

НЕЭЙКОНАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЧЕНИЯХ РЕАКЦИЙ ПРОТОНОВ С ЯДРАМИ

В.П. Заварзина

УДК 539.17.01

Проведен расчет сечений реакций под действием протонов на ядрах с A от 12 до 208 при энергиях 40-1000 МэВ в рамках оптической модели с учетом неэйкональных эффектов. Полученные сечения сравниваются с результатами точных расчетов.

Эйкональное приближение (ЭП) используется при описании по оптической модели взаимодействия адронов с ядрами в области промежуточных и даже низких энергий. Так, в работах /1,2/ в рамках ЭП на основе экспериментальных полных NN сечений были рассчитаны сечения реакций σ_R протонов на ядрах с A от 12 до 208 в широкой области энергий (40-1000 МэВ). Результаты расчета оказались довольно близкими к экспериментальным данным несмотря на то, что хорошо известный критерий применимости ЭП не всегда удовлетворялся.

Похожая ситуация имеет место и при взаимодействии пионов с легкими ядрами в области $\Delta_{3,3}$ -резонанса. В работе /3/ было показано, что неэйкональные эффекты в полных сечениях и в сечениях реакций сравнительно малы ($\leq 10\%$) даже при $|V_0|/E \geq 1$, если поглощение достаточно велико. В этом случае величина относительной неэйкональной поправки $\delta\sigma_R/\sigma_R^e$ убывает при возрастании $|\text{Im}V_0|$. Здесь V_0 — параметр глубины оптического потенциала (ОП):

$$V(\vec{r}) = \text{Re}V_0 f_R(\vec{r}) + i\text{Im}V_0 f_I(\vec{r}).$$

Для протонов с энергией < 100 МэВ величина $|\text{Im}V_0|/E$ невелика и возможность применения ЭП не является очевидной. В области энергий ≥ 200 МэВ, где $\text{Re}V_0/E \leq 0,1$, следует ожидать, что неэйкональная поправка, которая пропорциональна $\text{Re}V_0$, мала

С целью изучения E - и A -зависимостей неэйкональных эффектов в настоящей работе были проведены расчеты сечений реакций для протонов при $E =$

= 40-1000 МэВ на различных ядрах. Расчеты выполнены на основе высоко-энергетического приближения, использованного ранее в [3] для изучения пион-ядерного взаимодействия.

Выражения для эйконального сечения реакций σ_R^e и неэйкональной поправки $\delta\sigma_R$ в случае центрально-симметричного потенциала можно представить в виде [3]:

$$\begin{aligned}\sigma_R^{(1)}(k) &= \sigma_R^e(k) + \delta\sigma_R(k), \\ \sigma_R^e(k) &= 2\pi \int_0^\infty \rho d\rho [1 - \exp(-k |\text{Im} U_0| \int_{-\infty}^\infty f_I(\vec{r}) dz)], \\ \delta\sigma_R(k) &= k \text{Re} U_0 |\text{Im} U_0| 2\pi \int_0^\infty \rho d\rho \exp(-k |\text{Im} U_0| \int_{-\infty}^\infty f_I(\vec{r}) dz) \times \\ &\times \int_{-\infty}^\infty dz (1 + \frac{r}{2} \frac{d}{dr}) f_R(\vec{r}) f_I(\vec{r}).\end{aligned}\quad (1)$$

Безразмерный потенциал $U(\vec{r})$, входящий в релятивистское волновое уравнение с учетом энергии отдачи ядра, связан с ОП $V(\vec{r})$ соотношением [4]: $U(\vec{r}) = 2eV(\vec{r})/(\epsilon^2 - m^2 c^4)$, где $\epsilon = mc^2 + E_p + E_A$, а $E_p + E_A$ есть сумма кинетических энергий протона и ядра в системе центра масс. Формула (1) получена при учете поправок, пропорциональных $|U_0|$ и $kR|U_0|^2$, к эйкональной волновой функции протона.

В области энергий $40 < E_p < 200$ МэВ были вычислены сечения реакций σ_R для ядер ^{12}C , ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{120}Sn , ^{208}Pb с феноменологическими ОП, параметры которых определены из данных по упругому рассеянию протонов [5-9]. Для $f_R(\vec{r})$, $f_I(\vec{r})$ использовалась форма Вудса — Саксона, а при $E_p < 100$ МэВ в ОП был введен член, учитывающий поглощение в поверхностной области ядра. Поправка $\delta\sigma_R^c$ к эйкональному сечению, учитывающая кулоновское взаимодействие, определялась по формуле (1), в которой вместо $\text{Re} V(\vec{r})$ брался потенциал однородно заряженной сферы радиуса $R_c = r_c A^{1/3}$. Вклад $\Delta\sigma_R^{\text{so}}$ спин-орбитального взаимодействия учитывался в ЭП [10].

Результаты расчета $\sigma_R = \sigma_R^e + \delta\sigma_R + \delta\sigma_R^c + \Delta\sigma_R^{\text{so}}$ и отдельных слагаемых приведены в табл. 1, где вычисленные нами значения σ_R сравниваются с результатами точного расчета σ_R^T [5-9]. Видно, что относительная разность $\Delta = (\sigma_R - \sigma_R^T)/\sigma_R$ во всех случаях $< 10\%$. Неэйкональная поправка $\delta\sigma_R/\sigma_R$ везде положительна (так как в рассматриваемой области $\text{Re} V_0 < 0$) и максимальна ($\sim 14\%$) при $E_p = 40$ МэВ для всех ядер. При остальных энергиях она

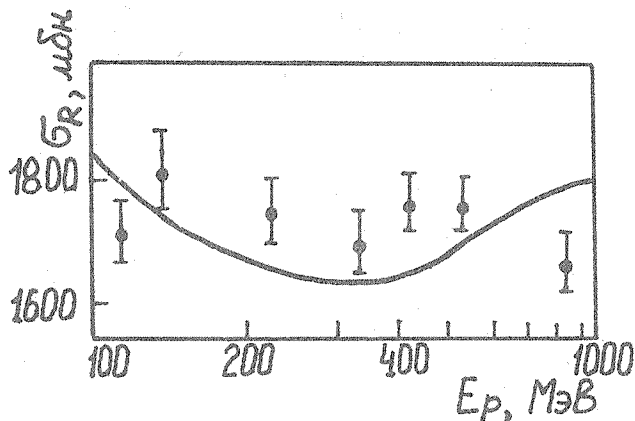
Таблица 1

Сечения реакций протонов с ядрами (в мбн) по оптической модели.

Ядро	E_p , МэВ	Расчет в высокоэнергетическом приближении					Точный расчет σ_R^T	Δ , %
		σ_R^e	$\delta\sigma_R$	$\delta\sigma_R^c$	$\Delta\sigma_R^{so}$	σ_R		
^{12}C	49	218	42	-8	0	252	243 /5/	3,5
	75	256	23	-6	-3	270	256 /5/	5
	100	240	21	-5	0	256	246 /5/	4
	156	218	6	-3	-9	212	196 /5/	7,5
^{40}Ca	40	853	119	-87	0	885	858 /6/	3
	156	528	22	-18	-4	528	487 /9/	8
^{90}Zr	40	1487	199	-261	0	1425	1375 /6/	4
	61,4	1272	146	-153	0	1265	1239 /7/	2
	100	1159	83	-89	-25	1128	1085 /8/	4
	156	884	44	-51	-26	851	801 /9/	6
^{120}Sn	40	1916	243	-387	0	1772	1704 /6/	3,5
	100	1983	112	-125	-27	1343	1296 /8/	3,5
	156	1022	52	-61	-30	983	902 /9/	8
^{208}Pb	40	2842	260	-827	0	2275	2217 /6/	2,5
	61,4	2560	116	-518	0	2158	2162 /7/	0
	100	1981	161	-243	-10	1889	1832 /8/	3
	156	1999	76	-187	-52	1836	1808 /9/	1,5

меньше 10%. Кулоновское взаимодействие, уменьшающее сечение реакций, становится существенным для средних и тяжелых ядер при $E_p < 100$ МэВ ($\sim 30\%$ для ^{208}Pb) и почти полностью компенсирует ядерную неэikonальную поправку для средних ядер. Вклад в σ_R спин-орбитального взаимодействия $\Delta\sigma_R^{so}$ оказался мал ($\leq 3\%$) во всех рассматриваемых примерах.

В области энергий $100 < E_p < 1000$ МэВ расчеты были проведены для микроскопического ОП 1-го порядка с параметрами, приведенными в работе /11/. На рис. 1 приведены энергетическая зависимость сечения реакций протонов на ^{208}Pb и соответствующие экспериментальные точки из /11/. Расчет



Р и с. 1. Энергетическая зависимость сечения реакций протонов с ядром ^{208}Pb . Экспериментальные точки взяты из [11/]

не противоречит экспериментальным данным, имеющим большую погрешность.

Таким образом, полная неэikonальная поправка (включающая как чисто ядерное слагаемое $\delta\sigma_R$, так и слагаемое $\delta\sigma_R^C$, соответствующее кулоновско-ядерной интерференции) относительно мала ($\leq 10\%$) почти для всех ядер. Для ядра ^{208}Pb она достигает величин $\sim 20\%$ при $E_p < 100$ МэВ и улучшает согласие результатов расчета с точными вычислениями. Применимость ЭП для $E_p < 100$ МэВ, по-видимому, можно объяснить компенсацией притягивающей вещественной части ядерного потенциала кулоновским отталкиванием, так что эффективная вещественная часть потенциала, определяющая неэikonальную поправку, оказывается небольшой.

Относительная кулоновская поправка $\delta\sigma_R^C/\sigma_R$, вычисленная нами, близка к фактору W/E (где W — кулоновский барьер), обычно используемому для учета вклада кулоновского взаимодействия в сечение реакций [12/]. Наши результаты показывают, что наряду с кулоновской необходимо учитывать и ядерную неэikonальную поправку, в особенности для средних ядер, где $|\delta\sigma_R^C| \sim \delta\sigma_R$.

В заключение автор выражает глубокую признательность Степанову А.В. за руководство работой и Сергееву В.А. за ценные советы и полезное обсуждение.

Институт ядерных исследований АН СССР

Поступила в редакцию
10 апреля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.J. Ernts, Phys. Rev., C19, 896 (1979).
2. N.J. DiGiacomo et al., Phys. Rev. Lett., 45, 527 (1980).
3. В.П. Заварзина, В.А. Сергеев, А.В. Степанов, Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат., 4, 1 (1981)
4. М. Гольдбергер, К. Ватсон, Теория столкновений, "Мир", М., 1967 г., с. 305.
5. I. Abdul-Jalil, D.F. Jackson, J. Phys. G, Nucl. Phys., 5, 1699 (1979).
6. M.P. Fricke et al., Phys. Rev., 156, 1207 (1967).
7. C.B. Fulmer et al., Phys. Rev., 181, 1565 (1969).
8. K. Kwiatkowski, N.S. Wall, Nucl. Phys., A301, 349 (1978).
9. V. Comparat et al., Nucl. Phys., A221, 403 (1974).
10. P.J. Glauber, in "Lectures in Theoretical Physics", ed. W.E. Brittin, N.-Y., 1959, vol. 1, p. 315.
11. L. Ray, Phys. Rev., C20, 1857 (1979).
12. Дж. Блатт, В. Вайскопф, Теоретическая ядерная физика, ИЛ, 1954 г., с. 273.