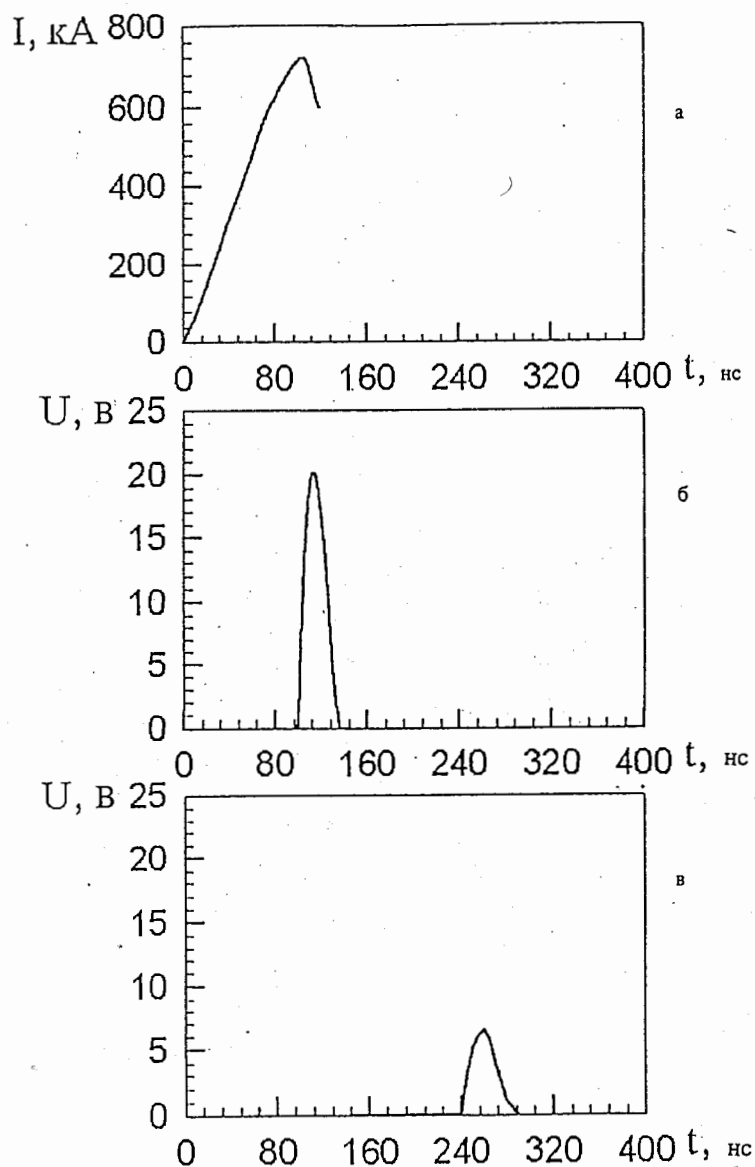


Рис. 3. Осциллограммы: а — импульса тока через лайнер; б, в — сигналов со сцинтилляционного детектора нейтронов без защиты из Рв (гелиевый лайнер) и с защитой из Рв (дейтериевый лайнер) соответственно

диаметром 9 мм (ось стержня совпадала с осью лайнера). Наличие стержня на оси лайнера не допускало высоких степеней сжатия последнего и подавляло развитие неустойчивостей.

Для выбранных условий полная масса лайнера составляла 33 мкг, что соответствует полному количеству ускоренных дейтронов $2,8 \cdot 10^{17}$ в одном выстреле. При этом средняя энергия ускоренных дейтронов составляла 440 эВ. Данное значение энергии получено путем усреднения соответствующей величины по числу срабатываний ускорителя (разброс средних энергий дейтронов составлял ${}_{-140}^{+180}$ эВ). Полная масса мишени составляла 102 мкг, что соответствовало количеству дейтронов в ней $9,1 \cdot 10^{17}$. Суммарная эффективность регистрации нейтронов экспериментальной установкой составляла $2,1 \cdot 10^{-3}$. Порог регистрации нейтронов сцинтилляционными детекторами составлял 0,25 МэВээ (в единицах эквивалентной по световыходу энергии электронов). В течение эксперимента нами периодически производилась калибровка спектрометрических трактов с использованием стандартных γ -источников ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{137}\text{Cs}$. Кроме этого, для проверки правильности работы регистрирующей аппаратуры в среднем через каждые 5 выстрелов со смесью 17% D_2 +83% N_2 производится выстрел с лайнером из чистого дейтерия без стержня на оси (в этом случае наблюдались большие потоки нейтронов, $10^6 \div 10^7$ нейтронов/импульс, обусловленные развитием неустойчивостей в лайнере за счет высоких степеней сжатия).

В эксперименте было произведено 25 выстрелов с двухкаскадным лайнером из смеси 17% D_2 +83% N_2 и стержнем, расположенным на оси. Ни в одном из выстрелов не было зарегистрировано ни одного нейтрона.

Таким образом, согласно выражению (1) нами на 90% уровне достоверности получено верхнее граничное значение сечения dd-реакции с образованием нейтрона при средней энергии дейтронов 440 эВ:

$$\sigma_{dd} < 10^{-33} \text{ см}^2.$$

4. Заключение

Впервые экспериментально полученная верхняя оценка сечения dd-реакции с образованием нейтрона при средней энергии дейтронов 440 эВ $\sigma_{dd} < 10^{-33}$ см² свидетельствует о том, что предложенный нами ранее метод исследования сильных взаимодействий между легкими ядрами в области ультранизких энергий столкновения с использованием импульсных высокоинтенсивных ионных потоков позволяет реально сделать столь необходимый шаг для понимания механизмов протекания ядерных реакций в той области энергий, которая практически недоступна при использовании классических ускорителей.

Хотя и полученная верхняя граничная оценка сечения dd-реакции существенно выше расчетного значения сечения данной реакции, тем не менее в настоящее время имеется реальная возможность на несколько порядков понизить эту оценку путем использования более мощных импульсных ускорителей, дальнейшей оптимизации динамики сжатия лайнеров (в плане увеличения массы лайнера при условии отсутствия возможных неустойчивостей в нем), а также расширения функциональных возможностей регистрирующей аппаратуры.

Приведенный результат является предварительным, так как основан на анализе только лишь части полученных экспериментальных данных.

В настоящее время работа находится в развитии, и конечной целью ее является исследование энергетической зависимости сечения dd-реакции в диапазоне энергий столкновения дейтронов 0, 2 ÷ 1 кэВ.

Авторы выражают глубокую признательность В.Б. Бруданину, Е. Неводничанскому и А. Хрынкевичу за постоянный интерес и поддержку в процессе выполнения работы, а также В.Б. Беляеву и О.М. Картавцеву за полезные дискуссии и ценные замечания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научного фонда (грант № RGN000), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-05689) и Полномочного Представителя Республики Польши в ОИЯИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Bargholz, Astr. J., 1979, v. 233, p. L161-L171; Nucl Phys., 1987, v. A474, p. 1.
2. C. Rolfs, Proc. Intern. School of Phys. "Enrico Fermi". Course C. 3, Villa Monastero, 23 June - 3 July 1987, edited by P. Kienle, R.A. Ricci and A. Rubbino. North Holland, 1989, p. 417.
3. M. Arnould, M. Forestini, Nuclear Astrophysics Proc. of the Third Intern. Summer School, La Rabida, Huelva, Spain, 1988. Springer-Verlag, Research Reports in Physics, p. 48.
4. G.M.Griffiths, M.Lal, C.D.Scarfe. Can. J. Phys., 1963, v. 41, p. 724.
5. A.S.Belov, V.E.Kusik, Yu.V.Ryabov. Nuovo Cim., 1990, v. 103A, No 11, p. 1647.
6. A.Krauss, H.W.Becker, H.P.Trautvetter et al., Nucl. Phys., 1987, v. A465, p. 150.
7. N.Jarmie, R.E.Brown and R.A.Hardekopf. Phys. Rev. C, 1984, v. 29, No 6, p. 2031.
8. В.И.Серов, С.Н.Абрамович, Л.А.Моркин. Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 1, с. 59.
9. V.B. Belyaev, V.M. Bystritsky, A.A. Sinebryukhov, et al., Preprint JINR D15-95-378, Dubna, 1995: to be published NIM.
10. V.B. Belyaev, Viach.M. Bystritsky, Vit.M. Bystritskii et al., JINR Communication, D15-92-324, Dubna, 1992.
11. Vit.M. Bystritskii, A.A. Sinebryukhov, Viach.M. Bystritsky, et al., 10-th IEEE International Pulsed Power Conference, Abstrat Book, P2-67, Albuquerque, New Mexico, July 10-13, 1995, USA.
12. Р.Б. Бакшт, ЖТФ, 1989, т. 59, с. 57.
13. С.А. Сорокин, А.А. Хачатурян, С.А. Чайковский. Физика плазмы, 1991, т. 17, вып. 12, с. 1453.
14. С.А. Сорокин, С.А. Чайковский. Физика плазмы, 1993, т. 19, вып. 7, с. 856.