

## ДИНАМИКА ЯДЕРНЫХ КАСКАДОВ ПРИ ФОТОРОЖДЕНИИ ЛЕГКИХ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ

© 2020 г. В. Г. Недорезов<sup>1)\*</sup>, А. А. Туринге<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 26.04.2020 г.; после доработки 26.04.2020 г.; принята к публикации 26.04.2020 г.

Обсуждаются новые экспериментальные данные по мультифрагментации ядер углерода, инициированной фоторождением нейтральных  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов. Новизна связана с эксклюзивным характером изучаемых процессов, когда выделяются парциальные реакции фоторождения мезонов с последующим анализом комплементарных частиц на совпадение. Эксперимент выполнен в коллаборации GRAAL (Grenoble Accelérateur Anneau Laser) на пучке комптоновских фотонов с энергией 500–1500 МэВ. Обсуждаются возможности новых экспериментов в коллаборации BGO-OD (Бонн, Германия). Обсуждается новый метод изучения взаимодействия короткоживущих мезонов с ядрами, основанный на регистрации каскадных нуклонов отдачи.

DOI: 10.31857/S0044002720050177

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мотивация изучения внутриядерных каскадов в области нуклонных резонансов на современном этапе связана с возможностью получения новой информации о взаимодействии нестабильных короткоживущих мезонов ( $\pi^0$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ) с ядрами. Это стало возможным благодаря созданию экспериментальных установок, на которых в режиме совпадений можно изучать процессы мультифрагментации ядер под действием фотонов промежуточных энергий. Таким образом, на повестке дня стоит переход от инклюзивных экспериментов по фрагментации ядер к эксклюзивным экспериментам с идентификацией начальной стадии взаимодействия на совпадение с каскадными нуклонами и ядерными фрагментами.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые фотоядерные эксперименты по изучению мультифрагментации ядер были выполнены на установке GRAAL [1, 2] на пучке квазимонохроматических (меченых) фотонов, полученных методом обратного комптоновского рассеяния. Для регистрации продуктов реакций использовался широкоапертурный детектор LAGRAN $\gamma$ E, состоящий из двух основных частей. Центральная часть включала в себя широкоапертурный BGO калориметр, кольцевой пластиковый сцинтилляционный  $\Delta E$ -детектор и координатно-чувствительную кольцевую пропорциональную камеру. В направлении

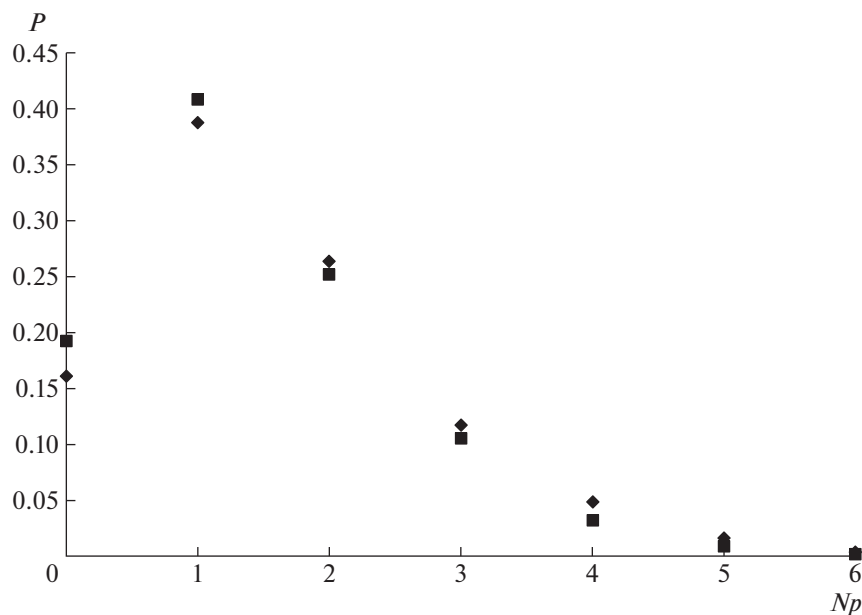
вперед располагались плоская пропорциональная камера, годоскоп из пластиковых сцинтилляционных полос и ливневый сцинтилляционный детектор площадью  $3 \times 3 \text{ м}^2$ . Это позволяло идентифицировать с высокой эффективностью протоны отдачи и ядерные фрагменты с разрешением по импульсу около 10%. В согласии с результатами моделирования, выполненного по программе GEANT-4, время пролета протонов не превышало 30 нс при пролетной базе 3 м. Фрагменты тяжелее протона регистрировались в области больших времен пролета (от 30 до 100 нс).

На рис. 1 показаны новые результаты по испусканию каскадных протонов в эксклюзивном режиме из ядра  $^{12}\text{C}$  в результате фоторождения нейтральных  $\pi^0$ -мезонов фотонами с энергией от 800 до 1500 МэВ. Экспериментальные данные сравниваются с результатами моделирования по программе RELDIS [3]. Можно отметить хорошее согласие экспериментальных и модельных результатов для событий с разной множественностью (от 1 до 6) испускания протонов. Но события когерентного фоторождения мезонов, когда нуклонов отдачи быть не должно, в эксперименте достоверно не наблюдаются. Пока на основании полученных данных можно говорить только о существовании верхней границы вероятности когерентного процесса на уровне 5% по отношению к полному сечению фоторождения  $\pi^0$ -мезонов. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

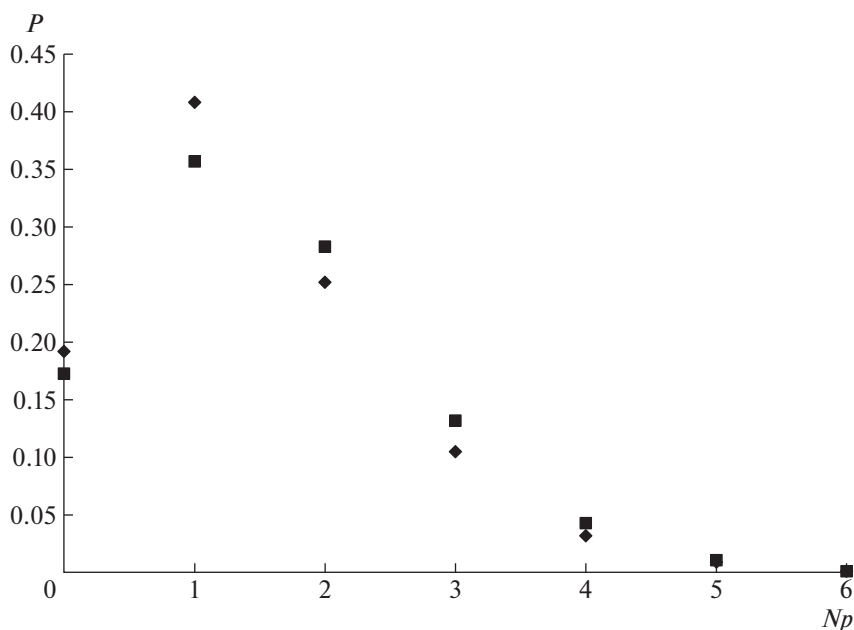
На рис. 2 показаны экспериментальные данные для реакции фоторождения нейтральных  $\eta$ -мезонов в сравнении с данными, приведенными на рис. 1. Видно, что вероятность испускания

<sup>1)</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

\*E-mail: vladimir@inr.ru



**Рис. 1.** Вероятности вылета каскадных протонов ( $P$ ) в реакции фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на ядре  $^{12}\text{C}$  в зависимости от их множественности ( $Np$ ). Квадраты и ромбы соответствуют результатам эксперимента и моделирования соответственно.



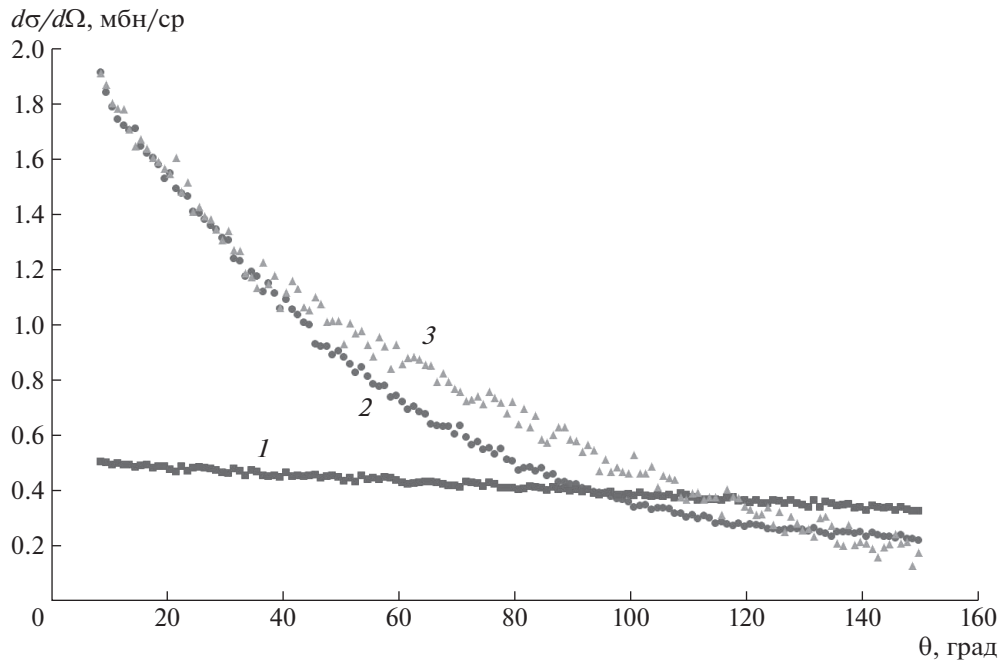
**Рис. 2.** Вероятности вылета каскадных протонов в реакции фоторождения  $\pi^0$ -мезонов (ромбы) и  $\eta$ -мезонов (квадраты) на ядре  $^{12}\text{C}$ .

протонов с разной множественностью практически одинакова для реакций с образованием  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов.

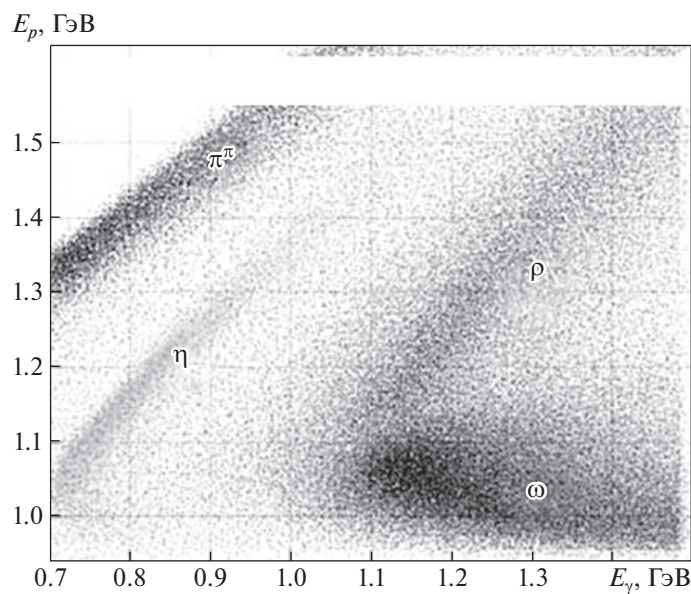
Полученные результаты следует считать предварительными. В настоящее время проводится изучение вероятности изучаемых эффектов от энергии

фотонов, оценка фоновых условий, исследование вероятности испускания более тяжелых фрагментов по сравнению с протонами.

Новые эксперименты планируются на установке BGO-OD на ускорителе ELSA в Германии [4]. Существенное улучшение параметров этой установки



**Рис. 3.** Угловые распределения каскадных протонов из ядра  $^{12}\text{C}$ . Кружки (кривая 2) и треугольники (кривая 3) соответствуют реакциям фоторождения  $\pi^0$ -мезонов и  $\eta$ -мезонов с не изотропным угловым распределением соответственно (сечение для  $\eta$ -мезона умножено на 30). Квадраты (кривая 1) соответствуют остальным каскадным нуклонам.



**Рис. 4.** Зависимость энергии каскадных протонов от энергии фотонов для разных парциальных реакций фоторождения мезонов по результатам моделирования.

по отношению к эксперименту GRAAL связано с наличием дипольного магнита OD в переднем направлении относительно мишени. Это позволит примерно в 10 раз улучшить разрешение по импульсу и повысить точность идентификации частиц. Но эксперимент еще не вышел на стадию набора статистики и находится в стадии подготовки.

### 3. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ КОРОТКОЖИВУЩИХ МЕЗОНОВ С ЯДРАМИ

Полученные данные позволяют провести классификацию изучаемых процессов фрагментации в зависимости от множественности испускаемых нуклонов (см. табл. 1). При этом следует учитывать, что фоторождение мезонов происходит на квазисвободных нуклонах ядра. Это подтвержда-

**Таблица 1.** Механизмы образования каскадных нуклонов в зависимости от их множественности

Множественность нуклонов	Механизм взаимодействия мезонов с ядрами
$n = 1$	Фоторождение мезонов на квазисвободных нуклонах. Упругое рассеяние мезонов на нуклонах ядра.
$n = 2$	Неупругое взаимодействие с внутриядерными нуклонами. Например, в реакции $\pi^0 p > \eta p$ .
$n > 2$	Мультифрагментация за счет внутриядерного каскада. Фазовый переход в ядре от жидкой капли в газообразное состояние.
$n = 0$	Когерентное взаимодействие.

ется универсальной зависимостью процессов фоторождения от атомного веса ядра мишени, когда полное сечение фотопоглощения пропорционально числу нуклонов в ядре [5].

Было экспериментально установлено, что по энергетическим и угловым распределениям каскадных протонов возможно выделить первый протон, получивший импульс от налетающего фотона. Из рис. 3 видно, что вылет одного из протонов происходит вдоль импульса налетающего фотона. Энергия этого протона выше, чем у остальных протонов, которые имеют изотропные распределения. Очевидно, это связано с тем, что налетающий фотон полностью поглощается квазисвободным нуклоном ядра и передает ему свою энергию и импульс. Благодаря этому появляется возможность идентифицировать тип реакции фоторождения с образованием конкретного мезона без его регистрации и без использования кинематического анализа, т.е. использовать протон отдачи как метку (таггер).

На рис. 4 показана зависимость энергии протонов от энергии налетающего фотона, полученная в результате моделирования по программе GEANT-4. При этом другие кинематические переменные, например, импульс протона, жестко фиксируются (в пределах нескольких процентов). Видно, что разные парциальные реакции фоторождения  $\pi$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ -мезонов, образующихся в области нуклонных резонансов, попадают в разные кинематические области. Таким образом, можно использовать протоны отдачи как метку ("tagger") протекающей реакции.

Постановка задачи по изучению реакций взаимодействия нестабильных короткоживущих мезонов с ядрами впервые была описана в работе [6]. В настоящее время по этому предложению проводится анализ полученных данных для определения сечения реакции  $\eta n \rightarrow \pi^- p$  на ядре  $^{12}\text{C}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что современные экспериментальные возможности открывают довольно широкую программу работ по изучению динамики внутриядерных каскадов, исследованию взаимодействия нестабильных мезонов с ядрами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Bocquet, J. Ajaka, M. Anghinolfi, V. Bellini, G. Berrier, P. Calvat, M. Capogni, L. Casano, M. Castoldi, P. Corvisiero, A. D'Angelo, J. P. Didelez, R. Di Salvo, Ch. Djalali, M. A. Duval, R. Frascaria, *et al.* (GRAAL Collab.), Nucl. Phys. A **622**, c124 (1997).
2. V. Nedorezov, A. D'Angelo, O. Bartalini, V. Bellini, M. Capogni, L. E. Casano, M. Castoldi, F. Curciarello, V. De Leo, J.-P. Didelez, R. Di Salvo, A. Fantini, D. Franco, G. Gervino, F. Ghio, G. Giardina, *et al.* (GRAAL Collab.), Nucl. Phys. A **940**, 264 (2015).
3. I. A. Pshenichnov, I. N. Mishustin, J. P. Bondorf, A. S. Botvina, and A. S. Iljinov, Phys. Rev. C **57**, 1920 (1998).
4. T. C. Jude, S. Alef, P. Bauer, D. Bayadilov, R. Beck, J. Bieling, A. Bella, S. Boese, A. Braghieri, K. Brinkmann, D. Burdeyny, P. Cole, R. Di Salvo, D. Elsner, A. Fantini, O. Freyermuth, *et al.* (BGO-OD Collab.), PoS (Hadron2017) 054 (2018); doi:10.22323/1.310.0054
5. J. Ahrens, Nucl. Phys. A **446**, 229 (1985).
6. A. Ignatov, O. Bartalini, V. Bellini, J. P. Bocquet, P. Calvat, M. Capogni, M. Casano, M. Castoldi, A. D'Angelo, J.-P. Didelez, R. Di Salvo, A. Fantini, G. Gervino, F. Ghio, B. Girolami, A. Giusa, *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **61**, 253 (2008).

# DYNAMICS OF NUCLEAR CASCADES IN PHOTOPRODUCTION OF LIGHT NEUTRAL MESONS

V. G. Nedorezov<sup>1)</sup>, A. A. Turinge<sup>1)</sup>

*<sup>1)</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia*

New experimental data on multifragmentation of carbon nuclei initiated by photoproduction of neutral  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons are discussed. The novelty is associated with the exclusive nature of the processes under study, when partial reactions of meson photoproduction are identified with the subsequent analysis of complementary particles for coincidence. The experiment was performed in the GRAAL collaboration (Grenoble Accélérateur Anneau Laser) on a beam of Compton photons with an energy of 500–1500 MeV. The possibilities of new experiments in the BGO-OD collaboration (Bonn, Germany) are discussed. A new method for studying the interaction of short-lived mesons with nuclei, based on the registration of cascade recoil nucleons, is discussed.