

Рассмотренные на примере реакции  $(p, p')$  особенности энергетических спектров являются универсальными и проявляются в любых ядерных реакциях. Область спектра, не описываемая ни моделью испарения, ни прямыми ядерными реакциями, обусловлена механизмом предравновесных ядерных реакций. Этот механизм состоит в том, что частицы испускаются ядром на стадии установления статистического равновесия. Эта стадия начинается с возбуждения относительно несложных степеней свободы. Поэтому энергетические спектры предравновесных частиц являются более жесткими, чем испарительных. Отсюда в свою очередь следует отмеченная выше слабая зависимость вероятности вылета предравновесных протонов от высоты кулоновского барьера (рис. 4.15). В общем балансе всех частиц, испущенных составным ядром, доля предравновесных зависит от энергии возбуждения составного ядра и может достигать 40%. Заряженные частицы, как видно из рис. 4.15, могут быть практически все предравновесными.

### § 9. Оптическая модель для ядерных реакций

1. Согласно оптической модели ядро представляет собой сплошную среду, преломляющую и поглощающую дебройлевские волны падающих на него частиц. В квантовой механике доказывается, что роль коэффициента преломления для дебройлевской волны играет гамильтониан взаимодействия частицы с силовым полем ядра. Для описания поглощения к этому гамильтониану добавляется мнимая часть  $iW$ , так что весь гамильтониан принимает вид

$$H_{вз} = V(r) + iW(r), \quad (4.59)$$

где  $V(r)$  — гамильтониан из (3.5), а  $W(r)$  подбирается так, чтобы наилучшим образом воспроизвести экспериментальные данные. Таким образом, в оптической модели взаимодействие падающего нуклона с ядром аппроксимируется рассеянием и поглощением этого нуклона силовым центром (вместо задачи  $A + 1$  тел решаем задачу одного тела).

2. Оптическая модель описывает: а) дифференциальное и интегральное сечения упругого рассеяния при различных энергиях рассеивающихся нуклонов; б) сечение всех неупругих процессов, т. е. сечение поглощения нуклонов ядрами. В области энергии 10—20 МэВ, где вклад прямых процессов относительно невелик, сечение поглощения совпадает с сечением образования составного ядра (см. § 6, п. 2, а также § 7, п. 2).

На рис. 4.16 приведено как рассчитанное по оптической модели, так и измеренное на опыте дифференциальное сечение упругого рассеяния протонов с энергией 22 МэВ на ряде ядер. Как видно из рисунка, оптическая модель прекрасно описывает измеренные сечения. Правда, хорошего согласия с экспериментом добиваются

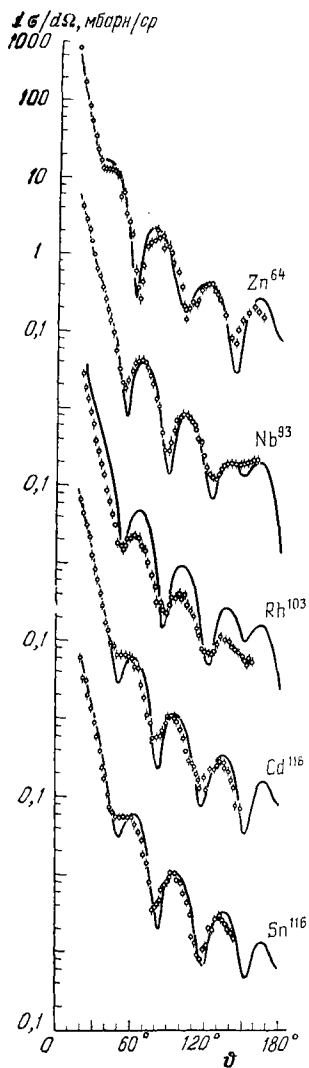


Рис. 4.16. Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов с энергией 22 МэВ на ядрах.

Точки — экспериментальные данные, кривые — расчет по оптической модели. Для каждого ядра шкала дифференциального сечения начинается с 0,1 мбарн/ср.

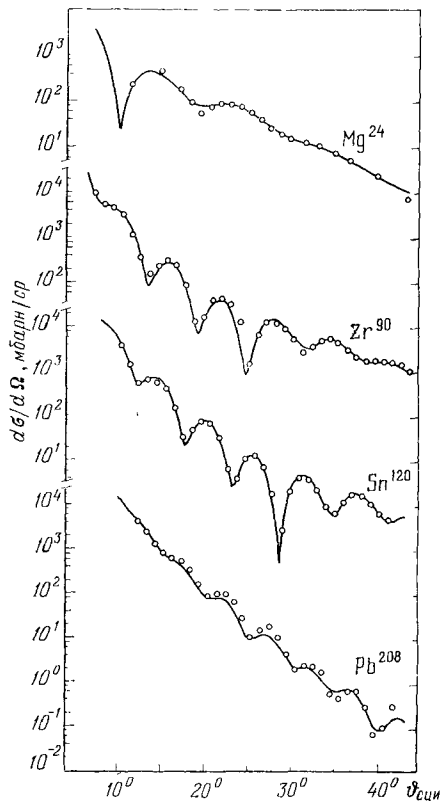


Рис. 4.17. Дифференциальные сечения упругого рассеяния ядра изотопа гелия  ${}^3\text{He}$  с энергией 130 МэВ на разных ядрах.

Точки — экспериментальные данные, сплошные кривые рассчитаны по оптической модели с соответствующим подбором параметров оптического потенциала.

введением многих параметров в мнимую часть гамильтониана (4.59) (в частности, введением наряду с объемным поглощением еще и поверхностного поглощения нуклонов). За последние годы оптическая модель с успехом применялась для описания упругого рассеяния и поглощения сложных частиц ( $d$ ,  $t$ ,  $\alpha$  и т. д.) атомными ядрами.

На рис. 4.17 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных по оптической модели дифференциальных сечений упругого рассеяния ядра изотопа гелия  ${}^3_2\text{He}$  с энергией 130 МэВ на различных ядрах. Как мы видим, оптическая модель прекрасно описывает и рассеяние сложных частиц. Разумеется, гамильтониан взаимодействия для сложных частиц отличается от гамильтониана для нуклонов.

3. Предельным случаем оптической модели является модель черного тела, согласно которой ядро поглощает все попавшие на него частицы. Для нейтронов упругое рассеяние в модели черного тела является чисто дифракционным (см. гл. II, § 6 и § 3, п. 3 этой главы), а сечение поглощения с ростом энергии плавно приближается к предельному значению (см. пунктир на рис. 2.16). Реальные параметры оптического гамильтониана (4.59) свидетельствуют о том, что ядро является полупрозрачным. Полупрозрачность ядра подтверждается также осцилляциями сечений поглощения (рис. 2.16) в зависимости от энергии. Эти осцилляции в оптической модели возникают вследствие интерференции налетающей и рассеянной ядером волн. Осцилляции сечений поглощения можно также наблюдать, сохраняя энергию неизменной, но меняя размеры ядра, т. е. изучая зависимость сечения поглощения от массового числа  $A$ . Полупрозрачность ядра означает, что влетевший в ядро нуклон не сразу образует составное ядро, а в течение некоторого времени, большего  $R/v$ , где  $v$  — скорость частицы в ядре, движется, сохраняя некоторую обособленность от остальных нуклонов ядра. Этот факт является важным для предравновесного механизма ядерных реакций (см. § 8, п. 3).

4. Практический анализ и сравнение расчетов с опытными данными показывают, что оптическая модель описывает ту часть упругого рассеяния, которая происходит без образования составного ядра. В области энергии налетающего нуклона, на несколько МэВ превышающей порог испускания нейтрона, упругое рассеяние через составное ядро является маловероятным (из-за большого числа открытых каналов) и оптическая модель описывает все упругое рассеяние. Однако для нейтрона с энергией, меньшей порога неупругого рассеяния, уже нельзя пренебречь упругим рассеянием через составное ядро: у составного ядра открыт только один канал и именно упругий. В этом случае усредненное по энергии сечение  $\bar{\sigma}_{\text{пн}}(E)$  упругого рассеяния равняется сумме сечения, даваемого оптической моделью, и сечения упругого рассеяния через составное ядро.

5. В заключение отметим, что оптическая модель имеет область применимости при рассеянии не только на ядре, но и на отдельном нуклоне (см. гл. VII, § 7).

## § 10. Прямые ядерные реакции

1. Если ядерная реакция протекает быстро, т. е. за время порядка времени пролета частицы через ядро ( $10^{-21}$ — $10^{-22}$  с), то она называется *прямой реакцией*. В прямой реакции налетающая ча-