

УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ФОТОНОВ НА ЯДРАХ ^{12}C И ^{16}O

Б. С. ИШХАНОВ, В. И. МОКЕЕВ, Е. С. ОМАРОВ,
И. М. ПИСКАРЕВ, В. М. СОРВИН

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

(Поступила в редакцию 26 ноября 1979 г.)

Измерены сечения упругого рассеяния фотонов на ядрах ^{12}C и ^{16}O в области гигантского резонанса. Энергетическое разрешение, достигнутое в эксперименте, соизмеримо с энергетическим разрешением в сечении полного фотопоглощения. Показано, что изучение сечений полного поглощения и упругого рассеяния фотонов позволяет получать спектроскопическую информацию о высоковозбужденных состояниях атомных ядер.

На пучке тормозного γ -излучения бетатрона НИИЯФ МГУ при максимальной энергии $E_{\max}=32$ МэВ выполнены измерения энергетических спектров рассеянных фотонов на ядрах ^{12}C и ^{16}O в диапазоне энергий E_γ от 8 до 32 МэВ. Рассеянные фотонны регистрировались сцинтилляционным детектором с кристаллом $\text{NaI}(\text{Tl})$ диаметром 15 см и высотой 15 см, установленным под углом 90° относительно направления первичного пучка. Кристалл $\text{NaI}(\text{Tl})$ просматривался ФЭУ-49Б. Защита детектора состояла из слоя свинца толщиной 15 см, кадмия толщиной 2 мм и парафина толщиной 60 см. Между мишенью и кристаллом помещался свинцовый коллиматор толщиной 20 см с отверстием $\varnothing 4$ см. Для подавления фона фотонов низкой энергии перед коллиматором на пути рассеянного пучка устанавливался фильтр из алюминия толщиной 37 см. Импульсы с ФЭУ поступали на вход 512-канального амплитудного анализатора. Вход анализатора открывался импульсом, поступающим с пучкового ФЭУ. Длительность импульса равнялась длительности вспышки пучка тормозного γ -излучения.

Аппаратурная функция детектора $F(E_i, K_j)$ (где K_j — истинная энергия рассеянного γ -кванта, E_i — зарегистрированная энергия γ -кванта) получена экспериментально при энергии 15,1 МэВ путем измерения спектров рассеянных фотонов при $E_{\max}=15,5$ и 15,0 МэВ на ядре ^{12}C (выше и ниже энергии 15,1 МэВ ($J^*=1^+$)-уровня). Эта аппаратурная функция хорошо описывается аналитическим выражением, приведенным в работе [1], с учетом особенностей данного кристалла. Зависимость параметров аппаратурной функции от энергии регистрируемых фотонов взята в виде, предложенном в работе [1]. Зависимость проверялась экспериментально путем измерений со светодиодом.

Энергетическое разрешение спектрометра составляло 10% при $E_\gamma=15,1$ МэВ. Однако энергетическое разрешение эксперимента определялось не аппаратурной функцией детектора, а точностью, с которой эта функция известна, так как при последующей обработке результатов нами вводилась поправка на энергетическое разрешение детектора.

Мониторирование и измерение дозы первичного пучка осуществлялось по выходу 15,1-МэВ линии в реакции $^{12}\text{C}(\gamma, \gamma')$. Интегральное сечение возбуждения 15,1-МэВ уровня принято равным $1,86 \pm 0,12$ МэВ·мбн [2].

Экспериментально измеренный спектр $Y(E_i)$ связан с истинным спектром $N(K_j)$ соотношением

$$Y(E_i) = \sum_j F(E_i, K_j) N(K_j), \quad (1)$$

$i, j=1, 2, \dots, n$, где число n равняется числу каналов анализатора, приходящихся на исследуемый спектр.

Для нахождения истинного спектра $N(K_j)$ решалась система уравнений (1), в которой экспериментально измеренный спектр предварительно сглаживался. Спектр γ -квантов $N(K_j)$, нормированный на число фотонов в соответствующих энергетических интервалах тормозного γ -спектра [3], давал искомое сечение упругого рассеяния при условии, что все γ -переходы из области гигантского резонанса идут на основное состояние ядра-мишени.

Рассмотрим, как можно оценить выполнение этого условия для исследуемых ядер. При неупругом рассеянии фотонов наибольшую вероятность имеет ядерный раман-эффект [4], приводящий к заселению низколежащих (в первую очередь имеющих $J^\pi=2^+$) уровней ядра. Заселение более высоколежащих состояний с большой вероятностью приводило бы к их каскадной разрядке и в конечном счете к заселению тех же низколежащих уровней. Следовательно, вклад неупругого рассеяния в области гигантского резонанса можно оценить, наблюдая заселение низколежащих уровней ядра-мишени в спектре γ -квантов низкой энергии.

Для ядра ^{12}C такой спектр измерялся в работах [5, 6]. Интегральное сечение заселения 4,43-МэВ ($J^\pi=2^+$) уровня представляет собой оценку интегрального сечения неупругого рассеяния. В обеих работах уровень 4,43 МэВ не наблюдался, наблюдался близкий по энергии уровень 4,46 МэВ ядра ^{11}B , заселяющийся в реакции $^{12}\text{C}(\gamma, p\gamma)$. В работе [6] дана верхняя оценка интегрального сечения 4,43-МэВ уровня

$$\sigma_{\text{инт}} < 0,05 \text{ МэВ} \cdot \text{мбн.}$$

Интегральное сечение рассеяния, полученное нами для ядра ^{12}C , составляет $0,35 \pm 0,03 \text{ МэВ} \cdot \text{мбн}$. Следовательно, можно считать, что $\sim 90\%$ γ -переходов из области гигантского резонанса ядра ^{12}C идет на основное состояние.

Для ядра ^{16}O спектр γ -квантов из $(\gamma, N\gamma)$ -реакции при $E_{\text{макс}} \sim 30 \text{ МэВ}$ исследовался в работах [6, 7]. Заселения низколежащих состояний также не наблюдалось ($\sigma_{\text{инт}} < 0,05 \text{ МэВ} \cdot \text{мбн}$), в то время как для рассеяния γ -квантов $\sigma_{\text{инт}} = 0,62 \pm 0,07 \text{ МэВ} \cdot \text{мбн}$. Следовательно, и в ядре ^{16}O не менее 90% γ -переходов из области гигантского резонанса идет на основное состояние.

Приведенные данные свидетельствуют о незначительной роли каскадных γ -переходов из области гигантского резонанса для ядер ^{12}C и ^{16}O и о возможности получения сечения упругого рассеяния непосредственно из энергетических спектров рассеянных фотонов.

Результаты эксперимента

Характеристики максимумов, обнаруженных нами в энергетических спектрах γ -квантов, представлены в табл. 1. Интегральные сечения уровней, заселяющихся в $(\gamma, p\gamma)$ - и $(\gamma, \alpha\gamma)$ -реакциях, хорошо согласуются с данными работы [8]. Впервые наблюдались также уровни 12,4 МэВ ($J^\pi=1^-$) ядра ^{16}O и 12,7 МэВ ($J^\pi=1^+$) ядра ^{12}C , заселяющиеся в (γ, γ') -реакции.

Дифференциальное сечение упругого рассеяния γ -квантов в области гигантского резонанса представлено на рис. 1а для ядра ^{12}C и на рис. 2а для ^{16}O . В приведенных сечениях учтен вклад томсоновского рассеяния

на ядре, определяемый соотношением

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^4 e^4}{M^2 c^4} \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta), \quad (2)$$

где θ — угол, под которым регистрируются рассеянные фотонны, M — масса ядра, Z — заряд ядра.

Для сравнения на рис. 1 и 2 нанесены сечения полного поглощения [10] и упругого рассеяния [9]. Сечения упругого рассеяния на ядрах ^{12}C

Таблица 1

Ядро-мишень	Энергия уровня, МэВ	J^π	Реакция	Интегральное сечение, МэВ-мбн.	
				настоящая работа	работа [9]
^{16}O	9,2	$3/2^+$	(γ, p)	$6,4 \pm 0,6$	5,73
	12,4	1^-	(γ, γ')	$0,02 \pm 0,005$	—
	15,1	1^+	(γ, α)	$0,32 \pm 0,03$	0,31
	Гигантский резонанс	1^-	(γ, γ')	$0,62 \pm 0,07$	—
^{12}C	12,7	1^+	(γ, γ')	$0,03 \pm 0,01$	—
	15,1	1^+	(γ, γ')	$1,86 \pm 0,12$	4,8
	Гигантский резонанс	1^-	(γ, γ')	$0,35 \pm 0,03$	—

и ^{16}O измерялись в работах [9, 11] по методике, аналогичной нашей. Результаты этих работ хорошо согласуются между собой. Из рисунков видно, что результаты настоящего эксперимента согласуются с данными, полученными ранее, причем энергетическое разрешение, достигнутое нами, сравнимо с разрешением в сечении полного фотопоглощения.

Обсуждение

В работе [12] показано, что применение дисперсионной теории в случае дипольного фотопоглощения позволяет получить следующее соотношение, справедливое в районе максимума сечения:

$$\sigma_{\text{п}}^2 / \sigma_{\text{упр}} = 6\pi\lambda^2, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — сечение полного фотопоглощения, $\sigma_{\text{упр}}$ — сечение упругого рассеяния фотонов, λ — длина волны фотона. Это соотношение также должно выполняться для каждого максимума в сечениях полного поглощения и упругого рассеяния, если этот максимум связан с дипольным поглощением фотонов [13]. В случае выполнения условия (3) можно, применяя правила отбора для дипольного поглощения и зная характеристики основного состояния ядра, определить спин и четность возбужденного состояния.

Значения $\sigma_{\text{п}}^2 / \sigma_{\text{упр}}$, вычисленные нами для наблюдаемых уровней, приведены в табл. 2 для ядер ^{12}C и ^{16}O . В таблице также приводятся характеристики уровней, наблюдавшихся в сечении полного поглощения [10], и значения спинов и четностей уровней, установленные по данным из других реакций [14, 15].

Из таблицы 2 видно, что соотношение (3) выполняется на ядре ^{12}C только для неразрешенной группы уровней с энергиями в интервале 22–24 МэВ, соответствующем максимуму гигантского дипольного резонанса. В этой области энергий согласно данным работ [14, 18, 19] расположены уровни 21,9, 22,5, 23,5, 23,9 МэВ с $J^\pi=1^-$, $T=1$. Для уровней 18,3 и 20,5 МэВ соотношение (3) не выполняется, значит они не могут иметь значение $J^\pi=1^-$, что согласуется с данными работы [14] (в районе энергий 18,3 и 20,5 МэВ не известно ни одного дипольного состояния). В ре-

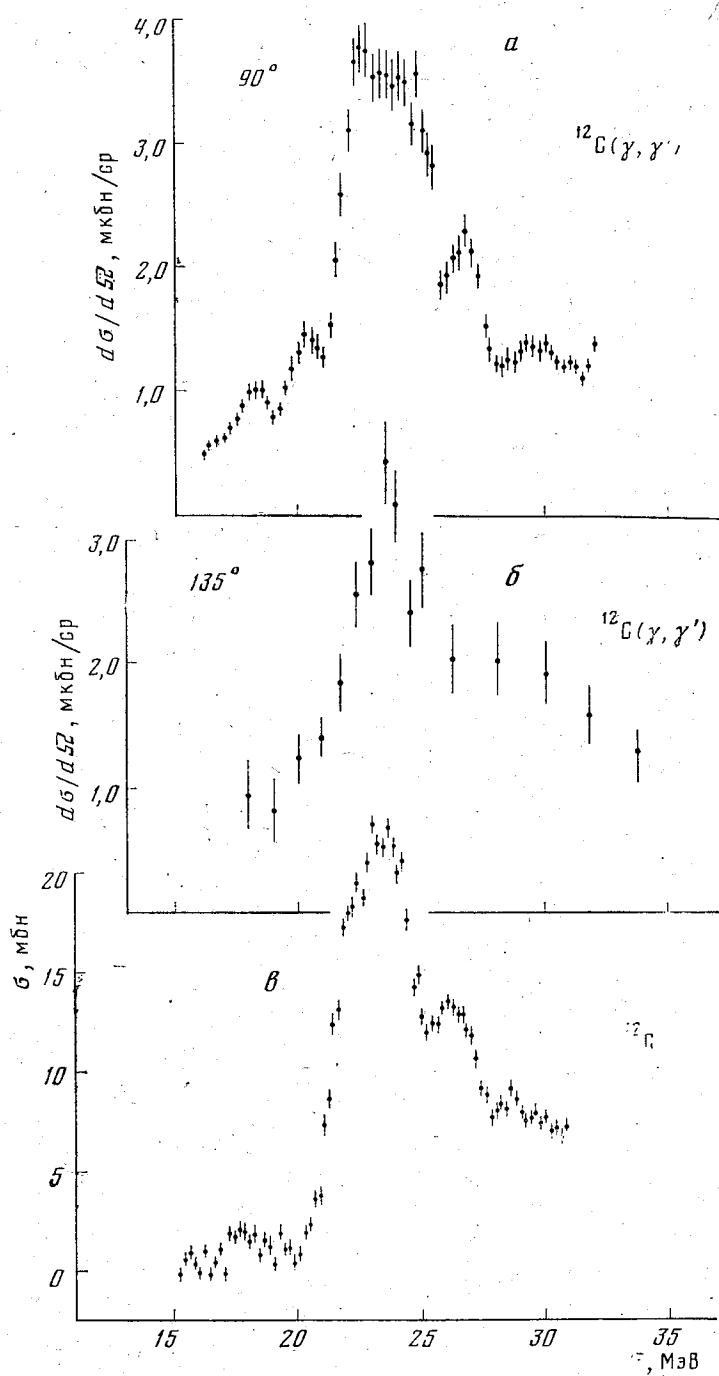


Рис. 1. Сечение упругого рассеяния фотонов на ядре ^{12}C , полученное в настоящей работе (а), в работе [9] (б); сечение полного поглощения фотонов на ядре ^{12}C [10] (с)

акциях с заряженными частицами [14] при этих энергиях идентифицированы уровни 18,3 и 20,5 МэВ соответственно с $J^\pi=3^-$ и 3^+ . Значения спинов и четностей уровней 26,5 и 29,5 МэВ неизвестны. Наши данные позволяют утверждать (см. табл. 2), что для них J^π не равно 1^- .

На ядре ^{16}O (см. табл. 2) соотношение (3) выполняется также для уровней в районе максимума гигантского дипольного резонанса 22,3 МэВ.

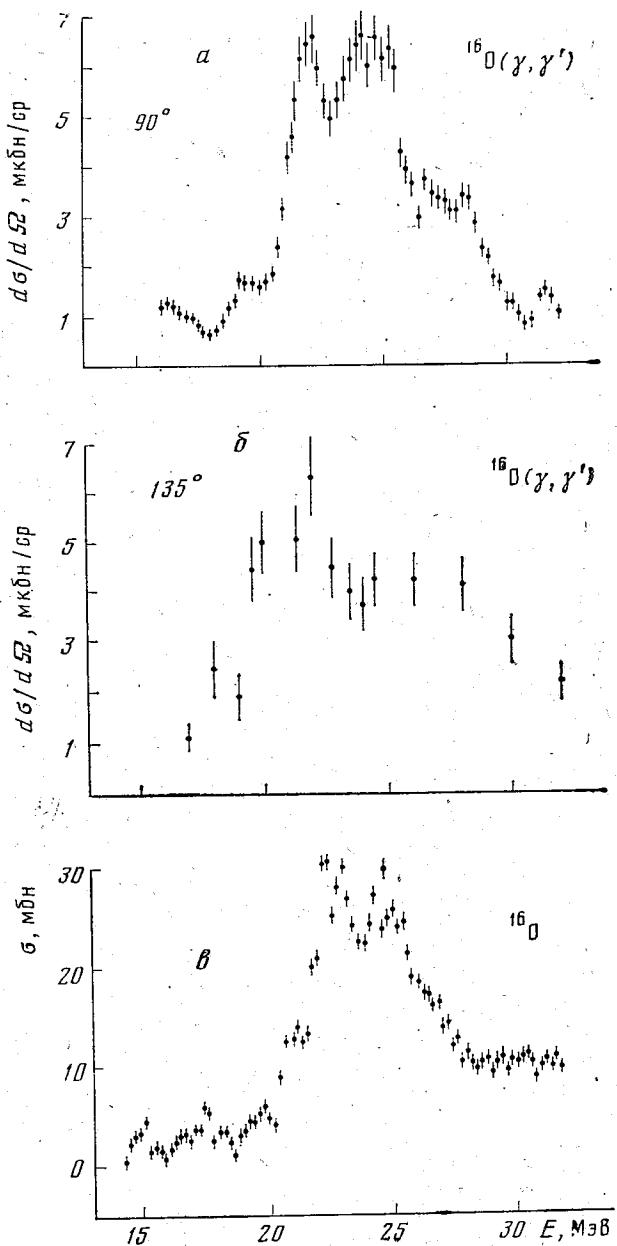


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для ^{16}O

и неразрешенной группы уровней с энергиями 24–25 МэВ (24,05, 24,4 и 24,74 МэВ [15]). Вывод о дипольном характере фотопоглощения для этих уровней согласуется с данными работ [15–17]. Уровни 17,1 и 21,0 МэВ ($J^\pi=1^-$, $T=1$) были обнаружены в сечении полного фотопоглощения [10], но в нашей работе не наблюдались. Величина сечения полного поглощения для этих уровней составляет несколько мбн (см. табл. 2). Соответствующая ему (при условии $E1$ -поглощения) величина дифференциального сечения упругого рассеяния согласно соотношению (3) не превышает 0,1 мкбн/ср и лежит в пределах статистических ошибок в сечении (γ, γ') -реакции (см. рис. 1a). Таким образом, если поглощение фотонов

Таблица 2

Энергия уровней ядра, МэВ		J^π, T	$\sigma_{\text{полн}}^2, \text{мкбн} [10]$	$\sigma_{\text{упр}}^2, \text{мкбн, настоящая работа}$	$\sigma_{\text{полн}}^2/\sigma_{\text{упр}}^2, \text{бн}$	$6\pi\lambda^2, \text{бн}$
работа [10], полное поглощение	настоящая работа					
^{12}C						
18,4	$18,3 \pm 0,2$	$3^-, 1^*$	2	4 ± 2	$1 \pm 0,6$	23,2
20,5	$20,5 \pm 0,2$	$3^+, 1^*$	2	6 ± 3	$0,7 \pm 0,4$	17,3
22–24	22–24	$1^-, 1^*$	25	50 ± 5	$12,6 \pm 4$	13,7
26,2	$26,5 \pm 0,4$	—	3,5	5 ± 2	$2,5 \pm 1$	10,3
27,5	—	—	1,5	—	—	—
29,5	$29,5 \pm 0,3$	—	—	3 ± 1	$4,3 \pm 0,5$	8,3
^{16}O						
17,1	—	$1^-, 1^{**}$	3	—	—	—
19,5	$19,5 \pm 0,2$	$1^-, 1^{**}$	3	10 ± 3	$0,9 \pm 0,4$	19,1
21	—	$1^-, 1^{**}$	6	—	—	—
22,3	$22,3 \pm 0,2$	$1^-, 1^*$	30	85 ± 10	$10,7 \pm 4$	14,4
24–25	24–25	$1^-, 1^{***}$	30	85 ± 10	$10,7 \pm 4$	12,1
27,2	$27,3 \pm 0,2$	$2^+, 1^{**}$	3	10 ± 3	$0,9 \pm 0,5$	10,3
—	$28,5 \pm 0,2$	—	—	—	—	—
—	$31,5 \pm 0,2$	—	—	—	—	—

* Данные из работы [14].

** Данные из работы [15].

*** Данные настоящей работы, а также работ [16, 17] по положению максимума гигантского дипольного резонанса.

на уровнях 17,1 и 21,0 МэВ имеет дипольный характер, то они не могут быть обнаружены в нашем эксперименте.

Для уровня 19,5 МэВ условие (3) не выполняется. Значение спина и четности этого состояния надежно установлено в (α, α') - и (p, γ) -реакциях [15] ($J^\pi=1^-, T=1$). При дипольном поглощении фотонов на уровень 19,5 МэВ он (в силу соотношения (3)) не может наблюдаться, сечение упругого рассеяния для него не должно превышать 0,05 мкбн/ср. Заселение состояния 19,5 МэВ в (γ, γ') -реакции может происходить в процессе неупругого рассеяния фотонов, например, за счет ядерного раман-эффекта на дипольном уровне 25,5 МэВ, известном из работ [15, 17].

Таким образом, в настоящей работе показано, что изучение сечений полного поглощения и упругого рассеяния фотонов позволяет получать спектроскопическую информацию о высоковозбужденных состояниях атомных ядер.

Полученные нами сведения о мультипольности поглощения фотонов для отдельных уровней позволяют оценить долю интегрального сечения полного фотопоглощения, имеющего дипольный характер. В диапазоне энергий от порога до 31 МэВ доля дипольного поглощения составляет $(60 \pm 10)\%$ для ядра ^{12}C и $(75 \pm 10)\%$ для ядра ^{16}O . Значительная асимметрия угловых распределений протонов и нейтронов из (γ, p) - и (γ, n) -реакций на ядрах ^{12}C и ^{16}O относительно угла 90° с преимущественным выходом фотонуклонов вперед, полученная в работах [20–22], также свидетельствует о существовании в области гигантского резонанса фотопоглощения более высокой мультипольности, чем $E1$, однако количественные данные получены нами впервые.

Литература

- [1] Г. М. Гуревич и др. Препринт П-0076, ИЯИ АН СССР, 1978.
- [2] D. Mehlig, K. H. Czock. Acta Phys. Acad. Hung., 41, 55, 1976.
- [3] L. J. Schiff. Phys. Rev., 83, 252, 1950.
- [4] H. Arenhövel, H. J. Weber. Nucl. Phys., A91, 145, 1967.

- [15] Н. А. Medicus et al. Nucl. Phys., A156, 257, 1970.
 [16] И. М. Пискарев. Диссертация, Физ. фак. МГУ, 1970.
 [17] H. Ullrich, H. Krauth. Nucl. Phys., A123, 641, 1969.
 [18] J.-M. Maison, These, Faculte des sciences D'Orsay de L'Univ. de Paris, Orsay, 1969.
 [19] A. S. Penfold, E. L. Garwin. Phys. Rev., 116, 120, 1959.
 [20] I. Ahrens et al. Nucl. Phys., A251, 479, 1975.
 [21] J.-M. Loiseaux et al. J. Phys., 28, 11, 1967.
 [22] E. G. Fuller, E. Hayward. Phys. Rev., 101, 692, 1956.
 [23] Дж. Левинджер. Фотоядерные реакции, пер. с английского, ИИЛ, 1962.
 [24] F. Ajzenberg-Selove. Nucl. Phys., A248, 55, 1975.
 [25] F. Ajzenberg-Selove. Nucl. Phys., A166, 14, 1971.
 [26] Б. С. Ишханов и др. ЯФ, 12, 892, 1970.
 [27] B. C. Cook et al. Phys. Rev., 143, 712, 1966.
 [28] Б. С. Ишханов и др. ЯФ, 14, 253, 1971.
 [29] B. C. Cook et al. Phys. Rev., 143, 724, 1966.
 [30] Б. Г. Шевченко. Диссертация, Физ. фак. МГУ, 1967.
 [31] I. A. Rawlins et al. Nucl. Phys., A122, 128, 1968.
 [32] J. E. E. Baglin, M. N. Thompson. Nucl. Phys., A138, 73, 1969.

ELASTIC SCATTERING OF PHOTONS ON ^{12}C AND ^{16}O

B. S. ISHKHANOV, V. I. MOKEEV, E. S. OMAROV, I. M. PISKAREV,
 V. M. SORVIN

Cross sections of the photon elastic scattering on the ^{12}C and ^{16}O nuclei are measured in the giant resonance range. The energy resolution of the experiment is of the order of the energy resolution in the total absorption cross section. It is shown that study of the total photoabsorption and elastic scattering cross sections allows to obtain the spectroscopic information on highly excited states of atomic nuclei.