

УДК 539.172

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ВЫХОДОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА РАЗДЕЛЕННЫХ ИЗОТОПАХ НИКЕЛЯ И МЕДИ

А.Р. БАЛАБЕКЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 22 мая 2006 г.)

Проведено исследование выходов продуктов реакций разного изотопического состава, образованных в мишенях из разделенных изотопов никеля и меди под действием пучков тормозных фотонов с максимальной энергией 4,5 ГэВ. В результате проведенной систематизации выявлена зависимость сечений образования продуктов от изотопического состава ядер-мишеней и ядер-остатков.

1. Введение

Исследование сечений ядерных реакций на разных изотопах имеет важное значение как для понимания механизма протекания реакций, так и для уточнения структуры ядра. Долгие годы внимание многих физиков было направлено на то, чтобы найти единую аналитическую форму описания сечений реакций глубокого расщепления на разных изотопах. Наиболее удачное приближение было получено Рудстамом в виде пятипараметрической формулы [1]. Систематизация большого объема экспериментальных данных позволила автору получить с удовлетворительной точностью (фактор два-три) оценки сечения реакций расщепления в широкой области массовых чисел мишени и энергий налетающих частиц. Но экспериментальные данные, относящиеся к расщеплению мишени с натуральным изотопическим составом, не могли дать достаточно точную информацию о влиянии изотопического состава на вероятность образования разных продуктов [2-7]. Хотя указание на влияние изотопического состава ядер мишеней и остаточных ядер на их образования отмечалось в ряде работ [8-10].

На Ереванском электронном ускорителе тормозными фотонами с $E_{\gamma max} = 4.5$ ГэВ проводились эксперименты с использованием мишеней из разделенных изотопов никеля, меди и олова [11-13]. Систематизация экспериментальных данных указывала на экспоненциальную зависимость выходов фотоядерных реакций от третьих проекций изоспинов исходных ядер и продуктов. В модифицированную формулу Рудстама [14] были введены дополнительные члены, учитывающие эту зависимость [15,16].

Мишени из разделенных изотопов олова облучались также на протонных пучках фазотрона и синхрофазотрона ОИЯИ с энергиями 0.66, 1.0 и 8.1 ГэВ. Исследования показали, что изотопическая зависимость наблюдается и для протон-ядерных реакций [17,18].

В последние годы интенсивно изучаются сечения реакций при ионном столкновении с высокими энергиями на нуклон. Авторы ряда работ [19-26] исследовали отношения сечений образования легких фрагментов в мишенях с разными нуклонными составами. Систематизация экспериментальных данных [23] по изотопическим отношениям сечений образования легких ядер с $Z = 1-8$ позволила выявить четкую зависимость от нуклонного состава продуктов и провести параметризацию отношения (R_{12}) в виде функции от числа нейтронов и протонов в вылетевших фрагментах:

$$R_{N_2Z_2}^{N_1Z_1}(N, Z) = Y_{N_2Z_2}(N, Z) / Y_{N_1Z_1}(N, Z) = C \exp(\alpha N + \beta Z), \quad (1)$$

где $Y_{NZ}(N, Z)$ – сечение образования фрагмента, содержащего Z протонов и N нейтронов, при этом $Y_{N_2Z_2}$ относится к выходам из мишеней с большим содержанием нейтронов, чем $Y_{N_1Z_1}$. C – нормировочный фактор, α и β – подгоночные параметры. Использование трех параметров для описания указанной зависимости для широкого набора реакций рассматривалось авторами [23,24] как изотопический скейлинг.

Явление изоскейлинга наблюдалось и в наших исследованиях в протон-ядерных реакциях при столкновении протонов разных энергий с мишенями из разделенных изотопов олова [18].

Цель настоящей работы – проведение анализа отношений выходов продуктов реакций, инициированных тормозным спектром фотонов $E_{\gamma \max} = 4.5$ ГэВ в мишенях из разделенных изотопов Ni и Cu.

2. Фотоядерные реакции на ядрах меди и никеля

Сделанные нами ранние исследования зависимости сечения образования остаточных ядер от нуклонного состава ядер-остатков и ядер-мишеней показали корреляцию между выходами этих ядер и их третьей проекцией изотопического спина [13,15,16]. Поэтому отношение выходов образования продуктов рассматривали в виде

$$R_{N_2Z_2}^{N_1Z_1}(t_3) = Y_{N_2Z_2}(N, Z) / Y_{N_1Z_1}(N, Z) = \exp(C + B(N - Z)/2), \quad (2)$$

где C и B – подгоночные параметры, а $(N - Z)/2 = t_3$ – третья проекция изотопического спина продукта. В целом, это выражение аналогично формуле (1), однако, систематизация отношений выходов проводится в зависимости от изоспина образующегося фрагмента. При поэлементном анализе сечений образования различных изотопических состояний в формуле (2) исключается зависимость отношения $R_{N_2Z_2}^{N_1Z_1}(t_3)$ от числа протонов в продукте, а влияние содержания нейтронов, определяемое параметром $B/2$, соответствует парамет-

ру α в формуле (1). Согласно теоретическим представлениям, величина параметра α зависит от ряда факторов, в том числе от различия нейтронного химического потенциала $\Delta\mu_n$ в обоих мишенях, а также от величины асимметричного энергетического члена, входящего в уравнение ядерного состояния [25].

На рис.1 приведена зависимость R_{21} от t_3 для изотопов никеля. Использовались отношения выходов остаточных ядер, полученных из следующих пар мишеней: $\frac{\sigma(^{64}\text{Ni})}{\sigma(^{58}\text{Ni})}$ ($\Delta N = 6$), $\frac{\sigma(^{64}\text{Ni})}{\sigma(^{60}\text{Ni})}$ ($\Delta N = 4$), $\frac{\sigma(^{62}\text{Ni})}{\sigma(^{60}\text{Ni})}$ ($\Delta N = 2$). На рисунках для удобства эти отношения приведены к одной шкале. Для пар мишеней ^{65}Cu и ^{63}Cu из отношения выходов получается $B = 0,64 \pm 0,07$ для $\Delta N = 2$. Такое разногласие с результатами для никеля можно объяснить тем, что для мишени ^{63}Cu значения выходов были рассчитаны из экспериментальных значений выходов по фоторасщеплению меди с натуральным изотопным составом (69% ^{63}Cu и 31% ^{65}Cu). И это приводит к увеличению ошибки при определении параметра B .

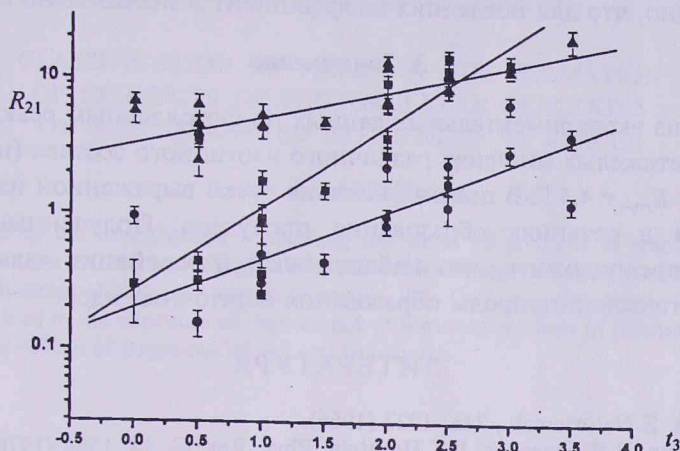


Рис.1. Зависимость отношения $R_{N_1 Z_1}^{N_2 Z_2}(t_3)$ от третьей проекции изотопического спина для разных пар мишеней ($E_{\gamma\text{max}} = 4.5$ ГэВ). Экспериментальные точки: ■ — $\Delta N = 6$ ($\times 10$), ● — $\Delta N = 4$ ($\times 1$), ▲ — $\Delta N = 2$ ($\times 20$).

Как видно из рис.1, для всех остаточных ядер имеет место экспоненциальная зависимость R_{21} от t_3 . Для изотопов никеля значения подгоночных параметров B даны в табл.1. На рис.2 приведена зависимость параметров B от изотопного состава ядер мишеней. Как видно, значения B линейно растут в зависимости от ΔN с наклоном $0,31 \pm 0,04$.

Таблица 1.

Ядро – продукт	Значения подгоночного параметра B для мишеней Ni		
	$\Delta N = 2$	$\Delta N = 4$	$\Delta N = 6$
$^{24}\text{Na} - ^{57}\text{Ni}$	0.33 ± 0.13	0.53 ± 0.08	0.81 ± 0.16

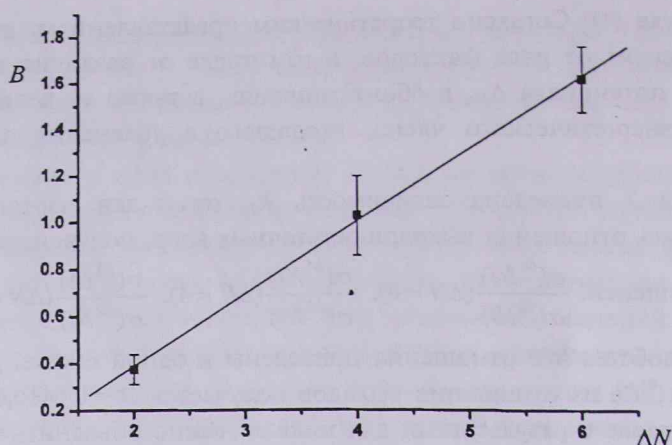


Рис.2. Зависимость параметра B от разности числа нейтронов (ΔN) в мишенях ($E_{\text{ymax}} = 4.5$ ГэВ).

При сравнении коэффициентов B для протон-ядерных и фотоядерных реакций видно, что для последних коэффициент B значительно больше.

3. Заключение

Анализ экспериментальных данных по фотоядерным реакциям на легких и среднетяжелых мишенях различного изотопного состава (никель, медь) для энергий $E_{\text{ymax}} = 4.5$ ГэВ показал наличие четко выраженной изотопической зависимости в сечениях образования продуктов. Полученные результаты позволяют предположить, что наблюдаемый изоскейлинг является следствием статистической природы образования остаточных ядер.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.Rudstam. Z.Naturforsch., **21a**, 1027 (1966).
2. J.B.Cumming, R.W.Stoerner, P.E.Haustein. Phys. Rev. C, **14**, 1554 (1976).
3. Y.Y. Chu, G.Friedlander, L.Husain. Phys. Rev. C, **15**, 352 (1977).
4. A.Y.Abul-Magd, W.A.Friedman, J.Hufner. Phys. Rev. C, **34**, 113 (1986).
5. N.T.Porile, G.D.Cole, C.R.Rudy. Phys. Rev. C, **19**, 2288 (1979).
6. T.Asano et al. Phys. Rev. C, **28**, 1718 (1983).
7. H.Sauvageon. Z. Phys. A, **326**, 301 (1987).
8. S.Kaufman. Phys. Rev., **129**, 1866 (1963).
9. T.H.Ku, P.J.Karol. Phys. Rev. C, **16**, 1984 (1977).
10. В.Г.Батий и др. ЯФ, **43**, 1074 (1986).
11. Г.В.Арустамян и др. ЯФ, **32**, 1165 (1980).
12. А.С.Данагулян и др. Изв. АН АрмССР, Физика, **16**, 336 (1981).
13. А.А.Аракелян и др. ЯФ, **45**, 609 (1987). А.А.Аракелян и др. ЯФ, **48**, 618 (1988).
14. K.Lindgren, G.G.Jonsson. Phys. Scr., **15**, 308 (1977).
15. A.S.Danagulyan et al. Second Inter. Conf. Low Radiact. Physics and Applications. Bratislava, vol.8, p.85, 1982.
16. А.А. Аракелян и др. ЯФ, **49**, 922 (1989).
17. V.Aleksandryan, J.Adam, A.Balabekyan, et al. Nucl. Phys. A, **674**, 539 (2000).
18. J.Adam, A.R.Balabekyan, A.S.Danagulyan, et al. Nuclear Physics A, **735**, 267 (2004); nucl-ex/0302032-2003.

19. H.S.Xu, M.B.Tsang, T.X.Liu, et al. Phys. Rev. Lett., **85**, 716 (2000).
20. Y.Brzychczyk, D.S.Bracken, K.Kwiatkowski, et al. Phys. Rev. C, **47**, 1553 (1993).
21. R.Wada, K.D.Hildenbrand, U.Lyner, et al. Phys. Rev. Lett., **58**, 1829 (1987).
22. F.Deak, A.Kiss, Z.Seves, et al. Phys. Rev. C, **43**, 2432 (1991).
23. M.B.Tsang, W.A.Friedman, C.K.Gelbke, et al. Phys. Rev. Lett., **86**, 5023 (2001).
24. M.B.Tsang, C.K.Gelbke, X.D.Liu, et al. Phys. Rev. C, **64**, 0544615 (2001).
25. W.P.Tan, B.A.Li, R.Domangelo, et al. Phys. Rev. C, **64**, 051901 (2001).
26. G.Verde, M.B.Tsang, et al. Nuclear Physics in the 21st Century INPC-2001, International Nuclear Physics Conf., p.697, 2001.

ՆԻԿԵԼԻ ԵՎ ՊՂՆԶԻ ԲԱԺԱՆՎԱԾ ԻԶՈՏՈՊՆԵՐԻՑ
ՖՈՏՈՆՍԻԶՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏԻՄՆԵՐԻ ՀԵՏԵՎԱՆՔՈՎ ԱՌԱՋԱՑԱԾ
ՄԻԶՈՒԿՆԵՐԻ ԵԼՔԵՐԻ ԴԱՍԱԿԱՐԳՈՒՄԸ

Ա.Ռ. ԲԱԼԱԲԵԿՅԱՆ

Աշխատանքում քերված են 4.5 ԳԷՎ մաքսիմալ էներգիայով արգելակման ճարագայթման զամմա-քվանտների ազդեցության տակ հարստացված նիկելի եվ պղնձի քիրախներից առաջացած տարբեր իզոտոպային կաոուցվածք ունեցող միջուկների ելքերի ուսումնասիրության արդյունքները: Բացահայտված է արդյունք-միջուկների առաջացման ելքերի կախվածությունը քիրախ-միջուկի եվ մնացորդային միջուկների իզոտոպային կաոուցվածքից:

CLASSIFICATION OF YIELDS OF THE FORMATION
OF PRODUCTS OF PHOTONUCLEAR REACTIONS
ON THE SEPARATED ISOTOPES OF Ni AND Cu

A.R. BALABEKYAN

The results of the investigation concerning the yields of products of reactions of various isotopic compositions formed in the targets of separated isotopes of Ni and Cu under the influence of beams of bremsstrahlung at maximal energy 4.5 GeV are presented. The conducted systematization lead to the exposure of dependence of the cross-sections of products formation on the isotopic composition of target-nuclei and residual nuclei.