

сообщения
 объединенного
 института
 ядерных
 исследований
 дубна

Д15-92-324

В.Б.Беляев, А.Бертин¹, Вит.М.Быстрицкий²,
 Вяч.М.Быстрицкий, А.Витале¹, Я.Возняк³,
 А.Гула³, О.И.Картавцев, А.В.Кравцов⁴,
 А.В.Лучинский⁵, Г.А.Месяц², Л.А.Ривкис⁶,
 Н.А.Ротахин⁵, А.А.Синебрюхов², С.И.Сорокин⁶,
 С.Г.Стеценко, В.А.Столупин

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
 ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ (50 эВ + 1000 эВ)

¹Национальный институт ядерных исследований, г.Болонья, Италия

²Институт электрофизики, г.Екатеринбург

³Институт физики и ядерной техники, г.Краков, Польша

⁴Санкт-Петербургский институт ядерной физики, г.Гатчина

⁵Институт сильноточной электроники, г.Томск

⁶Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов, г.Москва

Исследование сильных взаимодействий легчайших ядер при сверхнизких энергиях ($T \approx \text{эВ} + \text{кэВ}$) представляет значительный интерес. При тепловых энергиях существуют данные только по взаимодействию нейтронов: длины np -, nd -, nHe -, nLi -рассеяний в различных спиновых состояниях. Для исследования вопроса о зарядовой симметрии ядерных сил необходимы данные о длинах pp -, pd -, pHe - и т.д. рассеяний, а также о других характеристиках (фазах рассеяния, вероятностях) в указанной области энергий. С этой же целью необходимы данные о сечениях реакций $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, $p + t \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ и др. в области энергий от единиц эВ до нескольких кэВ. Анализ фаз дублетного np -рассеяния указывает на наличие виртуального уровня в этой системе с квантовыми числами трития^{/1/}. Возникает вопрос об изучении такого же состояния в pd -системе. Наличие виртуального уровня может изменить в 10 раз значение дублетной длины pd -рассеяния при экстраполяции существующих данных, полученных при энергиях ~ 400 кэВ, в область супернизких энергий^{/1/}.

Теоретический анализ кулоновской энергии ${}^3\text{He}$ указывает^{/2/}, что никакой из существующих NN -потенциалов не позволяет (в рамках зарядовой симметрии ядерных сил) объяснить экспериментальное значение данной величины ($E_{\text{theor}} = 0,65$ МэВ, $E_{\text{exp}} = 0,76$ МэВ).

Кроме исследования ядерных сил при сверхнизких энергиях значительный интерес представляет процесс радиационного захвата в реакциях $pd \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$, $n{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ и др. с точки зрения изучения структуры обменных мезонных токов^{/3/}, которые имеют существенный вклад при этих энергиях.

Наконец, представляется весьма актуальным исследование реакций с легчайшими ядрами для астрофизики. Например, при анализе распространенности легких ядер в звездах и Галактике обнаруживается недостаток (за исключением ${}^4\text{He}$) этих ядер по сравнению с тем, что следует из предсказаний, основанных на теории термоядерных реакций и общепринятых моделей звезд^{/4,5/}. В частности, дейтерий начинает "разваливаться" в звездах уже при температурах $T \geq 50$ эВ, Li при $T \geq 200$ эВ и т.д.

Для объяснения этого явления обычно предлагается модификация моделей звезд. При этом при экстраполяции ядерных сечений в

Объединенный институт
ядерных исследований
библиотека

астрофизическую область энергий (\sim кэВ) предполагается отсутствие резонансов или какого-либо другого аномального поведения сечений в этой области энергий. Однако не исключено, что ядерные сечения могут иметь резонансный характер, следствием чего будет усиленное выгорание легких элементов в звездах. Наблюдение ядерных реакций холодного ядерного синтеза также может быть объяснено на этой основе.

В недавно выполненном эксперименте^{/6/} по измерению сечений dd-реакции в области энергий дейтронов 20+400 эВ были получены аномально высокие значения сечения этой реакции ($\sim 10^{-32}$ см²), что на 30+40 порядков выше расчетных величин. В данном эксперименте проводилось облучение титана, насыщенного дейтерием, каплями, состоящими из 100+300 молекул D₂O, ускоренными до энергий 100+300 кэВ. Как следует из условий проведения эксперимента, данные о сечениях dd-реакции извлечены косвенным образом с привлечением ряда модельных представлений, что, в свою очередь, требует их проверки. Чтобы исключить неоднозначность интерпретации результатов, необходимо проведение экспериментов по исследованию dd-реакции при непосредственном взаимодействии пучка дейтронов с дейтериевой мишенью.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ

При использовании классических ускорителей в области энергий 20 эВ + 2 кэВ невозможно получить пучки частиц с интенсивностью, достаточной для измерения сечений взаимодействия изотопов водорода на уровне 10^{-32} см² и ниже с необходимой точностью. В настоящее время имеются данные измерений сечения dd-реакции на уровне 10^{-30} см² и выше^{/7/}. Нам представляется более перспективным использование интенсивных наносекундных ионных пучков, получаемых с помощью лайнерной плазмы, в данной области энергий^{/8/}. Интенсивность пучков, полученных таким методом, составляет $\sim 10^{21}$ частиц в импульсе в указанной области энергий. Суть этого метода заключается в следующем. По лайнеру - легкой металлической оболочке - пропускается мощный импульс тока, который взрывает оболочку. Затем плазма лайнера ускоряется к оси под давлением магнитного поля, пропускаемого по ней тока (см. рис.). Время

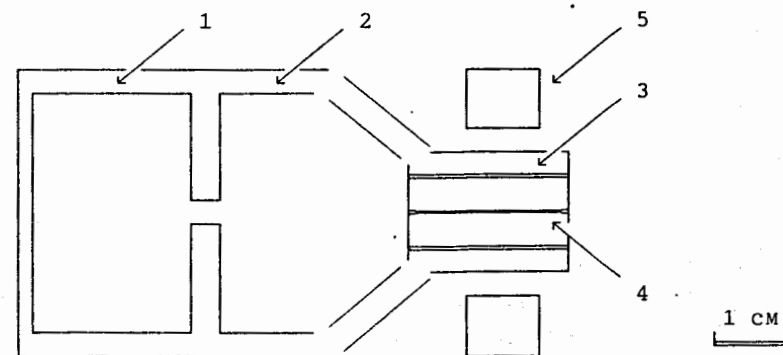


Рис. Схема эксперимента:

1. медленный накопитель [$\tau \sim (250+300)$ нс];
2. быстрый формирующий элемент (плазменный прерыватель тока);
3. цилиндрический лайнер;
4. мишень (CD₂, LiD);
5. блок детекторов

существования сжатого состояния составляет от единиц до десятков наносекунд и определяется как радиусом сжатого состояния, так и максимальной скоростью сжатия лайнера к оси, однако этого времени достаточно для протекания ядерных реакций. Для нагрева лайнера до температуры ~ 1 кэВ необходимо ускорить плазму лайнера до скорости $V_{\max} = 3 \times 10^7$ см/с, при этом импульс тока должен составлять 1+2 МА, а мощность, выделяемая электрофизической установкой в нагрузку, порядка 1 ТВт.

В Институте сильноточной электроники СО РАН действуют установки, которые позволяют осуществить эксперименты по исследованию взаимодействия легких ядер в области энергий ≤ 1 кэВ. При этом статистическая достоверность измерений может быть обеспечена в режиме от 1 до 100 срабатываний ускорителя. Такими установками являются: СНОП-III (мощность - 0,5 ТВт, напряжение - 0,7 МВ, ток - 1 МА, длительность импульса - 75 нс) и ГИ-4 (мощность - 1 ТВт, напряжение - 1 МВ, ток - 1,5 МА, длительность

импульса - 100 нс). При этих параметрах можно получить следующие характеристики сжатия лайнера (для дейтерия):

$$v \text{ (см/с)} = 10^6 W^{1/2} \text{ (эВ)},$$

где W - кинетическая энергия частицы, v - скорость сжатия лайнера. При $W = 100$ эВ скорость частиц $v = 10^7$ см/с, а при $W = 1000$ эВ $v = 3,2 \times 10^7$ см/с. Если ток $I = 1$ МА и $W = 100$ эВ, то линейная плотность частиц в лайнере составляет $\sim 10^{20}$ част./см, а при $W = 1000$ эВ плотность частиц равна $\sim 10^{19}$ част./см. Увеличивая ток и длину лайнера, можно достичь более высокой плотности частиц в лайнере.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ

Принимая во внимание указанные параметры ионных пучков, мы предлагаем на первом этапе провести исследования следующих ядерных реакций (см. таблицу).

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ПРОДУКТОВ ИССЛЕДУЕМЫХ РЕАКЦИЙ

Как видно из таблицы, продукты исследуемых ядерных реакций представляют собой γ -кванты, нейтроны и заряженные частицы. Для регистрации γ -квантов предлагается использовать сцинтилляционные γ -детекторы на основе кристаллов NaJ(Tl), а для регистрации нейтронов - времяпролетную методику с применением сцинтилляционных спектрометров и реакции активации. Регистрация заряженных частиц осуществляется полимерными трековыми детекторами на основе CR-39^{9/}, расположенными вблизи области сжатия лайнера. Трековые детекторы CR-39 позволяют регистрировать протоны и более тяжелые заряженные частицы в присутствии значительного фона γ -квантов, нейтронов, мощных электрических и магнитных полей, возникающих при работе данных установок (СНОП-III, ГИ-4).

Таблица

Реакция	Энергия продуктов	Расчетные значения сечения реакции при различных энергиях (10^{-24} см ²)
$d + d \begin{cases} \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,3 \text{ МэВ} \\ \rightarrow t + p + 4,03 \text{ МэВ} \end{cases}$	$E_n = 2,46 \text{ МэВ}$ $E_p = 3 \text{ МэВ}$ $E_t = 1 \text{ МэВ}$ $E_{He} = 0,8 \text{ МэВ}$	$\sim 1,4 \times 10^{-12}$ (1 кэВ)
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,5 \text{ МэВ}$	$E_\gamma \approx 5,5 \text{ МэВ}$	$\sim 4 \times 10^{-10}$ (1 кэВ)
$d + {}^6\text{Li} \rightarrow p + {}^7\text{Li} + 5,026 \text{ МэВ}$	$E_p \approx 5 \text{ МэВ}$	$3,07 \times 10^{-13}$ (10 кэВ)
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 5,6 \text{ МэВ}$	$E_\gamma \approx 5,6 \text{ МэВ}$	$> 5 \times 10^{-12}$ (10 кэВ)
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He} + 4,02 \text{ МэВ}$	$E_\alpha = 1,7 \text{ МэВ}$ $E_{He} = 2,3 \text{ МэВ}$	$4,7 \times 10^{-10}$ (10 кэВ)
$d + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^5\text{He} + 14,23 \text{ МэВ}$	$E_\alpha = 7,9 \text{ МэВ}$ $E_{He} = 6,3 \text{ МэВ}$	$\sim 10^{-10}$ (10 кэВ)
$d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma + 16,39 \text{ МэВ}$	$E_\gamma \approx 16,4 \text{ МэВ}$	$\sim 10^{-9}$ (6 кэВ)
$d + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} + 18,35 \text{ МэВ}$	$E_p = 14,7 \text{ МэВ}$ $E_{He} = 3,7 \text{ МэВ}$	$\sim 10^{-9}$ (6 кэВ)
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow 2p + {}^4\text{He} + 14 \text{ МэВ}$	сплошной спектр	$1,1 \times 10^{-10}$ (30 кэВ)
$d + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma + 22,3 \text{ МэВ}$	$E_\gamma \approx 22,3 \text{ МэВ}$	$\sim 5 \times 10^{-15}$ (10 кэВ)
$d + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\alpha + 22,4 \text{ МэВ}$	$E_\alpha = 11,2 \text{ МэВ}$	$4,96 \times 10^{-13}$ (10 кэВ)
$p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma + 17,3 \text{ МэВ}$	$E_\gamma \approx 17,3 \text{ МэВ}$	$\sim 7 \times 10^{-7}$ (100 кэВ)
$p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\alpha + 17,34 \text{ МэВ}$	$E_\alpha = 8,67 \text{ МэВ}$	$7,43 \times 10^{-5}$ (100 кэВ)
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 1,6 \text{ МэВ}$	$E_\gamma = 1,586 \text{ МэВ}$	$3,7 \times 10^{-10}$ (100 кэВ)

Предлагается использовать следующие типы мишеней: дейтерированный полиэтилен $(CD_2)_n$, дейтерид титана (TiD_2) , а также LiD , LiH , 6Li , 7Li . Исследование ядерных реакций с участием 3He предполагается проводить на встречных пучках с формированием так называемой "горячей" мишени. При этом разброс по энергии частиц в исследуемой области энергий увеличивается до 150 эВ, а количество частиц в сформированном плазменном сгустке лайнер + "горячая" мишень (площадь поперечного сечения $0,01 + 0,03 \text{ см}^2$, длина $1+2 \text{ см}$, время удержания сгустка $20+50 \text{ нс}$) достигает порядка 10^{22} част.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Принимая во внимание параметры ионных пучков, эффективность регистрации продуктов ядерных реакций, можно оценить нижнюю границу измеряемых сечений в предлагаемых экспериментах.

Например, для dd -реакции в расчете на один цикл срабатывания ускорителя при использовании конденсированной мишени оценка сечения составляет

$$\sigma_{dd} = \frac{1}{n \times \epsilon \times l \times I} \approx 10^{-38} \text{ см}^2,$$

где n - плотность ядер мишени ($n \approx 8 \times 10^{22}$ част./ см^3); ϵ - эффективность регистрации заряженных продуктов dd -реакции ($\epsilon \approx 0,1$); l - длина пробега дейтрона в веществе мишени ($l \sim 10^{-5} \text{ см}$); I - интенсивность потока дейтронов, падающего на мишень ($I \sim 10^{21}$ част./цикл).

В случае "горячей" мишени + лайнер граничная оценка измеряемого сечения составляет (в расчете на одно срабатывание ускорителя)

$$\sigma_{dd} = \frac{1}{N \times \epsilon \times I} \approx 10^{-41} \text{ см}^2,$$

где N - число частиц в "горячей" мишени ($N \sim 10^{21}$ част.), $\epsilon \approx 0,1$, $I \sim 10^{21}$ част./цикл.

Увеличивая количество циклов срабатывания ускорителя и принимая во внимание технические ограничения, нетрудно видеть, что реально можно понизить граничное значение измеряемых сечений до величин 10^{-40} см^2 (конденсированная мишень) и 10^{-43} см^2 ("горячая" мишень).

Имея в виду дальнейшее совершенствование техники мощных импульсных ионных пучков, можно ожидать понижение границы измеряемых сечений на порядок и более. Это открывает возможность использования данной методики для исследования слабых процессов в малонуклонных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.P. Merkuriev et al. / Proc. Int. Conf. on the Theory of Few Body and Quark-Hadronic Systems. - P6, Dubna, 1987.
2. K. Okamoto, C. Pask // Ann. Phys., 1971, v.68, p.18.
3. Bargholz C. // Astr. J., 1979, v.233, p.L161-L171; Nucl. Phys., 1987, v.A474, p.1.
4. C. Rolfs / Proc. Intern. School of Phys. "Enrico Fermi", Course C3, Villa Monastero, 23 June - 3 July 1987, edited by P.Kienle, R.A.Ricci and A.Rubbino, North Holland, 1989, p.417.
5. 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.
6. R.J. Beuhler et al. // Phys. Rev. Lett., 1989, v.63, p.1292.
7. A.S. Belov et al. // Nuovo Cim., 1990, v.103A, p.1647.
8. Н.Ф. Ковшаров и др. // ПТЭ, 1987, N.6, с.84-89.
9. С. Дюррани, Р. Балл / Твердотельные трековые детекторы - М.: Энергоатомиздат, 1990, с.149.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июля 1992 года.

Беляев В.Б. и др.

D15-92-324

Исследование сильных взаимодействий
при сверхнизких энергиях (50 эВ + 1000 эВ)

Предложена экспериментальная программа исследования ядерных реакций $d+d \rightarrow t+p$, $p+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}+\gamma$, $d+{}^3\text{He} \rightarrow p+{}^4\text{He}$ и т.п. при сверхнизких энергиях (50 эВ + 1000 эВ) с помощью высокоточных плазменных установок типа СНОП-III. Для регистрации продуктов ядерных реакций используются трековые детекторы на основе CR-39, кристаллы NaJ(Tl) и др. Ожидаемая нижняя граница измеряемых сечений взаимодействия изотопов водорода $\sigma \approx 10^{-38}$ см². Измерения предполагается проводить в Институте высокоточной электроники, г.Томск.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Belyaev V.B. et al.

D15-92-324

Investigation of Strong Interactions
at Very Low Energies (50 eV - 1000 eV)

To study nuclear reactions $d+d \rightarrow t+p$, $p+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}+\gamma$, $d+{}^3\text{He} \rightarrow p+{}^4\text{He}$, etc. at very low energies (50 eV-1000 eV) by means of liner plasma the experimental programme is proposed. The products of nuclear reactions are proposed to be registered with polymeric track detectors on the basis of CR-39, NaJ(Tl) scintillation detectors, etc. The lower limits of cross sections estimated for dd-reaction is $\sigma \approx 10^{-38}$ cm². The investigations are proposed to carry out in the Heavy Current Electronics Institute (Russia, Tomsk).

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992