



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Д15-99-163

АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ S -ФАКТОР
В dd -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ПРИ УЛЬТРАНИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Направлено в «European Physical Journal»

1999

В.М.Быстрицкий, В.М.Гребенюк, С.С.Паржицкий, Ф.М.Пеньков,
В.А.Столупин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Г.А.Месяц

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Е.Н.Волков, В.И.Махрин, Н.А.Ратахин, В.А.Синебрюхов, С.А.Сорокин,
С.А.Чайковский

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Вит.Быстрицкий

Калифорнийский университет, Ирвайн, США

Я.Возняк, М.Филипович

Институт физики и ядерной техники, Краков, Польша

Е.Гула

Институт ядерной физики, Краков, Польша

Введение

Изучение dd -реакции в области ультранизких энергий (\sim кэВ) представляет большой интерес не только с точки зрения физики малонуклонных систем [1,2] (составное ядро ${}^4\text{He}$ обладает наименьшей массой среди дважды магических систем), но и в плане разрешения ряда проблем, существующих в астрофизике (дефицит легких ядер в Галактике за исключением He [3,4]). Кроме того, актуальность исследования сильных взаимодействий между легкими ядрами обусловлена не только возможностью проверки фундаментальных симметрий (зарядовой симметрии, изотопической инвариантности) [1,2], но и возможностью получения информации о вкладе во взаимодействие обменных мезонных токов [5-8], о величине эффекта экранировки взаимодействующих ядер [9,10], о характере нуклон-нуклонного потенциала [1,2,7] и о масштабе эффекта Опенгеймера - Филипса [11,12].

Экспериментальное исследование ядерных реакций в области ультранизких энергий столкновения (\sim кэВ) с использованием классических ускорителей весьма проблематично [13,14]. Это обусловлено тем, что сечения данных процессов в указанной области энергий ($\sigma \approx 10^{-35} - 10^{-43} \text{ см}^2$) и интенсивности пучков заряженных частиц крайне малы.

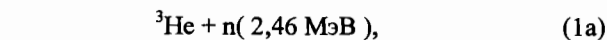
Рис.1, в качестве примера, отражает реальную экспериментальную ситуацию, существующую в настоящее время в области изучения dd -реакции. Как видно, информация практически отсутствует в интересующей нас области энергий столкновения дейтронов (\sim кэВ).

Для получения необходимой информации о характеристиках реакций между легкими ядрами в области ультранизких энергий (\sim кэВ) нами был предложен новый подход [4,13,18,19] к решению данной проблемы.

Суть его заключается в использовании высокоинтенсивных радиально конвергируемых ионных потоков, генерируемых в течение имплозии лайнерной плазмы (формирование Z-пинча). При этом интенсивность потоков ускоренных ионов достигает $10^{20} - 10^{21}$ [20-25] частиц в импульсе.

Первые эксперименты на сильноточном ускорителе ($I = 750 \text{ кА}$, I - ток лайнера) Института сильноточной электроники СО РАН (Томск) по исследованию dd -реакции с использованием данной методики [14,17,26-28] свидетельствовали о том, что предложенный подход заслуживает внимания и может быть эффективно применен для реализации программы исследования сильных взаимодействий в области ультранизких энергий.

Настоящая работа посвящена измерению S-фактора в dd -реакции



при энергиях столкновения 1,8; 2,06; 2,27 кэВ.

энергии столкновения; ε_n - эффективность регистрации нейтронов; \bar{E} - средняя энергия столкновения дейтронов; N_d - число дейтронов, падающих на мишень; n_t - плотность дейтронов в мишени; $2\pi\eta' = 31,29Z^2(\mu/E'(E, x'))^{1/2}$; $N_n(x)$ - выход нейтронов реакции (1a) из мишени толщиной x ; N_n^{tot} - полное число зарегистрированных нейтронов; $\frac{dE}{dx} = -\frac{2\pi n_t e^4}{E} L$ - удельные кулоновские потери

энергии дейтронов лайнера за счет их столкновения с дейтронами мишени, E - энергия дейтронов лайнера в лабораторной системе, e - элементарный электрический заряд, L - кулоновский логарифм для дейтериевой плазмы, соответствующий условиям настоящего эксперимента ($L=12,8$) [30]. В формуле (4) переменная интегрирования E' (энергия столкновения дейтронов в системе центра масс) соответствует энергии дейтрона E в лабораторной системе после прохождения слоя мишени толщиной x' .

Согласно формуле (5), экспериментальное значение астрофизического S-фактора в dd-реакции, соответствующее определенной средней энергии столкновения дейтронов \bar{E} , определяется как:

$$S(\bar{E}) = \frac{N_n^{exp}}{N_d n_t \varepsilon_n \int_0^\infty f(E) dE \int_0^\infty \frac{e^{-2\pi\eta'}}{E'(E, x')} dx'} \quad (6)$$

где N_n^{exp} - число зарегистрированных нейтронов в dd-реакции.

Кроме определения S-фактора, из анализа экспериментальных данных может быть также извлечена информация об эффективной толщине мишени \tilde{l} (данное понятие введено нами в предыдущей работе [17]).

Указанная величина определяется как:

$$N_n(\tilde{l}) = 0,9 N_n^{tot} \quad (7)$$

$$N_n(\tilde{l}) = N_d n_t \varepsilon_n \times S(\bar{E}) \int_0^\infty f(E) dE \int_0^{\tilde{l}} \frac{e^{-2\pi\eta'}}{E'(E, x')} dx' \quad (8)$$

где $N_n(\tilde{l})$ - выход зарегистрированных нейтронов из реакции (1a) при толщине мишени \tilde{l} .

Следует отметить одно важное обстоятельство. В расчетах мы полагаем, что кулоновский сброс энергии дейтронов при взаимодействии их с мишенью происходит на дейтронах мишени, а не на электронах, как это вытекает из теоретической модели торможения дейтронов лайнера в полностью ионизируемой дейтериевой плазме [30]. Такое предположение было продиктовано как результатами экспериментальной работы [31], так и другими

моделями торможения заряженных частиц в плазме [32-33], свидетельствующими о прозрачности мишени по отношению к электронам для падающих на нее дейтронов.

3. Постановка эксперимента

Выполнение эксперимента производилось на сильноточном ионном импульсном ускорителе [34] ИСЭ СО РАН (см. рис.2). В качестве лайнера использовалась сверхзвуковая полая цилиндрическая струя газообразного дейтерия с числом Маха 4, формируемая электромагнитным клапаном и соплом Ловаля. Мишень была изготовлена из дейтерированного полиэтилена (CD_2), который наносился на медный цилиндр, устанавливаемый вдоль оси лайнера. Параметры мишени и лайнера приведены в таблице 1.

В фоновых опытах в качестве мишени использовался идентичный стержень из Cu либо покрытый слоем CH_2 . Методика измерения массы и скорости лайнера, основанная на измерении тока через лайнер и времени его сжатия, подробно описаны в работе [17]².

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Опыт	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лайнер	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂	D ₂
Мишень	CD ₂	CD ₂	CD ₂	CD ₂	Cu	Cu	Cu	Cu	CH ₂
\bar{E} , кэВ	2,1	2,4	2,8	3,4	3,4	2,8	2,4	2,1	2,4
M, мкг	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88	6,88
l см	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
N_d , 10 ¹⁸	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07
n_t , 10 ²² см ⁻³	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
d_1^{in} , мм	32	32	32	32	32	32	32	32	32
d_1^{ex} , мм	36	36	36	36	36	36	36	36	36
d_t , мм	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
t, мм	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
N_n^{th}	2±2	7±2	22±8	86±25	4±3	3±2	2±2	2±2	2±2
FWHM, %	80	65	65	55	55	65	65	80	65

\bar{E} - средняя энергия дейтронов, падающих на мишень (данное значение - результат усреднения по выстрелам); M - масса лайнера; l - длина лайнера; d_1^{in} , d_1^{ex} - внутренний и наружный диаметры лайнера; d_t - диаметр мишени; t -

² Масса лайнера и время его сжатия определялись из нульмерного расчета [35], в основе которого лежит рассмотрение лайнера как бесконечно тонкой цилиндрической сверхпроводящей оболочки, сжимающейся к центру под действием сил собственного магнитного поля.

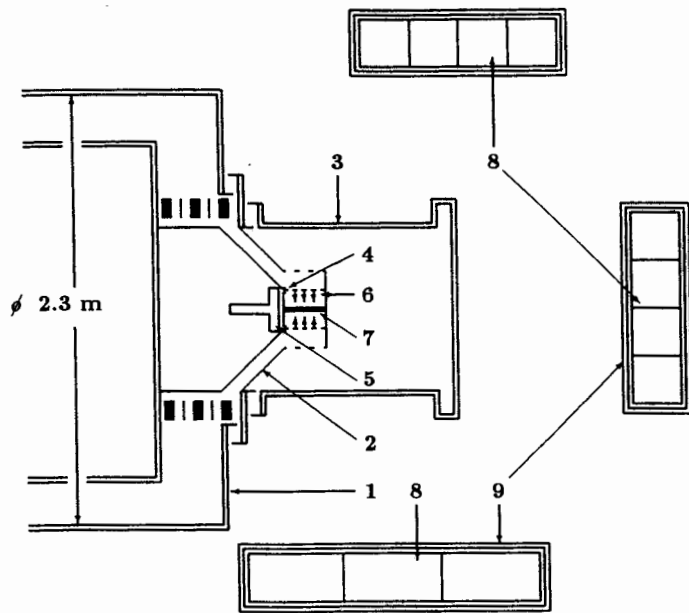


Рис 2 Схема экспериментальной установки: 1- сильноточный импульсный ускоритель; 2 - модуль нагрузки ускорителя; 3 - измерительная камера; 4 - сверхзвуковое сопло; 5 - быстродействующий электромагнитный клапан; 6 - газовый лайнер; 7 - твердотельная мишень из CD_2 ; 8 - детекторы тепловых нейтронов; 9 - защита из свинца

толщина слоя CD_2 , нанесенного на стержень из Cu ; N_n^{th} - число нейтронов, зарегистрированных тепловыми детекторами.

Приведенные в таблице 1 значения FWHM (ширина на полувысоте энергетического распределения дейтронов, падающих на мишень), соответствуют данным работ [28,36], в которых производилось исследование процесса сжатия лайнера с помощью хронографа с щелевой разверткой изображения, а также магнитных зондов, установленных на определенных радиусах относительно оси лайнера.

Значения FWHM обусловлены не только неточностью определения скорости лайнера $\pm 10\%$, путем сравнения экспериментального и расчетного (в нульмерной модели) времени сжатия лайнера, но и разбросом дейтронов по энергии, связанным с возможным возникновением неустойчивости внешней границы в виде "ряби" с характерной длиной волны 1-2 мм. Скорости сжатия лайнера в области "впадины" и "горба" могут отличаться на $\approx 10\%$, что, в свою очередь, приводит к 20% разбросу дейтронов по энергии.

Следует также отметить и то, что при неизменных начальных условиях разброс массы лайнера от выстрела к выстрелу составляет $\approx 10\%$.

В настоящей работе регистрация нейтронов dd -синтеза осуществлялась тремя детекторами тепловых нейтронов на основе пропорциональных счетчиков BF_3 , помещенных в парафиновый замедлитель. Каждый детектор включал в себя в среднем 10 счетчиков BF_3 и устанавливался на расстоянии $\sim 0,9$ м от центра мишени (см. рис.2). Эффективность регистрации нейтронов измерялась с помощью калиброванного источника ^{252}Cf , помещенного внутрь измерительной камеры 3 (см. рис.2) в центр области формирования Z-пинча. Суммарная эффективность регистрации нейтронов тремя BF_3 -детекторами составила 5×10^{-3} .

Для подавления загрузки BF_3 -детекторов, обусловленной тормозным излучением, возникающим при работе сильноточного генератора, они окружались защитой из свинца толщиной 12 мм.

Информация о зарегистрированном событии включала в себя:

- 1) время появления и амплитуду сигнала с BF_3 -детекторов;
- 2) время появления сигналов с магнитных зондов (как основной параметр, характеризующий динамику имплозии лайнера);

Более подробная информация о регистрирующей электронике приведена в работах [17,19,27].

4. Обсуждение результатов

В рамках выдвинутых предположений о взаимодействии лайнера с мишенью (см. раздел "Метод измерения") нами проведен анализ экспериментальных данных, полученных при четырех значениях средней энергии столкновения дейтронов: $\bar{E}_{col} = 1,79; 1,8; 2,06; 2,27$ кэВ.

Определение значений астрофизического S-фактора, соответствующих определенным энергиям столкновения дейтронов, производилось по формуле

(6). При этом предполагалось, что взаимодействие радиально ускоренных дейтронов лайнера происходит с мишенью, находящейся в состоянии полностью ионизованной плазмы.

Согласно нашим оценкам и данным работы [37], в условиях настоящего эксперимента, при имплозии дейтериевого лайнера поверхность мишени разогревается до температуры 20 - 30 эВ.

На рис. 3а приведены распределения дейтронов, падающих на мишень, по энергии столкновения¹, а на рис. 3б - расчетное дифференциальное распределение вероятности регистрации нейтронов dd-синтеза экспериментальной установкой $P(E_{col})$, нормированное на единицу:

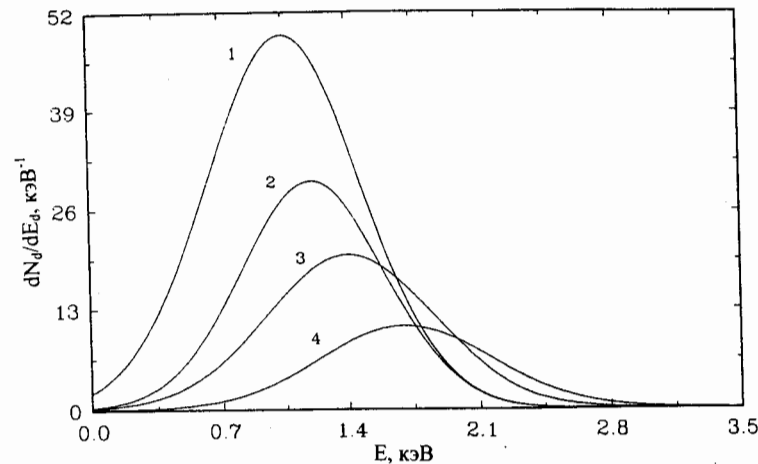
$$P(E_{col}) = f(E) \int_0^{\infty} \frac{e^{-2\pi\eta'}}{E'(E, x')} dx' / \int_0^{\infty} f(E) dE \int_0^{\infty} \frac{e^{-2\pi\eta'}}{E'(E, x')} dx' \quad (9)$$

Среднее значение энергии столкновения дейтронов \bar{E}_{col} , среднеквадратичное отклонение $\Delta E'_{col}$, соответствующие распределению $P(E_{col})$, приведены в таблице 2, в которой представлены также результаты анализа экспериментальных данных.

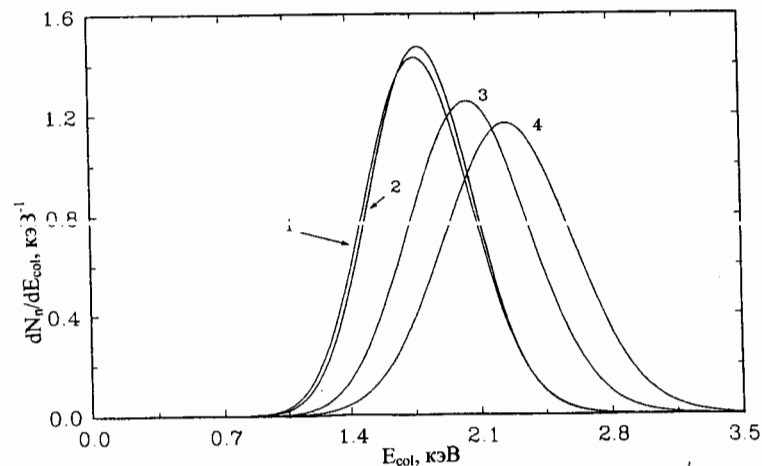
На рис. 4 приведены найденные нами экспериментальные значения астрофизического S-фактора для dd-реакции по формуле (6), соответствующие энергиям столкновения дейтронов 2,27; 2,06 и 1,8 кэВ. На этом же рисунке приведены значения S-фактора в dd-взаимодействиях, существующие в литературе к настоящему времени в интервале энергий столкновений 6,9-160 кэВ [15,38]. Как видно из рис. 4, найденные нами значения S-фактора в пределах статистических ошибок согласуются со значениями данной величины, измеренными в интервале энергий столкновения дейтронов 7-45 кэВ.

Что касается сечений dd-реакции, то нами были выполнены вычисления данной величины (согласно формуле (2)), соответствующие значениям энергии столкновения дейтронов $\bar{E}_{col} - \Delta E'_{col}$, \bar{E}_{col} , $\bar{E}_{col} + \Delta E'_{col}$. При этом в выражение (2) подставлялись экспериментально найденные значения S-фактора. Полученные таким образом значения сечения dd-реакции приведены на рис.1. Как видно, в пределах статистических ошибок наблюдается согласие расчетных значений сечения dd-реакции (пунктирная кривая) с экспериментальными.

¹ Данное распределение получено расчетным путем в предположении, что оно является гауссовским, с использованием дисперсий, соответствующих значениям FWHM, приведенным в таблице 1.



а)



б)

Рис.3. а) - дифференциальное распределение дейтронов, падающих на мишень, по энергии столкновения: 1,2,3,4 - $\bar{E} = 1,05; 1,2; 1,4; 1,7$ кэВ. б) - дифференциальное распределение вероятности регистрации нейтронов по энергии столкновения дейтронов: 1,2,3,4 - $\bar{E}_{col} = 1,79; 1,8; 2,06; 2,27$ кэВ. (распределение нормировано на единицу) Номера на рисунках а) и б) соответствуют друг другу

Таблица 2. Результаты анализа экспериментальных данных

Опыт	1	2	3	4
ЭКСПЕРИМЕНТ				
\bar{E} , кэВ	1,05	1,2	1,4	1,7
N_n^{exp}	≤ 4	5 ± 3	19 ± 9	82 ± 25
\bar{E}_{col} , кэВ	1,79	1,80	2,06	2,27
$\Delta E'_{col}$, кэВ	0,28	0,27	0,32	0,34
$\bar{\Gamma} n_{\gamma}$, 10^{18} см^{-2}	1,40	1,42	1,96	2,42
K	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$
S , б·кэВ	≤ 170	114	64	53
ΔS , б·кэВ		68	30	16
РАСЧЕТ				
N_n^{cal}	1,2	2,2	14,9	77,4
$\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col})$, см^2	$\leq 6,1 \cdot 10^{-33}$	$4,3 \cdot 10^{-33}$	$9,8 \cdot 10^{-33}$	$2,1 \cdot 10^{-32}$
$\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col} + \Delta E'_{col})$	$\leq 2,7 \cdot 10^{-32}$	$1,8 \cdot 10^{-32}$	$3,9 \cdot 10^{-32}$	$7,4 \cdot 10^{-32}$
$\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col} - \Delta E'_{col})$	$\leq 8,9 \cdot 10^{-34}$	$7,0 \cdot 10^{-34}$	$1,7 \cdot 10^{-33}$	$4,2 \cdot 10^{-33}$

\bar{E} - средняя энергия столкновения дейтронов лайнера и мишени; \bar{E}_{col} - среднее значение энергии столкновения дейтронов, дающих вклад в экспериментально измеренный выход нейтронов реакции (1a); K - доля от общего числа dd-столкновений, дающая вклад в экспериментально измеренный выход зарегистрированных нейтронов. $\Delta E'_{col}$ - среднеквадратичный энергетический разброс дейтронов, определяемый функцией распределения плотности вероятности регистрации нейтронов dd-синтеза; ΔS - среднеквадратичная ошибка определения астрофизического S-фактора; N_n^{exp} , N_n^{cal} - экспериментальное и расчетное (по формуле (5)) числа зарегистрированных нейтронов dd-синтеза; $\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col})$, $\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col} + \Delta E'_{col})$, $\sigma_{dd}^n(\bar{E}_{col} - \Delta E'_{col})$ - расчетные значения сечения dd-реакции, вычисленные по формуле (2) с использованием экспериментально найденных значений S-фактора и соответствующие значениям энергии столкновения дейтронов, указанным в скобках.

Экспериментально полученные значения астрофизического S-фактора в области ультранизких значений энергии столкновения дейтронов 1,8 – 2,3 кэВ свидетельствуют о том, что в пределах указанных ошибок измерения не наблюдается расхождение с ожидаемыми экстраполяционными значениями данной величины (результат экстраполяции значений S-фактора из области энергий столкновения 7 - 45 кэВ в исследуемую область энергии).

Для проверки чувствительности полученных результатов к модели взаимодействия лайнера с мишенью нами были проведены расчеты процесса

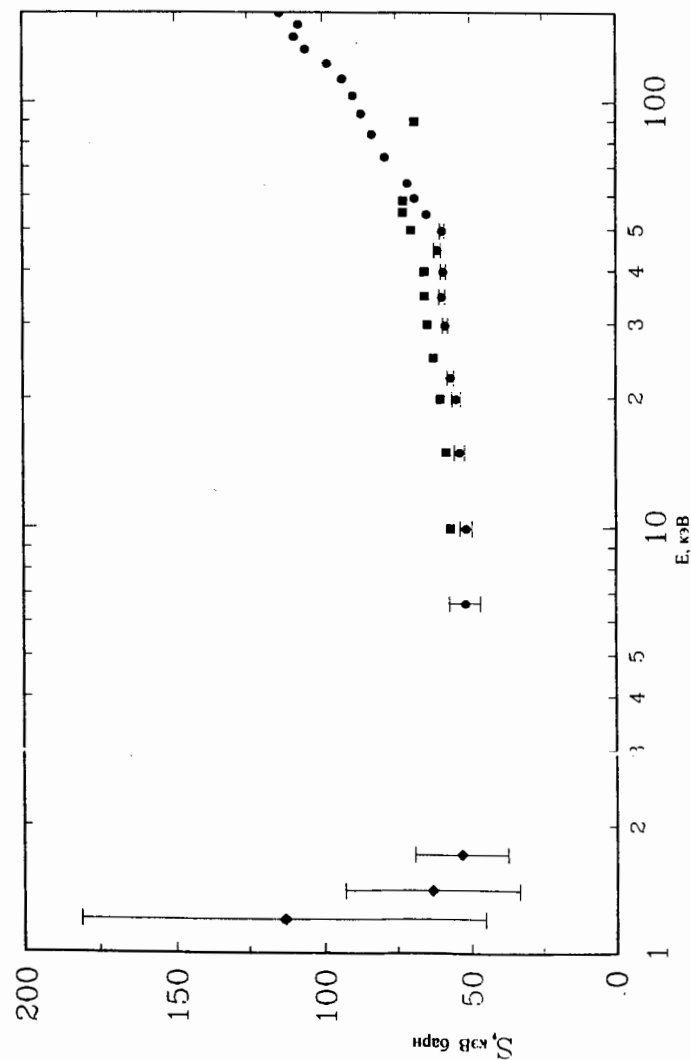


Рис.4. Зависимость астрофизического S-фактора в dd-взаимодействиях от энергии столкновения дейтронов. ■, ● - данные работ [15] и [29], соответственно; ● - результат настоящей работы

торможения дейтронов лайнера с учетом не только их взаимодействия с дейтронами, но и с электронами, согласно модели [30].

В последнем случае значение S-фактора возрастает примерно на порядок величины в указанной области энергий столкновения. Столь сильное увеличение значений S-фактора не может быть объяснено как возможным наличием узких ядерных резонансов в dd-сечении (из-за достаточно большого энергетического разброса ускоренных дейтронов лайнера), так и механизмами различных неустойчивостей, дающих дополнительный выход нейтронов. Второе обстоятельство противоречит результатам фоновых опытов.

В заключение отметим, что полученные нами результаты еще раз свидетельствуют о том, что использование предложенной нами методики исследования сильных взаимодействий в области ультранизких энергий столкновения с применением Z-пинча [13,14,18,19] является перспективным направлением, позволяющим осуществлять изучение ядерных реакций между легкими ядрами в недоступной с точки зрения классических ускорителей области энергий.

Авторы выражают искреннюю благодарность Р.Б.Бакшт (ИСЭ РАН) и А.Тоор (LLNL, США) за полезные дискуссии, В.Ф.Борейко и С.В.Шляхтуну за помощь при проведении эксперимента и подготовке рукописи к печати.

Литература

1. S.P. Merkuriev et al., Proc. Int. Conf. on the theory of Few Body and Quark --- Hadronic Systems, Dubna, D4--87--692, 1987, 6.
2. J.L. Friar, Proc. Int. Conf. on the theory of Few Body and Quark --- Hadronic Systems, Dubna, D4--87--692, 1987, 70.
3. C. Rolfs, Proc. Int. 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; J.N.-Bachall and M.H.-Pinsonneault, Rev. Mod. Phys., 64(1992)885; M.-Arnould and Forestini, Nuclear Astrophysics, Proc. of the Third Int. Summer School, La Rabida, Huelva, Spain, June 1988, Springer--Verlag, Research Reports in Physics, p.48.
4. V.B. Belyaev et al., Nukleonika 40(1995)85.
5. C. Bargholz, Nucl. Phys., A474, 1987, 1.
6. J.L. Friar et al., Phys. Lett. B251(1990)11.
7. В.Ф. Харченко и др. Ядерная физика, 55, 1992, 86.
8. A.C. Phillips, Nucl. Phys. A184(1972)337.
9. H.J. Assenbaum et al. Z. Phys., A327, 1987, 461.
10. C. Angulo et al., Z. Phys., A513, 1990, 316.
11. S.E. Koonin and M. Mukerjee, Phys. Rev., C42, 1990, 1639.
12. U. Greife et al., Z. Phys. A351(1995)107.
13. V.B. Belyaev et al., JINR preprint D15--92--324, Dubna, 1992.
14. Vit.M. Bystritskii et al., 10-th IEEE International Pulsed Power Conference, Abstract Book, P2--67, Albuquerque, NM, July 10--13, 1995, USA.
15. A. Krauss et al., Nucl. Phys. A465(1987)150.
16. A.S. Belov et al., Nuovo Cim., 103A, 1990, 1647.
17. V.M. Bystritsky et al., JINR Preprint, D15-98-239, Dubna, 1998, to be published in journal "Laser and particle beam".
18. V.B. Belyaev et al., JINR Preprint D15--95--375, Dubna, 1995.
19. V.M. Bystritsky et al., Nucleonika, 42 (1997), 775.
20. P.G. Burkhalter et al., J. Appl. Phys. 50(1979)1.
21. Н.Ф. Ковшаров и др., ИТЭ, 6, 1987, 84.
22. F.S. Feller et al., Phys. Fluids 31(1988)2053.
23. M.A. Libberman and A.B. Bud'ko, AIP Conf. Proc. 195(1989)174.
24. U.H. Rahman et al., Phys. Fluids 28(1985)1226.
25. С.А. Сорокин, С.Н. Чайковский, Физика плазмы, 19, 1993, 856.
26. Вит. М. Быстрицкий и др., Препринт ОИЯИ, D15-96-11, Дубна, 1996.
27. Вит. М. Быстрицкий и др., Ядерная Физика, 60, 1997, 1349.
28. Vit.M. Bystritskii et al., Proceedings Intern. Conf. on Plasma, June 1996, Prague.
29. N. Jarmie et al., Phys. Rev. C29(1984)2031.
30. Д.В.Сивухин, Вопросы теории плазмы, Выпуск 4, стр.81, Атомиздат, Москва, 1964.
31. K. Nui, T. Abe, Proceedings on 3-rd Intern. Conference on High Power Electron and Ion beam, V.2, Novosibirsk, 1979, p.518.

32. Л.А. Арцимович, Управляемые термоядерные реакции. Изд. физико-математической литературы, Москва, 1961, с.170 - 172.
33. Vit.M. Bystritskii et al., AIP Conference Proceedings 195, Dense Z-Pinches, Second International Conference, Laguna beach, CA, 1989, p.522.
34. А.В. Лучинский, Известия ВУЗов, 12, 1995, 52.
35. W. Clark et al., J. Appl. Phys. 53(1982)4099.
36. S.A. Chaikovsky, Private Communication.
37. Н.Г Карлыханов и др. Физика плазмы, 22, 1998, 998.
38. R.E. Brown and N. Jarmie, Phys. Rev. C41(1990)1391.

Издательский отдел
Объединенного института ядерных исследований
предлагает Вам приобрести перечисленные ниже книги:

Индекс книги	Название книги
E3-97-213	Труды V Международного семинара по взаимодействию нейтронов с ядрами. Дубна, 1997, 446 с. (на англ. яз.)
D9-97-231	Труды международной школы молодых ученых «Проблемы ускорения заряженных частиц». Дубна, 1996, 285 с. (на русском и англ. яз.)
E2,4-97-263	Труды III международной конференции «Ренормгруппа-96». Дубна, 1996, 436 с. (на англ. яз.)
E10-97-272	Труды международного рабочего совещания «Системы сбора данных в экспериментах на нейтронных источниках». Дубна, 1997, 325 с. (на англ. яз.)
D19-97-284	Труды международного симпозиума «Проблемы биохимии, радиационной и космической биологии». Дубна, 1997, 2 тома: 284 и 405 с. (на русском и англ. яз.)
P14-97-343	Труды Национальной конференции по применению рентгеновского синхротронного излучения нейтронов и электронов для исследования материалов. Дубна, 1997, 3 тома, 370 с., 448 с., 340 с. (на русском яз.)
P2-97-401	Труды IX международного семинара «Гравитационная энергия и гравитационные волны». Дубна, 1996, 194 с. (на русском яз.)
E2-97-413	Труды VII Международного совещания по спиновой физике высоких энергий (СПИН-97). Дубна, 1997, 398 с. (на англ. яз.)
F15-98-57	Труды III Международного совещания по исследованию сверхтонкой структуры и ядерных моментов экзотических ядер методами лазерной спектроскопии. Познань, 1997, 200 с. (на англ. яз.)
D13-98-66	Труды XVII Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1997, 242 с. (на русском и англ. языках)
E1,2-98-154	Труды XIII международного семинара по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика». Дубна, 1996, 2 тома, 300 с. и 282 с. (на англ. яз.)
E3,14-98-168	Труды Германо-Российского совещания пользователей ИБР-2. Дубна, 1998, 126 с. (на англ. яз.)
E3-98-202	Труды VI Международного семинара по взаимодействию нейтронов с ядрами. Дубна, 1998, 352 с. (на англ. яз.)
D1,2-98-215	Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика — от сотен МэВ до ТэВ». Дубна, 1998, 384 с. (на русском и англ. яз.)
D-98-224	Труды II Открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 1998, 190 с. (на русск. и англ. языках)
P1-98-231	А.Любимов, Д.Киш. Введение в экспериментальную физику частиц. Дубна, 1998, 330 с. (на русском яз.)
E2-98-254	Труды рабочего совещания «Адронные атомы и позитроны в стандартной модели». Дубна, 1998, 259 с. (на англ. яз.)
D9,11-98-273	Труды международной конференции «Динамика пучков и оптимизация». Дубна, 1997, 162 с. (на русском и англ. языках)
E17,19-98-305	Труды международного рабочего совещания «Дейтерирование биологических молекул для структурных и динамических исследований. Применение для нейтронного рассеяния и ЯМР». Дубна, 1998, 100 с. (на англ. яз.)

Рукопись поступила в издательский отдел
10 июня 1999 года.

Индекс книги	Название книги
E1,2-98-307	Труды международной школы-семинара «Актуальные проблемы физики частиц». Гомель, 1997, 2 тома, 304 с. и 220 с. (на англ. яз.)
E2-98-372	Труды III международного совещания «Классические и квантовые интегрируемые системы». Ереван, 1998, 200 с. (на англ. яз.)
E9-99-26	Труды XVII Международной конференции по ускорителям высоких энергий. Дубна, 1998, 432 с. (на англ. яз.)
E2-99-35	Труды XI международной конференции «Проблемы квантовой теории поля». Дубна, 1998, 508 с. (на англ. яз.)
E5-99-38	Труды международного совещания «Самоподобные системы». Дубна, 1998, 404 с. (на англ. яз.)
P3,14,17-99-75	Труды VIII Школы по нейтронной физике. Дубна, 1998, 330 с. (на русском яз.)
E9-99-92	Труды Международного совещания МЕЕС'98. Дубна, 1998, 302 с. (на англ. яз.)
Д-99-94	Труды III Открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 1999. 258 с. (на русск. и англ. языках) И.А.Шелаев. Введение в необратимую электродинамику. Дубна, 1999, 288 с. (на русском яз.)

За дополнительной информацией просим обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу:

141980, г. Дубна, Московской области,
ул. Жолио-Кюри, 6.
Объединенный институт ядерных исследований,
издательский отдел
E-mail: publish@pds.jinr.dubna.su

Быстрицкий В.М. и др.
Астрофизический S -фактор в dd -взаимодействиях
при ультранизких энергиях

D15-99-163

Приведены результаты экспериментов по измерению значений астрофизического S -фактора в dd -реакции при ультранизких энергиях столкновения дейтронов с использованием лайнерной плазмы.

Эксперимент выполнялся на сильноточном ускорителе Института сильноточной электроники РАН (Томск).

Измеренные значения S -фактора при энергиях столкновения дейтронов 2,27; 2,06; 1,8 кэВ составили, соответственно:

$$S_{dd} = (53 \pm 16), (64 \pm 30), (114 \pm 68) \text{ б} \cdot \text{кэВ}.$$

Вычислены сечения dd -реакции при указанных средних энергиях столкновения дейтронов с использованием измеренных значений S -фактора и известной параметризации сечения реакции в виде произведения барьерного множителя и астрофизического фактора:

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 1,8 \text{ кэВ}) = (4,3 \pm 2,6) \cdot 10^{-33} \text{ см}^2;$$

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 2,06 \text{ кэВ}) = (9,8 \pm 4,6) \cdot 10^{-33} \text{ см}^2;$$

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 2,27 \text{ кэВ}) = (2,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-32} \text{ см}^2.$$

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Bystritsky V.M. et al.
The Astrophysical S -Factor for the dd -Reaction at Ultralow Energies

D15-99-163

The experimental results for measurements of the astrophysical S -factor for dd -reaction at very low deuteron collision energies using liner plasma technique are presented. The experiment was fulfilled at the high current generator of the High-Current Electronics Institute, Tomsk, Russia. The measured values of S -factor for the deuteron collision energies: 2.27, 2.06, and 1.8 keV are: $S_{dd} = (53 \pm 16), (64 \pm 30), (114 \pm 68) \text{ b} \cdot \text{keV}$, respectively.

The corresponding dd cross sections described as a product of the barrier factor and measured astrophysical S -factor are:

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 1.8 \text{ keV}) = (4.3 \pm 2.6) \cdot 10^{-33} \text{ cm}^2;$$

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 2.06 \text{ keV}) = (9.8 \pm 4.6) \cdot 10^{-33} \text{ cm}^2;$$

$$\sigma_{dd}^n(E_{\text{col}} = 2.27 \text{ keV}) = (2.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-32} \text{ cm}^2.$$

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1999