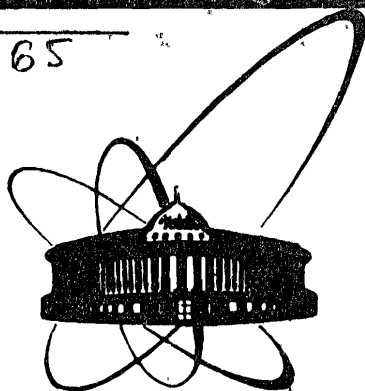


А 65



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С 343

РЗ-87-319

Ю. Анджеевски, В. П. Вертебный*, Ю. М. Гледенов,
А. В. Гребнев*, Т. С. Зварова, М. П. Митриков,
Ю. П. Попов, В. А. Пшеничный*, В. И. Салацкий,
Фунг Ван Зуан

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СЕЧЕНИЯ
РЕАКЦИИ $^{36}\text{Si}(n,p)^{36}\text{S}$

*Институт ядерных исследований АН УССР, Киев

1987

Введение

В последнее время повысился интерес к исследованиям реакции (n, p) на медленных нейтронах. Развитие источников нейтронов /1,2/ и методики регистрации заряженных частиц /3-6/ позволило проводить такие исследования и на радиоактивных ядрах-мишенях /7-10/. Реакция $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ наблюдается впервые на резонансных нейтронах в ЛНФ ОИЯИ /9/. Были обнаружены три резонанса при энергиях нейтронов - 1,3; 3,5 и 8,2 кэВ, для которых определено значение параметра $A_p = g \Gamma_n \Gamma_p / \Gamma$. Измерить ход сечения этой реакции при энергиях ниже 1 кэВ не удалось. Дело в том, что энергетический спектр исследуемых протонов существенно искажён наличием α -частиц близкой энергии из реакций (n, α) на микропримесях изотопов ^6Li и ^{10}B , присутствующих в веществе мишени, и возникает проблема выделения исследуемых протонов.

Тем не менее уже эти первые результаты дали возможность обсудить роль реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ в процессе превращений радиоактивного ядра ^{36}Cl во время взрыва сверхновых звёзд, которые являются источниками формирования изотопного состава метеоритов. В работе /11/ показано, что почти все ядра ^{36}Cl должны "выгорать" путём реакции (n, p) , превращаясь в ^{36}S , а не в ^{36}Ar через β -распад, чем и можно объяснить отрицательный результат поисков аномалии в распространённости ^{36}Ar в метеоритах.

Изотоп ^{36}Cl привлёк внимание широкого круга исследователей /12-17/ и своим большим периодом полураспада ($T_{1/2} = 3 \cdot 10^5$ лет). Так, использование ^{36}Cl наряду с ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca и ^{53}Mn , период полураспада которых лежит в пределах $(0,1+3,7) \cdot 10^6$ лет, в качестве радиоизотопных часов может значительно расширить временную шкалу в археологическом датировании за предел 70000 лет (установленную сейчас при помощи радиоактивного изотопа ^{14}C с $T_{1/2} \approx 5700$ лет) /15,16/. Эти часы могли бы послужить также важным инструментом для определения времени пребывания космических частиц и метеоритов в межзвёздном пространстве. На пути практического применения этих изотопов главным препятствием становится вопрос их идентификации. Так, масс-

спектроскопический анализ не позволяет разделить изобары (например, ^{36}Cl и ^{36}S), а чувствительный рентгеноспектральный метод не различает изотопы одного и того же химического элемента. Помочь здесь могут ядерные методы идентификации изотопов, в частности, по выходу протонов из реакции (n, p).

Настоящая работа предпринята с целью измерения сечения реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ на тепловых нейтронах, которое до сих пор не известно.

Эксперимент

Измерения были выполнены на фильтрованном пучке нейтронов реактора ВВР-М ИЯИ АН УССР /18/. Пучок тепловых нейтронов формировался с помощью фильтра из монокристаллического кремния высокой чистоты. Диаметры кремниевых стержней составляли 40–50 мм, а их суммарная длина ≈ 1600 мм. Фон от быстрых нейтронов и γ -излучения определялся с помощью дополнительного борного фильтра толщиной $0,2 \text{ г/см}^2$, в котором содержание изотопа ^{10}B в боре составляло 85%. Сформированный пучок тепловых нейтронов оказался достаточно чистым. Так, для реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ отношение эффекта от тепловых нейтронов к фону составляло величину 500.

Мишень ^{36}Cl была приготовлена методом осаждения соли NaCl на алюминиевую подложку толщиной 100 мкм. Размеры мишени 50×130 мм, толщина слоя вещества – $1,08 \text{ мг/см}^2$ и активность – $3,2 \cdot 10^5$ Бк. На обратной стороне подложки была помещена калибровочная литиевая мишень таких же размеров для исключения необходимости определения числа нейтронов, падающих на хлорную мишень. Используемая Li-мишень содержит $1,35 \cdot 10^{17} (\pm 5\%)$ ядер $^6\text{Li}/\text{см}^2$. С целью исключения просчётов (за счёт большой загрузки тракта электроники) Li-мишень была покрыта маской, изготовленной из 50-микронной алюминиевой фольги с отверстиями, диаметр которых 0,5 мм. Частицы-продукты реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ могли вылететь из мишени в рабочий газовый объём ионизационной камеры только с площадей под отверстиями, суммарная доля которых $K_{\text{Li}} = 7,4 \cdot 10^{-3} (\pm 15\%)$ от полной площади мишени (коэффициент пропускания маски). Мишени были поставлены в узкий сколлимированный нейтронный пучок под скользящим углом $\approx 2^\circ$ относительно его оси.

Вылетающие протоны из исследуемой реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)$ имеют энергию 1,88 МэВ, а фоновые α -частицы из реакций (n, α) на микропримесях изотопов ^6Li и ^{10}B имеют близкую энергию: 2,05 и 1,78; 1,47 МэВ соответственно. Поэтому для сохранения высокой эффективности при выделении протонов была применена методика идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц при помощи

ионизационной камеры с двумя сетками (ИКДС) /5,6/. Так как в данном измерении не исследовалась энергетическая зависимость сечения, можно было работать и в упрощённом варианте методики: сигнал, который снимается с мишени (катод), служит только для управления, а амплитудный спектр сигналов, снимаемых с коллектора (анод), получается только в одном, заранее установленном "окне" амплитудного спектра с мишени, соответствующем определённым энергетическим потерям протонов в промежутке мишень-сетка, CI (см. рис. I).

На рис. I показана блок-схема использованной измерительной аппаратуры вместе с двухсекционным детектором, состоящим из двух идентичных плоских камер с общим катодом M, в качестве которого служит алюминиевая подложка с хлорной и литиевой мишенями. В измерениях использовался усовершенствованный по сравнению с работой /5/ вариант ИКДС. Введена электрическая экранировка коллекторов (работающих одновременно в качестве высоковольтных электродов камер) с помощью дополнительных электродов (электроды O на рис. I): использованный каскадный способ замены мишеней без снятия других электродов особенно удобен при работе с радиоактивными мишенями. Рабочим газом служила смесь $\text{Ar} + 5\% \text{CH}_4$ при давлении 1,15 атм, так что пробеги протонов и тритонов полностью укладывались в газовом промежутке между мишенью и экранирующей сеткой C2. Энергетическая калибровка амплитудных спектров с мишеней и коллекторов детектора проводилась с помощью убывающего уранового α -источника и тритонов из реакции (n, t) на изотопе ^6Li , который имеется в Li-мишени, а также в виде микропримеси в мишени ^{36}Cl . Энергетическое разрешение детектора было 105 кэВ для пика тритонов из реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ на тонкой Li-мишени при наличии β -радиоактивности мишени ^{36}Cl на обратной стороне катода.

В рабочем режиме сигналы снимались с мишени (катод) и с коллектора (анод) одной из камер; при этом сетка CI в другой камере находилась под таким же потенциалом, как и мишень. Амплитуда сигнала с коллектора прямо пропорциональна энергии заряженной частицы, вылетающей из мишени, в то время как для амплитуды наблюдаемого сигнала, снимаемого с мишени, имеет место более сложная зависимость от энергии и угла вылета частицы из мишени, а также от толщины слоя вещества мишени (см. работы /5,6/). Для фоновых α -частиц (пробег которых укладывается в промежутке M – CI) амплитудный спектр, полученный с мишени, сосредоточен в узком интервале около максимальной амплитуды $V_{\text{max}} \sim E_\alpha$, в то время как для протонов (и тритонов) с близкой энергией этот спектр более растянутый, но в основном группируется в области значительно более низкой энергии, чем для фоновых α -частиц

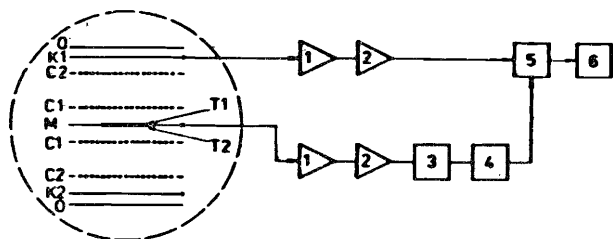


Рис.1. Блок-схема измерительной аппаратуры. М - общий катод; Т1 и Т2 - литиевая и хлорная мишени; С1 - дополнительная сетка; С2 - экранирующая сетка; К1 и К2 - коллектор первой и второй ионизационных камер с двумя сетками; О - дополнительный защитный (экранирующий) электрод; 1 - предусилитель; 2 - линейный усилитель; 3 - быстрый интегральный дискриминатор; 4 - формирователь сигналов управления; 5 - линейные вольты; 6 - амплитудный анализатор (1024) каналов.

(см. рис. 2в, где пик в районе каналов 90-190 обусловлен в основном тритонами, а пик в районе 500-650 - α -частицами из реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$). Использование схемы с отбором позволило также существенно снизить фоновую подложку в амплитудном спектре сигналов с коллектора. На рис. 2 показаны амплитудные спектры с коллектора ИКДС, в которой находится литиевая мишень, для двух случаев (за одинаковое время измерений): в режиме без отбора (а) и с отбором (б). Видно, что в режиме с отбором отсчёты α -частиц с энергией 1+2 МэВ (каналы 200+350) полностью подавлены, а фон значительно снизился.

В режиме с отбором были проведены две серии измерений с мишенью ${}^{36}\text{Cl}$:

- а) основная - без борного фильтра,
- б) фоновая - с борным фильтром в пучке нейтронов.

Измерения с Li-мишенью были выполнены в режиме без отбора, так как в области пика тритонов из реакции ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ фон в 500 раз меньше, чем эффект. При этом эффективность регистрации тритонов $\epsilon_t = 0,5$ (с учётом 2Л-геометрии измерений).

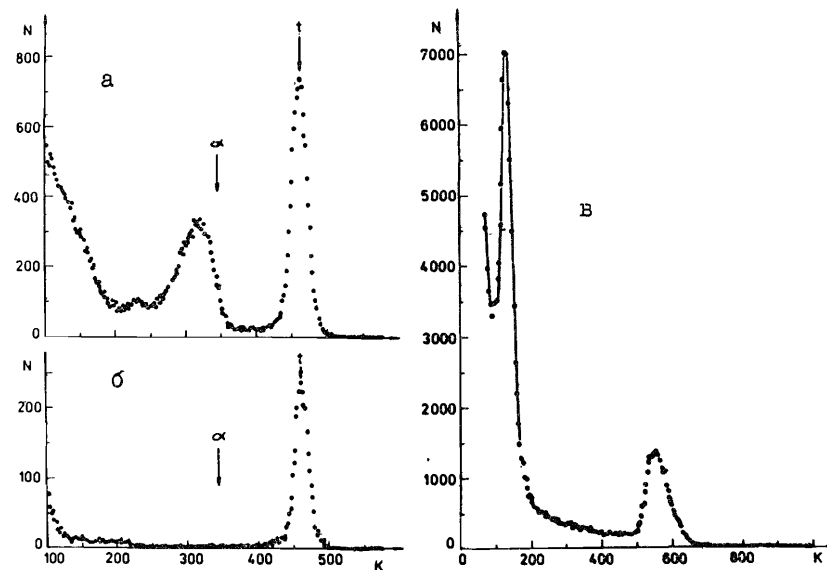


Рис.2. Амплитудные спектры заряженных частиц из реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$, снятые с коллектора (а и б) и с мишени (в) ионизационной камеры с двумя сетками: а - в режиме без отбора; б - с отбором; t и α - положение пиков тритонов и α -частиц; К - номер канала, N - число отсчётов.

Результаты измерений и обсуждение

Так как борный фильтр полностью поглощает тепловые нейтроны, а практически не влияет на поток быстрых нейтронов и γ -излучения, то разность энергетических спектров, полученных в сериях измерений а и б, нормированных на одинаковое произведение мощности реактора на продолжительность измерений, даёт энергетический спектр частиц, обусловленный только действием тепловых нейтронов. Этот результирующий энергетический спектр заряженных частиц (нормированный на 20 часов измерений, мощность реактора сохранялась постоянной) показан на рис. 3. На нём видны: пик от протонов (Р) с энергией 1,88 МэВ из реакции ${}^{36}\text{Cl}(n, p){}^{36}\text{S}$, а также пик тритонов (t) из реакции ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ на микропримеси изотопа ${}^6\text{Li}$ в веществе ${}^{36}\text{Cl}$ -мишени.

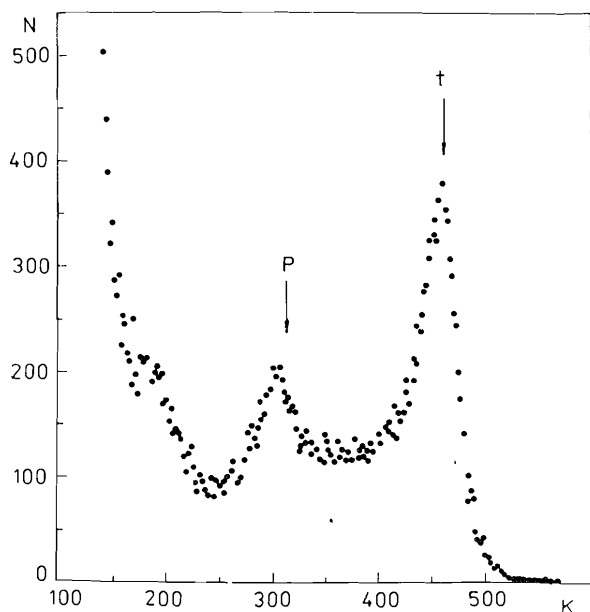


Рис.3. Амплитудный спектр с коллектора, полученный в режиме с отбором протонов из реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$. P и t - положение пиков исследуемых протонов (P) и тритонов (t) из реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ на микропримесях изотопа ^6Li в ^{36}Cl -мишени; K - номер каналов; N - число отсчетов.

Сечение реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)$ на тепловых нейтронах σ^{th} определяется нормировкой на хорошо известное сечение реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ σ_{Li}^{th} по следующему соотношению:

$$\sigma^{th} = \frac{N_p}{N_t} \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_p} \frac{n_{\text{Li}t} t_{\text{Li}} K_{\text{Li}}}{n t} \sigma_{\text{Li}}^{th},$$

где N_p, N_t - числа отсчетов протонов и тритонов;
 $\varepsilon_p, \varepsilon_t$ - эффективности их регистрации;
 n - число ядер ^{36}Cl на хлорной мишени;
 t - продолжительность измерений с мишенью ^{36}Cl ;
 Li - индекс соответствующих величин для измерений с калибровочной Li-мишенью;
 K_{Li} - коэффициент пропускания маски для Li-мишени.

Главными источниками ошибок в определении сечения реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ являются погрешность в выделении протонного пика из фона, обусловленного действием тепловых нейтронов с чужеродными нуклидами в веществе мишени ($< 15\%$), а также неточность в определении коэффициента K_{Li} (15%).

Эффективность регистрации с отбором протонов ε_p была определена из анализа амплитудных спектров с мишени для тритонов из реакции $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ на Li-мишени (см. работу /5/) и для протонов из исследуемой реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$. С учетом 2π -геометрии измерений получено $\varepsilon_p = 0,21$. Ошибка в определении этой величины может дойти до 10% . Влиянием других источников ошибок можно пренебречь.

По нашим измерениям и с учетом $\sigma_{\text{Li}}^{th} = 940$ барн получено значение теплового сечения реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ $\sigma^{th} = (0,4 \pm 0,1)$ барн.

Имеющаяся сейчас экспериментальная информация о высоковозбужденных состояниях составного ядра ^{37}Cl в области энергии связи нейтрона /9,19/ пока ещё недостаточна, чтобы выяснить вопрос о том, какими нейтронными резонансами обусловлено тепловое сечение реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)$. Видимо, оно определяется вкладом нескольких уровней, в том числе и отрицательного, лежащего на ~ 3 кэВ ниже энергии связи нейтрона. Для решения этого вопроса представляет интерес исследование реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)$ в области энергий нейтронов вплоть до нескольких сотен электрон-вольт.

В то же время полученные результаты по реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ на тепловых и резонансных нейтронах могут быть полезными для исследования процессов ядерных превращений и объяснения изотопного состава химических элементов в астрофизических объектах. Так, например, избыток серы по сравнению с соседними элементами, обнаруженный с помощью рентгеноспектрального анализа в остатке сверхновой Тихо (вспыхнувшей в 1572 г.) /20/, вероятно, можно объяснить и большим вкладом реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ на медленных нейтронах. Кроме того, исследование реакции (n, p) на медленных, особенно на резонансных, нейтронах для ^{36}Cl и других ядер-мишеней (например, ^{22}Na , ^{26}Al и ^{40}K) может дать экспериментальные данные, учёт которых, возможно, является необходимым для правильного расчёта баланса нейтронов при рассмотрении вопроса об источнике нейтронов для s- и r-процессов нуклеосинтеза, что представляет немалый интерес в ядерной астрофизике /21-24/.

Результаты измерения теплового сечения реакции $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ и определение характеристик первых нейтронных резонансов ^{36}Cl в реакции (n, p) /9/ (которая, по-видимому, является основной для этих резонансов) открывают принципиально новую возможность определе-

ния соотношения концентрации изотопов $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$, что может быть использовано в некоторых случаях для датировки образцов и изотопной хронологии. Так, на пучке тепловых нейтронов с плотностью $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ можно зарегистрировать 3000 отсчетов от протонов за сутки для мишени, содержащей 0,5 г хлора при отношении $\frac{^{36}\text{Cl}}{^{35}\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{-8}$.

В заключение авторы благодарят Ю.Н. Воронцова, В.Д. Кулика, Г.В. Замыслова и п.И. Линькова за помощь при подготовке к эксперименту.

Литература

1. Пикельнер Л.Б., Попов Ю.П., Шаратов Э.И. Успехи физических наук, 1982, т. 37, вып. I, с. 39-84
2. Koehler P.F. et al. Bull. Amer. Phys. Soc., 1986, v. 31, No. 4, p. 854.
3. Knitter N.N. et al. Nucl. Sci. and Eng., 1983, v. 83, p. 229
4. Budtz-Jørgensen C., Knitter N.N. Nucl. Instr. Meth., 1984, v. 223, p. 295.
5. Антонов А.Д. и др. ОИЯИ, P3-86-344, Дубна, 1986.
6. Гledenov Ю.М. и др. Препринт ОИЯИ, I3-87-150, Дубна, 1987 (направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента").
7. Ensallem A. et al. Nucl. Phys., 1981, A368, p. 108.
8. Gledenov Yu.M. et al. Z. Phys., 1982, A308, p. 57.
9. Gledenov Yu.M. et al. Z. Phys., 1985, A322, p. 685.
10. Гledenov Ю.М. и др. В сб.: Краткие Сообщения ОИЯИ № I7-86, Дубна, 1986, с. 36.
11. Попов Ю.П., Риголь Х. ОИЯИ, PI5-85-497, Дубна, 1985.
12. Davis R., Schaeffer O.A. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1955, v. 62, p. 105-122.
13. Schaeffer O.A., Thompson S.O., Lark N.L. Geophys. Res., 1960, v. 65, p. 4013-4016.
14. Meyer P. Nature, 1978, v. 272, p. 675-679.
15. Hedges R.E.M. Nature, 1979, v. 281, p. 19-24.
16. Wintle A. Phys. Bull., 1985, v. 36, № 5, p. 208-211.
17. Tuniz C. et al. INFN/BE - 86/5, Trieste, 1986.
18. Вертебный В.П. В кн.: IV Школа по нейтронной физике. ОИЯИ, ДЗ, 4-82-704, Дубна, 1982, с. 66.
19. Nooren G.J.L., Van der Leun C. Nucl. Phys., 1984, A423, p. 197.
20. Becker R.H. et al. Astrophys. J., 1980, v. 235, No. 1, part. 2, p. L5-8.
21. Iben I.J. Astrophys. J., 1975, v. 196, p. 549.
22. Almeida J., Kappeler F. Astrophys. J., 1983, v. 265, p. 417.
23. Gowan J.J., Cameron A.G.W. Astrophys. J., 1983, v. 265, p. 429.
24. Ядерная астрофизика, под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма. М.: Мир, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 мая 1987 года.

Анджеевски Ю. и др.

P3-87-319

Измерение теплового сечения реакции $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$

Представлены результаты измерений теплового сечения реакции (n,p) на радиоактивном ядре ^{36}Cl . Для спектрометрии и идентификации низкоэнергетических протонов использовалась ионизационная камера с двумя сетками. Впервые получено значение теплового сечения $\sigma_{th}(n,p) = 0,4 \pm 0,1$ бэрн. Этот результат позволяет определять соотношение $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ на уровне 10^{-8} , что может представить интерес для изотопной хронологии.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Andrzejewski J. et al.

P3-87-319

Measurement of the Thermal Cross Section of the $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ Reaction

The results are reported on the measurement of the thermal cross section of the (n,p) reaction for the radioactive nucleus ^{36}Cl . For spectrometry analysis and identification of low energy charged particles the ionization chamber with two grids was used. For the first time the thermal cross section has been found to be equal $\sigma_{(n,p)} = 0,4 \pm 0,1$ b. It makes possible to determine the $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ratio on the 10^{-8} level, which could be interesting for the isotope chronology.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987