Joint Institute for Nuclear Research

SCIENCE BRINGING NATIONS TOGETHER

JINR 114 Flerovium FLNR Dubna

Энергетическая зависимость полных сечений для реакций ^{10,11,12}Be + ^{28}Si, ^{59}Co, ^{181}Ta

Стукалов С.С.[1], Пенионжкевич Ю.Э.[1,2], Соболев Ю.Г.[1,3], Сивачек И.[1,4], Самарин В.В.[1,5], Науменко М.А.[1]

[1] *JINR, Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia;*

[2] *MEPhI, National Research NuclearUniversity,115409, Moscow, Russia;*

[3] *National Research Center "Kurchatov Institute" Moscow, 123182, Russia;*

[4] *NPIASCR, Nuclear Physics Institute, CZ 250 68, Řež, Czech Republic;*

[5] *Dubna State University, Dubna, Russia;*

E-mail: stukalov@jinr.ru

«Nucleus – 2021»

20.09.2021 – 25.09.2021, St. Petersburg, Russia

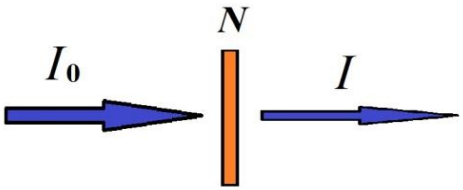
Мотивация

Целью данной работы является исследование взаимодействия легких ядер 10,11,12Be, имеющих различную структуру и разную энергию связи внешних нейтронов, с мишенями ^{28}Si, ^{59}Co, ^{181}Ta.

Представлена процедура измерения эффективности регистрации $\rho(M\gamma)$ и распределения по кратности сработавших детекторов $k(M\gamma)$ в зависимости от множественности $M\gamma$.

Методы измерений

- **Методы аттенюации и трансмиссии**



Экспериментальные условия: $\sigma_R \times N \approx 10^{-24} \times 5 \times 10^{20} << 1$

$$\sigma_R(E)N = (I_0 - I) / I_0 \qquad \sigma_R(E)N << 1$$

$$I = I_0 e^{-\sigma_R(E_\alpha)N}$$

И включает ∀ Неупругие спроцессы

1- одновременное измерение I_0 событий частиц пучка попавших в мишень и частиц I прошедших без взаимодействий **“метод аттенюации”**

2- одновременное измерение I_0 частиц пучка попавших в мишень и провзаимодействовавших частиц (I_0- I) **“метод трансмиссии”**

“Метод аттенюации”

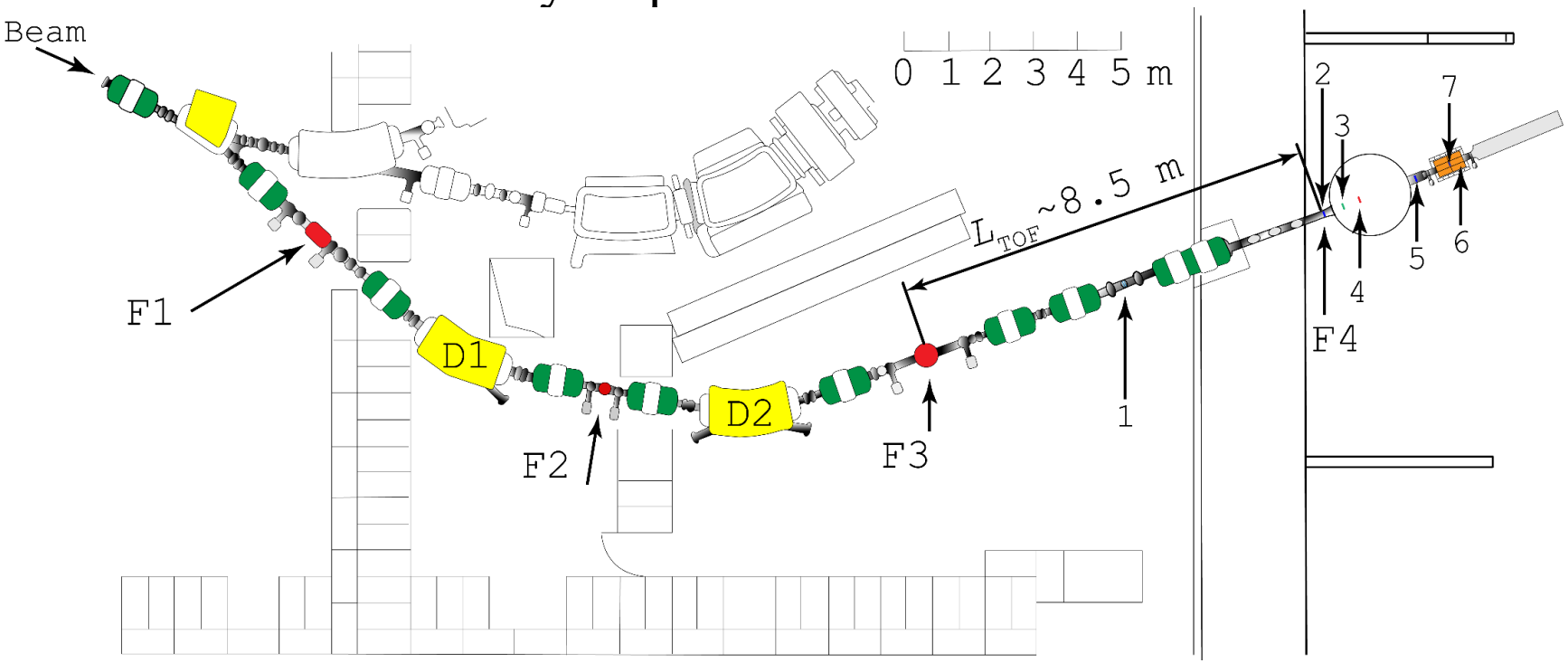
[*T.J. Gooding, Proton Total Reaction Cross Sections at 34 MeV, Nucl. Phys. Vol.* ***12****, Issue 3, 2 July 1959, P. 241–248;*] и Айсберга [*R. M. Eisberg, Proton total reaction cross sections at 62 MeV, Florida Optical Model Conference Report, (1959);*]

“Метод трансмиссии”

[*E.J. Burge, The total proton reaction cross section of carbon from 10—68 MeV by a new method, Nucl. Phys. Vol.* ***13****, Issue 4, 2 November 1959, P. 511–515* В литературе наблюдается некое размытие и смешивание терминов, оригинально даваемыми авторами методик. Так в S.Kox [*S.Kox Phys Rev C. 35 (5) p.1678-1691, (1987)*] методики аттенюации и прохождения (transmission meth.) объединены:

”Наша техника была основана на так называемом методе аттенюации (трансмиссии) Our technique was based on the so-called attenuation (or transmission) method [T. J. Gooding et al. 1959], который использовался для прямого измерения σ_R в протонно-ядерных столкновениях“.

Установка MULTI на отводе ACCULINNA-1 ускорителя U-400M



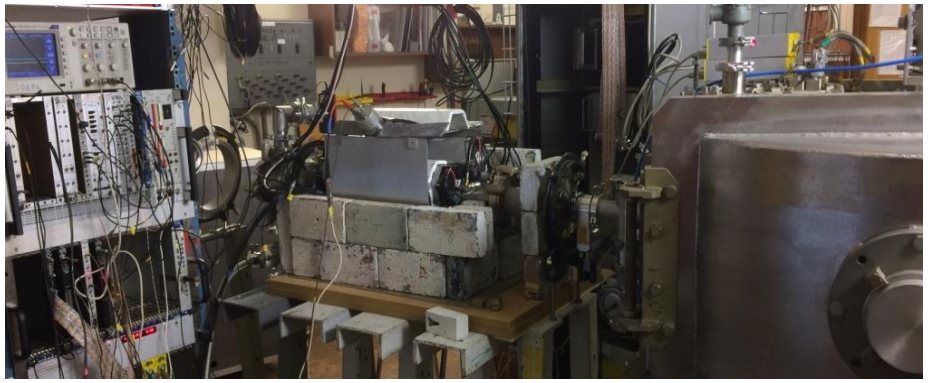
Параметры	Единицы измерения
Максимальная магнитная жесткость	3,6 Тлм
Телесный угол	0,9 мср
Горизонтальный аксептенс угла	20 мср
Вертикальный аксептенс угла	14мср
Импульсный аксептенс	4,2-8,4%

Параметры установки ACCULINNA-1.

Схема фрагмент сепаратора ACCULINNA-1: F1 — производящая мишень, D1, D2 — дипольный магнит, F2 — дегрейдер, F3 — ахроматический фокус, F4 — конечный фокус. Элементы спектрометра MULTI: 1 — CH2 поглотитель, 2 — активный коллиматор AC1, 3 — Si dE0 детектор, 4 — Si-секционный детектор 16x:16y, 5 — активный коллиматор AC2, 6 — 4π γ-спектрометр, 7 — мишень.

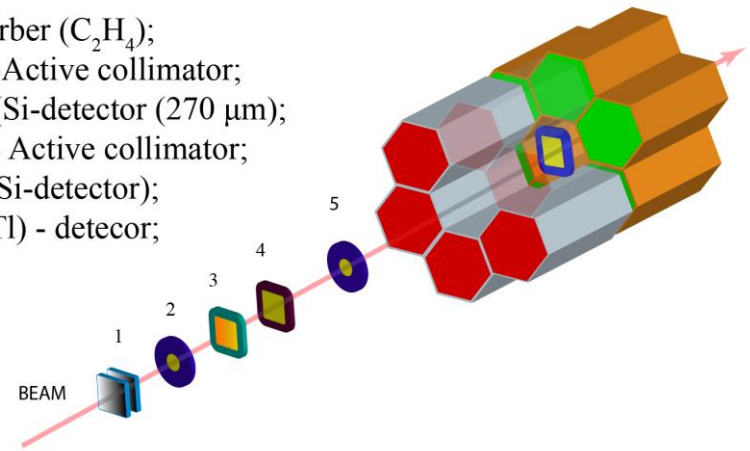
[http://aculina.jinr.ru/], [I. Siváček, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, S.S. Stukalov, “MULTI-2, a 4 π spectrometer for total reaction cross section measurements”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 976, 164255, (2020)]

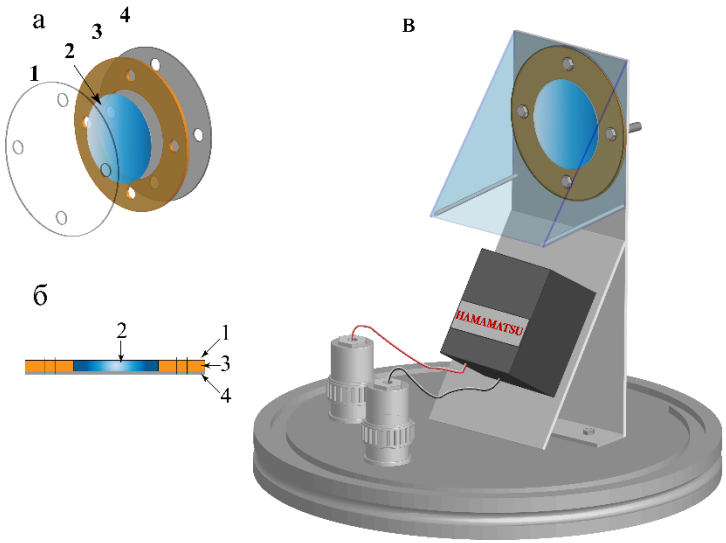
Установка MULTI



- Установка MULTI предназначена для измерений полных сечений реакций. На этой установке были измерены полные сечения ядер ^{6}He и ^{9}Li на мишенях ^{28}Si, ^{59}Co, и ^{181}Ta. А также ^{8}He и ^{11}Li на мишени ^{28}Si(Phys. Rev. C 99, 014609, (2019)).

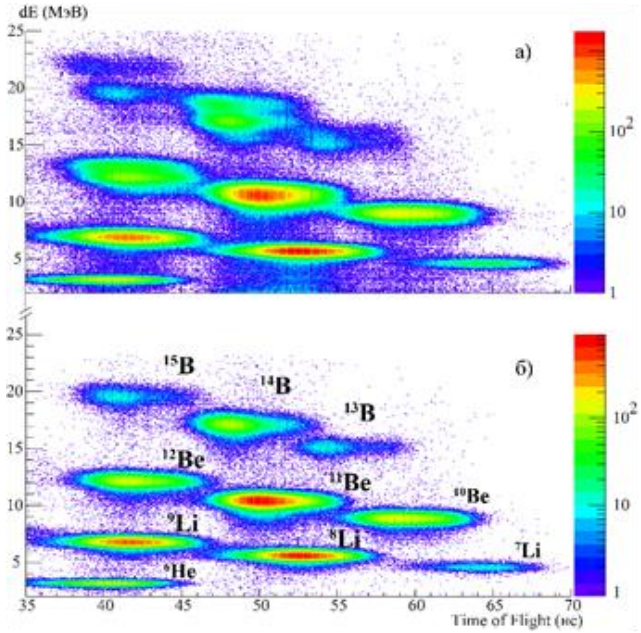
1 - Absorber (C_2H_4);
2 - AC1-Active collimator;
3 - dE0 (Si-detector (270 μm);
4 - AC2- Active collimator;
5 - dEt (Si-detector);
6 - CsI(Tl) - detecor;



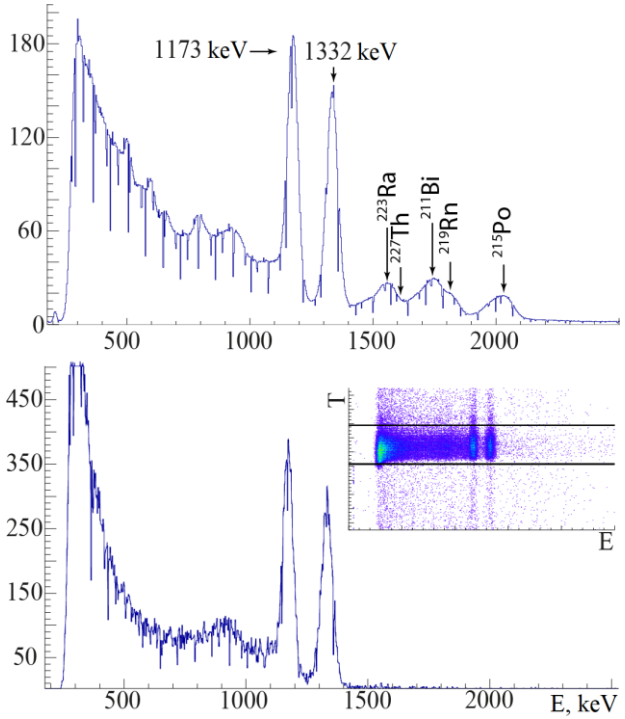


а) Вид активного коллиматора на основе пластикового сцинтилляционного материала. 1- майлар (3·10-3 мм), 2- сцинтиллятор BC 408 (1 мм), 3 – корпус крепления (1 мм), 4 алюминизированный майлар (5·10-3 мм); б) вид АК в разрезе; в) трехмерный вид АК. ФЭУ - Hamamatsu R7600U.

Матрица частиц в одном из проведенных экспериментов: а) Идентификационная матрица без использования активных коллиматоров; б) Идентификационная матрица с применением AC1 и AC2.



Функция отклика спектрометра и зависимость кратности от множественности



Инклюзивный энергетический спектр $CeBr_3$ детектора, полученный при калибровке γ-спектрометра с помощью источника ^{60}Co. (б) Энергетический спектр $CeBr_3$ детектора, набранный с условием γ−β совпадения.

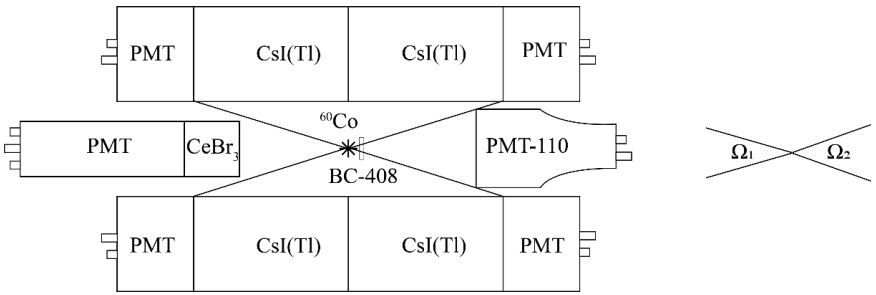
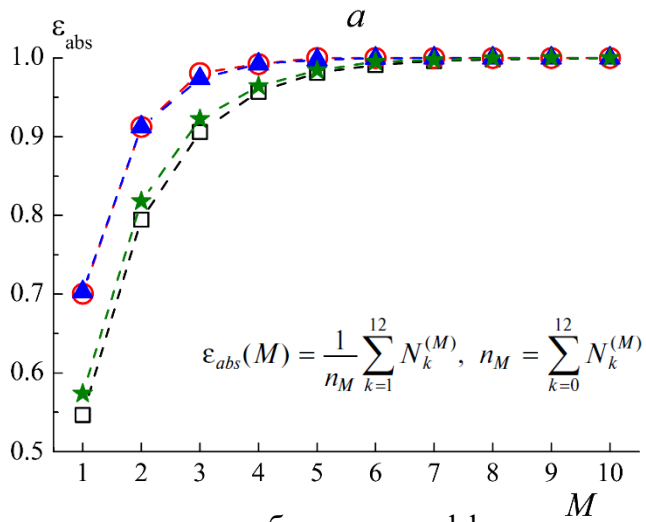
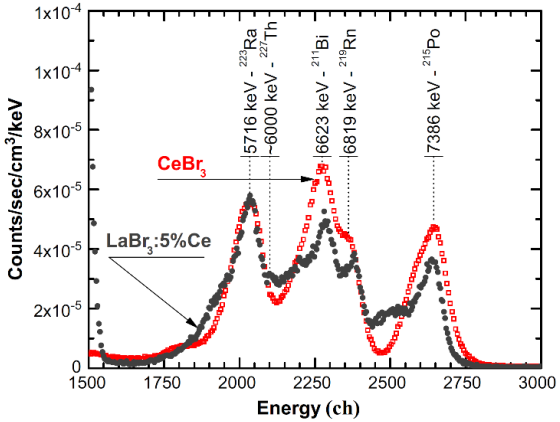


Схема измерения функции отклика в зависимости от множественности и кратности.



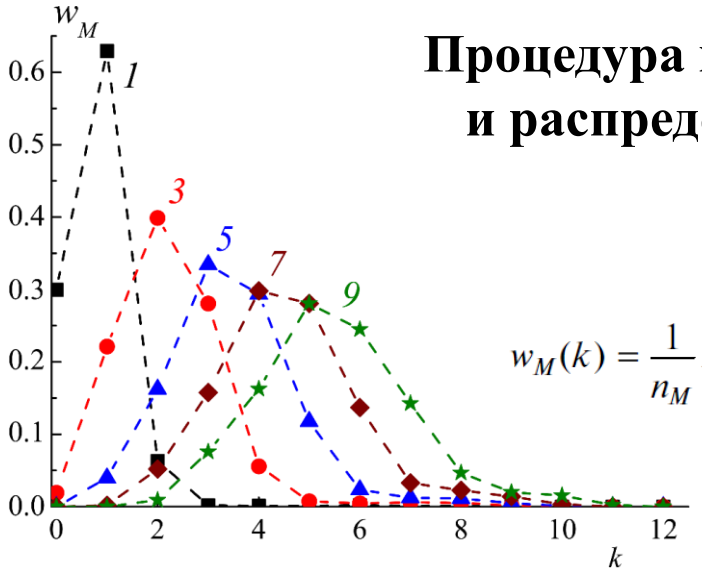
Экспериментальные абсолютные эффективности $\varepsilon_{abs}(M)$ регистрации γ-каскадов, измеренные с источником ^{60}Co для 6-детекторного (квадраты) и 12-детекторного (кружки) спектрометров, а также результаты моделирования с помощью программы GEANT-4 для 6-детекторного (звездочки) и 12-детекторного (треугольники) спектрометров

Спектры внутреннего свечения $CeBr^3$ and $LaBr_3$:5%Ce i (2″x 2″ образец).

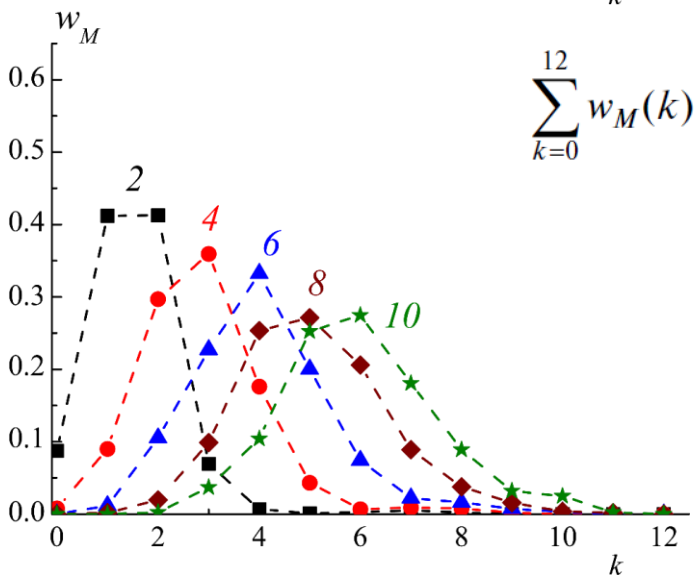


[Yu. G. Sobolev et al., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, No. 8, pp. 948–956.], [F.G.A. Quarati et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 729 (2013) 596–604].

Процедура измерения эффективности регистрации ρ(*M*γ) и распределения по кратности сработавших детекторов *k*(*M*γ) в зависимости от множественности *M*γ.



$$w_M(k) = \frac{1}{n_M} N_k^{(M)}$$



$$\sum_{k=0}^{12} w_M(k) = 1$$

Вероятности $w_M(k)$ срабатывания k детекторов для экспериментально смоделированных событий излучений γ-квантов с множественностью *M*; значения *M* указаны цифрами над вершинами распределений.

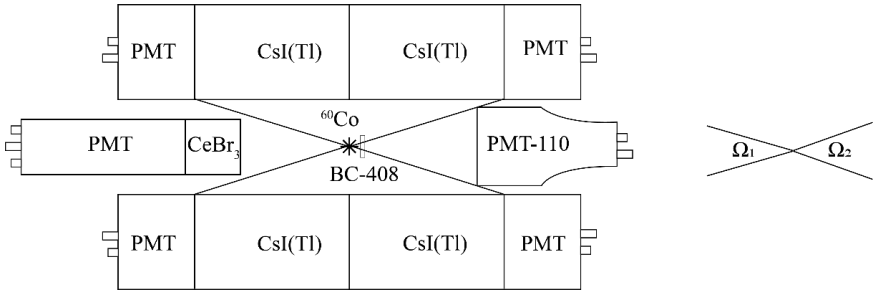


Схема измерения функции отклика в зависимости от множественности и кратности.

№	E1	E2	…	E12	T1	T2	…	T12	
1	0	1	0	0	0	1	0	0	*M*=2
2	1	0	0	0	1	0	0	0	
3	0	0	1	0	0	0	1	0	*M*=2
4	1	0	0	0	1	0	0	0	
…	…	…	…	…	…	…	…	…	
	ΣE1	ΣE2	Σ…	ΣE12					

№	E1	E2	…	E12	T1	T2	…	T12	
1	0	1	0	0	0	1	0	0	*M*=3
2	1	0	0	0	1	0	0	0	
3	0	0	1	0	0	0	1	0	
4	1	0	0	0	1	0	0	0	
…	…	…	…	…	…	…	…	…	
	ΣE1	ΣE2	Σ…	ΣE12					

Иллюстрация объединения событий для множественностей *M*=2 и *M*=3.

[Yu. G. Sobolev et al., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, No. 8, pp. 948–956.]

Обработка экспериментальных данных с применением распределений эффективности регистрации от множественности γ-излучения по кратности

PHYSICAL REVIEW C **99**, 014609 (2019)

Energy dependence of the total cross section for the ^{11}Li + ^{28}Si reaction

Yu. E. Penionzhkevich,[1,2,*] Yu. G. Sobolev,[1] V. V. Samarin,[1,3] M. A. Naumenko,[1] N. A. Lashmanov,[1] V. A. Maslov,[1] I. Siváček,[1,4] and S. S. Stukalov[1]

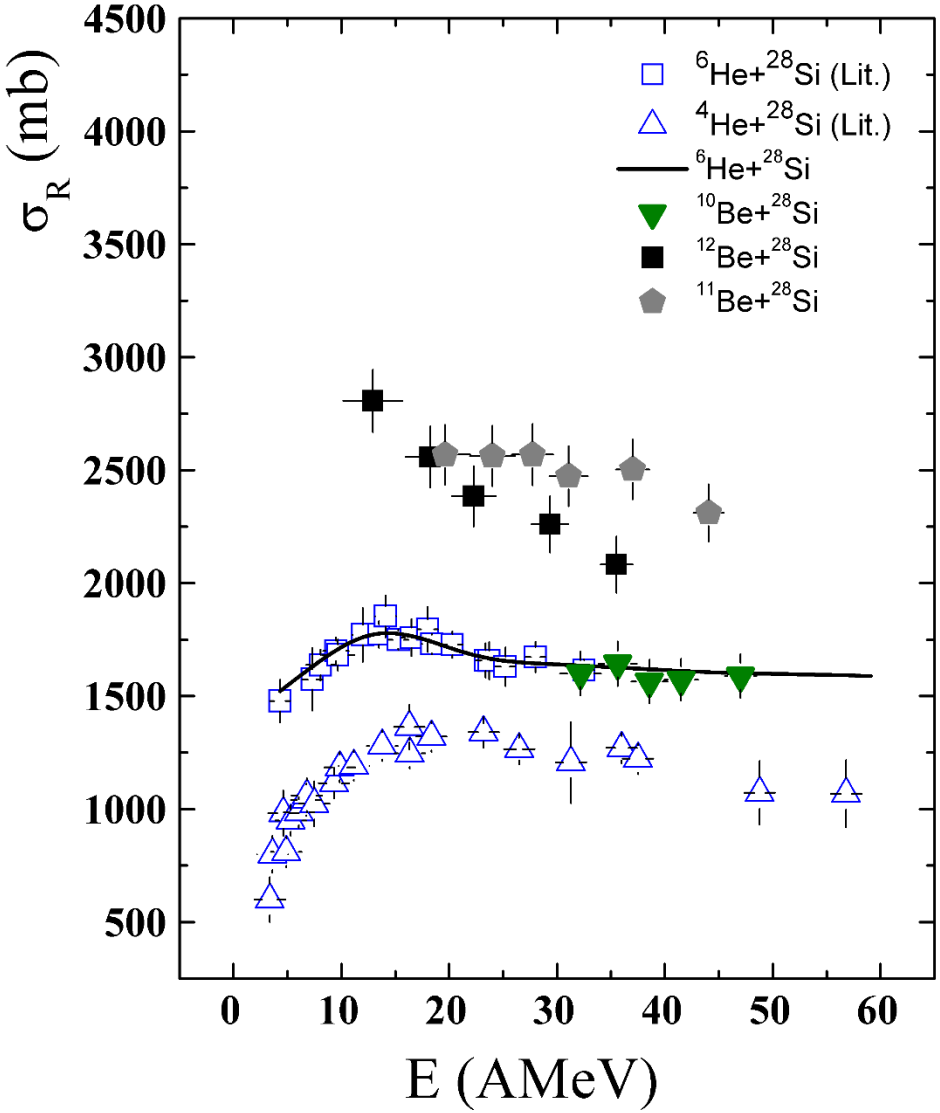
ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 8, с. 1152–1160

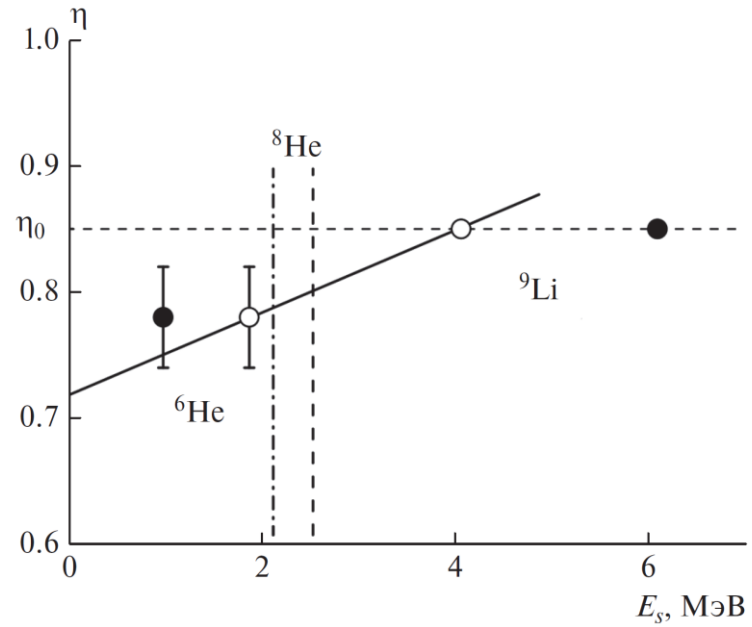
УДК 539.17:539.142:539.143

ПОЛНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ ЯДЕР ^{6,8}He, ^{9}Li НА МИШЕНЯХ ^{28}Si, ^{59}Co, ^{181}Ta

© 2020 г. Ю. Г. Соболев[1, *], Ю. Э. Пенионжкевич[1, 2], В. В. Самарин[1, 3], М. А. Науменко[1], С. С. Стукалов[1], И. Сивачек[1, 4], С. А. Крупко[1], А. Куглер[4], Ю. Лоуко[5]

Результаты $^{10,11,12}Be + ^{28}Si$

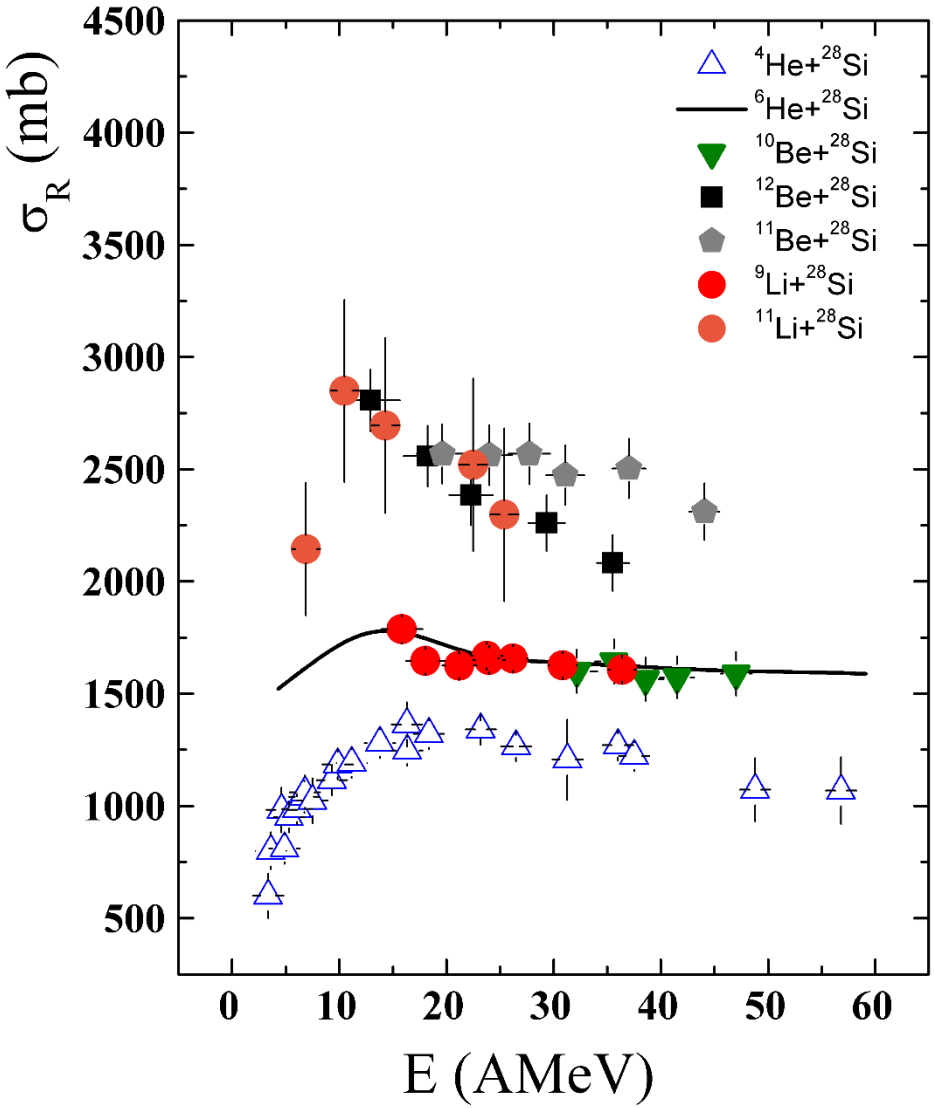


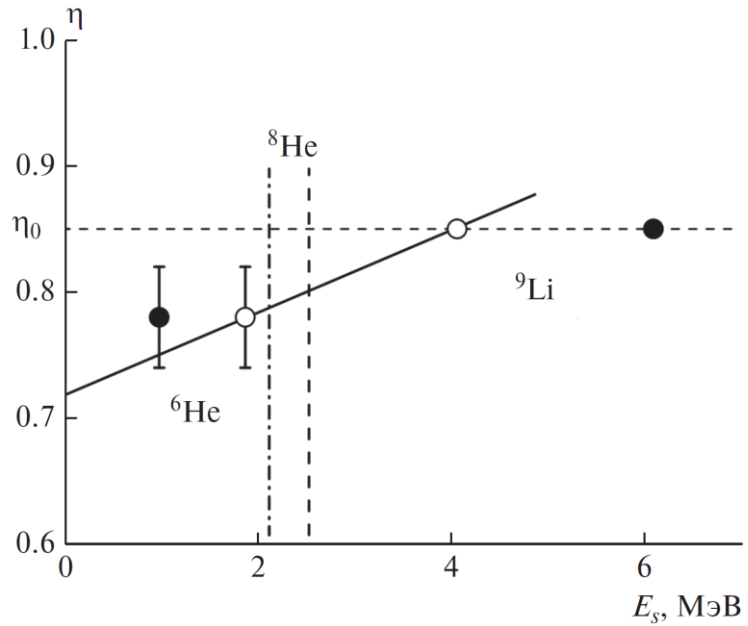


Зависимость поправки η для реакций $^{6}He + ^{28}Si$ и $^{9}Li + ^{28}Si$ от энергии E_s отделения одного (○) и двух (●) внешних нейтронов ядер ^{9}Li и ^{6}He. Сплошная линия – результат линейной интерполяции. Вертикальные линии соответствуют энергии отделения одного (штриховая линия) и двух (штрих-пунктирная линия) нейтронов от ядра ^{8}He.

Ядро	S_n, кэВ	S_{2n}, кэВ
^{6}He	1710	975
^{8}He	2535	2125
^{6}Li	5660	27380
^{7}Li	7251	12910
^{8}Li	2032	9283
^{9}Li	4062	6094
^{11}Li	396	369
^{10}Be	6812	8476
^{11}Be	501	7313
^{12}Be	3170	3672

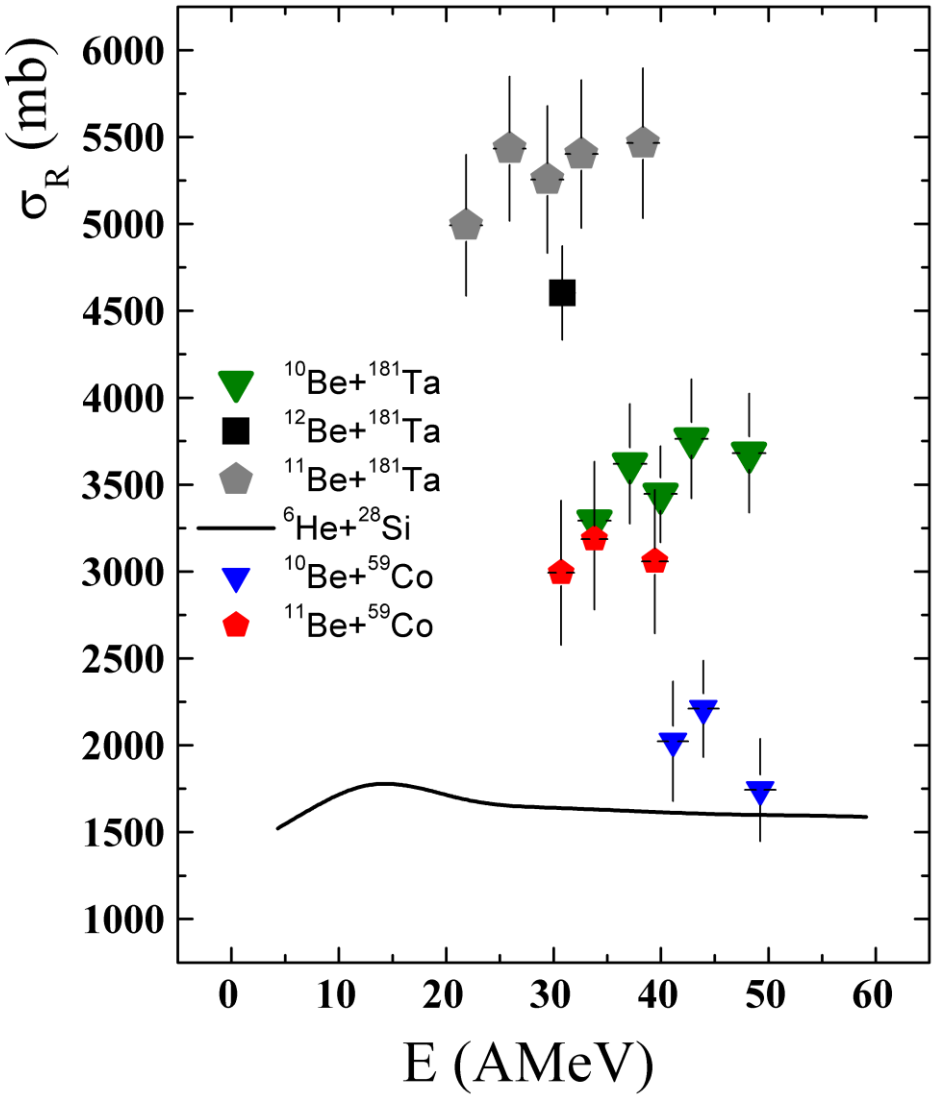
Результаты $^{10,11,12}Be + ^{28}Si$





Зависимость поправки η для реакций $^{6}He + ^{28}Si$ и $^{9}Li + ^{28}Si$ от энергии E_s отделения одного (○) и двух (●) внешних нейтронов ядер ^{9}Li и ^{6}He. Сплошная линия – результат линейной интерполяции. Вертикальные линии соответствуют энергии отделения одного (штриховая линия) и двух (штрих-пунктирная линия) нейтронов от ядра ^{8}He.

Ядро	S_n, кэВ	S_{2n}, кэВ
^{6}He	1710	975
^{8}He	2535	2125
^{6}Li	5660	27380
^{7}Li	7251	12910
^{8}Li	2032	9283
^{9}Li	4062	6094
^{11}Li	396	369
^{10}Be	6812	8476
^{11}Be	501	7313
^{12}Be	3170	3672



Результаты ^{10,11,12}Be + ^{59}Co, ^{181}Ta

Спасибо за внимание