

живаются в рассеянии лёгких ядер ($2 < Z < 12$) на ядрах (см. *Оптическая модель ядра*).

Реакции под действием электронов и мюонов. Взаимодействие электронов и мюонов с ядрами носит электромагн. характер (см. *Электромагнитное взаимодействие*). Это позволяет использовать мюоны для выявления распределения заряда в ядрах, получения информации об угл. моментах, вероятностях разл. переходов, спиновых возбуждениях. Электроны могут испытывать упругое и неупругое рассеяния на ядрах. Если энергия электронов достаточна, то идут процессы выбивания протонов из ядра (e, p). Взаимодействие мюонов с ядрами происходит через захват мюона с орбиты мюонного атома. Захвату предшествуют торможение мюона в веществе и захват на далёкую мюонную орбиту. При этом образуется *мюонный атом*.

Реакции под действием пионов (π^-), каонов (K^-) и антипротонов (\bar{p}). При взаимодействии этих частиц с кулоновским полем ядра атома происходит их захват и образование т. н. экзотических атомов (см. *Адронные атомы*), а затем поглощение ядром. Изучение рентг. спектров адронных атомов позволяет получить сведения как о распределении плотности заряда в ядре, так и о свойствах самих отрицательно заряженных частиц, заменивших электрон в атоме.

Реакции под действием γ -квантов. Осн. источник γ -квантов — *тормозное излучение*, имеющее непрерывный спектр. При энергиях γ -квантов ~ 10 МэВ энергетич. зависимость сечения их поглощения ядром характеризуется широким максимумом (см. *Гигантские резонансы*). При больших энергиях идут процессы выбивания нуклонов из ядра, напр. (γ, n), фрагментация нуклонов в ядре и фоторождение пионов (γ, π). В делящихся ядрах с большой вероятностью идёт реакция фотоделения (γ, f). В области энергий γ -квантов, больших неск. десятков МэВ, фотоделение ядер становится возможным практически для всех элементов. Фотоделение ядер в области промежуточных энергий (~ 100 МэВ) практически всегда сопровождается вылетом достаточно большого числа нейтронов и лёгких ядерных фрагментов.

Реакции с тяжёлыми ионами. В случае тяжёлых ионов во взаимодействие вовлекаются большие массы, во входном канале реализуются очень большие угл. моменты, а длина волны де Бройля λ мала по сравнению с характерными размерами области взаимодействия ядер. Напр., в реакции $U+U$ при энергии налетающего иона ~ 7 МэВ на нуклон орбитальный угловой момент достигает $600 \hbar$, а $\lambda \approx 4 \cdot 10^{-13}$ см. Малость λ означает, что с хорошей точностью можно говорить о движении взаимодействующих ядер по траектории. Ядра при этом обмениваются нуклонами, энергией, изменяют форму, что, в свою очередь, влияет на их движение по траектории. Представление о движении по траектории удобно использовать для классификации Я. р. с тяжёлыми ионами.

В зависимости от величины прицельного параметра b (расстояния, на к-ром частица прошла бы мимо центра ядра-мишени, если бы взаимодействие отсутствовало) осуществляются Я. р. разного типа. При больших значениях прицельного параметра сталкивающиеся ядра A_1, A_2 оказываются вне области действия ядерных сил — взаимодействие чисто кулоновское: либо упругое рассеяние, либо *кулоновское возбуждение ядра*. При касательных столкновениях ядер A_1, A_2 ($b \geq b'$) идут только прямые реакции (рис. а). При ещё меньших значениях b ($b_{кр} \leq b \leq b'$) наблюдаются глубоко неупругие столкновения (рис. б). Для них характерны большая величина потерь кинетич. энергии, к-рая переходит во внутр. энергию возбуждения ядер, большие ширины массовых и зарядовых распределений. Кинетич. энергия ядер в выходном канале приближённо равна их энергии кулоновского отталкивания. Максимумы проинтегрированных по энергии и углу зарядовых распределений продуктов реакции располагаются около значений зарядов сталкивающихся ядер. Различным парциальным волнам, к-рые дают вклад в глубоко неупругие столкновения, отвечают разные времена взаимодействия и вследствие этого разные

углы отклонения налетающего ядра. Поэтому исследование корреляций характеристик реакций с угл. распределениями даёт информацию о развитии процесса во времени. При глубоко неупругих столкновениях формируется двойная ядерная система, к-рая живёт приблизительно 10^{-20} с, а затем распадается на 2 фрагмента: A_1, A_2 , не достигая состояния статистич. равновесия.

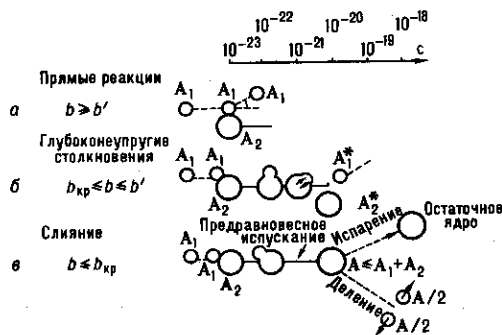


Рис. Классификация реакций с тяжёлыми ионами по значению прицельного параметра b и времени протекания реакции.

При значениях $b \leq b_{кр}$ ядра сближаются настолько, что становятся возможными процессы слияния ядер (рис. в). Образовавшееся при слиянии составное ядро эволюционирует в направлении статистич. равновесия. Процесс, как правило, заканчивается или испарением лёгких частиц и образованием остаточного ядра, или делением на 2 осколка $A/2$. Реакции слияния перспективны в связи с возможностью синтеза в этом процессе сверхтяжёлых элементов (см. *Трансурановые элементы*). Доля столкновений, ведущих к образованию составного ядра, зависит от произведения зарядов сталкивающихся ядер Z_1, Z_2 . Если $Z_1 \cdot Z_2 > 2000$, то эта доля становится малой.

При анализе Я. р. с тяжёлыми ядрами принято выделять реакции к в а з и д е л е н и я. Они заполняют переходную область между глубоконеупругими столкновениями и реакциями слияния. Для продуктов квазиделения характерны полная релаксация кинетич. энергии и типичные для деления угл. распределения. Однако в отличие от реакций слияния, к-рые проходят стадии составного ядра, форма системы не успевает стать равновесной до момента развала на 2 фрагмента.

Лит.: Вайскопф В., Статистическая теория ядерных реакций, пер. с англ., М., 1952; Лейн А., Томас Р., Теория ядерных реакций при низких энергиях, пер. с англ., М., 1960; Ситенко А. Г., Теория ядерных реакций, М., 1983; Валагтен Л., Субатомная физика: ядра и частицы, пер. с франц., т. 2, М., 1986; см. также *лит.* при ст. *Прямые ядерные реакции*. Р. В. Джолос, С. П. Иванов.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ — силы взаимодействия между нуклонами; обеспечивают большую величину энергии связи ядра по сравнению с др. системами. Я. с. являются наиб. важным и распространённым примером *сильного взаимодействия* (СВ). Когда-то эти понятия были синонимами и сам термин «сильное взаимодействие» был введён для подчёркивания огромной величины Я. с. по сравнению с др. известными в природе силами: эл.-магн., слабыми, гравитационными. После открытия π -, ρ - и др. мезонов, гиперонов и др. *адронов* термин «сильное взаимодействие» стали применять в более широком смысле — как взаимодействие адронов. В 1970-х гг. *квантовая хромодинамика* (КХД) утвердилась как общепризнанная микроскопич. теория СВ. Согласно этой теории, адроны являются составными частицами, состоящими из *кварков* и *глюонов*, а под СВ стали понимать взаимодействие этих фундамент. частиц.

С др. стороны, Я. с. как силы взаимодействия между нуклонами включают не только СВ, но и эл.-магн., слабое и гравитац. взаимодействия нуклонов. С точки зрения совр. теории, эл.-магн. и слабое взаимодействия являются