



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-239

P3-97-239

Ю.М.Гледенов, В.И.Салацкий, П.В.Седышев,
П.И.Шаланьски, Ю.Анджеевски*, А.Жак*

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$,
 $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ И $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$
НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

*Лодзинский университет, Польша

1. Введение

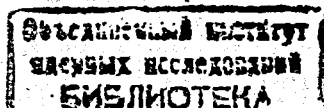
Реакции (n,p) и (n,α) играют важную роль в астрофизических процессах ядерного синтеза легких ядер и ядер средней массы. Для вычисления различных сценариев ядерного синтеза необходимо знание скорости протекания этих реакций. Однако по ряду технических причин некоторые элементы в газообразном состоянии, особенно изотопы благородных газов, не достаточно хорошо исследованы экспериментально. Нами сконструирована ионизационная камера и развит метод измерения (n,p) и (n,α) сечений для газообразных образцов, который применим и для благородных газов.

Реакции $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ и $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ могут играть важную роль в первичном ядерном синтезе при "большом взрыве" [1] и в s-процессе ядерного синтеза в звездах (происхождении редкого изотопа ^{36}S [2]). Однако рекомендованные в [3] значения сечений реакций $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ и $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ под действием тепловых нейтронов основываются только на работе [4], а для сечения реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ имеются противоречивые значения: $\sigma_{\text{th}} = (96 \pm 33) \text{ б}$ [5] и $\sigma_{\text{th}} < 1,5 \text{ б}$ [6].

Целью настоящей работы является как проверка нашей методики, так и измерение сечений указанных реакций на тепловых нейтронах.

2. Методика экспериментов

Наши измерения проводились в Дубне на нейтронном пучке $6^{\text{б}}$ реактора ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ [7]. Изогнутый зеркальный нейтронпровод обеспечивал чистый пучок тепловых нейтронов с интенсивностью до $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Пучок размером $60 \times 12 \text{ мм}$ формировался коллиматорами из ^6LiF и Cd и проходил через ионизационную камеру (рис.1) между катодом (3) и сеткой Фриша (4) параллельно поверхности электродов.



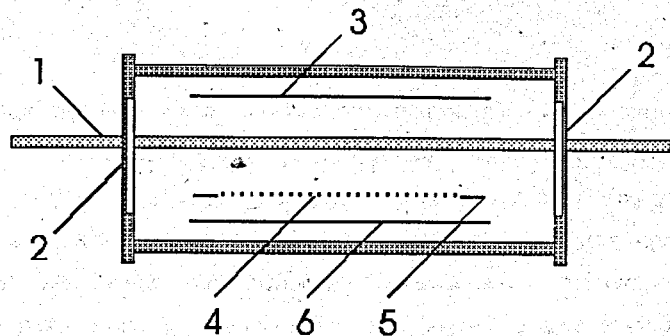


Рис.1. Схема ионизационной камеры : 1 - пучок нейтронов; 2 - окна из тонкого алюминия; 3 - катод; 4 - сетка; 5 - рамка сетки; 6 - коллектор (анод)

В первой серии измерений камера наполнялась смесью газов 93,75% Ar; 6,25% CO₂ и 1,8·10⁻⁵% ³He до давления 1,2 ата. Необходимое малое содержание ³He было получено путем последовательного разбавления начальной смеси с гелием-3 аргоном и CO₂. Во второй серии измерений камера наполнялась смесью газов 95% Ne и 5% CO₂ до давления 1,7 ата. Аргон, неон и гелий были газами высокой чистоты, а углекислый газ очищался перегонкой с помощью жидкого азота. Все газы, за исключением гелия, имели естественное изотопное содержание. Гелий содержал 98,8% ³He и 1,2% ⁴He. Окна для пропускания нейтронного пучка через камеру, выполненные из тонкого алюминия, рассеивали не более 0,5% нейтронов. Мишенями для реакций являлись ядра газов, наполняющих камеру. Расстояния между электродами в камере и положение пучка были такими (рис.1), что на электроды не попадал нейтронный пучок, а треки от продуктов ядерных реакций при использованных давлениях газовых смесей полностью укладывались в газе между ее катодом и сеткой. Чувствительный объем - объем, в котором регистрировалось число этих треков, одинаков для всех реакций. Влияние краевых эффектов на входе и выходе нейтронного пучка из чувствительного объема было мало, так как длина этого объема, определяемая длиной окна рамки сетки, значительно больше

(21 см), чем пробеги при использованных давлениях газовых смесей от регистрируемых частиц (от 0,72 до 0,97 см для легких продуктов реакции и от 0,04 до 0,25 см для конечных ядер).

Сигналы с катода и анода камеры от продуктов реакций, треки которых попадали в чувствительный объем, регистрировались в совпадении измерительно - накопительным модулем для многопараметрических измерений [8].

Для измерения сечений мы использовали относительный метод. Сечения исследуемых реакций определялись по сравнению с известными сечениями других (калибровочных) реакций по формуле

$$\sigma_x = \frac{N_x \cdot n_c}{N_c \cdot n_x} \cdot \sigma_c, \quad (1)$$

где N_x и N_c - число зарегистрированных импульсов исследуемой и калибровочной реакции, n_x и n_c - количество ядер в см³ исследуемого и калибровочного изотопа, σ_c - сечение калибровочной реакции.

В первой серии измерений по определению сечений реакций ¹⁷O(n,α)¹⁴C и ³⁶Ar(n,α)³³S калибровочной реакцией служила реакция ³He(n,p)³H, а во второй серии измерений по определению сечения реакции ²¹Ne(n,α)¹⁸O калибровочной реакцией была реакция ¹⁷O(n,α)¹⁴C. Для определения n_x и n_c взяты значения изотопного содержания из [9] : 0,038% для ¹⁷O; 0,27% для ²¹Ne и 0,337% для ³⁶Ar. Для приведения давления газов в камере к нормальным условиям регистрировалась температура помещения. Также учитывалось, что CO₂ отклоняется от идеального газа. Значения сечений калибровочных реакций взяты из [3] : реакции ³He(n,p)³H, равное (5333±7) б, и реакции ¹⁷O(n,α)¹⁴C, равное (235±10) мб.

Спектр сигналов с коллектора камеры, полученный в третьем измерении первой серии (табл.1) по определению сечения реакций на ¹⁷O и ³⁶Ar, показан на рис.2. На верхней шкале рисунка приведены энергии реакций на ядрах газов, наполняющих камеру. Видно, что кроме пиков от реакций на ³He, ¹⁷O и ³⁶Ar, присутствует пик от реакции

на примеси азота. Разделение импульсов в перекрывающихся пиках проводилось по анализу их формы. Экспериментальные данные по определению сечения реакций $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ и $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$, а также полученные сечения представлены в табл.1. Наибольший вклад в ошибку сечений вносит погрешность определения значений p_c для ^3He и p_x для ^{17}O и ^{36}Ar , входящих в формулу (1), полученная из-за многократного разбавления газовой смеси.

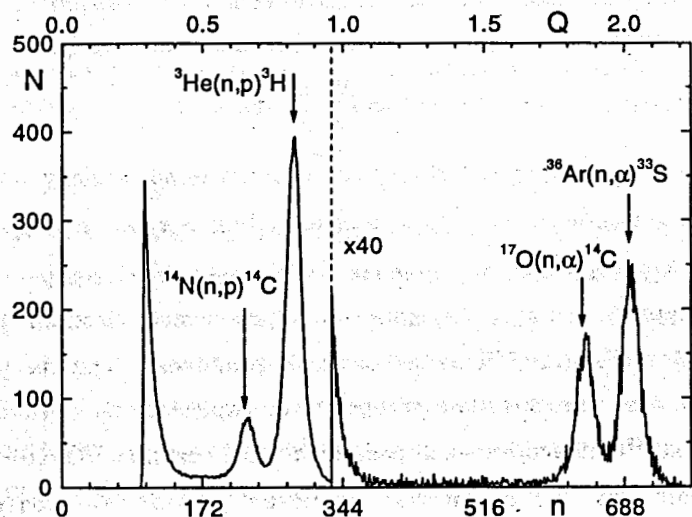


Рис.2. Спектр импульсов с коллектора камеры при наполнении ее ^3He , CO_2 и Ar : p - номер канала; Q - энергия реакций в МэВ; N - число зарегистрированных импульсов

Спектр сигналов с коллектора камеры, полученный в третьем измерении второй серии исследований (табл.2) по определению сечения реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$, показан на рис.3. На этом рисунке в приведенном масштабе не видно вклада от реакции на ^{21}Ne , находящегося между импульсами от реакций на ^{14}N и ^3He . Поэтому на рис.4 большего масштаба показано как выделяется небольшой пик от реакции

$^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$, находящийся между значительно большими выходами продуктов реакций $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$. Примесь ^3He в газе камеры находилась в использованном неоне, так как выход из реакции на ^3He увеличивался при добавлении неона пропорционально его давлению и не наблюдался в контрольном эксперименте при наполнении камеры аргоном и CO_2 . На рис.4 правая часть пика от реакции на ^{14}N проведена по форме правого края пика от реакции на ^{17}O с привязкой в их максимумах. В отличие от реакции на ^{14}N , в выход от реакции на ^{17}O нет вклада от других реакций (рис.3).

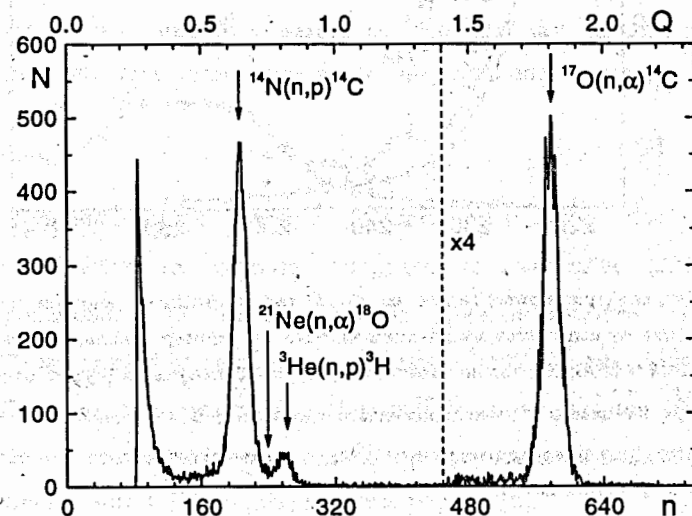


Рис.3. Спектр импульсов с коллектора камеры при наполнении ее 95 % Ne + 5 % CO_2 : p - номер канала; Q - энергия реакций в МэВ; N - число зарегистрированных импульсов

Левый край пика от реакции на ^3He проведен симметрично его правому краю. Выделение выхода из реакции на ^{21}Ne производилось вычитанием из экспериментальной кривой вклада от реакций на ^{14}N и ^3He . Результаты показаны на вставке рисунка. Видно, что в пределах 20 каналов есть превышение (горб) над суммой выходов от реакций на

^{14}N и ^3He . И так как этот горб совпадает с положением, где по известной энергии реакции должен находиться выход из реакции на ^{21}Ne и, кроме того, его не наблюдалось при наполнении камеры аргоном и CO_2 , мы считаем, что он обусловлен реакцией на ^{21}Ne .

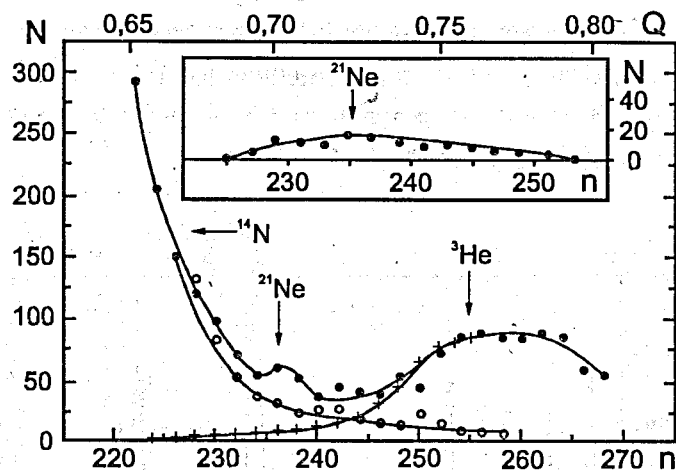


Рис.4. Часть спектра, приведенного на рис.3, где по энергии реакции должен быть пик от импульсов из реакции на ^{21}Ne : n - номер канала; Q - энергия реакций в МэВ; N - число зарегистрированных импульсов (сумма отсчетов в двух каналах); • - экспериментальные точки; ○ - вычисленные точки правого края пика от реакции на ^{14}N ; + - вычисленные точки левого края пика от реакции на ^3He

Диапазон выделения горба шириной 20 каналов, где он виден, совпадает с разрешением (шириной на половине высоты) других пиков на спектрах. При определении сечения реакции на ^{21}Ne по формуле (1), необходимо находить отношение числа отсчетов N_x от реакции на ^{21}Ne к числу отсчетов N_c от реакции на ^{17}O . Поэтому N_c от реакции на ^{17}O было также взято в диапазоне 20 каналов, как при выделении горба от реакции на ^{21}Ne . Оно составляло около 70% от полного числа отсчетов в пике.

Экспериментальные данные по определению сечения реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ и полученные результаты приведены в табл.2. Первые два измерения выполнены с камерой, наполненной неонам с одного источника, а третье - с неонам другой поставки. Большие погрешности полученных сечений, приведенных в таблице, объясняются большой неточностью выделения выхода от реакции на ^{21}Ne . Это выделение сильно зависит от точности определения положения максимумов пиков от реакций на ^{17}O и ^{14}N , необходимого для проведения правого края пика от реакции на ^{14}N , и от малого числа отсчетов в выходе от реакции на ^{21}Ne . Кроме того, оно также зависит от точности определения положения максимума пика от реакции на ^3He , так как левый край этого пика проводился симметрично правому по отношению к максимуму.

3. Заключение

Полученное нами сечение реакции $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ для тепловых нейтронов (233 ± 12) мб хорошо совпадает со значением (235 ± 10) мб, рекомендованным в [3]. Наше значение сечения реакции $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ ($5,43 \pm 0,27$) мб также совпадает со значением ($5,5 \pm 0,1$) мб, приведенным в [3]. Сечение же реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$, определенное нами как ($0,18 \pm 0,09$) мб, оказалось значительно меньше оценки верхнего порога 1,5 б, приведенного в [3] по результатам работы [6].

Авторы благодарят В.В.Нитца за предоставленную возможность провести измерения на 6^й пучке ИБР-2 ОИЯИ, оборудованном зеркальным нейтроноводом, и А.В.Стрелкова за помощь в приготовлении смеси газов, содержащих Ar, CO_2 и примесь ^3He , а также за приготовление смеси Ne+ CO_2 , использованной в двух первых измерениях по определению сечения реакции на ^{21}Ne .

Настоящая работа выполнена благодаря частичному финансированию Российским фондом фундаментальных исследований, грант 95-02-05212.

Таблица 1.
Сечения реакций $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ и $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$

Номер измерения	Время, ч	$N(^3\text{He}), 10^3$	$N(^{17}\text{O})$	$N(^{36}\text{Ar})$	$n(^3\text{He}), 10^{12}$	$n(^{17}\text{O}), 10^{15}$	$n(^{36}\text{Ar}), 10^{16}$	$\sigma(^{17}\text{O}), \text{мб}$	$\sigma(^{36}\text{Ar}), \text{мб}$
1	1,5	26,6 $\pm 0,3$	313 ± 18	483 ± 22	5,64 $\pm 0,20$	1,48 $\pm 0,05$	9,84 $\pm 0,34$	240 ± 18	5,55 $\pm 0,38$
2	6,5	123,0 $\pm 1,2$	1401 ± 43	2120 ± 49	5,64 $\pm 0,20$	1,48 $\pm 0,05$	9,84 $\pm 0,34$	231 ± 14	5,25 $\pm 0,29$
3	10,8	192,1 $\pm 1,9$	2158 ± 58	3463 ± 69	5,64 $\pm 0,20$	1,48 $\pm 0,05$	9,84 $\pm 0,34$	227 ± 13	5,49 $\pm 0,30$

Таблица 2.
Сечение реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$

Номер измерения	Время, ч	$n(^{17}\text{O}), 10^{15}$	$n(^{21}\text{Ne}), 10^{17}$	$N(^{21}\text{Ne})$	$N(^{17}\text{O})$	$\sigma(^{21}\text{Ne}), \text{мб}$
1	4,4	1,68 $\pm 0,05$	1,14 $\pm 0,035$	34 ± 17	677 ± 35	0,17 $\pm 0,09$
2	5,5	1,68 $\pm 0,05$	1,14 $\pm 0,035$	42 ± 21	844 ± 40	0,17 $\pm 0,09$
3	10,9	1,68 $\pm 0,05$	1,14 $\pm 0,035$	106 ± 42	2002 ± 50	0,18 $\pm 0,09$

Литература

1. Wiescher M., et al., *Astrophys. J.* 363 (1990), p.340.
2. Beer H. and Renzhorn R.D., *Astron. Astrophys.*, 174 (1987), p.323.
3. Mughabghab S.F., et al., *Neutron cross-section, vol.1.*, Academic, New York, 1981.
4. Hanna G.C., et al., *Can.J.Phys.*, vol. 39 (1961), p.1784.
5. Абрамов А.И., Юткин М.Г., *ЖЭТФ*, 41 (1961), Вып.4(10), с.1023.
6. Bennett E.F., Redman W.C., R, ANL-7310, 19 (1967).
7. Ананьев Б.Н., и др., Сообщение ОИЯИ, P13-89-517, Дубна, 1989.
8. Гледенов Ю.М., и др., Сообщение ОИЯИ, P10-95-438, Дубна, 1995.
9. Lederer C.M., et al., *Table of Isotopes*, John Wiley&Sons, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 июля 1997 года.

Гледенов Ю.М. и др.

P3-97-239

Измерение сечения реакций $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ и $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ на тепловых нейтронах

Измерения выполнены на нейтронном пучке реактора ИБР-2 с зеркальным нейтронотводом, обеспечивающим чистый пучок нейтронов. Использована плоская ионизационная камера с сеткой, которая наполнялась смесью газов Ar, Ne, CO₂ и ³He в различных комбинациях. Мы применили относительный метод измерения сечений исследуемых реакций с нормировкой к известным сечениям других реакций.

Получены сечения реакций $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ для тепловых нейтронов (233 \pm 12) мб и (5,43 \pm 0,27) мб соответственно, хорошо согласующиеся со значениями, полученными другими авторами. Сечение же реакции $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$, равное (0,18 \pm 0,09) мб, оказалось значительно меньше, чем оценка верхнего порога сечения, имеющегося в литературе.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им.И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод авторов

Gledenov Yu.M. et al.

P3-97-239

Measurements of the Thermal Neutron Cross-Section of the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$, and $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ Reactions

The measurements were carried out on the neutron beam of the IBR-2 reactor, with a curved mirror neutron guide providing a pure thermal neutron beam. The plate ionization chamber with a grid filled with the Ar, Ne, CO₂ and ³He gases in different proportions was used. We performed relative measurements with normalization to well known cross-sections of other reactions.

Our thermal cross-sections for the $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ and $^{36}\text{Ar}(n,\alpha)^{33}\text{S}$ reactions (233 \pm 12) mb and (5.43 \pm 0.27) mb, respectively, are in good agreement with the values obtained by other authors. The $^{21}\text{Ne}(n,\alpha)^{18}\text{O}$ -reaction cross-section (0.18 \pm 0.09) mb is significantly lower than the estimated upper limit reported earlier.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1997