

УДК 539.17.02

Пороговые явления в малонуклонных системах*

С. Н. Абрамович

Статья представляет собой обзор экспериментальных данных по пороговым аномалиям в малонуклонных системах. В качестве иллюстрации богатства спектроскопической информации, получаемой при изучении пороговых аномалий, рассматривается система ${}^7\text{Li} + t$ вблизи порога ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^$ ($E_x = 14,4$ МэВ, $T = 3/2$). Анализ функций возбуждения каналов реакции ${}^7\text{Li} + t$ позволил получить энергии нижайших уровней с изоспином $T = 2$ ядра ${}^{10}\text{Be}$, установить их спины и четности, а также квантовые характеристики нуклоно-нестабильного ядра ${}^{10}\text{Li}$, его массу и энергию первого возбужденного уровня.*

Пороговые явления в ядерных реакциях более полувека привлекают внимание исследователей своей уникальной возможностью детального изучения структуры ядер вблизи энергетического порога открытия какого-либо канала реакции, так как при этом происходит резкое изменение энергетической зависимости физических величин, характеризующих составную систему, которое вызвано ее радикальной внутренней перестройкой. Сохранение потока вероятности приводит к унитарности матрицы столкновений, что вместе с требованием аналитичности амплитуды реакции, обусловленной принципом причинности, является основой формального аппарата теории пороговых явлений (ТПЯ). Приведем цитату из монографии «Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике» Базя А. И., Зельдовича Я. Б. и Переломова А. М. [1]:

«Изучение пороговой аномалии позволяет получить много сведений:

- 1) отношение наклонов кривой сечения до и после порога определяет величину диагональных элементов матрицы рассеяния;
- 2) угловое распределение дает модуль амплитуды рассеяния;
- 3) угловое распределение аномального члена позволяет определить величину орбитального момента, а затем найти все фазы упругого рассеяния;
- 4) абсолютная величина аномалии дает величину полного сечения реакции;
- 5) четность и величина орбитального момента дают сведения об относительной четности пар ядер во входном и выходном каналах и определяют величину спина остаточного ядра».

Особенности поведения дифференциальных и полных сечений каналов реакции и упругого рассеяния вблизи порога одного из каналов были предсказаны Е. Вигнером в 1948 г. [2]. Через десятилетие (в 1957 г.) Г. Брейтом [3] и А. Базем [4] была построена последовательная ТПЯ, которая обобщена Л. М. Лазаревым [6] на основе микроскопической теории Фешбаха [5] на случай многочастичных реакций и резонансов в составном ядре вблизи порога.

Настоящая статья представляет собой обзор экспериментальных данных по пороговым аномалиям в малонуклонных системах. Следует отметить, что в [7] рассматривались работы по пороговым аномалиям в реакциях на ядрах среднего и большого веса, таким образом, настоящая работа спровоцирована ей и является ее естественным дополнением. Малонуклонные системы являются наиболее удобными объектами для изучения пороговых явлений из-за сравнительно низкой плотности состояний составной системы в районе порога [8]. В работах [9–13] обнаруже-

*Известия РАН, сер. физ., 2015, т. 79, № 7, с. 914–919.

ны пороговые аномалии большой амплитуды в полных сечениях реакций ${}^7\text{Li}({}^3\text{He}, p){}^9\text{Be}$, ${}^3\text{H}({}^7\text{Li}, p){}^9\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$, ${}^{10}\text{Be}(\alpha, p){}^{13}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}(t, p){}^{13}\text{B}$.

Рассмотрим использование анализа пороговых аномалий на примере исследования свойств состояний с $T = 2$ в ядре ${}^{10}\text{Be}$ по аномалии в реакции ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$. На рис. 1 изображены экспериментальные данные, полученные в работе [13].

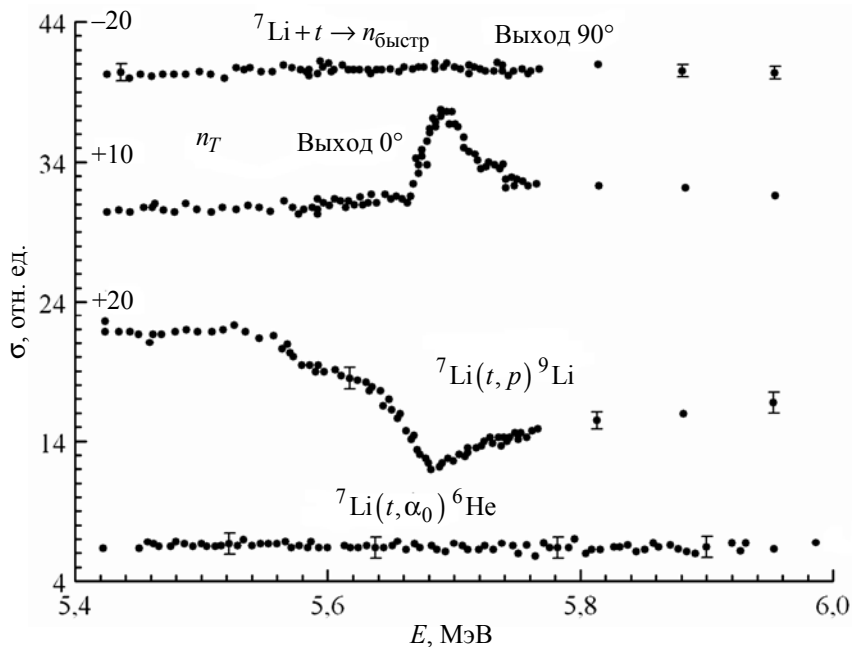


Рис. 1. Сечения реакций ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$, ${}^7\text{Li}(t, \alpha){}^6\text{He}$ вблизи первого порога канала ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$)

Напомним основные факты (рис. 1):

– центр аномалии находится вблизи порога зеркальной относительно ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$ реакции ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 14,4$ МэВ);

– форма выхода пороговых нейтронов канала ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 14,4$ МэВ) соответствует порогу с орбитальным моментом $l_n = 0$;

- в других каналах аномалия отсутствует;
- ступенчатая и асимметричная форма аномалии;
- малая протяженность аномалии (≈ 100 кэВ);
- большая амплитуда аномалии (размах ≈ 30 %).

Выводы:

- аномалия вызвана интерференцией порога с двумя узкими компаунд-состояниями ядра ${}^{10}\text{Be}$;
- эти состояния имеют изоспин $T = 2$;
- нижние $T = 2$ состояния в ${}^{10}\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Li}$ представляют собой тесные дублеты (величина расщепления ≈ 100 кэВ);

– большая величина аномалии может быть обусловлена только s -порогом (т. е. нейтроны в пороге рождаются с орбитальным моментом $l_n = 0$), отсюда отрицательная четность нижних $T = 2$ состояний в ${}^{10}\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Li}$.

В работе [8] на основе ТПЯ, развитой в [6], получено аналитическое выражение для зависимости от энергии полного сечения реакции ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$ вблизи порога ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 14,4$ МэВ). Результаты подгонки этого выражения по методу χ^2_{\min} под экспериментальные данные из [13] представлены в табл. 1 и на рис. 2 [14]. Из рисунка и таблицы видно, что только вариант с двумя уровнями отрицательной четности описывает наблюдаемую картину. Свойства обнаруженных $T = 2$ состояний ${}^{10}\text{Be}$ приведены в табл. 2 [14]. Наличие близко лежащего к уровню с высоким T нейтронного порога облегчает теоретический анализ по двум причинам:

- интерференция уровня и порогового состояния значительно усиливает пороговый эффект;
- может быть применена теория пороговых явлений [6], которая позволяет определить четности уровней, их энергию, полные ширины, парциальные ширины, вклады нерезонансных процессов и найти степень связи каналов реакции.

Таблица 1

Двухуровневое описание аномалии в составном ядре ${}^{10}\text{Be}$

Четности уровней	χ^2_{\min}	$E_{1ур}$, МэВ	$\Gamma_{1ур}$, МэВ	$E_{2ур}$, МэВ	$\Gamma_{2ур}$, МэВ
--	127	5,595	0,114	5,687	0,086
+ -	238	5,326	1,22	5,651	0,083
++	338	5,250	1,578	5,696	0,080

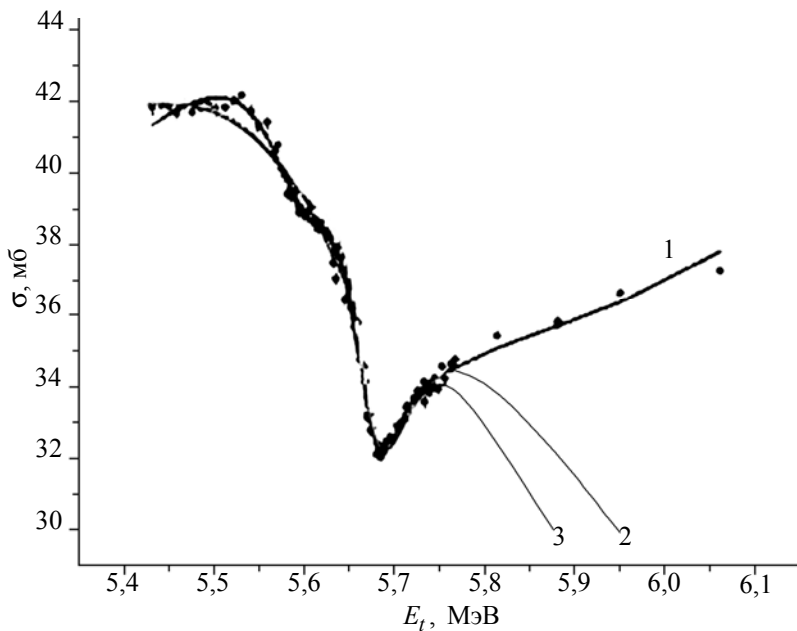


Рис. 2. Двухуровневое описание аномалии в реакции ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$:
 1 – оба уровня отрицательной четности; 2 – один отрицательной четности, другой – положительной; 3 – оба уровня положительной четности

Так как $T = 2$ состояния ${}^{10}\text{Be}$ являются аналогами основного и первого возбужденного состояний ядра ${}^{10}\text{Li}$, с помощью изобарических мультиплетных массовых уравнений и систематики энергий кулоновской перестройки [15, 16] удастся предсказать свойства этих состояний ядра ${}^{10}\text{Li}$ (табл. 3).

Таблица 2

Свойства нижайших $T = 2$ состояний ^{10}Be
(γ^n и γ^p – приведенные нейтронная и протонная ширины)

Энергия возбуждения, МэВ	Спин, четность	Изоспин	Полная ширина Γ , кэВ	$(\gamma^n/\gamma^p)^2$
21,168(42)	1^-	2	80	3,32
21,232(69)	2^-	2	60	32,9

Таблица 3

Свойства основного и первого возбужденного состояний ядра ^{10}Li
(Γ_n – нейтронная ширина, S_n – энергия связи нейтрона, γ_n – приведенная нейтронная ширина)

Энергия возбуждения, МэВ	Спин, четность, изоспин	$\Gamma \approx \Gamma_n$, кэВ	$(\gamma_n)^2$, кэВ	S_n , кэВ
0	$2^-, 2$	57	336	-27
0,061	$1^-, 2$	12	40	-88

Отметим, что отрицательная четность основного состояния ядра ^{10}Li находится в противоречии с предсказаниями стандартной оболочечной модели [17]. Это аномальное поведение последовательности заполнения уровней объясняется в [18].

Большую интенсивность проявления пороговой аномалии в канале $^7\text{Li}(t, p)^9\text{Li}$ А. И. Базь объяснил изоспиновой связью этого канала с пороговым каналом $^7\text{Li}(t, n)^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 14,4$ МэВ) [19].

Следует ожидать появление аномалии вблизи порога канала $^7\text{Li}(t, n)^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 16,98$ МэВ), энергия которого составляет около 9,3 МэВ. Экспериментальное подтверждение этого в рамках методики регистрации равновесной активности ^9Li , как это делалось в работе [13], осуществить невозможно из-за открытия канала $^7\text{Li}(t, d)^8\text{Li}$ при энергии ускоренных тритонов около 6 МэВ, так как β -спектр распада ^8Li «накрывает» β -спектр от ^9Li . Разделить их вклады можно, используя разницу в периодах полураспада. Для этого была разработана методика пульсирующего пучка ускоренных ионов [20]. На рис. 3 приведены результаты этих экспериментов. Действительно, при энергии 9,3 МэВ в функции возбуждения канала $^7\text{Li}(t, p)^9\text{Li}$ на рис. 3 при должной фантазии можно разглядеть «перелом», который следует интерпретировать как пороговую аномалию, вызванную открытием канала $^7\text{Li}(t, n)^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 16,98$ МэВ).

Как уже упоминалось выше, измерение дифференциальных сечений в пороговой области дает гораздо больше спектроскопической информации, чем в случае использования полных сечений [1]. Однако для реакции $^7\text{Li}(t, p)^9\text{Li}$ осуществление этих измерений встречает значительные трудности из-за малой энергии протонов в районе аномалии.

Аналогичная пороговая аномалия обнаружена в полном сечении реакции $^7\text{Li}(^3\text{He}, p)^9\text{Be}$ [9]. На рис. 4 представлены результаты измерений выходов γ -квантов из возбужденных состояний ядер ^9Be и ^9B , образующихся при бомбардировке ионами ^3He мишени из ^7Li в результате реакций $^7\text{Li}(^3\text{He}, p)^9\text{Be}$ и $^7\text{Li}(^3\text{He}, n)^9\text{B}$ [9]. Вблизи порога канала $^7\text{Li}(^3\text{He}, n)^9\text{Be}^*$ ($T = 3/2$) наблюдается аномалия, которая обусловлена интерференцией порога и уровней с $T = 2$ компаунд-ядра ^{10}B .

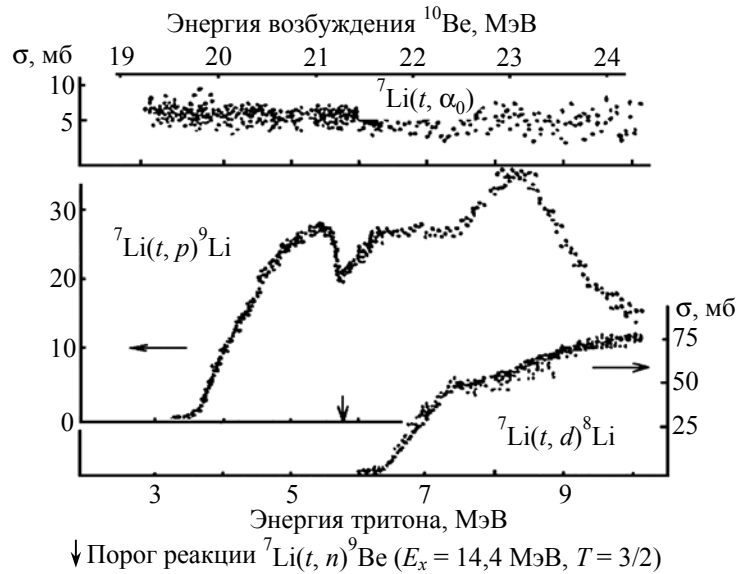


Рис. 3. Результаты измерений сечений каналов реакции $^7\text{Li} + t$ в режиме пульсирующего пучка ускоренных ионов

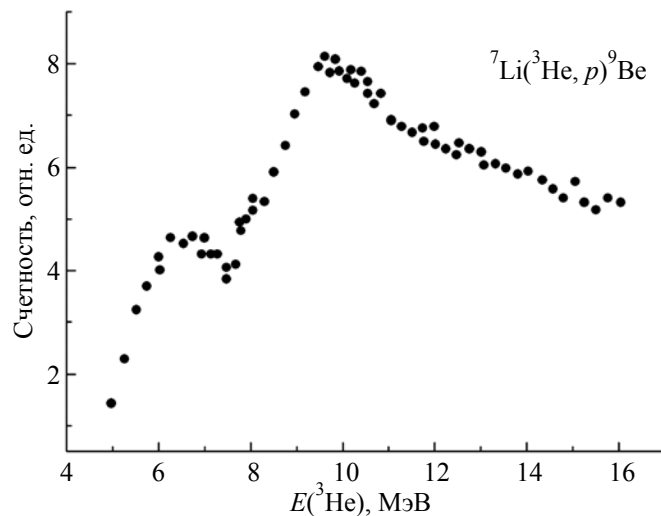


Рис. 4. Выход гамма-квантов из реакции $^7\text{Li} + ^3\text{He}$ (данные из [9])

Анализ этих данных с помощью ТПЯ приводит к большим погрешностям получаемых параметров теории из-за недостаточной экспериментальной обусловленности этих величин [6].

Более сложная ситуация рассмотрена в работах [6, 8] при анализе экспериментальных данных по дифференциальным сечениям упругого рассеяния протонов на ^7Li [20].

В исследованном интервале энергий налетающих протонов 1–2,5 МэВ находятся два порога в каналах $^7\text{Li}(p, n_0)^7\text{Be}$ и $^7\text{Li}(p, n_1)^7\text{Be}^*$ и четыре резонанса составного ядра ^8Be . ТПЯ успешно описала и объяснила эту сложную ситуацию [6]. О качестве описания экспериментальных данных можно судить по рис. 5. В табл. 4 приведены значения энергии и ширины этих резонансов, полученные в результате анализа функций возбуждения дифференциальных сечений упругого рассеяния под разными углами с помощью ТПЯ, в сравнении с данными работы [22].

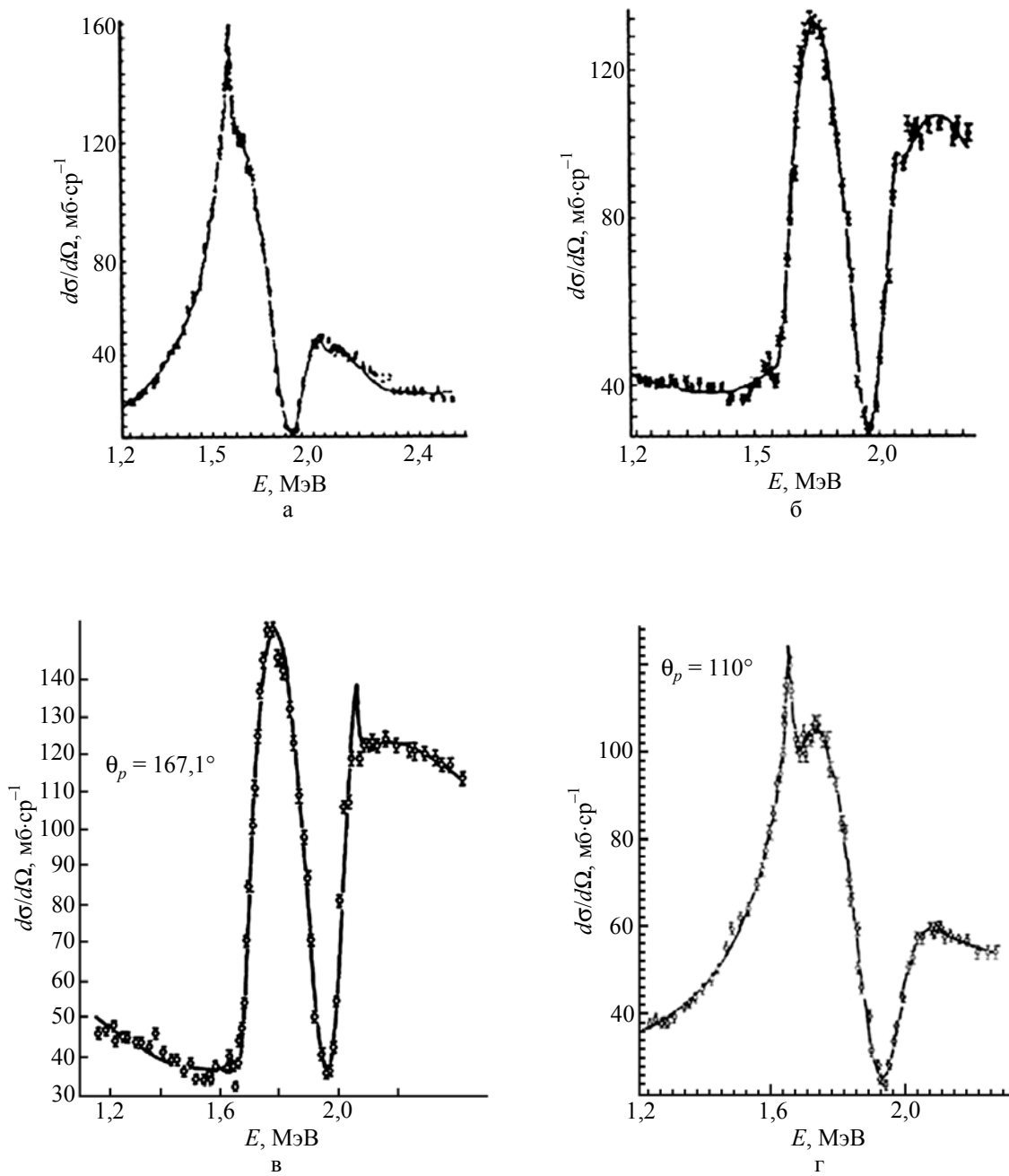


Рис. 5. Дифференциальные сечения ${}^7\text{Li}(p, p_0){}^7\text{Li}$ под углами 90° (а), 150° (б), 167° (в) и 110° (г). Экспериментальные данные из [21]. Сплошная линия – описание с помощью ТПЯ [6]

Параметры резонансов из анализа ${}^7\text{Li}(p, p_0){}^7\text{Li}$ с помощью ТПЯ. Энергии резонансов и их ширины приведены в МэВ в системе центра масс

Параметр	Угол рассеяния, градус						Среднее	Данные [22]
	70	90	110	130	150	167,1		
Число точек	74	97	73	79	69	73		
$\min \chi^2$	107	263	92	306	319	545		
$E_r, J^\pi = 2^-$	1,654	1,650	1,657	1,654	1,664	1,670	1,654	1,656
Γ	0,0496	0,0478	0,0486	0,0480	0,0740	0,0752	0,0485	0,122
$E_r, J^\pi = 3^+$	1,802	1,804	1,809	1,803	1,789	1,796	1,801	1,816±0,03
Γ	0,281	0,301	0,275	0,290	0,318	0,301	0,295	0,270±0,020
$E_r, J^\pi = 3^+$	1,965	1,965	1,959	1,964	1,950	1,978	1,963	1,986±0,025
Γ	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,230±0,03
$E_r, J^\pi = 1^-$	2,145	2,145	2,145	2,145	2,145	2,145	2,145	2,146
Γ	0,651	0,637	0,636	0,649	0,641	0,626	0,640	~0,650

Следует прокомментировать существенное различие средней ширины резонанса с $E_r = 1,654$ МэВ с данными обзора [22]. В предшествующих работах (например, [23]) приведено значение этой ширины 48 ± 20 кэВ, что находится в удовлетворительном согласии со средним значением из табл. 4.

Пороговые аномалии были также обнаружены в реакции ${}^9\text{Be} + d$ [24]. На рис. 6 представлен фрагмент функции возбуждения полного сечения образования нейтронов в реакции ${}^9\text{Be} + d$. Из рисунка видно, что в пороговых областях наблюдаются нерегулярности, которые можно истолковать как проявление пороговых аномалий. Однако экспериментальные данные слишком бедны, чтобы делать какие-либо серьезные заключения по этому поводу. Эксперимент с хорошим энергетическим разрешением и малым шагом по энергии при анализе результатов с помощью ТПЯ, возможно, помог бы установить свойства ряда уровней ядер ${}^{10,11}\text{B}$, как это удалось сделать для ядер ${}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{10}\text{Li}$.

В работе [12] сообщается об обнаружении в функции возбуждения полного сечения реакции ${}^{10}\text{Be}(\alpha, p){}^{13}\text{B}$ аномальной структуры вблизи порога ${}^{10}\text{Be}(\alpha, n){}^{13}\text{C}^*$ ($T = 3/2$, $E_x = 15,108$ МэВ) (рис. 7). В связи с этим было проведено исследование пороговой области энергии возбуждения составного ядра ${}^{14}\text{C}$ в реакции ${}^{11}\text{Be}(t, p){}^{13}\text{C}$ [25]. Результаты приведены на рис. 7, 8. Однако бедность экспериментальных данных не позволяет провести полноценный анализ с помощью ТПЯ.

Следует отметить существующий дефицит полноценных экспериментальных данных, необходимых для проведения анализа с помощью ТПЯ, особенно результатов измерения дифференциальных сечений [8]. Требования к экспериментальным данным, необходимым для полного анализа, следующие: функции возбуждения должны измеряться по всем открытым каналам с погрешностями не хуже 3–5 %; число экспериментальных точек в пороговой области должно составлять порядка сотни; разрешение по энергии – не хуже 10 кэВ. Очень информативными являются эксперименты с поляризованным пучком и мишенью.

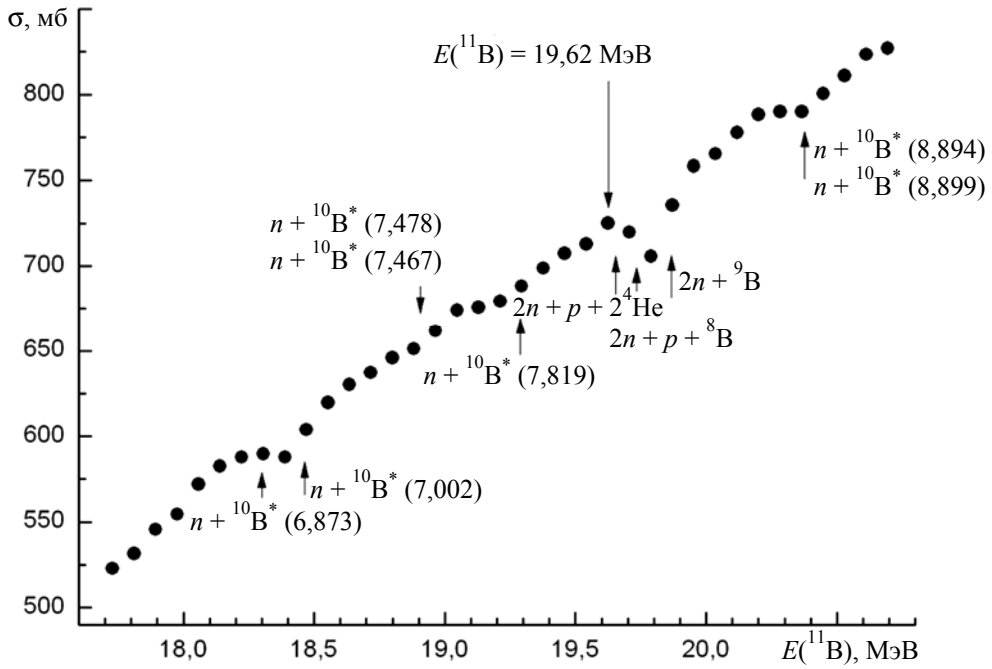


Рис. 6. Функция возбуждения реакции ${}^9\text{Be}(d, xn)$

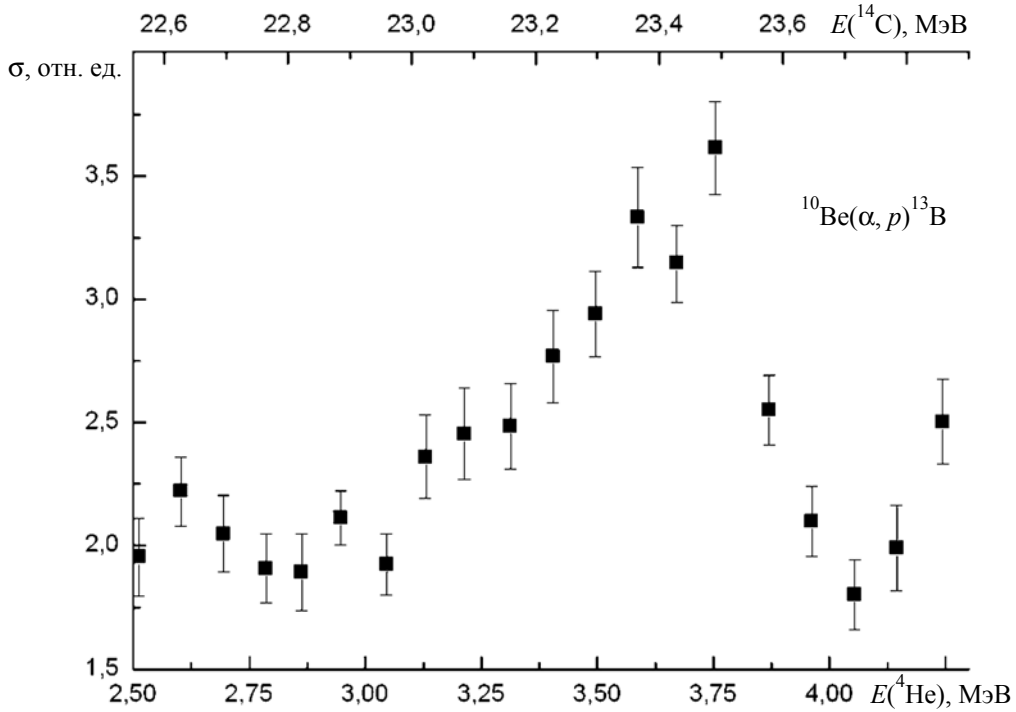


Рис. 7. Полное сечение реакции ${}^{10}\text{Be}(\alpha, n){}^{13}\text{C}$ (данные из [12])

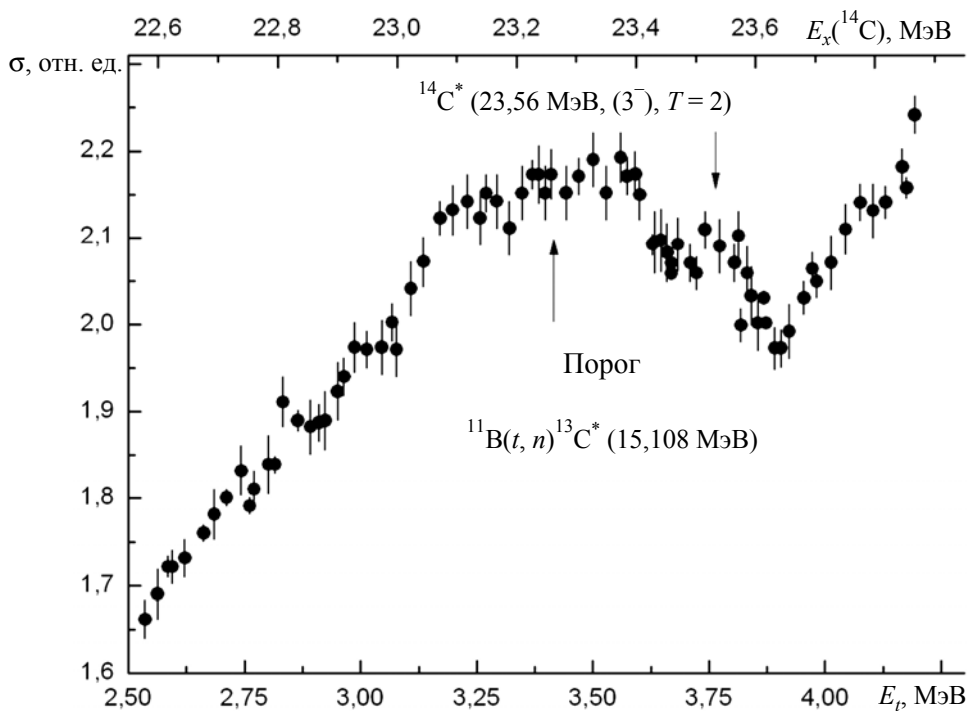


Рис. 8. Полное сечение реакции $^{11}\text{B}(t, p)^{13}\text{B}$ (данные из [25])

Список литературы

1. Базь А. И., Зельдович Я. Б., Переломов А. М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. – М.: Наука, 1966.
2. Wigner E. P. // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 1002.
3. Breit G. // Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1612.
4. Базь А. И. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 923.
5. Feshbach Н. // Ann. Phys. 1958. Vol. 5. P. 357.
6. Лазарев Л. М. Теория пороговых явлений и спектроскопия легких ядер. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007.
7. Comisel Н., Hategan С., Wolter Н. Н. // ЭЧАЯ. 2010. Т. 41. Вып. 4. С. 1075.
8. Абрамович С. Н., Гужовский Б. Я., Лазарев Л. М. // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. Вып. 2. С. 305.
9. Barnes С. А. Nuclear Isospin // Proc. Conf. Vol. 4. (Acad. Press. Asilomar, California, 1969). P. 179.
10. Chen Y.-S., Harrison W. D., Tombrello T. A. // VAPS. 1970. Vol. 15. P. 1598.
11. Гужовский Б. Я., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г., Трусилло С. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ., 1973. Т. 37. С. 1967.

12. Goosman D. R., Gorodetsky P. A. // BAPS. 1974. Vol. 19. P. 432.
13. Гужовский Б. Я., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г., Трусилло С. В. // ЯФ. 1979. Т. 30. С. 1276.
14. Абрамович С. Н., Гужовский Б. Я., Лазарев Л. М. // ЭЧАЯ. 1995. Т. 26. Вып. 4. С. 1001.
15. Nolen J. A., Schiffer F. J. P. // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1969. Vol. 19. P. 471.
16. Antony M. S., Britz J., Vueb J. B., Pape A. // ADNDT. 1985. Vol. 33. P. 447.
17. Popelier N. A. F. M., Wood L. D., Glaudemans P. W. M. // Phys. Lett. 1985. Vol. 157B, P. 120.
18. Barker F. C., Heckey G. T. J. // Phys. G: Nucl. Phys. 1977. Vol. 3. P. L23.
19. Абрамович С. Н., Базь А. И., Гужовский Б. Я. // ЯФ. 1980. Т. 32. С. 402.
20. Абрамович С. Н., Гужовский Б. Я., Дунаева С. А., Звенигородский А. Г., Трусилло С. В. // ВАНИТ. Сер. ядерные константы. 1985. Вып. 2. С. 14.
21. Brown L., Steiner E., Arnold L., Seiler R. // Nucl. Phys. 1973. Vol. A206. P. 353.
22. Ajzenberg-Selove F. // Nucl. Phys. 1988. Vol. A490. P. 86.
23. Ajzenberg-Selove F., Lauritsen T. // Nucl. Phys. 1974. Vol. A227. P. 87.
24. Генералов Л. Н., Абрамович С. Н., Звенигородский А. Г. // Изв. АН. Сер. физ. 1999. Т. 63. С. 78.
25. Генералов Л. Н., Звенигородский А. Г., Абрамович С. Н., Карпов И. А., Виноградов Ю. И. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 6. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2004. С. 94.

Threshold phenomena in few-nucleon systems

S. N. Abramovich

The report represents a review of experimental data on threshold anomalies in a few nucleon systems. As an illustration of wealth of spectroscopy information, obtained when studying threshold anomalies, the system ${}^7\text{Li}+t$ near the threshold ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^$ ($E_x = 14,4$ MeV, $T = 3/2$) is considered. Analysis of excitation functions of ${}^7\text{Li}+t$ reaction channels has allowed obtaining of energy of the lowest levels with isospin $T = 2$ of nuclei ${}^{10}\text{Be}$, determination of their spins and parities, as well as quantum characteristics of nucleon-unstable nucleus ${}^{10}\text{Li}$, its mass and energy of the first excited level.*