



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–28
ОРИ

Г.И. Крупный, Я.Н. Расцветалов

Экспериментальная оценка сечений образования нуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ

Направлено в *ИТЭ*

E-mail: instr@maik.ru

Протвино 2011

Аннотация

Крупный Г.И., Расцветалов Я.Н. Экспериментальная оценка сечений образования нуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2011-28. – Протвино, 2011. – 15 с., 12 рис., библиогр: 10.

В данной работе тонкая мишень (сборка из медной и алюминиевой фольг) была установлена в вакуумной камере ускорителя и облучена циркулирующими протонами с энергией 50 ГэВ. По активации мишени определено число протонов, прошедшее через мишень за сеанс работы ускорителя и измерены активности радионуклидов в каждой из фольг. Оценены сечения образования ряда радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди.

Abstract

Krupny G.I., Rascvetalov Ya.N. The Experimental Evaluation of Radionuclides Production Cross Sections in 50 GeV Proton Collisions with Copper: IHEP Preprint 2011-28. – Protvino, 2011. – p. 15, figs. 12, refs.: 10.

The thin complex target (unit of copper and aluminum foils) was placed inside accelerator vacuum tube and was exposed by circulating 50 GeV protons. The number of total protons, that penetrated across target during accelerator run and the radionuclides activities induced by protons in each foil were measured by activation method. The set of radionuclides production cross sections in 50 GeV proton collisions with copper nuclei was evaluated using the obtained data.

Введение

Решающим параметром для решения широкого круга задач по воздействию радиационных факторов на вещество в условиях высоких уровней радиации является максимально достижимая доза или интегральный флюенс частиц за разумное время работы облучательной установки. Для исследования физики радиационных повреждений материалов атомной техники обычно используют исследовательские реакторы. За рубежом довольно часто такие исследования проводятся на ускорителях протонов с энергиями 0.2 – 1.5 ГэВ для экспрессной оценки изменения свойств материалов в результате облучения. В ряде работ показана достаточно хорошая корреляция изменения механических свойств материалов, облученных на ускорителях и в исследовательских ядерных реакторах. Для моделирования радиационных материаловедческих задач в современной ядерной энергетике с помощью ускорителей нужны пучки частиц с интенсивностями не менее 10^{14} протонов/см²с. Таких ускорителей протонов в мире немного, а дальнейшее увеличение интенсивности пучков сопряжено с нарастанием как физико-технических, так и материальных проблем.

Данный подход и программа исследований разрабатывались в ГНЦ ИФВЭ со специалистами НИКИЭТ (ИЦП МАЭ) и ФЭИ. Проведенные на ускорительном комплексе Института Физики Высоких Энергий первые тестовые исследования по изучению радиационных повреждений материалов атомной техники [1] показали, что за сеанс работы протонного синхротрона У-70 (~1000 часов), не мешая основной физической программе, на тонких образцах материалов может быть достигнут интегральный флюенс протонов $\sim 10^{19}$ протонов/см². При этом используется около 1% протонов (гало пучка),

циркулирующих в вакуумной камере ускорителя и многократно пересекающих тонкий образец исследуемого материала, создавая в нем вышеуказанный уровень радиационных нагрузок. Более детально вопрос многократного прохождения протонами тонких образцов будет описан в отдельной публикации [1]. В настоящей работе были исследованы облученные тонкие образцы (фольги) из меди и алюминия с целью получения экспериментальных оценок сечений образования вторичных радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди.

Эксперимент

В качестве тонкой внутренней мишени использовалась сборка из двух фольг: медной и алюминиевой, первой по пучку стояла медная фольга, вплотную за ней - алюминиевая. В этой сборке исследуемым образцом была фольга из электролитической меди с естественным содержанием изотопов ^{63}Cu и ^{65}Cu ; назначение мониторинговой алюминиевой фольги – определение полного числа протонов, прошедших сборку. Размеры фольг – $40 \times 20 \text{ мм}^2$ определялись конструкцией рамки-держателя мишени, толщина медной фольги - 50 мкм. С целью минимизации вносимых возмущений на число пересечений толщина алюминиевой фольги выбрана гораздо тоньше медной ($\sim 6 \text{ мкм}$). Мишень в штатном держателе (см. вставку на рис. 1) была установлена в вакуумной камере магнитного блока №33 ускорителя У-70. Радиальная координата мишени ($R = +18 \text{ мм}$) выбрана экспериментально, что равно удалению мишени примерно на 11 мм от центра пучка. Энергия циркулирующих протонов в У-70 составляла 50 ГэВ.

Контроль интенсивности сброса протонов на мишень

Два фактора ограничивали интенсивность сброса (наведения) протонов на исследуемую мишень: чрезмерный ее разогрев и обеспечение надежной совместной работы других внутренних мишеней и медленного вывода пучка протонов. Средняя интенсивность протонов, сбрасываемая на исследуемую мишень, составляла $\sim 7 \cdot 10^9$ протонов/цикл. При этом ускоренные до 50 ГэВ протоны в течение каждого цикла многократно (~ 2000 раз) пересекают мишень (сборку из двух тонких фольг), что эквивалентно однократному падению на мишень $\sim 1,4 \cdot 10^{13}$ протонов/цикл. В сеансе У-70

контроль за сбросом протонов на мишень осуществлялся детектором черенковского излучения (радиатор из свинцового стекла, сочлененный с фотоумножителем ФЭУ-85), регистрирующим вторичные заряженные частицы от неупругих взаимодействий протонов с ядрами вышеуказанной мишени под углом $\sim 30^\circ$ [2]. Детектор был установлен в коллиматоре боковой защиты ускорителя (нулевая ветка канала №6) и включен в систему автоматизированного радиационного контроля У-70 [3].

Определение числа протонов на мишени за экспозицию

Число протонов, прошедших мишень, измерено по числу радиоактивных ядер ^{22}Na , образующихся в мониторинной алюминиевой фольге. Толщина алюминиевой фольги определялась путем взвешивания и составила $5,7 \pm 0,1$ мкм. Нуклид ^{22}Na образуется на протонах в реакции $^{27}\text{Al} (p, 3p3n) ^{22}\text{Na}$. Сечение σ этой реакции является опорным для последующих вычислений и оценок сечений образования радионуклидов протонами на ядрах меди. Используемое нами значение сечения данной реакции при энергии протонов $E_p = 50$ ГэВ принято равным $\sigma = (10,6 \pm 0,9)$ мб [4].

Число ядер радионуклида ^{22}Na ($N_{\text{акт.ядер}}$) в мониторинной фольге, образуемое при взаимодействии протонов с мишенью, определяется по формуле:

$$N_{\text{акт.ядер}} = I_{\Sigma} N_0 \cdot \sigma \Delta x, \quad (1)$$

где σ – сечение реакции, I_{Σ} – число протонов за экспозицию, Δx – толщина мишени, N_0 – число ядер ^{27}Al мишени в 1 см^3 .

С другой стороны, активность C радионуклида ^{22}Na , определяемая на полупроводниковом гамма-спектрометре, связана с числом радиоактивных ядер $N_{\text{акт.ядер}}$ следующим соотношением:

$$C = \frac{N_{\text{акт.ядер}}}{\tau}, \quad (2)$$

где $\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$; $T_{1/2} = 2,605$ лет – период полураспада радионуклида ^{22}Na .

Таким образом, используя формулы (1) и (2), определяем число протонов за экспозицию. Заметим, что аналогичный подход был реализован при расчете сечений образования долгоживущих радионуклидов на меди.

Результаты

Измеренная активность нуклида ^{22}Na в алюминиевой фольге за экспозицию, приведенная на время окончания экспозиции составила (7630 ± 397) Бк. По соотношениям (1) и (2) было определено, что через медную фольгу толщиной 50 мкм прошло $(2,50 \pm 0,25) \cdot 10^{18}$ протонов. Выбывание нуклида ^{22}Na из алюминиевой фольги по нашим оценкам составляет $\sim 1\%$ и частично компенсируется их добавкой с медной фольги. Для изучения распределения активности ^{22}Na по алюминиевой фольге она была разрезана на три полоски: две шириной по 5 мм и одна шириной 10 мм. Из ближней к пучку полоски шириной 5 мм вырезали ее центральную часть размером 20 мм. На эту часть фольги приходится 90% активности, всего на ближайшую к пучку полосу приходится 95% активности, 4,5% на среднюю полосу шириной 5 мм и оставшиеся 0,5% активности приходится на полосу шириной 10 мм.

Идентификация радионуклидов и измерения активности C облученных фольг выполнены на полупроводниковом гамма-спектрометрическом комплексе [5]. Измерения активности короткоживущих радионуклидов не проводилось в виду высокой суммарной активности радионуклидов в фольгах на конец облучения. После выдержки в течение ~ 1 месяца измерены активности радионуклидов с периодом полураспада более 16 суток. По результатам измерений определены активности 11 долгоживущих радионуклидов, образовавшихся в результате облучения тонкой медной фольги протонами с энергией 50 ГэВ (табл.1).

В погрешность определения активности входит погрешность скорости счета в пике полного поглощения при обработке аппаратного спектра и погрешность (3%) градуировки спектрометра по образцовым источникам гамма-излучения (ОСГИ). Суммарная удельная активность долгоживущих радионуклидов в медной фольге на конец облучения с погрешностью 8% составила $1,8 \cdot 10^7$ Бк/г.

Таблица 1. Активности идентифицированных радионуклидов в медной фольге
(значения приведены на конец облучения)

Радионуклид	^7Be	^{22}Na	^{46}Sc	^{48}V	^{51}Cr	^{54}Mn
Период полураспада	53,3 сут	2,602 лет	83,83 сут	16,238 сут	27,704 сут	312,5 сут
Активность, Бк	$8,4 \cdot 10^5$ $\pm 4\%$	$1,5 \cdot 10^4$ $\pm 4\%$	$3,0 \cdot 10^5$ $\pm 7\%$	$1,3 \cdot 10^6$ $\pm 5\%$	$1,9 \cdot 10^6$ $\pm 12\%$	$2,0 \cdot 10^5$ $\pm 10\%$
Радионуклид	^{59}Fe	^{56}Co	^{57}Co	^{58}Co	^{60}Co	
Период полураспада	44,529 сут	78,76 сут	270,9 сут	70,8 сут	5,271 лет	
Активность, Бк	$1,3 \cdot 10^5$ $\pm 6\%$	$2,8 \cdot 10^5$ $\pm 12\%$	$1,9 \cdot 10^5$ $\pm 7\%$	$1,2 \cdot 10^6$ $\pm 6\%$	$2,3 \cdot 10^4$ $\pm 6\%$	

Полученные значения активностей долгоживущих радионуклидов, образуемых на меди протонами с энергией 50 ГэВ, позволили выполнить оценку сечения образования этих радионуклидов. Результаты вычислений с погрешностью в процентах представлены в табл. 2. В определении погрешности, кроме названных выше, учтена погрешность оценки сечения мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(p,3p3n)^{22}\text{Na}$.

На рис. 3÷13 приведены экспериментальные данные по сечениям образования радионуклидов на меди, взятые из работ [6,7,8,9]. На этих рисунках приведены также наши данные (●) для радионуклидов, перечисленных в табл. 2.

Представлялось целесообразным также сравнить наши данные с расчетными значениями сечений, полученными с помощью феноменологических аппроксимаций. Расчеты сечений σ^* были проведены по модели Silberberg and Tsao [10] для естественной смеси изотопов меди с содержанием 69%- ^{63}Cu и 31%- ^{65}Cu и представлены в нижней строке табл.2. В отдельных случаях (^{59}Fe и ^{60}Co) расхождение результатов эксперимента и расчетов не превышает 30%; в других случаях почти до трех раз. Дальнейшее обсуждение имеющихся расхождений возможно лишь совместно с анализом самого феноменологического подхода в модели Silberberg and Tsao.

Таблица 2. Сечение образования радионуклидов в меди протонами с энергией 50 ГэВ

Радио- нуклид	${}^7\text{Be}$	${}^{22}\text{Na}$	${}^{46}\text{Sc}$	${}^{48}\text{V}$	${}^{51}\text{Cr}$	${}^{54}\text{Mn}$
σ , мб	6,1 $\pm 11\%$	1,4 $\pm 11\%$	3,2 $\pm 13\%$	5,3 $\pm 11\%$	9,3 $\pm 16\%$	6,4 $\pm 14\%$
σ^* , мб	10,9	3,6	6,3	8,9	18,1	17,7
Радио- нуклид	${}^{59}\text{Fe}$	${}^{56}\text{Co}$	${}^{57}\text{Co}$	${}^{58}\text{Co}$	${}^{60}\text{Co}$	
σ , мб	0,9 $\pm 12\%$	2,8 $\pm 16\%$	5,6 $\pm 13\%$	10,5 $\pm 12\%$	4,4 $\pm 12\%$	
σ^* , мб	1,3	4,9	15,3	23,0	5,5	

При измерении активности алюминиевой фольги были идентифицированы следующие радионуклиды: ${}^{46}\text{Sc}$, ${}^{48}\text{V}$, ${}^{51}\text{Cr}$, ${}^{54}\text{Mn}$, ${}^{56}\text{Co}$, ${}^{57}\text{Co}$ и ${}^{58}\text{Co}$ (табл. 3). Измеренные величины активностей этих радионуклидов не могут быть объяснены активацией содержащихся в алюминиевой фольге примесей более тяжелых элементов. Согласно ГОСТ 25905-83 при изготовлении алюминиевой фольги основной примесью с более высоким атомным номером является медь, содержание которой не превышает 0,0045%. Прямая активация этой примеси меди в алюминиевой фольге дает вклад в значения активностей указанных радионуклидов в диапазоне (0,01÷ 11) Бк, что значительно ниже величин, приведенных в табл. 3. Активности и доля перенесенных с медной фольги радионуклидов на алюминиевую фольгу приведены в табл. 3. Как видно из таблицы, доля перенесенных с медной фольги радионуклидов уменьшается с ростом их атомной массы

Таблица 3. Активности и доли радионуклидов на алюминиевой фольге, перенесенные с медной фольги

Радио- нуклид	${}^{46}\text{Sc}$	${}^{48}\text{V}$	${}^{51}\text{Cr}$	${}^{54}\text{Mn}$	${}^{56}\text{Co}$	${}^{57}\text{Co}$	${}^{58}\text{Co}$
Активность на Al, Бк	1810	6720	8740	790	700	440	2130
Доля, %	0,60	0,50	0,46	0,40	0,25	0,23	0,18

Заключение

В данной работе исследованы облученные пучком протонов тонкие фольги с целью получения экспериментальных оценок сечений образования вторичных радионуклидов протонами с энергией 50 ГэВ на ядрах меди. По активации алюминиевой фольги определено число протонов за сеанс работы ускорителя, прошедшее через мишень (сборка из алюминиевой и медной фольг) в вакуумной камере ускорителя; измерены активности радионуклидов в фольгах; оценены сечения образования ряда радионуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ; проанализированы погрешности основных величин, использующихся при расчетах сечений; внесены поправки, учитывающие временную структуру изменения интенсивности облучения образцов в течение сеанса; количественно и качественно оценен перенос части радионуклидов с медной фольги на алюминиевую в вакуумной среде. Представлены сравнения полученных данных с расчетами по модели Silberberg and Tsao и известными экспериментальными результатами при энергиях менее 50 ГэВ.

Авторы выражают благодарность Г.Е. Воронину и А.В. Минченко за установку и обеспечение работы мишени; С.А. Другаченку за обеспечение непрерывной работы в сеансе монитора; Ю.В. Белецкой за проведение измерений радиоактивных фольг на полупроводниковом гамма-спектрометре; А.В. Санникову за полезное обсуждение результатов и замечания; О.В. Суманееву за предоставленные расчеты сечений образования радионуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ.

Список литературы

[1] А.А. Асеев, В.А. Ключников, Г.И. Крупный, М.А. Маслов, В.Н. Пелешко, Я.Н. Расцветалов. *Моделирование условий проведения экспериментов по радиационной кинетике металлов на протонном пучке синхротрона ИФВЭ*. Готовится к печати в виде препринта ИФВЭ.

- [2] С.И.Купцов, В.Н.Пелешко, А.Л.Сумароков и др. *Детекторы и аппаратура системы радиационного контроля ускорителя У-70*. Препринт ИФВЭ 2000-26, Протвино, 2000.
- [3] В.А. Ключников, С.И. Купцов, В.Н. Пелешко. *Программное обеспечение автоматизированной системы оперативного радиационного контроля ускорителя У-70*. Препринт ИФВЭ 2002-24, Протвино, 2002.
- [4] Г.И. Крупный, Д.В. Снитко, А.А. Янович. *Сечения реакций $Al^{27}(p, spall)Be^7$, $Al^{27}(p, 3p3n)Na^{22}$ и $Al^{27}(p, 3pn)Na^{24}$ в диапазоне энергий протонов 37 МэВ - 70 ГэВ*. АЭ, 2000, т. 89, вып. 5, с. 418-420. Препринт ИФВЭ 2000-13, Протвино, 2000.
- [5] Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко, А.А. Янович. *Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ*. Препринт ИФВЭ 2000-30, Протвино, 2000.
- [6] G. Rudstam, E. Bruninx and A.C. Pappas. Spallation of Copper with 24-GeV Protons. Phys. Rev. V. 126, Number 5, June 1, 1962, p. 1852-1857.
- [7] J. Hudis, I. Dostrovsky, G. Friedlander et al. Energy Dependence of Product Yields in Copper Spallation by Protons between 3 and 30 GeV. Phys.Rev. V. 126, Number 5, June 1, 1962, p. 1852-1857.
- [8] Norbert T. Porile and Shigeo Tanaka. Formation of Sodium and Potassium Nuclides in the Bombardment of light Elements with 29-GeV Protons. Phys.Rev. V. 135, Number 1B, July 13, 1964, p. B122-B128.
- [9] <http://www.nndc.bnl.gov/> . (EXFOR)
- [10] R. Silberberg, C.H. Tsao. Partial cross-sections in high-energy nuclear reactions, and astrophysical applications. ApJS, 1973, No. 220 (I), 25, p. 315-333.

Рукопись поступила 21 ноября 2011 г.

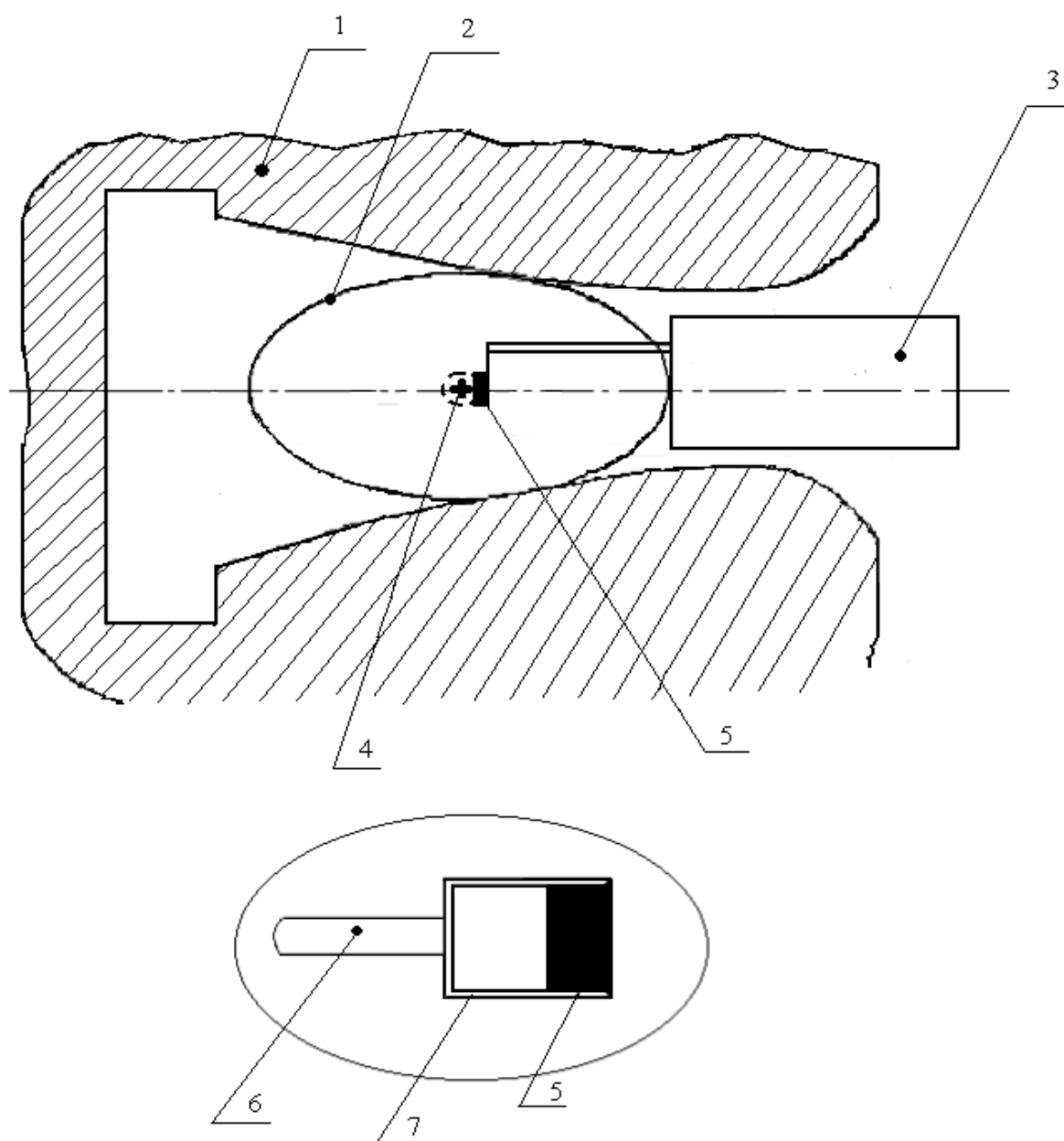


Рис. 1. Схема расположения мишени в радиально-фокусирующем блоке ускорителя:
 1 – магнитный блок, 2 – вакуумная камера, 3 – бокс привода мишени, 4 – пучок протонов и его гало (условно), 5 – мишень (фольги), 6 – привод мишени, 7 – рамка для крепления фольг.

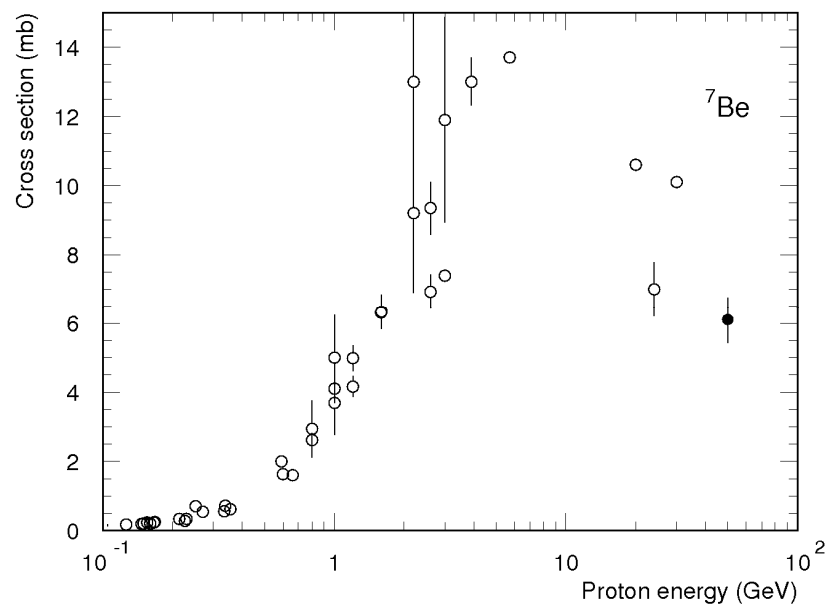


Рис. 2. Зависимость сечения образования ${}^7\text{Be}$ на меди от энергии протонов.

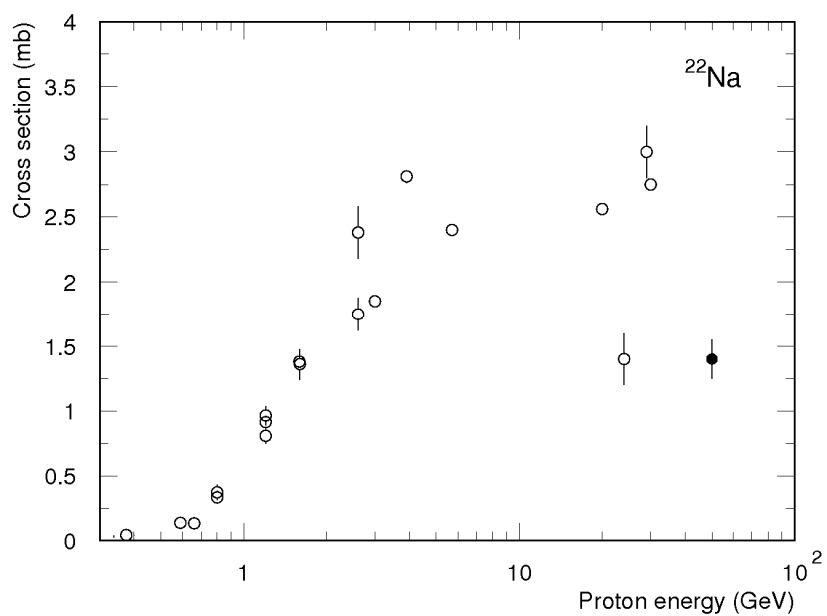


Рис. 3. Зависимость сечения образования ${}^{22}\text{Na}$ на меди от энергии протонов.

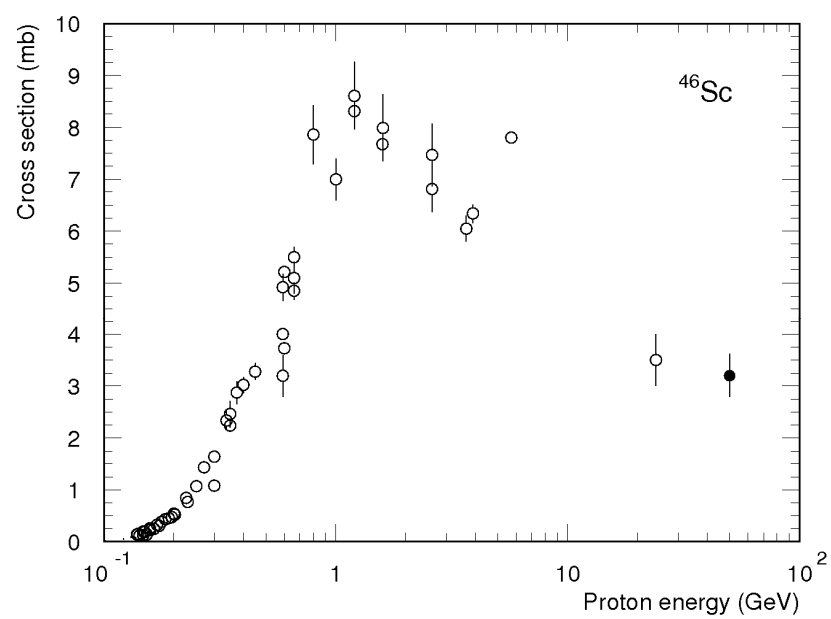


Рис. 4. Зависимость сечения образования ^{46}Sc на меди от энергии протонов.

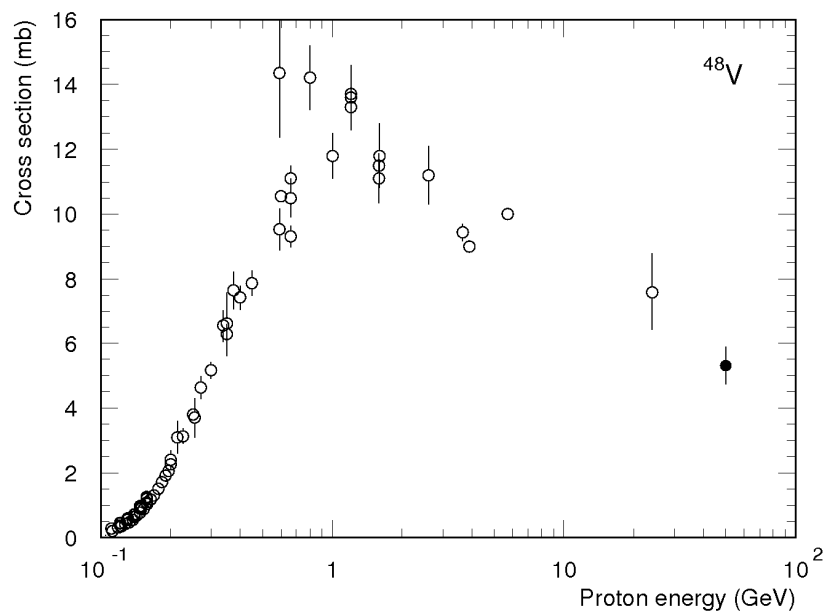


Рис. 5. Зависимость сечения образования ^{48}V на меди от энергии протонов.

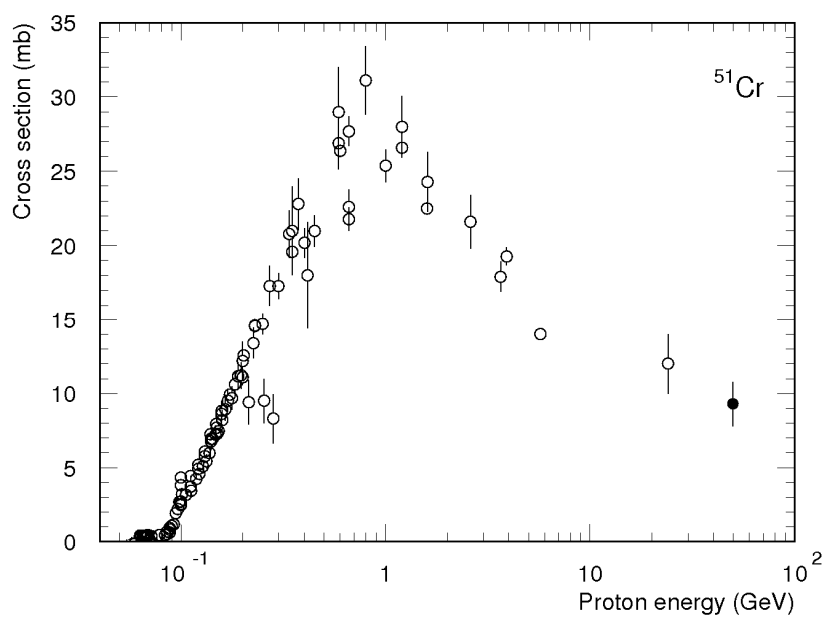


Рис. 6. Зависимость сечения образования ^{51}Cr на меди от энергии протонов.

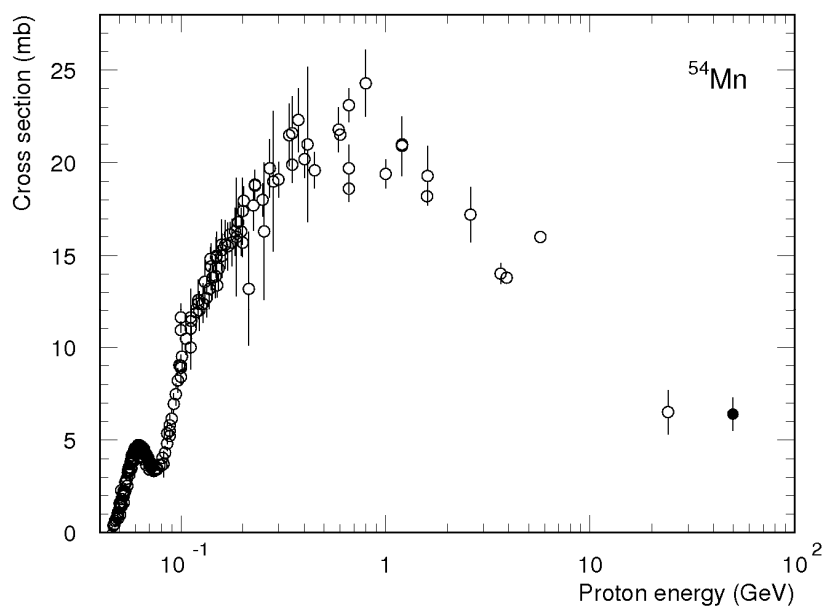


Рис. 7. Зависимость сечения образования ^{54}Mn на меди от энергии протонов.

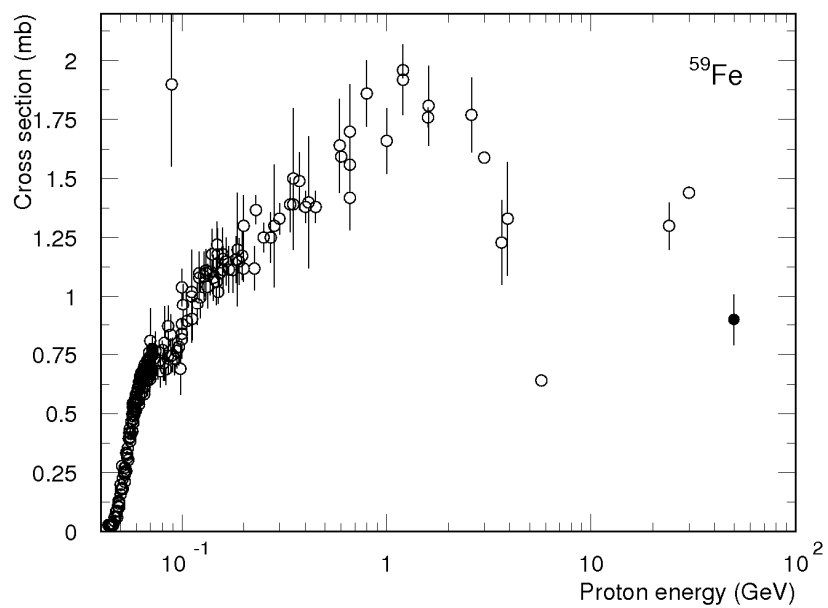


Рис. 8. Зависимость сечения образования ^{59}Fe на меди от энергии протонов.

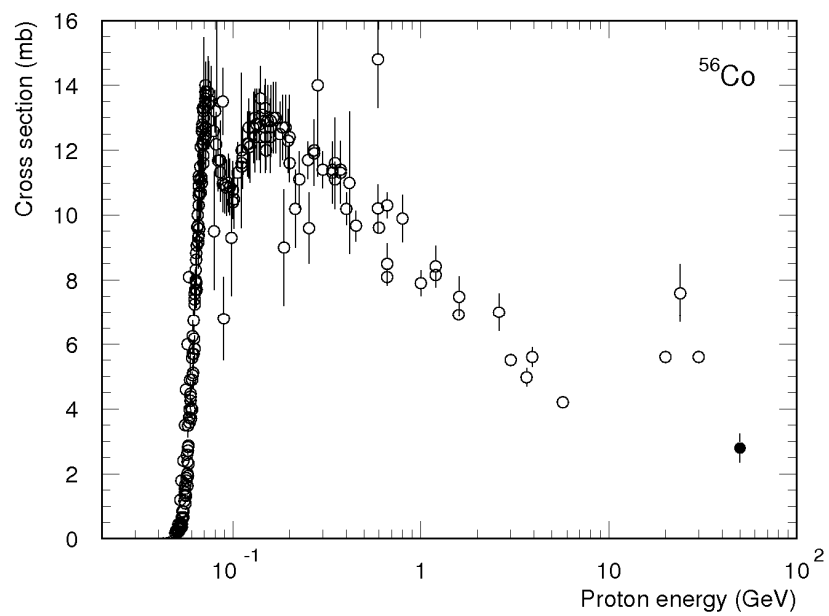


Рис. 9. Зависимость сечения образования ^{56}Co на меди от энергии протонов.

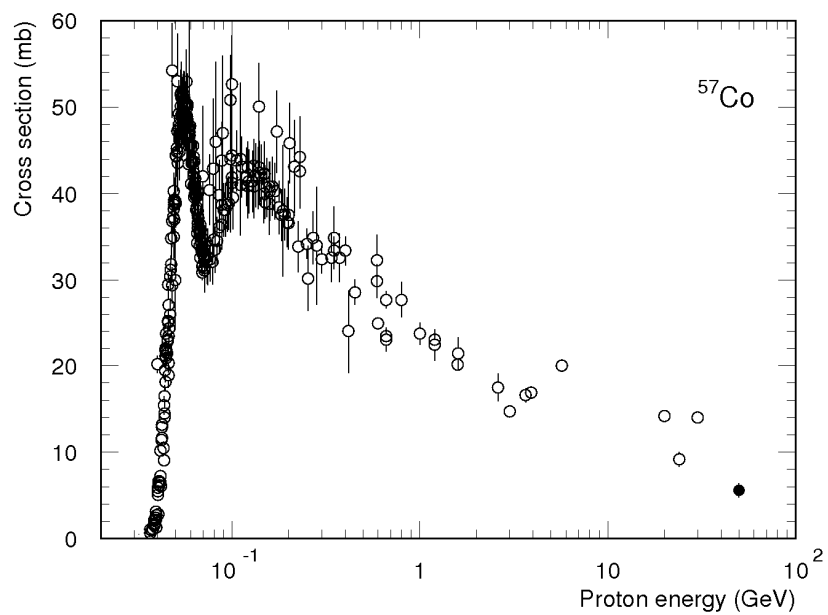


Рис. 10. Зависимость сечения образования ^{57}Co на меди от энергии протонов.

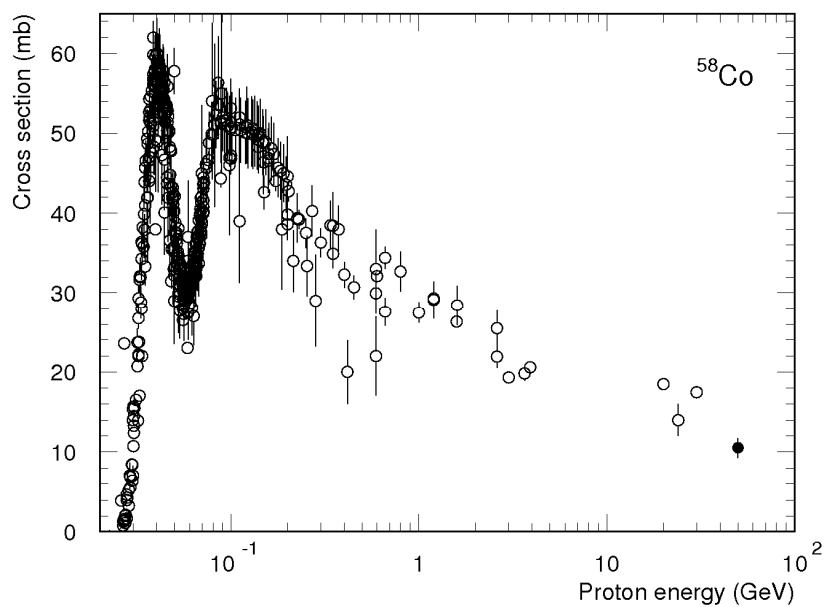


Рис. 11. Зависимость сечения образования ^{58}Co на меди от энергии протонов.

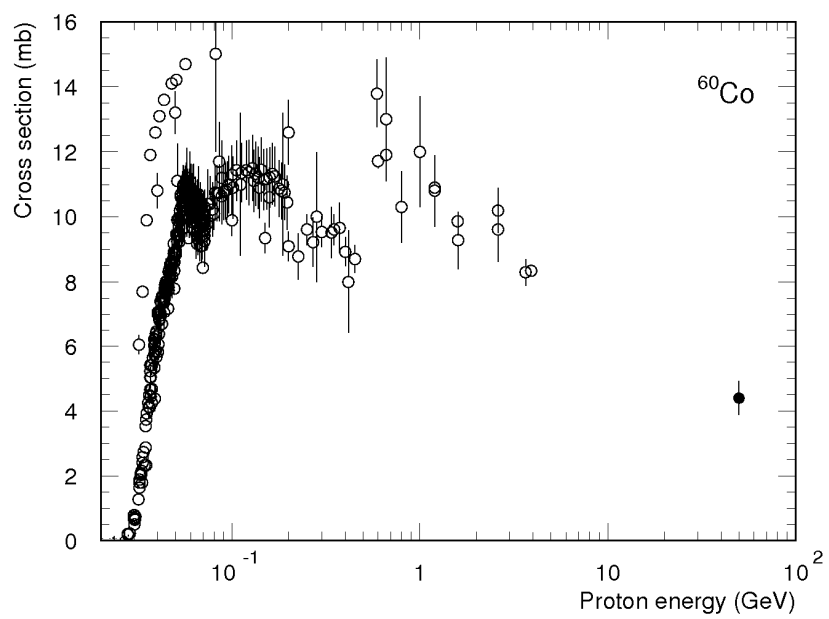


Рис. 12. Зависимость сечения образования ^{60}Co на меди от энергии протонов.

Г.И. Крупный, Я.Н. Расцветалов

Экспериментальная оценка сечений образования нуклидов на меди
протонами с энергией 50 ГэВ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	14.12.2011.	Формат 60 × 84/16.	Офсетная печать.
Печ.л.	1,06.	Уч.– изд.л.	1,63.
Тираж	80.	Заказ	16.
Индекс	3649.		

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-28, ИФВЭ, 2011
