

МЕТОД ЭФФЕКТИВНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Ю. А. Поздняков

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Предложенный ранее новый подход к анализу угловых распределений упругого рассеяния тяжелых ионов обобщен на случаи, когда полные (т.е. просуммированные по всем каналам) парциальные вероятности усиления “слияния” (в общем случае полное и неполное слияние, квазиделение и реакции глубококонепругой передачи) сравнимы по величине с полными парциальными вероятностями ослабления “слияния”. Это удалось сделать с помощью эффективных полных парциальных вероятностей, каждая из которых является линейной комбинацией тех или иных фактических полных парциальных вероятностей. Показано, что введенные таким образом вероятности имеют вполне определенный физический смысл. Действительно, эффективные полные парциальные вероятности позволяют рассчитать сечение “слияния” через входной канал и некоторое опорное полное сечение периферийных процессов, сравнение с которыми рассчитанного или экспериментального соответственно сечения “слияния” или полного сечения периферийных реакций позволяет судить об усилении или ослаблении “слияния” и периферийных реакций. Также установлено, что усиление “слияния” сопровождается ослаблением периферийных реакций и наоборот.

1. Введение

Недавно был предложен [1] новый подход к анализу угловых распределений упругого рассеяния (УР) тяжелых ионов, позволивший значительно увеличить объем получаемой информации. Так, помимо величин, определяемых в рамках традиционной оптической модели, предложенный в [1] метод позволяет рассчитывать также сечение “слияния” (в общем случае сумма сечений полного и неполного слияния, квазиделения и реакций глубококонепругой передачи) σ_F и полное сечение периферийных (или квазиупругих) реакций σ_D , их распределения по парциальным волнам и количественные характеристики усиления или ослабления “слияния” и периферийных реакций.

В работе [1] было рассмотрено два приближения. В одном из них, отвечающем столкновениям сильносвязанных ионов, предполагается, что в соответствующих парциальных волнах полные (т.е. просуммированные по всем каналам) парциальные вероятности (ППВ) усиления “слияния” намного больше ППВ подавления “слияния”. Во втором приближении, наоборот, предполагается, что ППВ подавления “слияния” намного больше ППВ усиления “слияния”, что соответствует столкновениям, в которых хотя бы один из ионов является слабосвязанным.

Во многих случаях указанные приближения выполняются. Однако есть ситуации, когда это не так. Например, можно ожидать, что при УР слабосвязанных ионов тяжелыми ядрами при околорезонансных энергиях ППВ усиления “слияния” и его ослабления будут сравнимы по величине. Действительно, с одной стороны, в такой системе будет иметь место развал налетающего иона, обусловленный действием ядерных сил. Такой развал сопровождается виртуальными возбуждениями, т.е. возвратом частиц во входной канал вследствие рекомбинации (см., например, [2]). Как показано в [1], такие процессы приводят к ослаблению “слияния”. С другой стороны, развал (как ядерный, так и кулоновский) будет инициировать неполное слияние, когда один или несколько фрагментов развала сливаются с ядром-мишенью. Такие процессы приводят к усилению “слияния”. Дополнительный механизм усиления “слияния” для слабосвязанных ионов обусловлен кулоновской поляризуемостью. Вышесказанное подтверждается экспериментально. Так, например, анализ угловых распределений УР ${}^9\text{Be}$ на ${}^{209}\text{Bi}$ при околорезонансных энергиях [3] показал, что

полученный в результате подгонки оптический потенциал на радиусе сильного поглощения равен или превышает величину потенциала двойной свертки [4]. Хотя известно (см., например, [4]), что для описания угловых распределений УР слабосвязанных частиц потенциал двойной свертки приходится ослаблять.

Из вышесказанного следует, что представленный в работе [1] метод анализа угловых распределений УР тяжелых ионов необходимо модифицировать таким образом, чтобы его можно было применять и в таких ситуациях, когда ППВ усиления “слияния” сравнимы по величине с ППВ его ослабления. Такая модификация и является целью настоящей работы.

2. Эффективные вероятности

Ниже будут обсуждаться вероятности и сечения различных процессов, протекающих при столкновении двух тяжелых ионов. Поэтому необходимо кратко охарактеризовать их. В работе [1] все каналы реакций, отличные от канала УР, разбиты на две группы. В первую (группа D) входят все периферийные реакции, а во вторую (группа F) – все реакции, которые возбуждаются при большом перекрытии плотностей сталкивающихся ядер (выше для обозначения реакций этой группы для краткости введен термин “слияние”). ППВ этих реакций обозначим через $P_{l,D}$ и $P_{l,F}$ (l – угловой момент во входном канале), а соответствующие сечения – через σ_D и σ_F . Вероятность $P_{l,F}$ состоит из двух слагаемых. Первое $P_{l,EF}$ является ППВ возбуждения реакций группы F через входной канал, а второе $P_{l,DF}$ – ППВ многоступенчатого возбуждения реакций этой группы. Если в системе имеет место кулоновская поляризуемость налетающего иона, то она также вносит вклад в $P_{l,DF}$. Соответствующие сечения обозначим через σ_{EF} и σ_{DF} . В случае слабосвязанных ионов виртуальный развал налетающей частицы, обусловленный ядерными силами, приводит к подавлению реакций группы F с ППВ $P_{l,HF}$. Соответствующее уменьшение сечения σ_F обозначим через σ_{HF} .

Кроме ППВ периферийных реакций $P_{l,D}$ также вводятся ППВ периферийных процессов $P_{l,ED}$, которые отличаются от вероятностей $P_{l,D}$ из-за того, что часть реакций, возбуждаемых в периферийной области, на втором этапе завершается либо возвратом во входной канал (виртуальные возбуждения, в частности виртуальный развал), либо возбуждением реакций группы F (многоступенчатые реакции группы F , в частности многоступенчатое слияние).

Описанные выше вероятности выражаются через S -матричные элементы УР S_l , $\tilde{S}_l^{(0)}$ и $S_l^{(0)}$. Все они рассчитываются по модели УР с граничными условиями типа сходящихся волн [5 – 8]. S_l получаются в результате подгонки теоретического дифференциального сечения УР к экспериментальному. $\tilde{S}_l^{(0)}$ и $S_l^{(0)}$ рассчитываются с тождественно равной нулю мнимой частью оптического потенциала с перенормированным и перенормированным потенциалом двойной свертки, соответственно.

Таким образом, в представленном в работе [1] методе анализа угловых распределений УР тяжелых ионов фигурируют шесть ППВ, которые необходимо найти. Это – $P_{l,F}$, $P_{l,D}$, $P_{l,EF}$, $P_{l,DF}$, $P_{l,HF}$ и $P_{l,ED}$. Две из них, $P_{l,F}$ и $P_{l,D}$, можно найти независимо от остальных. Они даются выражениями

$$P_{l,F} = \frac{|S_l|^2}{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2} \left(1 - |\tilde{S}_l^{(0)}|^2 \right), \quad (1)$$

$$P_{l,D} = 1 - \frac{|S_l|^2}{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2}. \quad (2)$$

Остальные вероятности удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} P_{l,EF} + P_{l,DF} = P_{l,F}, \\ P_{l,EF} = \left(1 - |S_l^{(0)}|^2\right) \cdot (1 - P_{l,ED}), \\ P_{l,DF} - P_{l,HF} = \left(1 - \frac{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2}{|S_l^{(0)}|^2}\right) (1 - P_{l,D}). \end{cases} \quad (3)$$

Как видим, для определения четырех ППВ, $P_{l,EF}$, $P_{l,DF}$, $P_{l,HF}$ и $P_{l,ED}$, имеется всего три уравнения. Поэтому метод [1] не позволяет найти одновременно вероятности $P_{l,DF}$ и $P_{l,HF}$. Однако проблему можно решить введением эффективных ППВ, которые, как будет показано ниже, имеют вполне определенный физический смысл.

Итак, предположим, что в некоторой системе усиление реакций группы F , т.е. “слияния”, преобладает над ослаблением. Введем эффективную ППВ усиления “слияния”

$$\mathcal{P}_{l,DF} \equiv P_{l,DF} - P_{l,HF} = \frac{|S_l|^2}{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2} \left(1 - \frac{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2}{|S_l^{(0)}|^2}\right). \quad (4)$$

В противном случае введем эффективную ППВ подавления “слияния”

$$\mathcal{P}_{l,HF} \equiv P_{l,HF} - P_{l,DF} = \frac{|S_l|^2}{|S_l^{(0)}|^2} \left(1 - \frac{|S_l^{(0)}|^2}{|\tilde{S}_l^{(0)}|^2}\right). \quad (5)$$

Правые части формул (4) и (5) получаются подстановкой в третье уравнение системы (3) выражения (2) для вероятности $P_{l,D}$. Физический смысл вероятностей $\mathcal{P}_{l,DF}$ и $\mathcal{P}_{l,HF}$ ясен. Они являются наблюдаемыми ППВ усиления или ослабления реакций группы F соответственно. Т.е. именно с этими вероятностями связано различие между измеряемыми сечениями “слияния” и рассчитываемыми тем или иным способом (например, по модели проницаемости барьера [9, 10]) сечениями “слияния” через входной канал. Отметим, что не исключена ситуация, когда в одной группе волн будет иметь место усиление “слияния”, а в другой – ослабление. Однако обнаружить это в расчетах можно лишь при использовании l -зависимого оптического потенциала.

Теперь в левой части первого уравнения системы (3) добавим и вычтем вероятность $P_{l,HF}$. Если в системе усиление “слияния” преобладает над его подавлением, то полученное уравнение принимает вид

$$\mathcal{P}_{l,EF} + \mathcal{P}_{l,DF} = P_{l,F}. \quad (6)$$

Если же, наоборот, подавление “слияния” преобладает над его усилением, то получаем уравнение

$$\mathcal{P}_{l,EF} - \mathcal{P}_{l,HF} = P_{l,F}. \quad (7)$$

Появившаяся в формулах (6) и (7) вероятность $\mathcal{P}_{l,EF}$ является эффективной ППВ возбуждения реакций группы F через входной канал. Она определяется следующим образом:

$$\mathcal{P}_{l,EF} \equiv P_{l,EF} + P_{l,HF} = \frac{|S_l|^2}{|S_l^{(0)}|^2} \left(1 - |S_l^{(0)}|^2 \right). \quad (8)$$

Правую часть (8) можно получить из любой из формул, (6) или (7), воспользовавшись выражениями (1) и (4) или (5) для $P_{l,F}$ и $\mathcal{P}_{l,DF}$ или $\mathcal{P}_{l,HF}$ соответственно.

Согласно формуле (8) вероятность $\mathcal{P}_{l,EF}$ превышает фактическую вероятность “слияния” через входной канал $P_{l,EF}$ на величину $P_{l,HF}$. Однако сравнение формул (1) и (8) показывает, что вероятности $\mathcal{P}_{l,EF}$ являются ППВ “слияния” в том случае, когда в системе отсутствует как усиление “слияния”, так и его ослабление (согласно [1] в такой ситуации для описания углового распределения УР не требуется перенормировка потенциала свертки и, следовательно, $\tilde{S}_l^{(0)} = S_l^{(0)}$). Значит, рассчитанное с вероятностями $\mathcal{P}_{l,EF}$ сечение

$$\sigma_{EF} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \mathcal{P}_{l,EF}, \quad (9)$$

где k – волновое число в канале УР, является именно тем сечением, с которым следует сравнивать фактическое сечение “слияния” σ_F , чтобы судить о том, имеет ли место в системе усиление или ослабление реакций группы F . Из формулы (8) также следует, что подавление “слияния” обусловлено уменьшением фактических ППВ “слияния” через входной канал $P_{l,EF}$, на что было указано в работе [1] при обсуждении приближения $P_{l,DF} \equiv 0$.

Чтобы ввести эффективную ППВ периферийных процессов $\mathcal{P}_{l,ED}$, добавим к обеим частям второго уравнения системы (3) вероятность $P_{l,HF}$. В результате несложных преобразований получим соотношение

$$\mathcal{P}_{l,EF} = \left(1 - |S_l^{(0)}|^2 \right) \cdot \left(1 - \mathcal{P}_{l,ED} \right), \quad (10)$$

в котором

$$\mathcal{P}_{l,ED} \equiv P_{l,ED} - \frac{P_{l,HF}}{1 - |S_l^{(0)}|^2} = 1 - \frac{|S_l|^2}{|S_l^{(0)}|^2}. \quad (11)$$

Правую часть формулы (11) можно найти в результате подстановки в уравнение (10) выражения (8) для $\mathcal{P}_{l,EF}$. Из формулы (11) следует, что вероятность $\mathcal{P}_{l,ED}$ меньше фактической ППВ периферийных процессов $P_{l,ED}$ на величину $P_{l,HF} / (1 - |S_l^{(0)}|^2)$. Однако сравнение формул (2) и (11) показывает, что вероятности $\mathcal{P}_{l,ED}$ являются ППВ периферийных реакций, если в системе отсутствует как усиление, так и ослабление “слияния”. Следовательно, рассчитанное с вероятностями $\mathcal{P}_{l,ED}$ сечение

$$\sigma_{ED} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \mathcal{P}_{l,ED} \quad (12)$$

является именно тем сечением, с которым следует сравнивать полное сечение периферийных реакций σ_D , чтобы судить о том, имеет ли место в системе усиление или ослабление периферийных реакций. Отметим также, что согласно формуле (11), чем больше $P_{I,ED}$, тем больше $P_{I,HF}$ и, следовательно, тем сильнее подавление “слияния”. Таким образом, в конечном итоге подавление “слияния” обусловлено увеличенными значениями фактических ППВ периферийных процессов $P_{I,ED}$ для слабосвязанных ионов. Такой же вывод был сделан в работе [1] в приближении $P_{I,DF} \equiv 0$.

На основе полученных выше формул легко установить, что усиление “слияния” (выполняется соотношение (6)) сопровождается таким же ослаблением периферийных реакций, т.е.

$$\mathcal{P}_{I,ED} - \mathcal{P}_{I,DF} = P_{I,D}. \quad (13)$$

Наоборот, ослабление “слияния” (выполняется соотношение (7)) сопровождается таким же усилением периферийных реакций, т.е.

$$\mathcal{P}_{I,ED} + \mathcal{P}_{I,HF} = P_{I,D}. \quad (14)$$

Так как вероятности $P_{I,F}$ и $P_{I,D}$ удовлетворяют [1] соотношению унитарности, воспользовавшись формулами (6) и (13) или (7) и (14), можно убедиться в том, что оно также выполняется и для эффективных ППВ $\mathcal{P}_{I,EF}$ и $\mathcal{P}_{I,ED}$, т.е.

$$\mathcal{P}_{I,EF} + \mathcal{P}_{I,ED} = 1 - |S_I|^2. \quad (15)$$

Итак, удалось ввести эффективные ППВ различных процессов, протекающих при столкновении двух ядер, которые имеют вполне определенный физический смысл. Все они выражаются через S -матричные элементы УР S_I , $\tilde{S}_I^{(0)}$ и $S_I^{(0)}$, которые могут быть получены из анализа соответствующих угловых распределений УР. Имея эффективные ППВ можно рассчитать все необходимые полные сечения по формулам, аналогичным формулам (9) и (12).

В заключение этого раздела отметим, что если при всех l $P_{I,DF} \equiv 0$ или $P_{I,HF} \equiv 0$, то полученные выше формулы переходят в формулы, приведенные в работе [1].

3. Заключение

В работе сделано обобщение нового подхода к анализу угловых распределений УР тяжелых ионов [1] на случаи, когда ППВ усиления “слияния” (в общем случае полное и неполное слияние, квазиделение и реакции глубококонепругой передачи) и его ослабления сравнимы по величине. Это удалось сделать с помощью эффективных ППВ. Рассчитываемые с этими вероятностями сечения позволяют сделать вывод о том, имеет ли место в системе усиление или ослабление “слияния” и периферийных реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздняков Ю. А., Теренецкий К. О. // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2001. – № 1(3). – С. 31.
2. Sakuragi Y. // Phys. Rev. – 1987. – Vol. C35. – P. 2161.
3. Signorini C., Andrighetto A., Ruan M. et al. // Phys. Rev. – 2000. – Vol. C61. – P. 061603.
4. Satchler G. R., Love W. G. // Phys. Rep. – 1979. – Vol. 55. – P. 183.
5. Strutinsky V. M. // Nucl. Phys. – 1965. – Vol. 68. – P. 221.
6. Rawitscher G. H. // Nucl. Phys. – 1966. – Vol. 85. – P. 337.
7. Eisen Y., Vager Z. // Nucl. Phys. – 1972. – Vol. A187. – P. 219.

8. *Вербицкий В. П., Ильин А. П., Поздняков Ю. А., Теренецкий К. О.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1985. – Т. 49. – С. 945.
9. *Vaz L. C., Alexander J. M., Satchler G. R.* // Phys. Rep. – 1981. – Vol. 69. – P. 373.
10. *Beckerman M.* // Phys. Rep. – 1985. – Vol. 129. – P. 145.

МЕТОД ЭФФЕКТИВНЫХ ИМОВІРНОСТЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ КУТОВИХ РОЗПОДІЛІВ ПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ ВАЖКИХ ІОНІВ

Ю. А. Поздняков

Запропонований раніше новий підхід для аналізу кутових розподілів пружного розсіяння важких іонів узагальнено на випадок, коли величини повних (тобто просумованих по всіх каналах) парціальних імовірностей підсилення “злиття” (в узагальненому випадку повне та неповне злиття, квазіділення і реакції глибоконепружної передачі) подібні за величиною парціальним імовірностям послаблення “злиття”. Це вдалось зробити за допомогою ефективних повних парціальних імовірностей, кожна з яких є лінійною комбінацією тих або інших фактичних повних парціальних імовірностей. Показано, що введені таким чином імовірності мають доволі прозорий фізичний зміст. Дійсно, ефективні повні парціальні імовірності дозволяють розрахувати перерізи “злиття” через вхідний канал і деякий опорний повний переріз периферійних процесів, порівняння з якими розрахованого або відповідно експериментально виміряного перерізу “злиття” або повного перерізу периферійних реакцій дозволяє судити про підсилення або послаблення “злиття” й периферійних реакцій. Також встановлено, що підсилення “злиття” супроводжується послабленням периферійних реакцій і навпаки.

EFFECTIVE PROBABILITIES METHOD FOR HEAVY-ION ELASTIC SCATTERING ANGULAR DISTRIBUTION ANALYSIS

Yu. A. Pozdnyakov

Previously proposed the new approach to heavy-ion elastic scattering angular distributions analysis is generalized for the cases when the total (i.e. summed over all channels) partial probabilities of “fusion” (in general complete and incomplete fusion, quasifission and deep inelastic collisions) enhancement are comparable with total partial probabilities of “fusion” hindrance. It became possible due to effective total partial probabilities introduction, every of which is a linear combination of either actual total partial probabilities. It is shown that introduced in such manner probabilities have quite definite physical meaning. Really, effective total partial probabilities allow to calculate entrance channel “fusion” cross section and certain reference peripheral processes cross section, comparison with which calculated or measured correspondingly “fusion” or total peripheral reaction cross section allows one to predetermine about “fusion” or peripheral reactions enhancement or hindrance. It is also established that “fusion” enhancement is accompanied by peripheral reactions hindrance, and vice versa.

Поступила в редакцию 15.11.01,
после доработки – 15.02.02.