

ИССЛЕДОВАНИЕ (p, γ)-РЕАКЦИИ НА ЯДРЕ ^{115}In

И. Н. Вишневский, О. И. Давидовская, В. А. Желтоножский,
Н. В. Стрильчук, П. Н. Трифионов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Впервые измерены спектры γ-лучей, сопровождающих (p, γ)-реакцию на ^{115}In . Измерения велись при энергиях протонов 3,5 и 4,0 МэВ. Измерены сечения $\sigma(p, \gamma) = 0,5 \pm 0,1$ и $0,9 \pm 0,1$ мкб соответственно и относительная заселенность нижайших дискретных состояний ^{116}Sn . Выполнены расчеты по статистической модели и с учетом гигантского дипольного резонанса. Показана доминирующая роль нестатистических процессов.

Исследования (p, γ)-реакции на ядрах в области $Z = 50$ представляют значительный интерес как для понимания механизма (p, γ)-реакции в этой области ядер, так и для изучения структуры и природы возбужденных состояний [1, 2].

Изучение (p, γ)-реакции ранее, в основном, было проведено на ядрах с образованием 1^- -состояний гигантского дипольного резонанса (ГДР). Наиболее полные исследования таких процессов были выполнены на ядрах с $A \leq 90$ [3, 4], где было показано, что доминирующим механизмом является прямой канал, приводящий к образованию ГДР.

Представляет определенный интерес изучение образования высокоспиновых состояний в (p, γ)-реакции и распада этих состояний. Удобным ядром для таких исследований является ^{115}In ($I_\pi = 9/2^+$), так как на нем в (p, γ)-реакции образуется полумагическое ядро ^{116}Sn , а в магических и полумагических ядрах низколежащие возбужденные состояния могут быть описаны простыми двухчастичными конфигурациями. Следовательно, переходы между возбужденными состояниями ^{116}Sn , образованными в (p, γ)-реакции, и нижайшими возбужденными состояниями ^{116}Sn будут практически чистыми переходами в рамках простой оболочечной модели.

Данных о (p, γ)-реакции на ядре ^{115}In ранее получено не было. Основной экспериментальной сложностью этих работ на ^{115}In является то, что Q-величина для (p, γ)-реакции $Q(p, \gamma) = 9,3$ МэВ, в то время как $Q(p, n\gamma) = -0,3$ МэВ. При энергии протонов 4 МэВ выход (p, nγ)-канала на три - четыре порядка больше, чем для (p, γ)-канала, и спектр γ-излучения ^{116}Sn в низкоэнергетической области будет находиться на высокоинтенсивном спектре γ-лучей ^{115}Sn , образовавшихся в (p, nγ)-реакции. Вследствие этого такие исследования можно проводить только с помощью полупроводниковых спектрометров с хорошими техническими характеристиками в режиме γγ-совпадений.

Необходимо также отметить, что данные о ^{116}Sn можно сравнить с исследованием (p, γ)-реакции на ^{89}Y , в которой возбуждаются состояния полумагического ядра ^{90}Zr , и на этом ядре было выполнено много работ по изучению (p, γ)-реакций [3 - 5]. Выбор ядра ^{116}Sn также обусловлен и тем, что в настоящее время получено много новых данных из γγ'-реакций [6], в которых возбуждаются в основном состояния со спинами 1 - 2. В то же время заселение более высокоспиновых состояний в ГДР на этом ядре не изучалось.

Эксперимент и результаты исследований

Изучение (p, γ)-реакции было выполнено на тандем-генераторе ИЯИ НАН Украины методами γ-спектрометрии на пучке. В измерениях использовались протоны с энергией 3,5 и 4 МэВ. Облучалась мишень из естественного индия (содержание $^{115}\text{In} - 96\%$).

В измерениях использовался спектрометр $\gamma\gamma$ -совпадений с двумя Ge-детекторами с эффективностью регистрации 40 и 30 % по сравнению с NaJ(Tl)-детектором размером 3" $\times$ 3" и энергетическим разрешением 2,0 кэВ на γ -линиях ^{60}Co . Детекторы были размещены под углом 100° друг к другу. Измерения проводились в непрерывном режиме почти трое суток. Блок-схема установки приведена на рис. 1. Управление измерениями осуществлялись с помощью специально разработанной программы NetSpectrum.

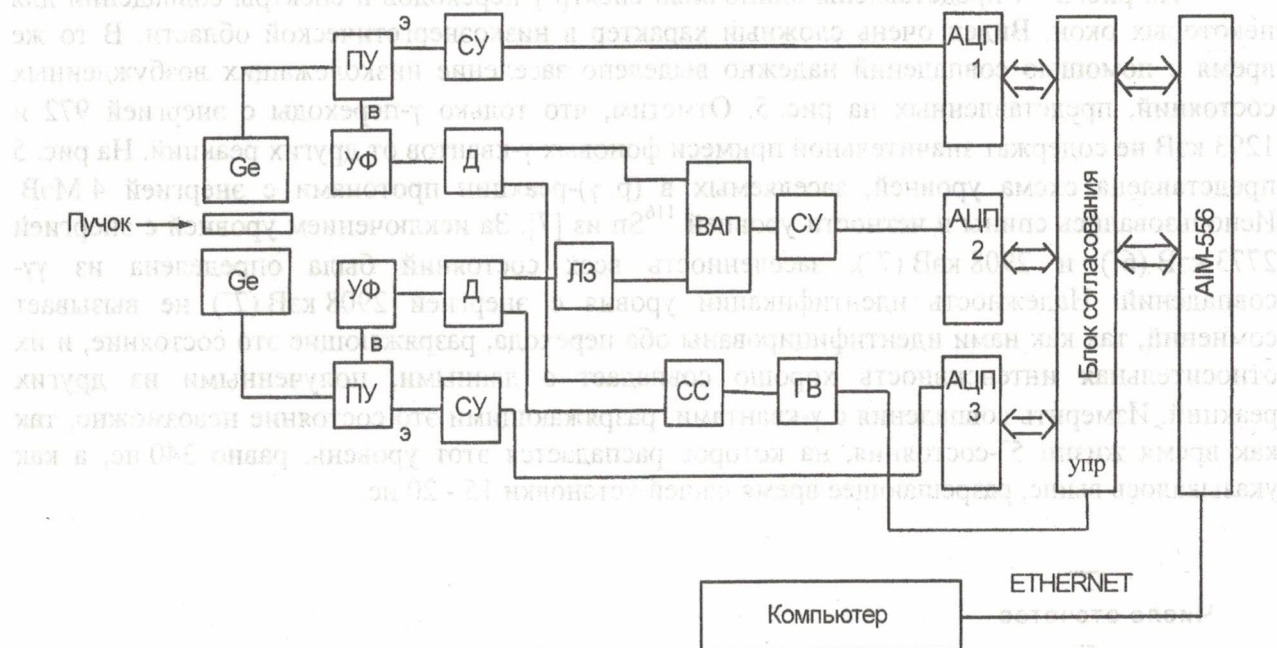


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения $\gamma\gamma$ -совпадений.

В этой установке с каждого детектора (Ge) через предварительный усилитель (ПУ) снимается два сигнала: энергетический (э) и временной (в). Энергетические сигналы через спектрометрические усилители (СУ) поступают на 1-й и 3-й амплитудно-цифровые преобразователи (АЦП). Временные сигналы каждого детектора проходят через усилители формирования (УФ), а затем через дискриминаторы постоянных отношений (Д), которые позволяют получить сигналы точной временной привязки. С дискриминаторов сигналы привязки попадают во время-амплитудный преобразователь (ВАП), при этом один из сигналов задерживается линией задержки (ЛЗ). Таким образом получают задержанные совпадения. С ВАП сигнал через спектрометрический усилитель подается на 2-й АЦП, где набирается временной спектр.

Три АЦП связаны с блоком согласования, который выдает команду записи сигналов в модуль AIM-556. Этот модуль позволяет снимать сигналы с АЦП в гистограмном и потоковом режимах. Через локальную сеть Ethernet информация с AIM-556 поступает в компьютер.

В гистограмном режиме с трех АЦП записываются интегральные спектры с двух детекторов и временной спектр задержанных совпадений.

В потоковом режиме информация со всех АЦП последовательно записывается в память AIM-556, если на управляющий вход (упр) блока согласования поступает сигнал о совпадениях. Этот сигнал образуется в схеме совпадений (СС), связанной с обоими дискриминаторами, и формируется генератором ворот (ГВ). Таким образом, лишняя информация в потоковом режиме отсекается. Полуширина пика совпадений 15 - 20 нс.

Информация с AIM-556 записывается на жесткий диск компьютера в виде последовательности четырех двухбайтовых слов. В каждом из них 13 бит используются для кодирования номера канала, что позволяет адресовать 8192 канала, а два бита – для кодирования номера АЦП, что позволяет не путать АЦП при сбоях записи. Запись на диск осуществляется порциями, размер которых задается в программе NetSpectrum. Это позволяет сохранить информацию в случае сбоя системы, что важно при долговременных измерениях. Записанную информацию можно многократно использовать для сортировки спектров совпадений с выделением различных энергетических окон на одном из детекторов.

На рис. 2 - 4 представлены одиночный спектр γ -переходов и спектры совпадений для некоторых окон. Виден очень сложный характер в низкоэнергетической области. В то же время с помощью совпадений надежно выделено заселение низколежащих возбужденных состояний, представленных на рис. 5. Отметим, что только γ -переходы с энергией 972 и 1293 кэВ не содержат значительной примеси фоновых γ -квантов от других реакций. На рис. 5 представлена схема уровней, заселяемых в (p, γ)-реакции протонами с энергией 4 МэВ. Использовались спины и четности уровней ^{116}Sn из [7]. За исключением уровней с энергией 2773 кэВ (6) и 2908 кэВ (7), заселенность всех состояний была определена из $\gamma\gamma$ -совпадений. Надежность идентификации уровня с энергией 2908 кэВ (7) не вызывает сомнений, так как нами идентифицированы оба перехода, разряжающие это состояние, и их относительная интенсивность хорошо совпадает с данными, полученными из других реакций. Измерить совпадения с γ -квантами, разряжающими это состояние невозможно, так как время жизни 5-состояния, на которое распадается этот уровень, равно 340 нс, а как указывалось выше, разрешающее время нашей установки 15 - 20 нс.

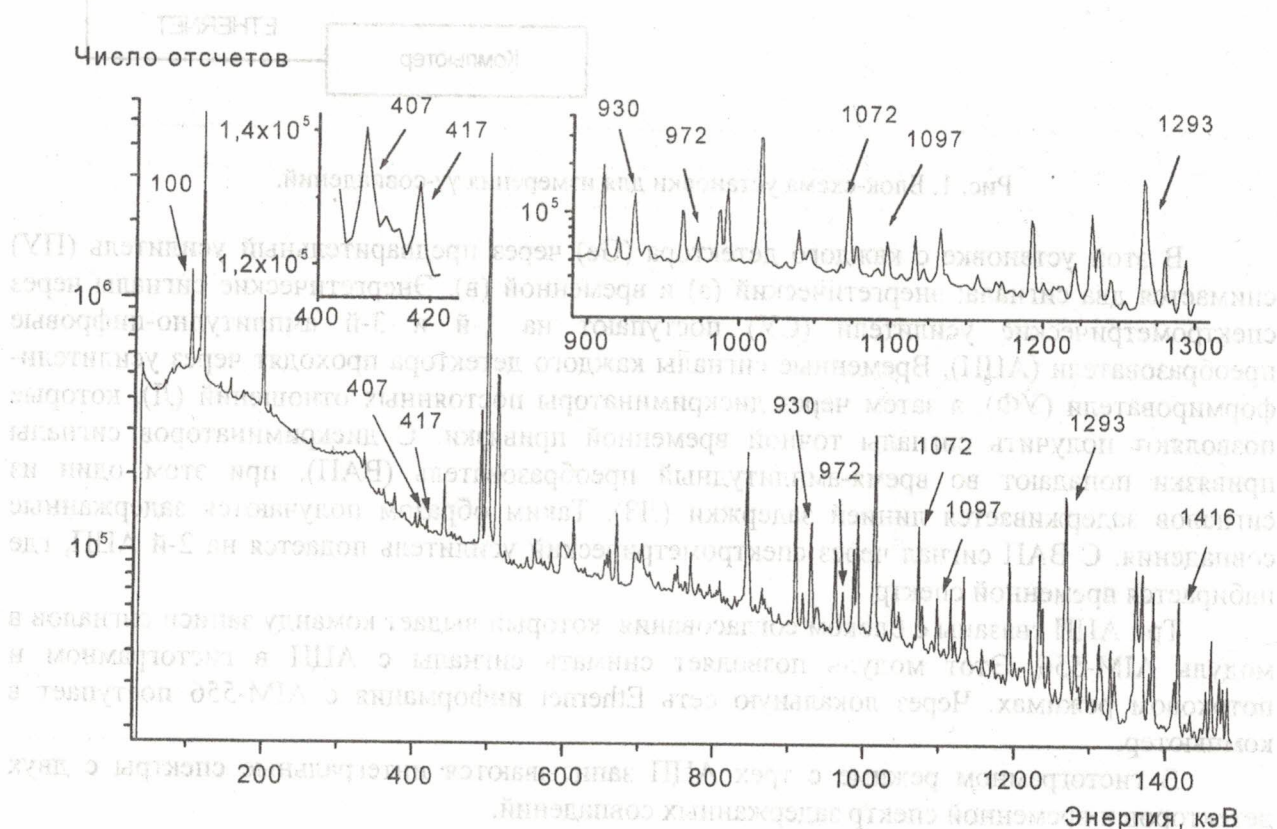


Рис. 2. Одиночный спектр γ -излучения.

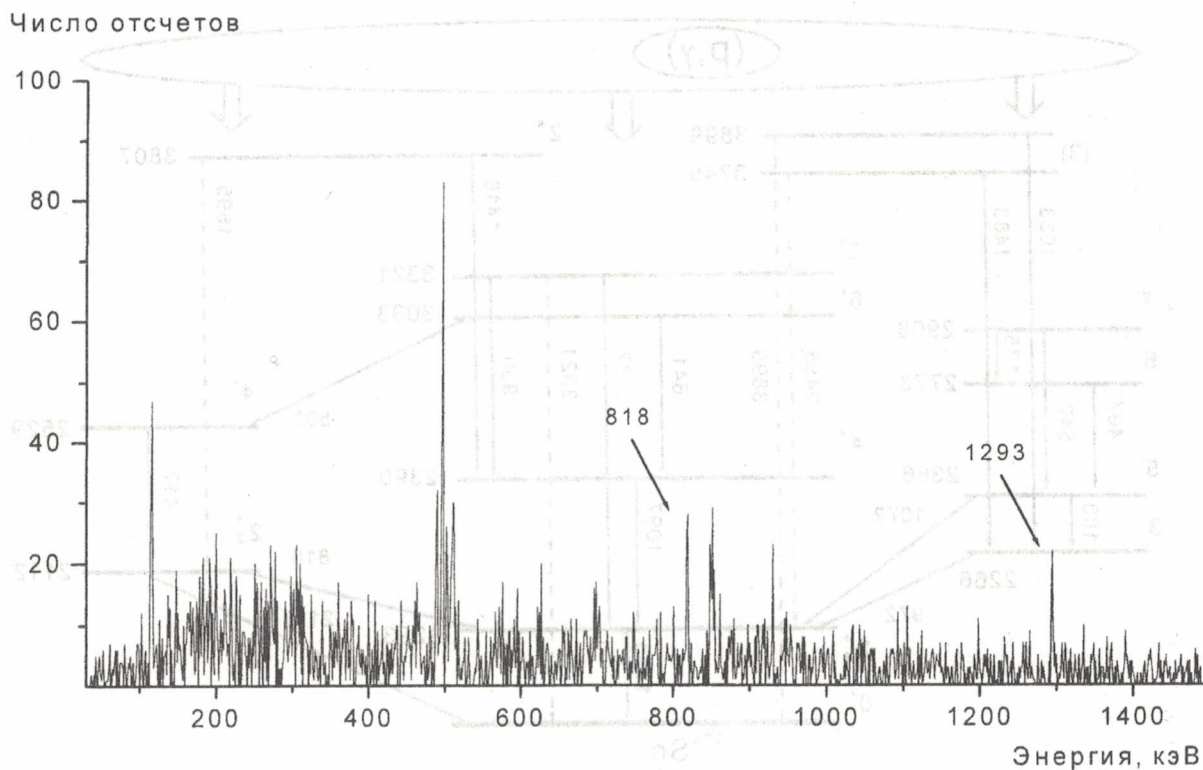


Рис. 3. Спектр совпадений с γ 1293 кэВ.

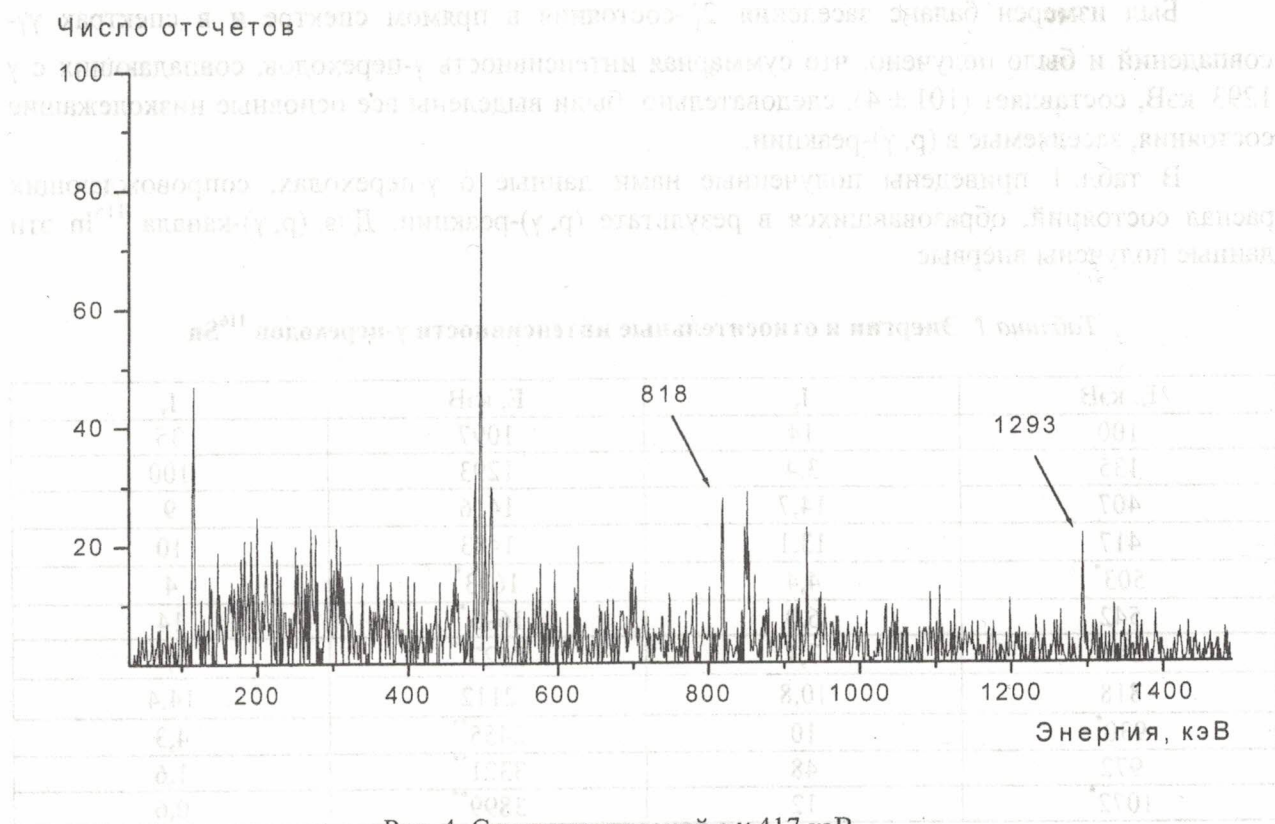


Рис. 4. Спектр совпадений с γ 417 кэВ.

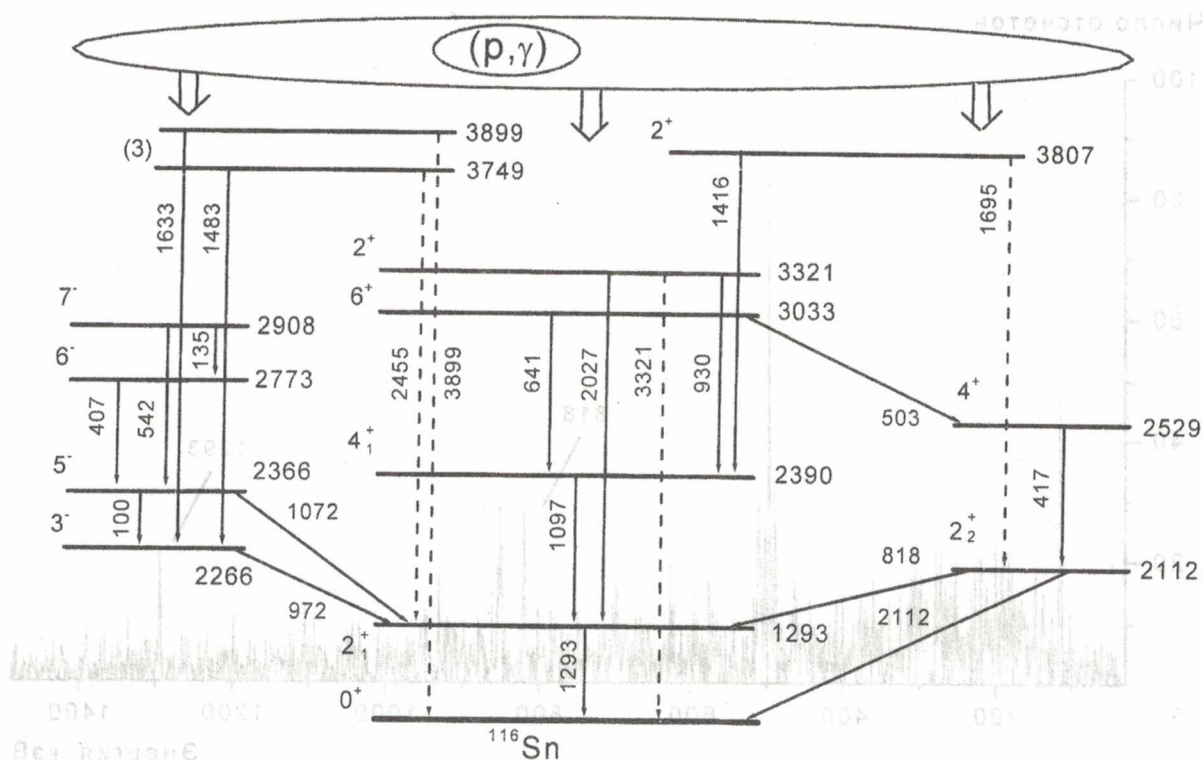


Рис. 5. Возбужденные состояния ^{116}Sn , заселяемые в (p, γ) -реакциях, и их относительная заселенность. Пунктирными линиями указаны переходы, обнаруженные только в прямом спектре.

Был измерен баланс заселения 2_1^+ -состояния в прямом спектре и в спектрах $\gamma\gamma$ -совпадений и было получено, что суммарная интенсивность γ -переходов, совпадающих с γ 1293 кэВ, составляет (101 ± 4) , следовательно, были выделены все основные низколежащие состояния, заселяемые в (p, γ) -реакции.

В табл. 1 приведены полученные нами данные о γ -переходах, сопровождающих распад состояний, образовавшихся в результате (p, γ) -реакции. Для (p, γ) -канала ^{115}In эти данные получены впервые.

Таблица 1. Энергии и относительные интенсивности γ -переходов ^{116}Sn

Е, кэВ	I_γ	Е, кэВ	I_γ
100	14	1097	35
135	3,4	1293	100
407	14,7	1416	9
417	13,1	1483	10
503*	4,4	1633*	4
542	6,0	1695**	14
641	7,4	2027**	3,7
818	10,8	2112	14,4
930*	10	2455**	4,3
972	48	3321**	1,6
1072*	12	3899**	0,6

* Данные получены только из спектра $\gamma\gamma$ -совпадений.

** Данные получены только из одиночного γ -спектра.

Отметим, что погрешности в измерениях относительных интенсивностей γ-переходов, которые идентифицированы в прямом спектре и спектрах γγ-совпадений, не превышали 5 - 7 %. Данные об относительных интенсивностях, полученные только из γγ-совпадений, как правило, имеют погрешность 10 - 15 %.

Сечение (p, γ)-реакции определили по формуле

$$\sigma(p, \gamma) = \frac{I_{\gamma}(1293)}{I_{\gamma}(497)} \sigma(p, n\gamma),$$

используя значение $\sigma(p, n\gamma)$, равное 2,39 мб для $E_p = 4$ МэВ, из [8].

Произведенный анализ относительных интенсивностей γ-лучей показал, что (p, nγ)-канал на 98 % распадается через состояние с энергией 497 кэВ, а (p, γ)-канал – на 95 % через уровень с энергией 1293 кэВ. Для расчета пробега протонов в мишени при определении сечения (p, nγ)-реакции использовались таблицы [9]. С учетом вышеизложенного было получено, что $\sigma(p, \gamma) = (0,9 \pm 0,1)$ мкб при $E_p = 4$ МэВ и $\sigma(p, \gamma) = (0,5 \pm 0,1)$ мкб при $E_p = 3,5$ МэВ. Погрешность в данных измерениях в основном обусловлена тем, что измерения проводились с "толстыми" мишенями. При этом (p, nγ)-реакция эффективно происходит с 4 до 3,5 МэВ, а (p, γ) – от 4 МэВ до 0.

Обсуждение результатов

Реакция с протонами при низкой энергии происходит через статистический и прямой каналы. В зависимости от энергии протонов роль этих каналов может существенно перераспределяться.

С помощью программы ALICE [10] авторами были выполнены расчеты сечения (p, γ)-реакции на ^{115}In . В этой программе используется обычная статистическая модель с учетом предравновесия. Программа позволяет рассчитывать сечения до энергий 4 МэВ, и для такой энергии было получено, что $\sigma(p, \gamma) = 0,8$ мкб. Как видно, это значение находится в хорошем согласии с нашими экспериментальными значениями.

Однако при статистическом распаде разрядка происходит со средней энергией γ-квантов

$$E_{\gamma} = 4 \sqrt{E^* / a - \sigma / a^2},$$

где E^* – энергия возбуждения остаточного ядра; a – параметр плотности одночастичных уровней; σ – параметр ограничения по спину.

С учетом экспериментальных данных о величинах a и σ для ядер с $A \sim 120$ ([11]) средняя энергия γ-переходов примерно равна 3 МэВ, т. е. три - четыре γ-перехода разряжают статистические состояния, при этом значительная часть таких переходов идет через низкоспиновые состояния, в том числе 2^+ -уровни. Таким образом, если (p, γ)-реакция идет через статистический канал, должно наблюдаться прямое заселение нижайших 2^+ -состояний.

Из экспериментальных данных об исследовании изомерных отношений в ядрах с $A \sim 110-120$ [11] при энергиях возбуждения составного ядра 10 - 20 МэВ, т. е. в области исследуемых энергий, получено, что заселенность нижайшего низкоспинового состояния составляет 20 – 30 %, что совпадает с расчетами по каскадно-испарительной модели.

Авторами же с точностью 3 % не обнаружено прямого заселения 2_1^+ -состояния, т. е. это может указывать на значительный вклад нестатистических процессов. Поэтому были проведены расчеты относительной заселенности низлежащих состояний и полного сечения (p, γ)-реакции на ^{115}In через ГДР. Для ^{115}In это E1-переходы, которые разряжают состояния $[g9/2 + s1/2] 4^+, 5^+$; $[g9/2 + p3/2] 3^- \div 6^-$; $[g9/2 + d5/2] 2^+ \div 7^+$. Расчеты были

выполнены с помощью программы *Stapre* [12]. Заселения определялись с использованием методов, развитых при расчетах изомерных отношений в каскадно-испарительной модели [13]. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Относительные заселенности возбужденных состояний ^{116}Sn в (p, γ) -реакции через ГДР

Энергия состояния, кэВ	$I_{\text{расч}}^{\text{отн}}$	$I_{\text{эксп}}^{\text{отн}}$	Энергия состояния, кэВ	$I_{\text{расч}}^{\text{отн}}$	$I_{\text{эксп}}^{\text{отн}}$
1293	2,5	<2	2908	13	9,4
2112	1,2	0	3033	14	12
2266	9,5	20	3321*	~8	15
2366	25	5,4	3749*	~8	14
2390	13	11	3807*	~6	23
2529	11	8,7	3899*	~5	5
2773	17	11			

* Расчеты выполнены при $I^{\pi} = 4^{+}$.

Расчетное сечение активации ^{116}Sn $\sigma(p, \gamma) = 0,3$ мкб существенно отличается от $\sigma^{\text{эксп}} = 0,9$ мкб. В то же время, согласие расчетных и экспериментальных данных об относительной заселенности низколежащих состояний через ГДР в ^{116}Sn хорошее.

В этой работе погрешность в данных об относительной заселенности возбужденных состояний, как правило, составляет 10 - 15 %. Поэтому эти экспериментальные и расчетные данные можно с большой уверенностью использовать для анализа.

Систематические ошибки при определении сечения (p, γ) -реакции могут быть значительными из-за неоднозначностей при оценке толщины мишени и расчетных данных о пробегах протонов при низкой энергии. Вполне можно допустить, что расхождение расчетного сечения активации через ГДР с экспериментальными данными может быть обусловлено именно этим.

С учетом вышеизложенного, авторами сделан вывод о доминирующей роли ГДР в (p, γ) -реакции на ^{115}In при энергии протонов 4 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Irigaray J. L., Asghar M., Dalmaz J. et al. The $^{89}\text{Y}(p, \gamma)^{90}\text{Zr}$, $^{88}\text{Sr}(p, \gamma)^{89}\text{Y}$ and $^{86}\text{Sr}(p, \gamma)^{87}\text{Y}$ Reactions with 4 MeV Protons // Nuclear Physics. - 1969. - Vol. A136. - P. 631.
2. Geramb H. V., Sprickmann R., Strobel G. L. Excitation of Giant Multipole Resonances $L = 1-4$ in the $^{16}(\text{p}, \text{p}') \text{ Spin-Flip Transition}$ // Nuclear Physics. - 1973. - Vol. A199. - P. 545 - 559.
3. Sheflinska G., Sheflinski Z., Wilhelmi Z. Gamma-Ray Strength Functions for $A = 70-90$ Nuclei // Nuclear Physics. - 1979. - Vol. A323. - P. 253 - 270.
4. Rauch F., Seirn B. Compound Contribution To the Radiative Width of the Ground-State Analog in ^{90}Zr // Physical Letters. - 1974. - Vol. 48B. - P. 33.
5. Sheflinski Z., Sheflinska G., Klapdor H. V. et al. Giant Dipole Resonances Built on Excited States in ^{90}Zr through Radiative Proton Capture // Nuclear Physics. - 1987. - Vol. A467. - P. 397 - 407.
6. Govaert K., Bauwens F., Bryssinck J. et al. Dipole Excitations to Bound States in ^{116}Sn and ^{124}Sn // Physical Review. - 1998. - Vol. C57, No. 5. - P. 2229 - 2249.
7. Table of Isotopes / Ed. R. B. Firestone. - New York, 1996.
8. Hershberger R. L., Flynn D. S., Gabbard F. et al. Systematics of Proton Absorption Deduced From (p, p) and (p, n) Cross Sections for 2.0- to 6.7-MeV Protons on $^{107,109}\text{Ag}$ and ^{115}In // Physical Review. - 1980. - Vol. C21, No. 3. - P. 896 - 901.

9. Пучеров Н. Н., Романовский С. В., Чеснокова Т. Д. Таблицы массовой тормозной способности. - Киев: Наук. думка, 1975.
10. Blatt M. New Precompound Decay Model // Physical Review. - 1996. - Vol. C54, No. 3. - P. 1341 - 1349.
11. Вишневский И. Н., Желтоножский В. А., Лацко Т. Н. // Ядер. физика. - 1985. - Т. 41. - С. 1435 - 1439.
12. Uhl M., Strohmaier B. / Institut für Radiumforschung und Kernphysik, Report IRK 76/10, Vienna, 1976; Avrigeanu M., Avrigeanu V. / Institute of Physics and Nuclear Engineering, Report NP-88-1995, Bucharest, 1995.
13. Богила Е. А., Коломиец В. Н. Изомерные отношения в модификации каскадно-испарительной модели // УФЖ. - 1989. - Т. 34. - С. 7 - 14.

ДОСЛІДЖЕННЯ (p, γ)-РЕАКЦІЙ НА ЯДРІ ^{115}In

І. М. Вишневський, О. І. Давидовська, В. О. Желтоножський,
М. В. Стрільчук, П. М. Трифонов

Уперше виміряно спектри γ-випромінювання, що супроводжують (p, γ)-реакцію на ^{115}In . Вимірювання проводились при енергіях протонів 3,5 та 4,0 МеВ. Виміряно перерізи $\sigma(p, \gamma) = 0,5 \pm 0,1$ і $0,9 \pm 0,1$ мкб відповідно й відносну заселеність найнижчих дискретних станів ^{116}Sn . Виконано розрахунки за статистичною моделлю та з врахуванням гігантського дипольного резонансу. Показано домінуючу роль нестатистичних процесів.

RESEARCH OF (p, γ)-REACTION ON ^{115}In NUCLEUS

I. N. Vishnevsky, O. I. Davydovskaya, V. A. Zheltonozhsky,
N. V. Strilchuk, P. N. Trifonov

Study of γ-ray spectra accomplishing (p, γ)-reaction on ^{115}In nucleus has been performed for the first time. Measuring was carried out at 3,5 and 4 MeV proton energies. Cross section $\sigma(p, \gamma) = 0,5 \pm 0,1$ and $0,9 \pm 0,1$ mkb correspondingly have been measured. Lowest discrete ^{116}Sn states relative population has been measured also. Calculation was carried out using the statistical model with account of giant dipole resonance. Nonstatistical processes dominating role has been showed.

Поступила в редакцію 20.06.03,
после доработки – 04.07.03.