

## СВЯЗЬ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С ПРОЦЕССОМ ФОТОРОЖДЕНИЯ $\pi$ -МЕЗОНОВ

А. С. Белоусов, Е. И. Малиновский

*Изучался процесс выбивания фотонами пар нейтрон-протон из ядер железа ( $Fe^{56}$ ) путем регистрации наведенной при этом гамма-активности изотопа  $Mn^{54}$ . Эксперименты проводились в пучке синхротрона при двух значениях максимальной энергии фотонов: 150 и 650 МэВ. Оказалось, что при максимальной энергии 150 МэВ выход изучаемой реакции практически равен нулю, тогда как при энергии 650 МэВ зарегистрирован значительный выход гамма-активных ядер  $Mn^{54}$ . Оценка величины поперечного сечения реакции образования пар нейтрон-протон на  $Fe^{56}$  при энергии 650 МэВ дала  $4 \cdot 10^{-27}$  см<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** спектрометр, гамма-активность, фотоядерные реакции, фоторождение, изотоп, гамма-спектр, изобара.

*Введение.* Одним из актуальных направлений в ядерной физике является изучение свойств барионных резонансов в атомных ядрах. Уже в первых экспериментах по изучению фоторождения  $\pi$ -мезонов на ядрах было показано, что вероятность образования  $\pi$ -мезонов фотонами на ядре нелинейно зависит от числа нуклонов в ядре:  $\sigma_A = \sigma_P A^\alpha$ , где  $\sigma_A$  и  $\sigma_P$  – поперечные сечения фоторождения  $\pi$ -мезонов на ядре с числом нуклонов  $A$  и на протоне, соответственно. При этом обычно значение  $\alpha = 2/3$ . Это интерпретировалось как “поверхностное” рождение, так как число нуклонов, расположенных на поверхности ядра, пропорционально  $A^{2/3}$  [1].

Предполагалось, что мезоны, образованные на внутренних нуклонах, поглощаются ядром и наружу не вылетают. Однако измерения, проведенные на пучках  $\pi$ -мезонов, показали, что вероятность поглощения пионов ядром меняется с изменением энергии мезонов и при уменьшении энергии эта вероятность становится настолько малой вели-

чиной, что она уже не может объяснять “поверхностный” характер образования мезонов в ядрах.

Для проверки этого был поставлен эксперимент, в котором изучалась  $A$ -зависимость сечения фоторождения нейтральных  $\pi$ -мезонов в такой геометрии, когда регистрировались только мезоны в интервале энергий 0–10 МэВ, для которых ядро должно быть прозрачным. При этом опять была получена зависимость, близкая к  $\sim A^{2/3}$  [2].

Одно из возможных объяснений этого эффекта было предложено в работе Р. Р. Вильсона [3]. Если фотообразование  $\pi$ -мезонов идет через возбуждение изобары  $\Delta_{33}$ , которая потом распадается на пион и нуклон, то внутри ядра изобара имеет большую вероятность передать свою энергию возбуждения соседнему нуклону, чем образовать  $\pi N$ -пару. В результате из ядра вылетит пара нуклонов. Наиболее вероятным является вылет нейтрона и протона. Образование  $\pi$ -мезона при этом не происходит. Таким образом, образование мезонов будет происходить в основном на поверхности ядра. Справедливость этого предположения можно проверить, измеряя выход пар нейтрон-протон из ядер под действием гамма-квантов в области энергий до порога фоторождения  $\pi$ -мезонов и сравнивая его с выходом в области энергий выше порога этого процесса.

Фоторасщепление ядер с испусканием одного нуклона имеет максимум поперечного сечения в десятки, а для тяжелых ядер и в сотни миллибарн, в области энергий 10–30 МэВ. Это явление получило название “Гигантский резонанс”. Относительно величины сечений испускания пары нуклонов в фотоядерных реакциях есть немного экспериментальных данных, которые не всегда согласуются друг с другом. В работе [4] автор наблюдал рост поперечного сечения реакции  $B^{11}(\gamma, 2p)Li^9$  в области энергий гамма-квантов от 100 до 300 МэВ. При энергии фотонов 300 МэВ полное сечение достигало величины 15 мкбарн, а при энергии 100 МэВ величина сечения была близка к нулю.

Относительно изменения величины сечения  $(\gamma, np)$ -реакции при изменении энергии гамма-квантов от 100 до 300 МэВ данных в литературе не удалось найти. Представляет интерес получить экспериментальные данные о сечении этой реакции при энергиях ниже порога фоторождения мезонов и при энергиях, превышающих порог образования  $\pi$ -мезонов. В том случае, если справедливо предположение Р. Р. Вильсона, выход пар нейтрон-протон при энергиях выше порога фоторождения  $\pi$ -мезонов должен расти за счет образования  $\Delta$ -изобар и последующей передачи ими энергии возбуждения парам нейтрон-протон в результате их взаимодействия с ядерным веществом.

*Постановка эксперимента.* Для проверки этого предположения исследовалась энергетическая зависимость реакции  $Fe^{56}(\gamma, np)Mn^{54}$  в диапазоне энергий от 150 до 650 МэВ.

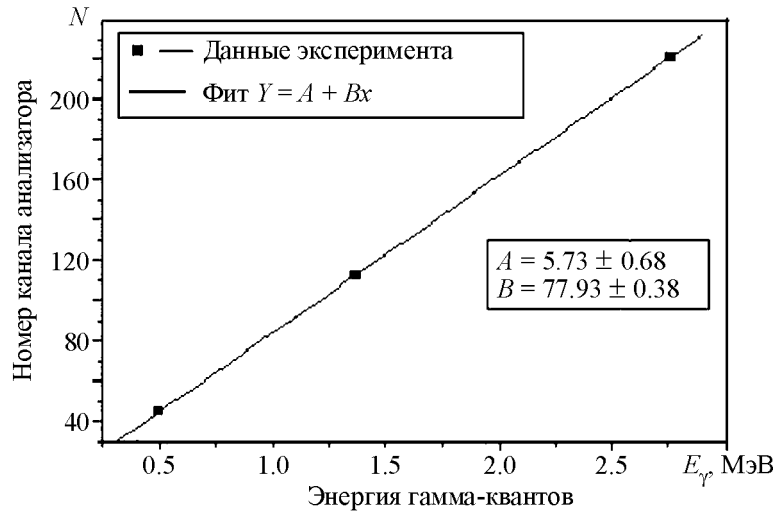


Рис. 1: Калибровочная кривая сцинтилляционного гамма-спектрометра, полученная из измерения положения максимумов в спектрах изотопов  $C^{11}$  и  $Na^{24}$ .

В Лаборатории электромагнитных взаимодействий ОФВЭ были проведены измерения наведенной радиоактивности, возникающей при облучении мишеней пучком тормозного излучения синхротрона ПАХРА [5]. Облучение стальной мишени приводило к накоплению в ней ядер  $Mn^{54}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 291$  день, распадающихся с испусканием гамма-квантов с энергией  $E_\gamma = 0.8$  МэВ. Измерение наведенной гамма-активности проводилось при помощи сцинтилляционного гамма-спектрометра с кристаллом  $NaI(Tl)$  с размерами 100 мм диаметром и 100 мм высотой. На рис. 1 приведена калибровочная кривая гамма-спектрометра, полученная на основании регистрации нескольких линий монохроматических фотонов: положения гамма-линии с энергией 0.51 МэВ от изотопа  $C^{11}$ , распадающегося с испусканием позитронов, а также спектральных линий  $E_\gamma = 1.38$  и  $E_\gamma = 2.76$  МэВ от изотопа  $Na^{24}$ . Экспериментальные точки профитированы линейной зависимостью

$$N = (5.73 \pm 0.68) + (77.93 \pm 0.38)E_\gamma.$$

Чтобы выяснить, как меняется поперечное сечение в указанном диапазоне энергий, проводилось облучение двух идентичных стальных мишеней – одна из них облучалась при энергии 150 МэВ (в измерениях использовалась система получения фотонов низких энергий с малой расходимостью тормозного пучка [6]), другая – при 650 МэВ. При этих же энергиях облучалась углеродная мишень, в которой при облучении за счет реакции  $C^{12}(\gamma n)C^{11}$  накапливался изотоп  $C^{11}$ , распадающийся с испусканием позитронов,

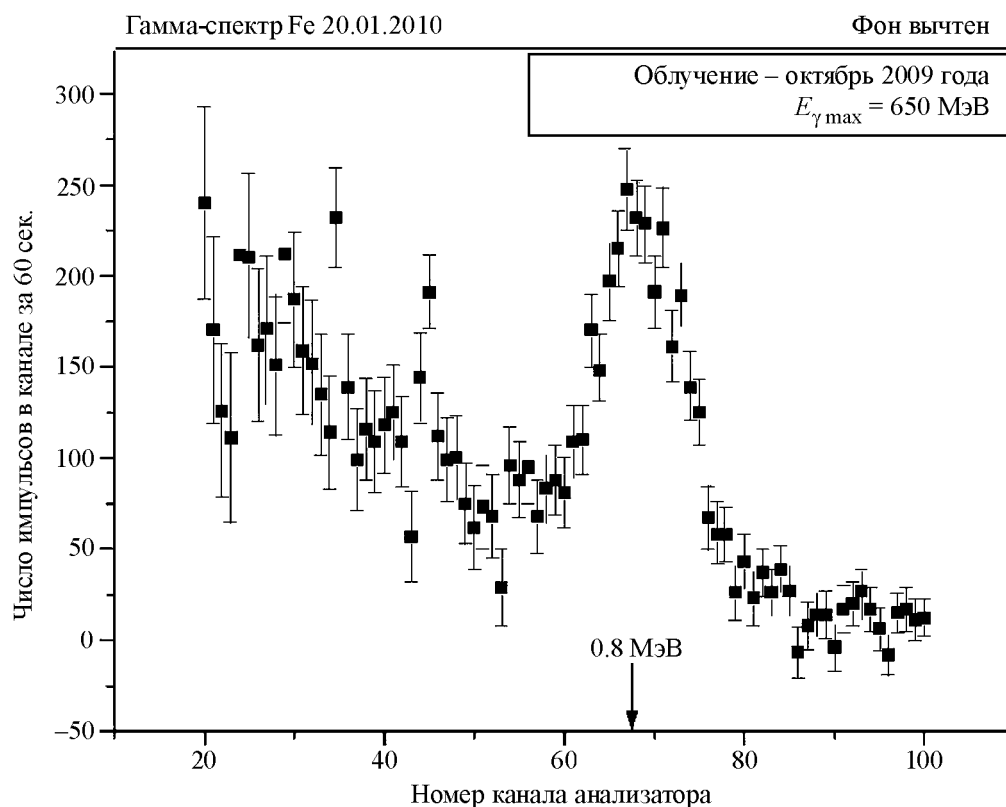


Рис. 2: Гамма-спектр железной мишени, измеренный через три месяца после облучения в октябре 2009 года в тормозном пучке с максимальной энергией 650 МэВ. Фон вычтен.

дающих в гамма-спектре линию с энергией 0.51 МэВ. Период его полураспада равен 20 мин. Поскольку известно, что основной вклад в реакцию  $\gamma n$  вносят фотоны малых энергий (10–30 МэВ), можно предполагать, что выход этой реакции при изменении максимальной энергии пучка тормозного излучения от 150 до 650 МэВ сильно не изменится. Таким образом, измерение наведенной активности углеродной мишени использовалось для контроля потока фотонов.

*Результаты.* На рис. 2 и 3 показаны экспериментально измеренные спектры гамма-квантов, испускаемых железной мишенью после облучения в пучке тормозного излучения с максимальной энергией 650 и 150 МэВ, соответственно. Измерения проведены через 3 месяца после конца облучения, когда изотопы с короткими временами жизни уже распались. Данные представлены после вычитания фоновой загрузки спектрометра. На рис. 4 и 5 приведены гамма-спектры, полученные при обсчете спектров, полученных от углеродной мишени, облучавшейся в течение 30 мин при одинаковых условиях

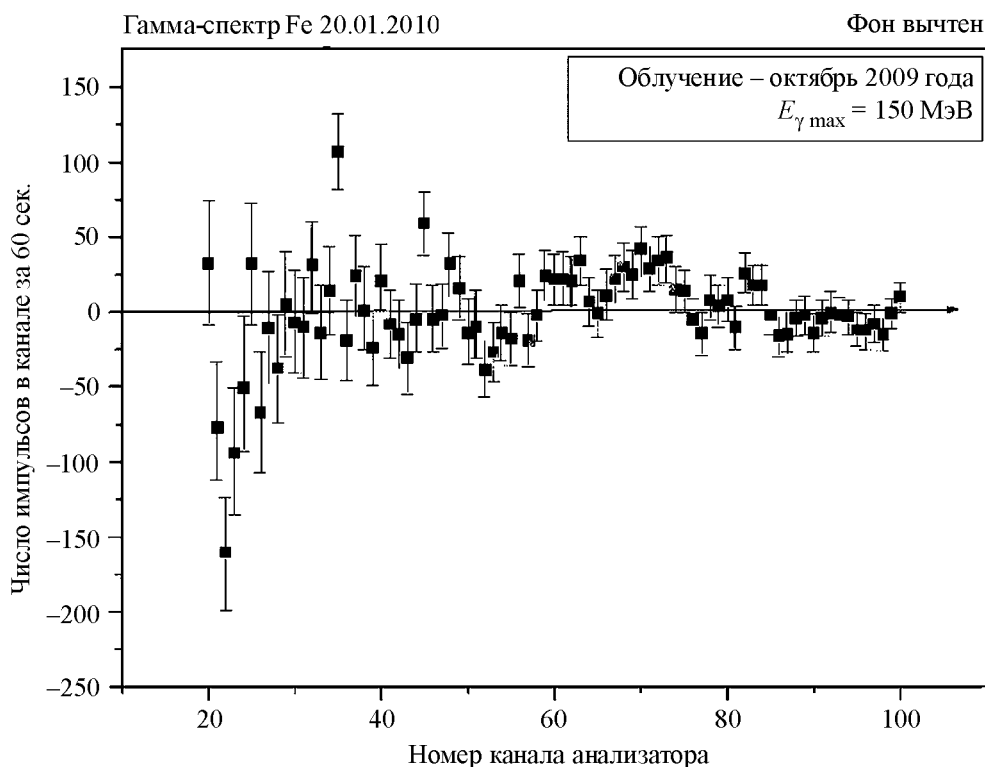


Рис. 3: Гамма-спектр железной мишени, измеренный через три месяца после облучения в тормозном пучке с максимальной энергией 150 МэВ. Конец облучения – октябрь 2009 г. Фон вычтен.

с железной мишенью в пучке тормозного излучения при максимальных энергиях 150 и 650 МэВ, соответственно. Измерение спектров проводилось непосредственно после облучения. Как можно видеть из рисунков, выход изотопа  $C^{11}$  при энергии пучка 650 и 150 МэВ различаются менее чем в два раза (это указывает на то, что число фотонов в области малых энергий в тормозном пучке практически не изменяется при переходе максимальной энергии от 150 до 650 МэВ), тогда как выход изотопа  $Mn^{54}$  в железной мишени при энергии до 150 МэВ практически близок к нулю, а при максимальной энергии 650 МэВ он составляет заметную величину. А это значит, что образование нейтрон-протонных пар происходит преимущественно за счет фотонов с энергиями выше порога фоторождения  $\pi$ -мезонов.

Оценка величины поперечного сечения реакции  $\gamma + Fe^{56} \rightarrow Mn^{54} + n + p$  дает результат:  $\sigma = 4 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ .

Эту величину можно сравнить с поперечным сечением фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на протонах [8]. В максимуме это поперечное сечение достигает величины  $2 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2$ .

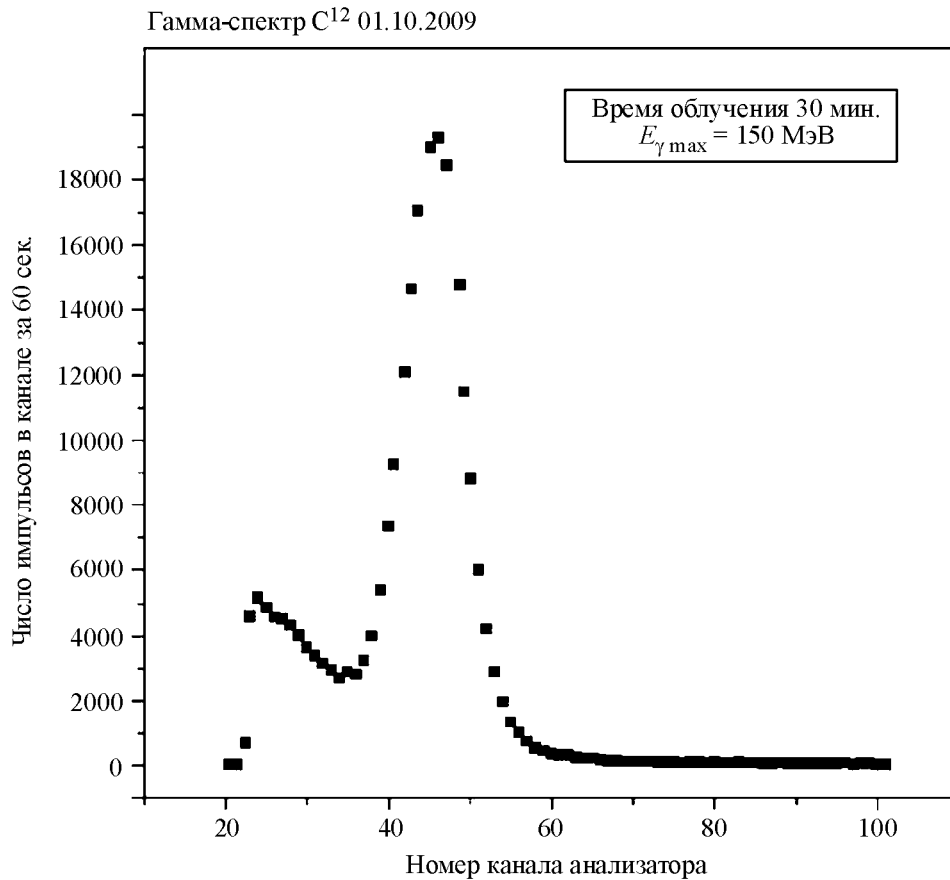


Рис. 4: Гамма-спектр углеродной мишени, измеренный 01.10.2009 через 10 минут после облучения в тормозном пучке фотонов с максимальной энергией 150 МэВ. Время облучения 30 мин.

Поскольку в образовании изобары принимают участие как протоны, так и нейтроны, то, учитывая ошибки, можно считать что приведенные значения поперечных сечений не противоречат друг другу.

*Заключение.* Выход изотопа  $Mn^{54}$  благодаря фотообразованию пар нейтрон-протон на  $Fe^{56}$  при максимальной энергии пучка 150 МэВ близок к нулю. Практически весь выход пар нейтрон-протон обусловлен фотонами более высоких энергий. В то же время число фотонов в пучке в области малых энергий при переходе от максимальной энергии 150 МэВ к 650 МэВ существенно не меняется. Следовательно, образование пар нейтрон-протон происходит преимущественно за счет фотонов с энергиями выше порога фоторождения  $\pi$ -мезонов. Полученная оценка величины поперечного сечения реакции не противоречит предположению о том, что процесс образования пар нейтрон-протон

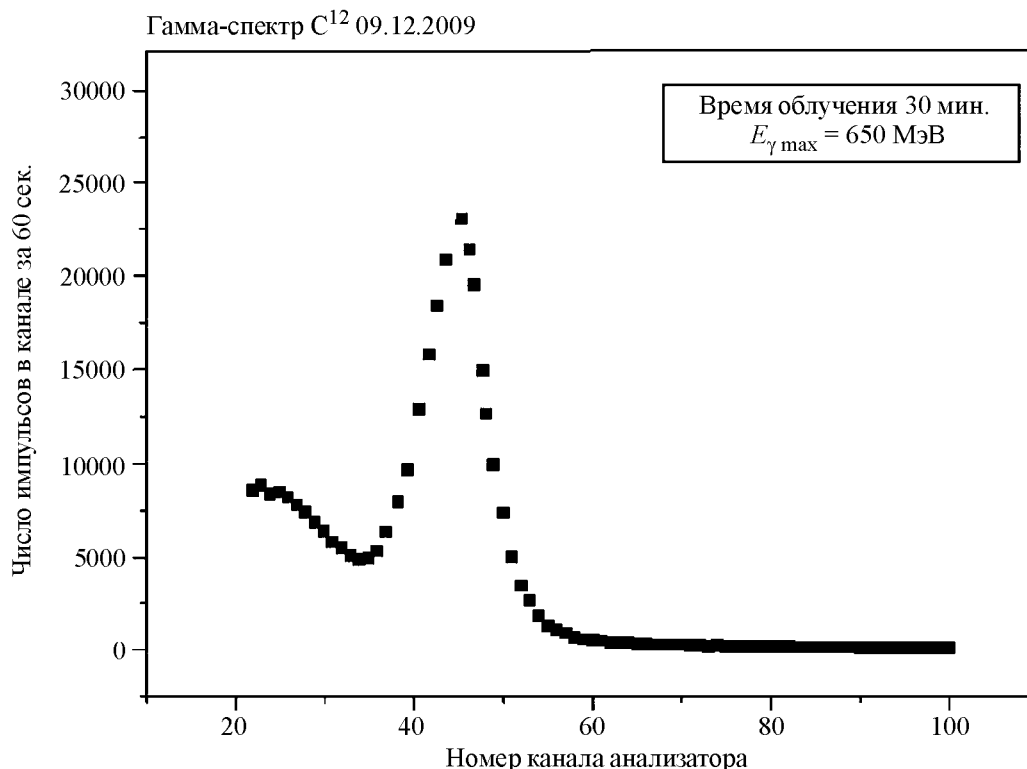


Рис. 5: Гамма-спектр углеродной мишени, измеренный через 10 минут после облучения 09.12.2009 г. в течение 30 мин в тормозном пучке с максимальной энергией 650 МэВ.

идет через фоторождение  $\Delta_{33}$  изобары. Этот результат можно объяснить предложенным Р. Вильсоном механизмом подавления фоторождения  $\pi$ -мезонов на внутренних нуклонах ядра.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Отдела физики высоких энергий ФИАН Г.Г. Субботину и С.Н. Ралко за обеспечение работы синхротрона «ПАХРА».

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] W. K. Panofsky, J. Steinberger, J. S. Steller, Phys. Rev. **86**, 180 (1952).
- [2] А. С. Белоусов, С. В. Русаков, Е. И. Тамм, ЖЭТФ **35**, 355 (1958).
- [3] R. R. Wilson, Phys. Rev. **86**, 125 (1952).
- [4] G. W. Tautfest, Phys. Rev. **110**, 709 (1958).

- [5] А. С. Белоусов, Е. И. Малиновский, Препринт ФИАН № 64 (Москва, ФИАН, 1999).
- [6] Е. Г. Бессонов, Е. И. Малиновский, Г. Г. Субботин, Препринт ФИАН № 28 (Москва, ФИАН, 2006).
- [7] А. С. Белоусов, Е. И. Малиновский, Препринт ФИАН № 12 (Москва, ФИАН, 2008).
- [8] С. Швебер, Г. Бете и Ф. Гофман, Мезоны и поля, **1** (М., ИЛ, 1957).

Поступила в редакцию 14 ноября 2011 г.