



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-356

P3-96-356

Ю.М.Гледенов, В.И.Салацкий, П.В.Седышев,
П.И.Шаланьски

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$
ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

1996

Измерение сечения реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ для тепловых нейтронов

Измерения выполнены на нейтронах от реактора ИБР-30. В отличие от опубликованных ранее работ тепловые нейтроны выделялись по времени пролета. Сечение реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)$ определялось сравнением с сечением реакций (n,p) и (n,α) на ядрах ^{14}N и ^6Li . Для регистрации заряженных частиц из реакций применялась ионизационная камера. Ранее исследования реакции на ^{35}Cl проводились в основном с помощью активационного анализа. Только в одной работе, опубликованной более 50 лет назад, использовалась ионизационная камера. Наши измерения выполнены на 8 мишенях из NaCl, KCl, LiF и $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ различной толщины. Сечение реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ для тепловых нейтронов оказалось равным (575 ± 13) мб, что заметно выше большинства опубликованных ранее значений.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Gledenov Yu.M. et al.

P3-96-356

Measurement of the $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ Reaction Cross Section for Thermal Neutrons

The measurements were performed on the neutron beam of the IBR-30 reactor. In distinction from the recent published works, thermal neutrons were separated by the flight time. The $^{35}\text{Cl}(n,p)$ reaction cross section was determined by a comparison with the (n,p) and (n,α) reaction cross sections on ^{14}N and ^6Li . The ionization chamber was used to register the charged particles. Previously, investigations of the reaction on ^{35}Cl were carried out mainly with the help of the activation method. Only in one experiment, reported over 50 years ago, an ionization chamber was used. Our measurements were performed with 8 targets of NaCl, KCl, LiF and $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ with different thicknesses. The $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ reaction cross section for thermal neutrons turned out to be equal to (575 ± 13) mb, that is noticeably higher than most of the recent published values.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996

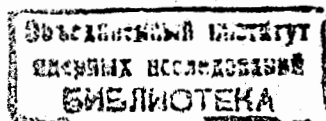
1. Введение

Для астрофизики представляет интерес сечение реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ в области энергии нейтронов E_n выше тепловых. Но в работах [1-3] это сечение определено с использованием сечения на тепловых нейтронах с $E_n=0,0253$ эВ. В литературе же, полученное различными авторами, сечение этой реакции на тепловых нейтронах имеет разброс значительно больше указанных погрешностей. Кроме того, для исследований р-четных и р-нечетных корреляций в реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ требуется [4,5] знание точных параметров резонансов ^{35}Cl при $E_0=-180$ эВ и $E_0=398$ эВ, получаемое по привязке к величине сечения на тепловых нейтронах. Поэтому представлялось целесообразным еще раз измерить это сечение, уделяя особое внимание надежности получаемого результата.

2. Методика экспериментов

Измерения проводились на нейтронах от импульсного реактора ИБР-30, работавшего совместно с линейным ускорителем электронов. Использовалась пролетная база 31 м. По времени пролета нейтронов выделялся выход из реакций: $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$, $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ и $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ для нейтронов с энергией $E_n \leq 1$ эВ. Две последние реакции имеют сечение, в этой области энергий, подчиняющееся закону $1/v$, а сечение первой реакции согласно нашим расчетам, а также расчетам и измерениям работы [2] отклоняется от этого закона при изменении энергии нейтронов от 0 до 1 эВ только на 1%. Поэтому сечение реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)$ можно определить по сравнению выхода из этой реакции с выходом из реакций на ^6Li и ^{14}N , сечение которых известно, если использовать нейтроны с E_n от примерно 0 эВ до 1 эВ. При этом форма спектра нейтронов не важна, лишь бы он был в пределах 0-1 эВ. В наших измерениях спектр состоял из нейтронов от $E_n=0,12$ эВ до 1,0 эВ, выделенных по времени пролета и рециклических нейтронов с $E_n \leq 0,033$ эВ.

В качестве детектора заряженных частиц применялась двухсекционная ионизационная плоская камера с сетками (рис.1), у



которой катод является общим для обеих секций [6]. Две мишени - содержащая хлор и вторая, содержащая литий или азот, имеющие одинаковую площадь и нанесенные на алюминиевые подложки, устанавливались на катод камеры. Так как мишени складывались подложками так, что нанесенные на них слои веществ, входящие в различные секции ионизационной камеры, располагались строго друг против друга, то количество нейтронов, попадающее на мишени, было почти одинаковым. Небольшая поправка, около 1%, из-за рассеяния нейтронов на двух алюминиевых подложках толщиной 50 мкм, вычислялась с большой точностью для различных измерений.

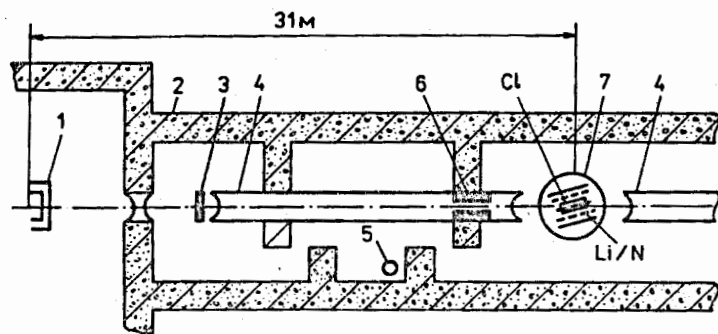


Рис.1 Схема эксперимента : 1 - активная зона реактора с замедлителем; 2 - защита из бетона; 3 - фильтр; 4 - нейтронород; 5 - монитор нейтронов; 6 - коллиматоры; 7 - ионизационная камера.

За несколько метров перед ионизационной камерой устанавливались коллиматоры (рис.1), формирующие нейтронный пучок, падающий на мишени. В предварительных экспериментах он был размером 2x4 см, а в основных экспериментах размером 2x8 см. Измерения проводились в геометрии, когда плоскости мишеней находились, в различных экспериментах, под углом от 5 до 7° к пучку падающих нейтронов, что устраняло попадание пучка нейтронов на сетки и электроды камеры без мишеней.

3. Предварительные эксперименты

В предварительных экспериментах было установлено, что при измерении сечения реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)$ заметно лучшее выделение пика протонов от фоновой подложки происходит, когда на пути пучка нейтронов помещен фильтр из алюминия толщиной 20 см. В дальнейшем такой фильтр стоял во всех экспериментах на расстоянии примерно 10 м от реактора (рис.1). Примерно в 20 м от реактора, вне нейтронного пучка, находился монитор нейтронов - борный счетчик.

В предварительных экспериментах камера наполнялась смесью $\text{Ar} + 4\% \text{CO}_2$ до давления 0,7 ата. Газы брались без дополнительной очистки.

Сигналы с коллекторов обеих секций ионизационной камеры и электрода с мишенями (катада) усиливались и подавались на входы АЦП измерительно-накопительного модуля для многопараметрических измерений [7]. С помощью этого модуля можно проводить регистрацию сигналов в различных режимах. Для уменьшения фона предварительные измерения были выполнены в режиме совпадения сигналов от коллекторов с сигналами от катада камеры. Применялись мишени : хлорная из NaCl и литиевая из LiF (табл.1). Так как выход из литиевой мишени был значительно больше выхода из хлорной мишени, то измерения проводились поочередно, с литиевой мишенью в течение значительно меньшего времени. Сигналы от монитора нейтронов запускали генератор точных амплитуд, и импульсы от него подавались на входы предусилителей так же, как и сигналы с электродов камеры. Это устраняло необходимость учитывать различие просчетов сигналов в трактах от секции с хлорной и литиевой мишенью.

Мишени готовились напылением веществ в вакууме на алюминиевые подложки. Толщина напыленных слоев этой пары мишеней определялась по взвешиванию с точностью около 3% (табл.1).

Сечение реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)$ определялось по формуле

$$\sigma(\text{Cl}) = \frac{n(\text{Li})}{n(\text{Cl})} \cdot \frac{N(p)}{N(\alpha)} \cdot \frac{m(\text{Li})}{m(\text{Cl})} \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot \sigma(\text{Li}) \quad (1)$$

где $n(\text{Li})$ и $n(\text{Cl})$ - количество ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^{35}\text{Cl}$ на см^2 в мишенях LiF и NaCl ; $N(p)$ и $N(\alpha)$ - число протонов и α -частиц, образующихся в реакциях на ${}^{35}\text{Cl}$ и ${}^6\text{Li}$ с учетом эффективности регистрации; $m(\text{Li})$ и $m(\text{Cl})$ - отсчеты монитора нейтронов при измерениях с литиевой и хлорной мишенями; K_1 - поправка на протоны из реакции ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ от азота, присутствующего как примесь в газе камеры. Она необходима, так как импульсы от протонов из реакции на ${}^{35}\text{Cl}$ и ${}^{14}\text{N}$, имеющих близкие энергии, на спектрах не разделялись, K_2 - поправка из-за рассеяния нейтронов на подложках мишеней, $\sigma(\text{Li})$ - сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$.

Для определения поправки K_1 камера опускалась так, что прямой нейтронный пучок не попадал на мишени, но проходил такой же путь в газе камеры, как и при облучении мишеней. Величина K_1 вычислялась по формуле $K_1 = 1 - \frac{N_p(0)}{N_p}$, где $N_p(0)$ - число зарегистрированных протонов, когда мишень вне прямого пучка; N_p - число протонов, когда мишень в прямом нейтронном пучке.

Значения измеренных величин, входящих в формулу (1), приведены в табл.2. Величина $\sigma(\text{Li})$ при $E_n=0,0253$ эВ взята из [8] равной 941 ± 3 барн.

Сечение исследуемой реакции в этих предварительных экспериментах оказалось равным (579 ± 50) мб, что отличается от большинства опубликованных значений.

Из предварительных измерений были сделаны следующие выводы для дальнейших экспериментов: а) так как поправка на вклад от протонов из реакции ${}^{14}\text{N}(n,p)$ оказалась большой ($K_1=0,52$), то необходимо наполнять камеру более чистыми газами, б) необходимо более тщательно определять толщину мишеней, как наиболее вероятный источник возможных ошибок.

4. Мишени

Необходимо подробно остановиться на надежности и точности определения толщины мишеней с помощью взвешивания. Это важно в свете утверждения в работах [3,9,10] о ненадежности определения толщины мишеней только методом дифференциального взвешивания, то

есть сначала взвешивания подложки, а затем подложки с напыленным слоем.

Все мишени в наших экспериментах приготавливались на вакуумной распылительной установке ВУП-5. Размер мишеней в предварительных экспериментах был 30×120 мм, на подложках из алюминия размером 60×150 мм, а в основных измерениях 61×120 мм, на подложках из алюминия 80×140 мм. Распылялись вещества с высокой химической чистотой. Распыление производилось из молибденовых лодочек, нагреваемых пропусканием через них электрического тока. Вакуум во всех режимах поддерживался в пределах $3 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-3}$ Па. Литиевые мишени изготовлялись из LiF . Содержание лития-6 в литии составляло $(3,65 \pm 0,02)$ %, что определено с помощью масс-спектрометрического анализа. Геометрия, при напылении пары мишеней, содержащей хлор, и эталонной, содержащей литий или азот, была одинаковой.

Применялась следующая процедура напыления мишеней. Сначала в камеру установки помещались пустая лодочка и подложка, вымытые ацетоном, затем лодочка прогревалась током примерно в том же режиме скорости увеличения силы тока и выдержки по времени, что затем применялся при напылении. Этот режим определялся по более раннему пробному напылению. После окончания прогрева делалась выдержка, на остывание деталей внутри камеры, примерно 3 минуты, и в камеру впускался воздух. Еще через 3 минуты начинались измерения веса подложки, которая была прогрета и обезгажена при радиационном нагреве от лодочки. Сначала взвешивание проводилось в течение нескольких минут на весах ВЛР-200г, стоящих рядом с напылительной установкой, а затем, примерно через 11 минут и до 20 минут на весах ВЛР-20г, большей точности, находящихся в другом помещении. Взвешенная подложка помещалась в установку и производилось напыление. Затем подложка с напыленным веществом взвешивалась на двух весах, так же, как и чистая подложка, и в тех же временных интервалах.

Были изготовлены 6 мишеней различной толщины и с различными напыленными веществами весом от 14 до 40 мг. После соприкосновения с

воздухом как чистые подложки, так и подложки с напыленными веществами увеличивали свой вес. Скорость увеличения веса, измеренная в интервале от 3 до 20 минут, после соприкосновения с воздухом, была одинаковой как для чистых подложек, так и подложек с NaCl, LiF, KCl и C₅H₅N₅, независимо от толщины напыленного слоя. Вес слоев определялся по измерениям на более точных весах как разность веса напыленной подложки и чистой подложки в диапазоне от 11 до 20 минут, после соприкосновения их с воздухом, через каждую минуту. Максимальный разброс полученных значений веса от среднего значения был меньше, чем погрешность весов по паспорту, которая бралась как погрешность значения напыленного слоя. Вес слоев, измеренный на более грубых весах в диапазоне от 3 до 6 минут, после соприкосновения с воздухом, использовался для проверки отсутствия грубых ошибок при измерениях на более точных весах. Вес напыленных 6 мишеней, которые использовались в основных измерениях, определенный на двух весах, только для одной мишени различался больше чем на 1 процент. Увеличение веса при соприкосновении мишеней с воздухом обусловлено в основном адсорбцией влаги, так как при помещении мишеней в эксикатор они восстанавливают свой вес.

Была также проведена проверка измеренных толщин литиевых мишеней по форме пиков от α -частиц при облучении мишеней нейтронами. Как она проводилась, описано в разделе 5.1 главы "Основные измерения". Оказалось, что толщина литиевых мишеней, полученная по дифференциальному взвешиванию, определена с точностью лучше чем 5%. Все перечисленное выше показывает, что определение толщин мишеней, изготовленных по применяемой процедуре, правильное.

При рассмотрении напыленных мишеней в микроскоп с увеличением в 50 раз видно, что они однородны; у более тонких через напыленный слой видны полосы от прокатки алюминиевых подложек.

На мишенях меньшей толщины четко видны интерференционные полосы, свидетельствующие о равномерном уменьшении слоя вещества от центра к краям.

5. Основные измерения

Ионизационная камера наполнялась смесью Ar + CO₂. Аргон брался из баллонов без дополнительной очистки, так как по паспорту в нем азота меньше 0,006 %, а углекислый газ очищался с помощью жидкого азота.

Измерения были проведены на второй, третьей и четвертой парах различных по толщине мишеней (табл.1). Импульсы с электродов камеры регистрировались 1024-канальными АЦП. Энергетическая калибровка спектров заряженных частиц проводилась по α -частицам с энергией 4,18 и 4,76 МэВ от тонких источников урана-238 и 234.

5.1 В измерениях со второй парой мишеней использовалась мишень из NaCl толщиной 0,216 мг/см² и мишень из LiF толщиной 0,451 мг/см². Были проведены два измерения одновременно с двух секций камеры в течение примерно 2,5 часа и два только с секцией с хлорной мишенью (загрузка от которой меньше) в течение около 17 часов. При этом применялся режим регистрации событий без совпадений импульсов с коллектора и катода. Очистка CO₂, входящего в смесь газов, наполняющих камеру, уменьшила поправку на присутствие азота в газе примерно в 5 раз. Проверено, что в выполненных экспериментах влияние рассеянных в помещении нейтронов мало. Вклад от рассеянных нейтронов в выход из литиевой мишени, когда она стояла вне прямого нейтронного пучка, всего 0,36% от выхода из литиевой мишени, стоящей в пучке.

Часть спектра частиц, вылетающих из мишени NaCl, с пиками от протонов из реакций ³⁵Cl(n,p) и ¹⁴N(n,p) приведена на рис.2. Спектр протонов из реакции на азоте, когда хлорная мишень выведена из прямого пучка нейтронов, нормирован на то же число отсчетов монитора, что было при измерении с хлорной мишенью в прямом пучке. Импульсы от монитора выводились на полном спектре в интервале 700-900 каналов. Процедура определения фоновой подложки была следующей: сначала на глаз проводилась подложка и находилось полное число протонов, образующихся в мишени, по формуле (2), приведенной ниже. Затем,

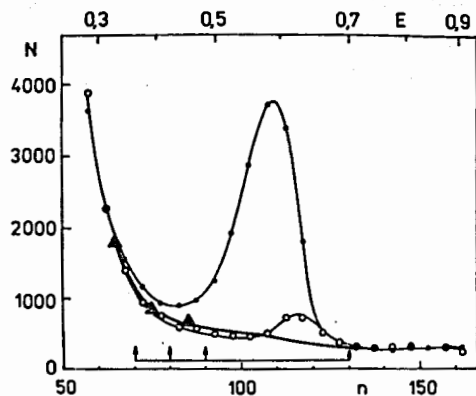


Рис.2 Пики от протонов из реакций : ● - $^{35}\text{Cl}(n,p) + ^{14}\text{N}(n,p)$; ○ - только $^{14}\text{N}(n,p)$; ▲ - вычисленные точки фоновой подложки; n - номер канала; E - энергия протонов в МэВ; N - число зарегистрированных частиц; —▲— - экстраполированная подложка по вычисленным точкам.

используя это число, вычисляли вклад в измеренный спектр в интервалах 60-70, 70-80 и 80-90 каналов, от "хвоста" протонного пика, зависящий от конечной толщины мишени. Окончательно фоновая подложка под левым краем пика проводилась по точкам, обозначенным треугольничками на рис.2, полученным с учетом вычисленного вклада "хвоста" пика. Надежность такого метода проведения подложки подтверждается результатами измерений только на азоте (кружки на рис.2). Для уменьшения фоновой подложки расстояние мишень-сетка в камере уменьшено от 82 мм в предварительных экспериментах до 60 мм. А ширина мишеней, для повышения выхода из хлорной мишени, увеличена от 30 до 61 мм. Мишени располагались ниже центра электрода, чтобы прямой нейтронный пучок вызывал реакцию $^{14}\text{N}(n,p)$, на примеси азота в объеме, из которого вылетающие из реакции протоны не выходили из однородного поля между электродами. При такой ширине мишеней, их положении и давлении в камере 1,15 ата смеси Ag + 3% CO_2 , не все тритоны из литиевой мишени укладывались в объеме с однородным электрическим полем и надежно разделить пики от α -частиц и тритонов было невозможно. Это потребовало найти зависимость числа

α -частиц из мишени $N(\alpha)$ от отсчетов монитора $m(\text{Li})$. Такая калибровка монитора была проведена при давлении в камере 2,0 ата, когда все тритоны укладывались в однородное электрическое поле. Оказалось, что $N(\alpha) = 303 \cdot m(\text{Li})$ с точностью 2%. Отсюда - входящее в формулу (1) отношение $m(\text{Li})/N(\alpha) = 0,00330 (\pm 2\%)$. Выделение общего пика от протонов из реакций на хлоре и азоте от фоновой подложки производилось в трех диапазонах : 70-130, 80-130 и 90-130 каналов (рис.2). Полное число протонов, образующихся в реакции на хлоре, вычислялось по формуле

$$N(p) = \frac{N_p}{\epsilon} \quad (2)$$

где N_p - число отсчетов в пике от протонов из реакции на хлоре, в диапазоне выделения пика; ϵ - эффективность регистрации протонов для данного диапазона. Так как в наших измерениях регистрируются частицы, вылетающие под любыми углами из мишени (в 2π), то формула для эффективности регистрации, аналогичная формулам из [11, 12], имеет следующий вид :

$$\epsilon = 0,5 - \frac{0,25 \cdot t}{R_0 - R_x} \quad (3)$$

где t - толщина мишени; R_0 - полный пробег протонов в веществе мишени; R_x - пробег при пороговой энергии, соответствующей нижнему каналу выделяемого диапазона.

Использованные нами мишени были достаточно тонкими, чтобы удовлетворить условию $t \leq R_0 - R_x$, необходимому для того, чтобы можно было применить формулу (3). Пробеги протонов в NaCl взяты из [13], они совпадают с данными, приведенными в [14]. Пробеги α -частиц и тритонов в мишени из LiF, необходимые для калибровки монитора, взяты из [15]. Разность $R_0 - R_x$ по этим данным совпадает, в необходимой области пробегов, с разностями, вычисленными по [13, 14 и 16].

Проверка толщин литиевых мишеней, измеренных по дифференциальному взвешиванию, была проведена по форме пиков от α -частиц, при облучении мишеней нейтронами, следующим образом. Вычислялось полное число α -частиц, образующихся в реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ с энергией 2,05 МэВ, по формуле

$$N_{\alpha} = \frac{N_x}{\epsilon_x}, \quad (4)$$

где N_x - число отсчетов в пике от α -частиц, в диапазоне энергий выделения пика; ϵ_x - эффективность регистрации α -частиц для данного диапазона. Как видно из формулы (3), эффективность регистрации зависит от толщины мишени, а вычисленное число α -частиц N_{α} не должно зависеть от диапазона, в котором выделяется пик, поэтому если толщина определена правильно (так же, как и величины R_0 и R_x), то величина N_{α} будет одинаковой, не зависящей от диапазона выделения. Проведены вычисления N_{α} , когда нижняя граница выделения пика изменялась в широких пределах энергий α -частиц от 0,4 до 1,3 МэВ, для толщины мишени, полученной по взвешиванию, а также при предположениях, что толщина мишени на 5% больше и меньше. Постоянство N_{α} при таких предположениях (о изменении толщины мишени) оказалось значительно хуже, чем для толщины мишени, определенной взвешиванием. Отсюда можно сделать вывод, что толщина литиевых мишеней, полученная дифференциальным взвешиванием, определена с точностью лучше чем 5%.

Значения величин, входящих в формулу (1), полученные в четырех измерениях со второй парой мишеней, приведены в табл.2. В ней же приведены и полученные сечения исследуемой реакции.

5.2. Измерения на третьей паре мишеней были проведены с мишенью KCl толщиной 0,320 мг/см² и мишенью из C₅H₅N₅ (аденина) толщиной 0,310 мг/см². Давление в камере было 1,15 и 0,46 ата смеси Ar + 4,3 % CO₂. Энергия протонов из реакции на азоте, так же как и из реакции на хлоре, меньше 0,6 МэВ, поэтому протоны полностью укладывались в однородное электрическое поле между электродами, даже при давлении в камере 0,46 ата.

Продолжительность измерений одновременно с обеих секций камеры составляла от 8 до 13 часов, для всех шести измерений, трех с мишенями в пучке нейтронов и трех с мишенями вне пучка нейтронов.

При этом события регистрировались в режиме совпадений импульсов от коллекторов с импульсами от катода.

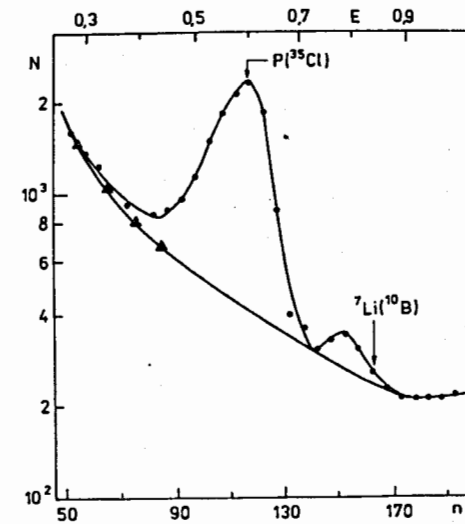


Рис.3 Спектр частиц из мишени KCl : ${}^7\text{Li}({}^{10}\text{B})$ - литий-7 из реакции ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$; $p({}^{35}\text{Cl})$ - протоны из хлора; n - номер канала; E - энергия в МэВ; N - число зарегистрированных частиц; \blacktriangle - вычисленные точки фоновой подложки.

Спектры частиц из мишеней KCl и C₅H₅N₅ показаны на рисунках 3 и 4. Стрелки указывают места, где по расчету должны быть протоны из реакций ${}^{35}\text{Cl}(n,p)$ и ${}^{14}\text{N}(n,p)$, а также ядра ${}^7\text{Li}$ из реакции ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$. Пики от ядер ${}^7\text{Li}$ и протонов из азота сдвинуты влево от вычисленных положений из-за конечной толщины мишеней. Такого сдвига для пика от протонов из хлора не видно, так как пробеги протонов в KCl примерно в два раза больше, чем в аденине. Пик от ядер ${}^7\text{Li}$ из мишени KCl обусловлен реакцией на малой примеси ${}^{10}\text{B}$, имеющей сечение на четыре порядка величины больше, чем на ${}^{35}\text{Cl}$. На спектре частиц из адениновой мишени не виден пик от ядер ${}^7\text{Li}$, что означает значительно меньшее количество примеси ${}^{10}\text{B}$ в аденине по сравнению с примесью ${}^{10}\text{B}$ в KCl.

Из рис.3 видно, что пик от протонов из хлора достаточно хорошо отделяется от пика ${}^7\text{Li}$.

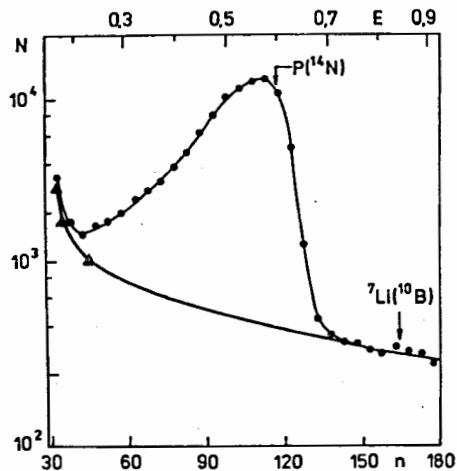


Рис.4 Спектр частиц из мишени $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$: n - номер канала; E - энергия в МэВ; N - число зарегистрированных частиц; \blacktriangle - вычисленные точки фоновой подложки.

Процедура определения фоновой подложки была такой же, как и при обработке результатов измерений на второй паре мишеней.

Сечение реакции ${}^{35}\text{Cl}(n,p)$ определялось по формуле

$$\sigma(\text{Cl}) = \frac{n(\text{N})}{n(\text{Cl})} \cdot \sigma(\text{N}) \cdot \frac{N_p(\text{Cl})}{N_p(\text{N})} \cdot \frac{K_1(\text{Cl})}{K_1(\text{N})} \cdot \frac{\varphi}{K_2}, \quad (5)$$

где $n(\text{N})$ и $n(\text{Cl})$ - количество ядер азота-14 и хлора-35 на см^2 в мишенях из аденина и KCl; $\sigma(\text{N})$ - сечение реакции ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$; $N_p(\text{Cl})$ и $N_p(\text{N})$ - число протонов, образующихся в реакциях на азоте и хлоре; $K_1(\text{Cl})$ и $K_1(\text{N})$ - поправки величин $N_p(\text{Cl})$ и $N_p(\text{N})$ из-за присутствия азота в газе камеры; φ - поправка на отношение коэффициентов, учитывающих просчеты импульсов от секций с азотной и хлорной мишенями; K_2 - поправка из-за рассеяния нейтронов на подложках мишеней, равная 1,011.

Просчеты определялись по различию отсчетов от урановых источников, когда ионизационная камера облучалась нейтронами и когда камера не облучалась.

Значение $\sigma(\text{N})=1,83$ б при $E_n=0,0253$ эВ взято по нашим измерениям [17], где $\sigma(\text{N})=(1,83 \pm 0,07)$ б, и приведенному в [18], где $\sigma(\text{N})=(1,83 \pm 0,03)$ б, а погрешность взята равной 0,05 б.

Энергии протонов из реакций на хлоре и азоте (598 и 584 кэВ), а также толщины мишеней (0,320 и 0,310 $\text{мг}/\text{см}^2$) отличаются мало, поэтому вершины пиков от этих протонов на полученных спектрах (рис. 3 и 4) находятся примерно при одной энергии. И так как на обоих спектрах 1 канал соответствовал примерно 5,14 кэВ, то и примерно в одинаковых каналах. Это позволило находить отношение $N_p(\text{Cl})/N_p(\text{N})$ при выделении протонных пиков на обоих спектрах в одинаковых интервалах каналов. В таблице 3 приведен способ вычисления этого отношения, для второго измерения на третьей паре мишеней, спектры, полученные в котором, показаны на рис. 3 и 4. В первой колонке приведены 5 интервалов выделения пиков. Во второй и пятой число отсчетов в заданном интервале с вычетом фоновой подложки, определенной по описанной выше процедуре. Эффективности регистрации протонов (ϵ_p) приведены в 3 и 6 колонках. Мишени были тонкими, и $\epsilon_p(\text{Cl})$ для мишени KCl вычислены по формуле (3) с использованием пробегов из [13]. Они совпадают с приведенными в [14]. Для мишени из аденина пробеги взяты из [15]. Они совпадают с пробегами из [13]. В 4 и 7 колонках помещены вычисленные значения $N_p(\text{Cl})$ и $N_p(\text{N})$, а в 8 колонке их отношение. Видно, что полученные отношения имеют значительно меньший разброс, чем разброс отдельных значений $N_p(\text{Cl})$ и $N_p(\text{N})$. Вероятно, это обусловлено сокращением неизвестной систематической ошибки, присутствующей при использованной нами процедуре определения фоновой подложки для обоих спектров. Среднее значение отношения приведено в табл. 4 и использовано для вычисления сечения исследуемой реакции. В этой таблице приведены и другие величины, входящие в формулу (5) для этого измерения и для двух других измерений на третьей паре мишеней. В ней же приведены и полученные сечения исследуемой реакции.

5.3. В измерениях с четвертой парой мишеней использовалась мишень из KCl толщиной 0,545 мг/см² и мишень из аденина толщиной 0,188 мг/см². Давление в камере было 1,15 и 0,46 ата смеси Ag + 3,1% CO₂. Измерения проводились одновременно с двух секций камеры продолжительностью от 6 до 18 часов. При этом применялся режим регистрации событий с совпадениями импульсов с коллектора и катода. Обработка результатов, полученных в экспериментах с четвертой парой мишеней, производилась так же, как и для измерений с третьей парой мишеней. Сечение реакции вычислялось по формуле (5). Величины, входящие в формулу, и вычисленные сечения приведены в табл. 4.

5.4. Полученные нами средние взвешенные сечения реакции ³⁵Cl(n,p), по измерениям на всех 4 парах мишеней, приведены на рис. 5. На рисунке также показаны средние взвешенные сечения этой реакции, вычисленные по данным, взятым из табл. 1 работы [3]. В этой таблице приведено 13 значений сечения, полученных в экспериментах при 8 различных толщинах мишеней. В наших вычислениях определены средние взвешенные сечения трех групп приведенных значений. На рисунке эти сечения показаны при толщинах мишеней, средних для каждой группы. Кроме того, взвешенное среднее по всем мишеням, полученное в [3], также показано на рисунке. Видна зависимость в [3] определяемого сечения от толщины мишени, чего не должно быть. Такой зависимости не наблюдается в наших экспериментах. Среднее взвешенное сечение реакции по всем нашим измерениям равно (575±13) мб. Так как полученное нами сечение выше большинства известных из литературы, девяти из десяти, приведенных в табл. 2 [3], то это заставило нас тщательно проверить, нет ли в наших измерениях систематических ошибок.

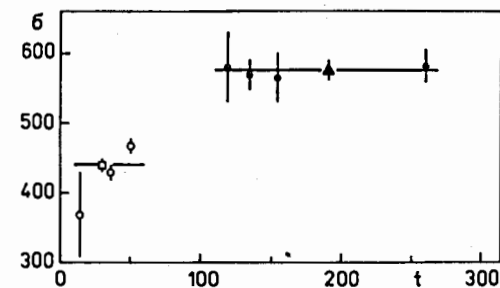


Рис.5 Сечение реакции ³⁵Cl(n,p) для тепловых нейтронов : t - толщина мишеней, мг/см² хлора; σ - сечение, мб ; ϕ - по данным из [3]; ϕ - наши данные; ϕ - взвешенное среднее по данным [3]; ↑ - взвешенное среднее по нашим данным.

6. Контрольные измерения и расчеты

6.1. Для проверки, не завышено ли полученное нами сечение реакции для тепловых нейтронов, из-за вклада от нейтронов с энергией выше 1 эВ, был проведен специальный контрольный эксперимент. Выполнены измерения выхода протонов из хлорной мишени с фильтром ⁶LiF и без него. Оказалось, что вклада от нейтронов с энергией выше 1 эВ нет, с точностью до экспериментальных ошибок, составляющих меньше 1%.

6.2. Во всех экспериментах, кроме одного, нейтронный пучок сначала проходил через хлорную мишень, а затем через литиевую или азотную. В одном эксперименте мишени поменяли местами и при вычислении сечения реакции по формуле (5), поправку K₂, на рассеяние нейтронов на подложках мишеней, брали в числителе. Полученное сечение не выпадает из сечений, полученных в других экспериментах.

6.3. В формулу (3), по которой вычисляется эффективность регистрации ε, входит толщина мишени t. В наших вычислениях она определялась по взвешиванию. Но это средняя толщина, а при использованной геометрии напыления толщина мишеней уменьшается от

центра к краям согласно формуле (для испарения с малой площадки на параллельную ей плоскую поверхность) из [19]. Поэтому была проведена оценка правильности использования значения средней толщины для вычисления ϵ . Проверка для всех трех пар мишеней показала, что поправки к ϵ на неравномерность толщин мишеней меньше 1% и приводят к изменению сечения исследуемой реакции и в сторону его увеличения и в сторону его уменьшения. Кроме того, точность вычисления этих поправок, вероятно, меньше, чем их абсолютная величина. Поэтому они не учитывались и использовалось значение толщины, определенное по дифференциальному взвешиванию.

7. Заключение

Измерения, выполненные нами на мишенях из NaCl, KCl, LiF и $C_5H_5N_5$ различной толщины, при различных условиях в ионизационной камере и в различных режимах измерительного модуля, дают совпадающие значения, в пределах ошибок, для исследуемого сечения реакции. Контрольные расчеты и измерения показали, что те места, где у нас возникли малейшие сомнения в надежности наших экспериментов, не могут давать ошибку больше 1%. Поэтому мы считаем, что полученное нами сечение реакции $^{35}Cl(n,p)^{35}S$ для нейтронов с энергией 0,0253 эВ, равное $(575 \pm 13) \text{ мб}$, достаточно надежное, несмотря на то, что оно выше большинства полученных ранее значений сечения.

Настоящая работа выполнена благодаря частичному финансированию Международным научным фондом по гранту N RFI300 и Российским фондом фундаментальных исследований, грант 95-02-05212.

Таблица 1
Мишени и условия в ионизационной камере

| Пара мишеней | | $n(Cl)$, ядер $Cl-35/cm^2$ $\times 10^{18}$ | $n(Li)$, ядер $Li-6/cm^2$ $\times 10^{17}$ | $n(N)$, ядер $N-14/cm^2$ $\times 10^{18}$ | Расстояние мишень- сетка, мм | Давление газа, ата |
|--------------|----------------------|---|--|---|------------------------------------|-----------------------|
| номер | состав | | | | | |
| 1 | NaCl и LiF | $1,53 \pm 0,05$ | $2,34 \pm 0,07$ | ----- | 82 | 0,7 |
| 2 | NaCl и LiF | $1,71 \pm 0,02$ | $3,78 \pm 0,04$ | ----- | 60 | 1,15 |
| 3 | KCl и $C_5H_5N_5$ | $1,99 \pm 0,02$ | ----- | $6,82 \pm 0,07$ | 60 | 0,46 и 1,15 |
| 4 | KCl и $C_5H_5N_5$ | $3,38 \pm 0,03$ | ----- | $4,14 \pm 0,04$ | 60 | 0,46 и 1,15 |

Таблица 2

Измерения с мишенями NaCl и LiF

| Пара мишеней | $N(p)(^{35}Cl) \times 10^3$ | $N(\alpha)(^6Li) \times 10^3$ | $m(Li)$ | $m(Cl) \times 10^3$ | K_1 | K_2 | $\sigma(Cl)$, мбарн |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| 1 | $5,07 \pm 0,15$ | $181,6 \pm 1,8$ | 8322 ± 125 | $29,7 \pm 0,3$ | $0,520 \pm 0,034$ | $1,008 \pm 0,002$ | 579 ± 50 |
| 2 | $30,8 \pm 0,9$ | ----- | ----- | $33,28 \pm 0,20$ | $0,905 \pm 0,008$ | $1,009 \pm 0,002$ | 570 ± 23 |
| 2 | $4,09 \pm 0,13$ | ----- | ----- | $4,365 \pm 0,065$ | $0,905 \pm 0,008$ | $1,009 \pm 0,002$ | 577 ± 25 |
| 2 | $41,45 \pm 1,48$ | ----- | ----- | $43,70 \pm 0,22$ | $0,905 \pm 0,008$ | $1,009 \pm 0,002$ | 584 ± 26 |
| 2 | $5,46 \pm 0,23$ | ----- | ----- | $5,990 \pm 0,078$ | $0,905 \pm 0,008$ | $1,009 \pm 0,002$ | 561 ± 29 |

Таблица 3

Определение отношения $\frac{N_p(Cl)}{N_p(N)}$

| каналы | $N_p'(Cl)$ | $\epsilon_p(Cl)$ | $N_p'(Cl) \times 10^3$ | $N_p'(N)$ | $\epsilon_p(N)$ | $N_p(N) \times 10^3$ | $\frac{N_p'(Cl)}{N_p(N)}$ |
|--------|------------|------------------|------------------------|-----------|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 50-140 | 10090 | 0,4364 | 23,12 | 90915 | 0,3967 | 229,2 | 0,1009 |
| 60-140 | 10003 | 0,4284 | 23,35 | 88802 | 0,3826 | 232,1 | 0,1006 |
| 70-140 | 9860 | 0,4166 | 23,67 | 85058 | 0,3616 | 235,2 | 0,1006 |
| 80-140 | 9630 | 0,3960 | 24,32 | 79349 | 0,3278 | 242,1 | 0,1005 |
| 90-140 | 9225 | 0,3595 | 25,66 | 69604 | 0,2652 | 262,5 | 0,0978 |

Таблица 4

Измерения с мишенями KCl и $C_5H_5N_5$

| Пара мишеней | $\frac{N_p(Cl)}{N_p(N)}$ | $K_1(Cl)$ | $K_1(N)$ | ϕ | σ_{Cl} , мбарн |
|--------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 3 | $0,0963 \pm 0,0014$ | $0,929 \pm 0,011$ | $0,996 \pm 0,001$ | $1,005 \pm 0,010$ | 561 ± 21 |
| 3 | $0,0994 \pm 0,0016$ | $0,837 \pm 0,013$ | $0,990 \pm 0,001$ | $1,02 \pm 0,02$ | 532 ± 23 |
| 3 | $0,1045 \pm 0,0054$ | $0,834 \pm 0,012$ | $0,969 \pm 0,001$ | $1,04 \pm 0,01$ | 595 ± 37 |
| 4 | $0,2566 \pm 0,0046$ | $0,956 \pm 0,007$ | $0,987 \pm 0,003$ | $1,03 \pm 0,01$ | 568 ± 22 |
| 4 | $0,2677 \pm 0,0040$ | $0,966 \pm 0,005$ | $0,991 \pm 0,002$ | $1,03 \pm 0,01$ | 595 ± 21 |
| 4 | $0,2784 \pm 0,0031$ | $0,896 \pm 0,014$ | $0,961 \pm 0,008$ | $1,007 \pm 0,010$ | 574 ± 22 |

Литература

1. Попов Ю.П., Шапиро Ф.Л., ЖЭТФ, 1961, 40, N6, с.1610.
2. Koehler P.E., Phys. Rev. C44, 1675 (1991).
3. Druyts S., et al, Nucl. Phys. A573 (1994) 291.
4. Антонов А., и др., ЯФ, 1988, 48, с.305.
5. Зенкин С.В., Титов Н.А., Препринт ИЯИ АН СССР П-0367, М.,1984.
6. Гледенов Ю.М., и др., ПТЭ, 1988, N3, с.55.
7. Гледенов Ю.М., и др., Сообщения ОИЯИ, P10-95-438, Дубна, 1995.
8. Mughabghab S.F., et al., Neutron cross-section, vol.1. (Academic, New York, 1981), p.9.
9. Wagemans C., Nucl. Instr. Meth. A282 (1989), p.4.
10. Eukens R., et al, Nucl. Instr. Meth. A303 (1991), p.152.
11. Росси Б., Штауб Г., Ионизационные камеры и счетчики. ИЛ, Москва, 1951, с.226.
12. Абросимов Н.К., Кочаров Г.Е., Изв. АН СССР, сер. физ., 1962, 26, с.237.
13. Atomic Data and Nucl. Data Tables, 27 (1982), N 4/5, 352.
14. Пучеров Н.Н., и др., Таблицы пробегов заряженных частиц с энергией до 8 МэВ, Изд. Наукова Думка, Киев, 1977, с.20 и 50.
15. ICRU REPORT 49, BETHESDA, MARYLAND, U.S.A., 1993, p.152 and p.228.
16. Немец О.Ф., Гофман Ю.В., Справочник по ядерной физике. Изд. Наукова Думка, Киев, 1975, с.94, 98, 120 и 124.
17. Gledenov Yu.M., et al., Z. Phys. A346, p.307 (1993).
18. Ajzenberg-Selove F., Nucl. Phys. A449, 1 (1986).
19. Холлэнд Л., Нанесение тонких пленок в вакууме. Госэнергоиздат, М. и Л., 1963, с.186.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 октября 1996 года.