

этой пары в свою очередь порождают по одному тормозному кванту и т. д. В результате энергия первичного электрона распределяется между большим количеством вторичных электронов, позитронов и квантов. Наконец, энергии отдельных электронов и позитронов уменьшаются настолько, что ионизационные потери начинают преобладать над радиационными, после чего ливень прекращается. Заметим, что все компоненты ливня летят практически в том же направлении, что и первичная частица, из-за ультрарелятивистского характера процесса (см. гл. VII, § 4). При наличии ливней поток частиц, попадая в вещество, сначала резко усиливается и, только пройдя некоторое расстояние, начинает падать.

При ядерном взаимодействии тяжелых заряженных частиц с ядрами возникает большое количество вторичных частиц. При энергии падающей частицы от 20 МэВ примерно до десятков — сотен МэВ вторичными частицами в основном являются нуклоны. При более высоких энергиях вторичный пучок в основном состоит из пионов. Все эти вторичные частицы (в особенности нейтроны) сильно осложняют расчет эффективной радиационной защиты для ускорителей и космических кораблей.

§ 6. Ионизирующее действие ядерных излучений и наведенная активность

1. Действие ядерных излучений на вещество в общих чертах состоит из следующих процессов. Во-первых, налетающие частицы, сталкиваясь с электронами, выбивают их, производя в веществе ионизацию (иногда возбуждение) атомов. Во-вторых, налетающие частицы достаточно высоких энергий при неупругом ядерном столкновении с ядрами могут частично разрушать ядра, например, выбивая из них протоны и нейтроны. Это ведет к появлению в веществе новых изотопов, в том числе новых элементов. Эти новые изотопы часто оказываются радиоактивными. В результате в веществе возникает *наведенная активность*. В-третьих, при выбивании электронов во многих веществах, особенно органических, могут разрушаться или, наоборот, возникать различные химические связи, что приводит к изменению химической структуры вещества. В-четвертых, при упругих столкновениях налетающих частиц с ядрами атомы вещества выбиваются из своих положений в кристаллической решетке в другие узлы или в междоузлия. В результате в решетке образуются разного рода дефекты, влияющие на различные физические свойства кристаллов.

Здесь мы рассмотрим только важные для самой ядерной физики процессы ионизации и появления наведенной активности. Воздействие излучений на химические и физические свойства вещества, а также биологическое действие излучений будут рассмотрены ниже в гл. XIII.

2. Начнем с ионизации вещества под действием заряженных частиц. Кулоновское взаимодействие проходящих частиц с электронами вещества в основном происходит на сравнительно больших (порядка межатомных) расстояниях. Поэтому за единичное столкновение электрону в среднем передается довольно малая энергия, имеющая порядок 10 эВ. Эта энергия, как правило, достаточна для выбивания электрона только из наружной атомной оболочки. Электроны внутренних оболочек, получив такую энергию, только возбуждаются. Из-за этого, а также из-за большого разброса передаваемых энергий вокруг среднего значения не каждое столкновение с электроном ведет к ионизации атома.

Расчет ионизационной способности заряженных частиц довольно сложен. Он был проведен для воздуха и дал следующий просто формулируемый результат: в воздухе пролетающая заряженная частица в среднем образует одну пару ионов противоположного знака на 33 эВ потерь. Так что, например, α -частица с энергией 5 МэВ, тормозясь в воздухе, образует $5 \cdot 10^6 / 33 = 150\,000$ пар ионов. Ионизационная способность частиц в других средах примерно такая же, как и в воздухе.

Как мы увидим в следующей главе, ионизационная способность ядерных частиц лежит в основе почти всех устройств для их регистрации.

3. Гамма-кванты, проходя через вещество, передают свою энергию электронам. Поэтому их ионизационная способность примерно такая же, как и у заряженных частиц. Но проникающая способность γ -излучения очень велика. Поэтому при облучении заряженными частицами ионизируется лишь тонкий поверхностный слой вещества, а при облучении γ -квантами — вся толщина вещества.

4. Возникновение наведенной активности обусловлено ядерными реакциями, производимыми налетающими частицами. Эти реакции обычно затруднены целым рядом факторов. Прежде всего, реакции выбивания протона или нейтрона из ядра электроном или γ -квантом сильно эндотермичны, их пороги имеют порядок 10 МэВ. Ниже порога реакции не идут, и наведенная активность, следовательно, не возникает. Но даже выше порога сечения реакций, производимых электронами и γ -квантами, очень малы (на несколько порядков меньше поперечной площади ядра) из-за слабости электромагнитного взаимодействия.

Для протонов и α -частиц пороги ядерных реакций могут быть и не очень велики. Но в этом случае при не очень высоких энергиях (примерно до 10 МэВ) реакции, особенно на тяжелых ядрах, не идут из-за кулоновского барьера, препятствующего частице подойти вплотную к ядру. Поэтому протоны и α -частицы создают заметную наведенную активность лишь при сравнительно высоких энергиях.

Так как при радиоактивных распадах из ядер вылетают α -частицы, электроны, позитроны и γ -кванты и так как энергия радиоактивных излучений обычно не превышает нескольких МэВ, то из только что сказанного следует важный вывод: радиоактивные излучения, как правило, не создают вторичной радиоактивности.

Возникновение наведенной активности — вредное явление, так как она отравляет материал и делает опасной работу с ним. С другой стороны, в исследовательских работах по ядерным реакциям явление наведенной активности часто используется для идентификации и изучения выхода различных реакций (см. гл. IV, § 1).

§ 7. Прохождение тяжелых положительно заряженных частиц через монокристаллы

1. Прохождение тяжелых положительно заряженных частиц через монокристаллы отличается от прохождения через аморфные и поликристаллические среды только для частиц, движущихся под

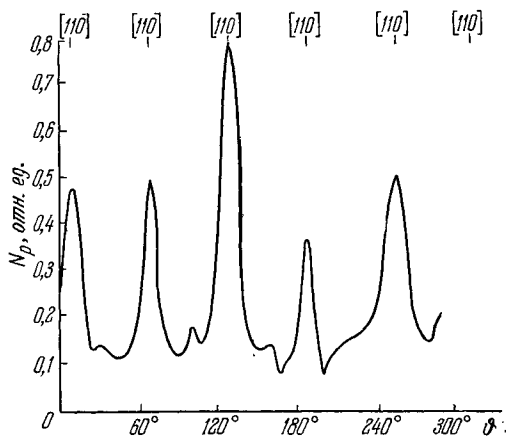


Рис. 8.11. Зависимость числа прошедших через монокристаллическую пленку золота протонов от угла ориентации плоскости пленки относительно протонного пучка.

Вверху указаны миллеровские индексы кристаллографических осей. Энергия протонов равняется 75 кэВ.

малыми углами к кристаллографическим осям низшего порядка. Это отличие состоит прежде всего в том, что у частиц, движущихся вдоль этих осей, резко уменьшаются ионизационные потери энергии и, следовательно, резко возрастают пробеги. Рис. 8.11 и 8.12 иллюстрируют это утверждение. На рис. 8.11 изображена зависимость числа протонов, прошедших через монокристаллическую пленку золота, от угла поворота монокристалла относительно на-