

ЛЕКЦИЯ №25

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений и частиц

Практически все методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений (α, β, γ) и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Заряженные частицы вызывают эти процессы непосредственно, а γ -кванты и нейтроны обнаруживаются по ионизации, вызываемой возникающими в результате их взаимодействия с электронами и ядрами атомов среды быстрыми заряженными частицами. Вторичные эффекты, сопровождающие рассмотренные процессы, такие, как вспышка света, электрический ток, потемнение фотопластинки, позволяют регистрировать пролетающие частицы, считать их, отличать друг от друга и измерять их энергию.

Приборы, применяемые для регистрации радиоактивных излучений и частиц, делятся на две группы:

1) приборы, позволяющие регистрировать прохождение частицы через определенный участок пространства и в некоторых случаях определять ее характеристики, например энергию (сцинтилляционный счетчик, черенковский счетчик, импульсная ионизационная камера, газоразрядный счетчик, полупроводниковый счетчик);

2) приборы, позволяющие наблюдать, регистрировать (например, фотографировать), следы (треки) частиц в веществе (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии).

1. Сцинтилляционный счетчик. Наблюдение **сцинтилляций** — вспышек света при попадании быстрых частиц на флуоресцирующий экран - первый метод, позволивший Уильяму Круксу и Эрнсту Резерфорду на заре ядерной физики (1903) визуально регистрировать α -частицы. Сцинтилляционный счетчик - детектор ядерных частиц, основными элементами которого являются сцинтиллятор (кристаллофосфор) и фотоэлектронный умножитель, позволяющий преобразовывать слабые световые вспышки в электрические импульсы, регистрируемые электронной аппаратурой. Обычно в качестве сцинтилляторов используют кристаллы некоторых неорганических (ZnS для α -частиц; $NaI-Tl$, $CsI-Tl$ — для β - частиц и γ -квантов) или органических (антрацен, пластмассы — для γ -квантов) веществ.

Сцинтилляционные счетчики обладают высоким разрешением по времени (10^{-10} — 10^{-5} с), определяемым родом регистрируемых частиц, сцинтиллятором и разрешающим временем используемой электронной аппаратуры (оно доведено сейчас до 10^{-8} — 10^{-10} с). Для этого типа счетчиков эффективность регистрации — отношение числа зарегистрированных частиц к полному числу частиц, пролетевших в счетчике, примерно 100% для заряженных частиц и 30% для γ -квантов. Так как для многих сцинтилляторов (NaI-Tl, CsI-Tl, антрацен, стильбен) интенсивность световой вспышки в широком интервале энергий пропорциональна энергии первичной частицы, то счетчики на данных сцинтилляторах применяются для измерения энергии регистрируемых частиц.

2. Черенковский счетчик. Назначение черенковских счетчиков — это измерение энергии частиц, движущихся в веществе со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде, и разделение этих частиц по массам. Зная угол испускания излучения, можно определить скорость частицы, что при известной массе частицы равносильно определению ее энергии. С другой стороны, если масса частицы не известна, то она может быть определена по независимому измерению энергии частицы. Кроме того, при наличии двух пучков частиц с разными скоростями будут различными и углы испускания излучений, по которым можно искомые частицы определить. Для черенковских счетчиков разрешение по скоростям (иными словами, по энергиям) составляет 10^{-3} — 10^{-5} . Это позволяет отделять элементарные частицы друг от друга при энергиях порядка 1 ГэВ, когда углы испускания излучения различаются очень мало. Время разрешения счетчиков достигает 10^{-9} с. Счетчики Черенкова устанавливаются на космических кораблях для исследования космического излучения.

3. Импульсная ионизационная камера — это детектор частиц, действие которого основано на способности заряженных частиц вызывать ионизацию газа. Ионизационная камера представляет собой заполненный газом электрический конденсатор, к электродам которого подается постоянное напряжение. Регистрируемая частица, попадая в пространство между электродами, ионизует газ. Напряжение подбирается так, чтобы все образовавшиеся ионы, с одной стороны, доходили до электродов, не успев рекомбинировать, а с другой — не разгонялись настолько сильно, чтобы производить вторичную ионизацию. Следовательно, в ионизационной камере на ее электродах непосредственно собираются ионы, возникшие под действием заряженных частиц. Ионизационные камеры бывают двух типов: интегрирующие (в них измеряется суммарный ионизационный ток) и импульсные, являющиеся, по существу, счетчиками (в них регистрируется прохождение одиночной частицы и измеряется ее энергия, правда, с довольно низкой точностью, обусловленной малостью выходного импульса).

4. Газоразрядный счетчик. Газоразрядный счетчик обычно выполняется в виде наполненного газом металлического цилиндра (катод) с тонкой проволокой (анод), натянутой по его оси. Хотя газоразрядные счетчики по конструкции похожи на ионизационную камеру, однако в них основную роль играет вторичная ионизация, обусловленная столкновениями первичных ионов с атомами и молекулами газа и стенок. Можно говорить о двух типах газоразрядных счетчиков: **пропорциональных** (в них газовый разряд несамостоятельный, т. е. гаснет при прекращении действия внешнего ионизатора) и **счетчик Гейгера — Мюллера** (в них разряд самостоятельный, т. е. поддерживается после прекращения действия внешнего ионизатора).

В пропорциональных счетчиках рабочее напряжение выбирается так, чтобы они работали в области вольтамперной характеристики, соответствующей несамостоятельному разряду, в которой выходной импульс пропорционален первичной ионизации, т. е. энергии влетевшей в счетчик частицы. Поэтому они не только регистрируют частицу, но и измеряют ее энергию. В пропорциональных счетчиках импульсы, вызываемые отдельными частицами, усиливаются в 10^3 — 10^4 раз (иногда и в 10^6 раз).

Счетчик Гейгера — Мюллера по конструкции и принципу действия существенно не отличается от пропорционального счетчика, но работает в области вольтамперной характеристики, соответствующей самостоятельному разряду, когда выходной импульс не зависит от первичной ионизации. Счетчики Гейгера — Мюллера регистрируют частицу без измерения ее энергии. Коэффициент усиления этих счетчиков составляет 10^8 . Для регистрации отдельных импульсов возникший разряд следует гасить. Для этого, например, последовательно с нитью включается такое сопротивление, чтобы возникший в счетчике разряд вызывал на сопротивлении падение напряжения, достаточное для прерывания разряда. Временное разрешение счетчиков Гейгера—Мюллера составляет 10^{-3} — 10^{-7} с. Для газоразрядных счетчиков эффективность регистрации равна примерно 100% для заряженных частиц и примерно 5% для γ -квантов.

5. Полупроводниковый счетчик — это детектор частиц, основным элементом которого является полупроводниковый диод. Время разрешения составляет примерно 10^{-9} с. Полупроводниковые счетчики обладают высокой надежностью, могут работать в магнитных полях. Малая толщина рабочей области (порядка сотни микрометров) полупроводниковых счетчиков не позволяет применять их для измерения высокоэнергетических частиц.

6. Камера Вильсона (1912) — это старейший и на протяжении многих десятилетий (вплоть до 50—60-х годов) единственный тип трекового детектора. Выполняется обычно в виде стеклянного цилиндра с плотно прилегающим поршнем. Цилиндр на-

полняется нейтральным газом (обычно гелием или аргоном), насыщенным парами воды или спирта. При резком, т. е. адиабатическом, расширении газа пар становится пересыщенным и на траекториях частиц, пролетевших через камеру, образуются треки из тумана. Образовавшиеся треки для воспроизводства их пространственного расположения фотографируются стереоскопически, т. е. под разными углами. По характеру и геометрии треков можно судить о типе прошедших через камеру частиц (например, α -частица оставляет сплошной жирный след, β -частица—тонкий), об энергии частиц (по величине пробега), о плотности ионизации (по количеству капель на единицу длины трека), о количестве участвующих в реакции частиц.

Российский ученый Д. В. Скобельцын (1892—1990) значительно расширил возможности камеры Вильсона, поместив ее в сильное магнитное поле (1927). По искривлению траектории заряженных частиц в магнитном поле, т. е. по кривизне трека, можно судить о знаке заряда. А если известен тип частицы (ее заряд и масса), то по радиусу кривизны трека можно определить энергию и массу частицы даже в том случае, если весь трек в камере не умещается (для реакций при высоких энергиях вплоть до сотен мегаэлектронвольт). Недостаток камеры Вильсона — ее малое рабочее время, составляющее примерно 1% от времени, затрачиваемого для подготовки камеры к последующему расширению (выравнивание температуры и давления, рассасывание остатков треков, насыщение паров), а также трудоемкость обработки результатов.

7. Диффузионная камера (1936) — это разновидность камеры Вильсона. В ней рабочим веществом также является пересыщенный пар, но состояние пересыщения создается диффузией паров спирта от нагретой (до 10°C) крышки ко дну, охлаждаемому (до - 60°C) твердой углекислотой. Вблизи дна возникает слой пересыщенного пара толщиной примерно 5 см, в котором проходящие заряженные частицы создают треки. В отличие от вильсоновской, диффузионная камера работает непрерывно. Кроме того, из-за отсутствия поршня в ней могут создаваться давления до 4 МПа, что значительно увеличивает ее эффективный объем.

8. Пузырьковая камера (1952; американский физик Д. Глезер (р. 1926)). В пузырьковой камере рабочим веществом является перегретая (находящаяся под давлением) прозрачная жидкость (жидкие водород, пропан, ксенон). Запускается камера, так же как и камера Вильсона, резким сбросом давления, переводящим жидкость в неустойчивое перегретое состояние. Пролетающая в это время через камеру заряженная частица вызывает резкое вскипание жидкости, и траектория частицы оказывается обозначенной цепочкой пузырьков пара - образуется трек, который, как и в камере Вильсона, фотографируется. Пузырьковая камера работает циклами. Размеры пузырьковых камер

примерно такие же, как камеры Вильсона (от десятков сантиметров до 2 м), но их эффективный объем на 2—3 порядка больше, так как жидкости гораздо плотнее газов. Это позволяет использовать пузырьковые камеры для исследования длинных цепей рождений и распадов частиц высоких энергий.

9. Ядерные фотоэмульсии (1927; российский физик Л. В. Мысовский (1888—1939)) — это простейший трековый детектор заряженные частиц. Прохождение заряженной частицы в эмульсии вызывает ионизацию, приводящую к образованию центров скрытого изображения. После проявления следы заряженных частиц обнаруживаются в виде цепочки зерен металлического серебра. Так как эмульсия — среда более плотная, чем газ или жидкость, используемые в вильсоновской и пузырьковой камерах, то при прочих равных условиях длина трека в эмульсии более короткая. Так, трек длиной 0,05 см в эмульсии эквивалентен треку в 1 м в камере Вильсона. Поэтому фотоэмульсии применяются для изучения реакций, вызываемых частицами в ускорителях сверхвысоких энергий и в космических лучах. В практике исследований высокоэнергетических частиц используются также так называемые **стоны** — большое число маркированных фотоэмульсионных пластинок, помещаемых на пути частиц и после проявления промеряемых под микроскопом.

Большое значение начинают играть сравнительно новые (1957) приборы - **искровые камеры**, использующие преимущества **счетчиков** (быстрота регистрации) и **трековых детекторов** (полнота информации о треках). Говоря образно, искровая камера - это набор большого числа очень мелких счетчиков. Поэтому она близка к счетчикам, так как информация в ней выдается немедленно, без последующей обработки, и в то же время обладает свойствами трекового детектора, так как по действию многих счетчиков можно установить треки частиц.

В настоящее время методы наблюдения и регистрации заряженных частиц и излучений настолько разнообразны, что их полное описание выходит за рамки курса.

Современные исследовательские установки – настоящие монстры. Например, один из блоков тяжелоионного синхротрона в Дармштадте (ФРГ) – инжектор – представляет собой туннель длиной 150 метров с вакуумом 10^{-11} мм. рт. ст. Понятно, что новые методики исследования в области ядерной физики – весьма дорогостоящие «забавы». Так при попытке создания суперколлайдера в Эллис Каунте (Техас) Джордж Буш, тогдашний президент США, «выбил» из Японии 1 млрд. долл. США и только в одном 1992 году вложения составили 592 млн. долл. Можно представить масштабы стройки: площадь лаборатории разработки магнитов – 10000 м². На том месте, где дол-

жен быть второй главный детектор частиц выкопана шахта шириной 48 м и глубиной 80 м, с целью изучения грунта под фундамент...

Ядерные реакции и их основные типы

Ядерные реакции - это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В ядерной физике эффективность взаимодействия характеризуют **эффективным сечением** σ . С каждым видом взаимодействия частицы с ядром связывают свое эффективное сечение: эффективное сечение рассеяния определяет процессы рассеяния, эффективное сечение поглощения — процессы поглощения. Эффективное сечение ядерной реакции

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx},$$

где N — число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объема n ядер, dN — число этих частиц, вступающих в ядерную реакцию в слое толщиной dx . Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдет реакция.

Единица эффективного сечения ядерных процессов — **барн** ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$).

В любой ядерной реакции выполняются **законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел**: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Выполняются также **законы сохранения энергии, импульса и момента импульса**.

В отличие от радиоактивного распада который протекает всегда с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как экзотермическими (с выделением энергии), так и эндотермическими (с поглощением энергии).

Важную роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение Н. Бора (1936) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия — это захват ядром X частицы a , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и образование промежуточного ядра C , называемого **составным** (или **компаунд-ядром**). Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в возбужденном состоянии. При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон - ядро тяжелого изотопа водорода - дейтерия, содержащее один протон и один нейтрон) или α -частица может получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате возможна вторая стадия ядерной реакции — распад составного ядра на ядро Y и частицу b .

В ядерной физике вводится **характерное ядерное время** - время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины, равной диаметру ядра ($d \approx 10^{-15}$ м). Так, для частицы с энергией 1 МэВ (что соответствует ее скорости $v \approx 10^7$ м/с) характерное ядерное время $\tau = \frac{10^{-15} \text{ м}}{10^7 \text{ м/с}} = 10^{-22}$ с. С другой стороны, доказано, что время жизни составного ядра равно $10^{-16} - 10^{-12}$ с, т. е. составляет $(10^6 - 10^{10}) \tau$. Это же означает, что за время жизни составного ядра может произойти очень много столкновений нуклонов между собой, т. е. перераспределение энергии между нуклонами действительно возможно. Следовательно, составное ядро живет настолько долго, что полностью «забывает», каким образом оно образовалось. Поэтому характер распада составного ядра (испускание им частицы b) - вторая стадия ядерной реакции - не зависит от способа образования составного ядра - первой стадии.

Если испущенная частица тождественна с захваченной ($b \equiv a$) то схема (25.1) описывает **рассеяние** частицы: **упругое** — при $E_b = E_a$, **неупругое** — при $E_b \neq E_a$. Если же испущенная частица не тождественна с захваченной ($b \neq a$), то имеем дело с ядерной реакцией в прямом смысле слова.

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются **прямыми ядерным взаимодействиями** (например, реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

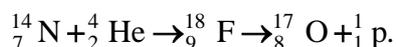
1) *по роду участвующих в них частиц* — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

2) *по энергии вызывающих их частиц* — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектронвольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектронвольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

3) *по роду участвующих в них ядер* — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

4) *по характеру происходящих ядерных превращений* — реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

Первая в истории ядерная реакция осуществлена Э. Резерфордом (1919) при бомбардировке ядра азота α -частицами, испускаемыми радиоактивным источником:



Рассмотренные ядерные реакции приводят к образованию дочерних ядер, массовые и зарядовые числа которых всего на 1 — 2 единицы отличаются от материнских. Но вот в 1938 г. немецкие физики О. Ган и Ф. Штрассманн доказали, что в результате облучения урана нейтронами образуются барий и другие элементы из *середины* таблицы Менделеева. В следующем, 1939 г., английский физик О. Фриш и австрийский Л. Мейтнер объяснили полученный результат тем, что происходит *реакция деления (расщепления)* ядра урана на примерно равные осколки.

Теория деления тяжелых ядер разработана в том же, 1939 г., советским теоретиком Я. И. Френкелем на основе капельной модели ядра. Ее развили также Н. Бор и Дж. Уиллер. Согласно этой теории, при малых деформациях ядро-капля колеблется: вытягивается и сжимается под действием электростатических и поверхностных сил, подобных силам поверхностного натяжения жидкости. Если амплитуда колебаний достигает критического значения, ядро разрывается. Для этого возбуждающая его энергия должна быть не меньше некоторого значения — *энергии активации*. Ее и сообщает нейтрон, который вносит в ядро как свою энергию связи, так и свою кинетическую энергию.

У разных изотопов энергия активации различна. Изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ при захвате нейтрона превращается в изотоп ${}_{92}^{236}\text{U}$, энергия активации которого равна 6,6 МэВ. Так как энергия связи, внесенная нейтроном, равна 6,8 МэВ, то для деления ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ достаточно внедрения нейтрона с *нулевой* кинетической энергией. Поэтому реакцию деления этого изотопа эффективно осуществляют медленные, *тепловые, нейтроны*. Они даже эффективней, чем быстрые, так как более длительное время находятся вблизи ядра, отчего возрастает вероятность захвата. При некоторых значениях скорости (энергии) нейтрона вероятность захвата резко возрастает. Это *резонансное поглощение*, подобное резонансному возбуждению атома фотоном. Энергия нейтрона в этом случае как раз равна разности энергий основного и возбужденного уровней ядра.

Изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ при захвате нейтрона превращается в ${}_{92}^{239}\text{U}$, энергия активации которого составляет 7 МэВ, а энергия связи, привнесенная нейтроном, - только 6 МэВ.

Следовательно, чтобы осуществить деление ${}_{92}^{238}\text{U}$, нейтроны должны иметь кинетическую энергию > 1 МэВ, т. е. изотоп делится *быстрыми нейтронами*. Если же ${}_{92}^{238}\text{U}$ облучать медленными нейтронами, то происходит просто их *радиационный захват* с образованием радиоактивного изотопа ${}_{92}^{239}\text{U}$. Такие реакции интересны тем, что приводят к образованию радиоактивного нептуния, а затем плутония, т. е. *трансурановых элементов*.

Обнаруженная реакция деления урана оказалась настолько важной, что в 1944 г. Ган и Штрассман были удостоены Нобелевской премии. Если для тяжелого ядра урана удельная энергия связи составляет 7,6 МэВ, то для элементов средней части таблицы Менделеева она больше - 8,7 МэВ. Это означает, что при делении высвобождается энергия $\sim 1,1$ МэВ на каждый нуклон. Так как в уране их ~ 200 , то при делении одного ядра выделяется ~ 200 МэВ. Соответственно макроскопические количества урана, например 1 г ${}^{235}\text{U}$, выделяют энергию $8 \cdot 10^{10}$ Дж, что неизмеримо больше, чем любые известные до того времени источники энергии.

Основная часть энергии деления выделяется в виде кинетической энергии «осколков» ядра. Как только они оказываются на расстоянии, большем радиуса сильного взаимодействия, их расталкивают огромные кулоновские силы. Другая часть энергии деления — малая, но очень важная — выделяется с нейтронами. В тяжелых ядрах число нейтронов, приходящихся на один протон, больше, чем в средних и легких. Поэтому, когда тяжелое ядро делится на два средних, они оказываются «перегружены» нейтронами. Это приводит к двум следствиям. Во-первых, осколки становятся β -радиоак-

тивными, а во-вторых, часть нейтронов высвобождается. Одним из первых пришел к этому выводу Ф. Жолио-Кюри в 1939 г.

Из 200 МэВ энергии, выделившейся при делении ядра ^{235}U , 166 МэВ составляет кинетическая энергия осколков, 14 МэВ — энергия γ -излучения, 10 МэВ — энергия нейтрино, по 5 МэВ - энергии β -частиц и нейтронов.

При одном акте деления ^{235}U выделяется в среднем $\sim 2,5$ нейтрона, а ^{239}Pu - 2,9 нейтрона, т. е. происходит *размножение нейтронов*. Это важнейшее обстоятельство в 1939 г. привело отечественных физиков Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона к мысли, что возможно осуществление *цепной ядерной реакции*. К аналогичным мыслям независимо пришли Э. Ферми, Ф. Жолио-Кюри и Л. Мейтнер.

Каждый из нейтронов, выделившихся в результате деления, может быть захвачен соседним ядром и вызвать точно такую же реакцию. А поскольку число нейтронов возрастает, происходит *лавинообразное нарастание числа актов деления* и, следовательно, лавинообразное возрастание выделяющейся энергии. Точно так же происходит лавинообразное нарастание актов ионизации при газовом разряде или актов химического взаимодействия при возгорании рабочей смеси в цилиндре двигателя. Теорию подобных химических реакций разработал ученый Н. Н. Семенов в 1928 — 1934 гг. Так как их называют *цепными*, то, по аналогии, развивающуюся реакцию деления тоже называли *цепной*.

Минимальную массу, при которой возникает цепная реакция деления, называют *критической массой* (аналогично можно определить критический размер). Для ^{239}Pu критическая масса составляет ~ 17 кг. Ее образует шар радиусом ~ 6 см. Конечно, критическая масса зависит от формы и плотности материала, содержания в нем делящегося изотопа и среднего числа нейтронов, выделяющихся в одном акте деления. Наличие примесей также приводит к тому, что нейтроны захватываются ядрами без деления, что уменьшает вероятность возникновения цепной реакции. Некоторые ядра (графит, тяжелая вода D_2O) не делятся и не захватывают нейтроны, а отражают их (в основном).

Сумму всех этих факторов, влияющих на ход цепной реакции, характеризуют *коэффициентом k размножения нейтронов*. Он равен отношению числа нейтронов в активной зоне в последующем звене реакции к числу нейтронов в предыдущем звене. Очевидно, что при $k < 1$ реакция затухает, а при $k > 1$ — развивается в виде цепной реакции. При $k = 1$ возникает пограничный, или, как его называют, *критический режим реакции*. В таком режиме число нейтронов остается постоянным и реакция является *самоподдерживающейся*.

Мирное применение реакций деления

Очевидно, что **для созидательного использования ядерной энергии нужно уметь регулировать ее выделение, т. е. получить управляемую реакцию деления.**

Это осуществляется в ядерных реакторах. Первый реактор создан в США в 1942 г., в России — в 1946 г., а в 1954 г. введена первая промышленная АЭС мощностью 5000 кВт.

В результате реакций деления природного урана, состоящего в основном из ^{238}U , выделяются нейтроны с энергиями $\sim 0,7$ МэВ. Они приводят к делению ^{235}U , содержащегося в природном уране в небольшом количестве. В то же время ядра ^{238}U такими нейтронами не делятся — происходит лишь их радиационный захват. Так как этот процесс преобладает, то коэффициент размножения нейтронов меньше единицы. Поэтому для поддержания реакции необходимо увеличить вероятность первого процесса и уменьшить вероятность второго. И то, и другое достигается при уменьшении энергии нейтронов. В качестве *замедлителей* применяют такие ядра, которые меньше других захватывают нейтроны и в то же время эффективно уменьшают их энергию при столкновениях. Этим требованиям удовлетворяют ядра бериллия, углерода (который применяют в виде графита) или дейтерия, содержащегося в тяжелой воде D_2O . С помощью таких замедлителей создают *реакторы на медленных нейтронах*.

Отдельные блоки урана размещают, например, в графитовом замедлителе. Тепловая энергия, выделяющаяся при делении, воспринимается циркулирующим теплоносителем, в качестве которого служит вода или щелочной металл. Коэффициент размножения нейтронов автоматически регулируется на уровне I подъемом или опусканием стержня, который эффективно поглощает нейтроны (кадмий или бор).

Другая возможность состоит в том, чтобы в делящемся материале увеличить относительное содержание ^{235}U , т. е. *обогащить* уран этим изотопом. Если количество таких ядер достаточно велико, то они смогут поддерживать реакцию и на быстрых нейтронах, несмотря на захват части нейтронов ядрами ^{238}U . Такой *реактор на быстрых нейтронах* не только даст энергию, но и воспроизводит топливо в виде ^{239}Pu , образующегося из ^{238}U (реактор-размножитель, или «бридер»). Например, во Франции запущен подобный реактор мощностью 1200 МВт, а в России разработан реактор на 1500 МВт. Ядерные электростанции занимают весьма заметное место в общем энергетическом балансе: в России — 12%, во Франции — 70%, в США — 23%. В мире сейчас работает около 400 атомных реакторов, в России их было 40 общей мощностью $28 \cdot 10^6$ кВт.

Ядерные реакторы используют и в качестве *силовых установок*, например, подводных лодок, что обеспечивает длительную автономность плавания.

Авария в Чернобыле свидетельствует, что не только ядерное оружие, но и недостаточная надежность АЭС могут привести к необратимым крупномасштабным последствиям.

Ядерные реакции применяют не только с целью получения энергии. Они позволяют, например, выяснять все более глубокие закономерности строения материи и создавать новые элементы (трансурановые). Такие реакции осуществляют, в основном, искусственно с помощью ускорителей, внедряющих в ядра различных мишеней те или иные частицы. Уже упоминалось, что рассеяние нейтронов на моно- и поликристаллах применяется для исследования их строения (нейтронография), а резонансное поглощение γ -квантов дает очень тонкий метод анализа атомов и ядер. Большая проникающая способность γ -излучения позволяет использовать его и для обнаружения раковин и трещин в отливках, сварных швах, корпусах и деталях (гамма-дефектоскопия). Потоки быстрых частиц, пробивая очень малые отверстия в органических пленках, позволяют создавать ядерные фильтры, которые применяют для тонкой очистки и разделения компонентов различных смесей. Потоки радиоактивного излучения применяют в медицине (онкология).

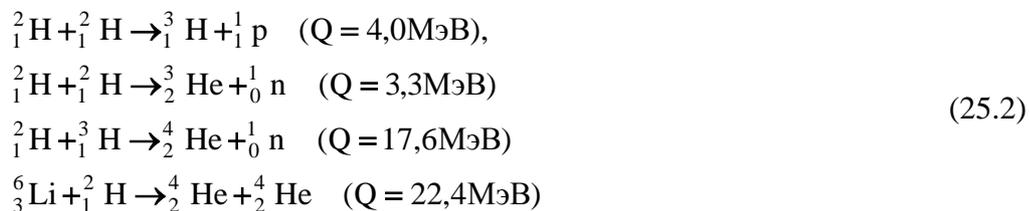
Большое применение находят радиоактивные изотопы или, как их называют, *меченые атомы*. Оно основано на двух обстоятельствах. Во-первых, они имеют точно такие же электронные оболочки, как и стабильные изотопы, а следовательно, такие же физико-химические свойства. Поэтому они могут вступать в такие же химические соединения, находиться в том или ином агрегатном состоянии, подвергаться всевозможным внешним воздействиям (кроме ядерных) и при этом их активность остается постоянной (на примере $^{14}_6\text{C}$ можно убедиться о возможности определения возраста, например, мумий). Во-вторых, большая энергия радиоактивного излучения позволяет регистрировать ничтожные количества таких атомов. Это дает возможность легко следить за поведением вещества при различных реакциях, технологических процессах и т. п. Например, если поршневые кольца содержат радиоактивный изотоп, то их истирание в цилиндре может быть изучено по изменению активности масла, уносящего частицы металла. Точно так же можно проследить за усвоением лекарства в организме человека и т. д.

Радиоактивные изотопы применяют в качестве различных *датчиков* (уровнемеры, толщиномеры и т. д.). В сочетании с устройствами регулирования такие датчики позволяют автоматизировать различные технологические и эксплуатационные процес-

сы. В радиационной химии с помощью излучений получают *материалы с новыми свойствами*, а в радиационной биологии — изменяют наследственные признаки, получают новые сельскохозяйственные культуры и т. д.

Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций

Источником огромной энергии может служить реакция синтеза атомных ядер — образование из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи ядер резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$) к литию ${}^6_3\text{Li}$ и особенно к гелию ${}^4_2\text{He}$, т. е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые должны сопровождаться выделением большого количества энергии, что действительно подтверждается расчетами. В качестве примеров рассмотрим реакции синтеза:



где Q — энергосвободное.

Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше, чем в реакциях деления тяжелых ядер. В самом деле, если при делении ядра ${}^{238}\text{U}$ выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции (25.2) эта величина равна $17,6/5 \text{ МэВ} \approx 3,5 \text{ МэВ}$.

Оценим на примере реакции синтеза ядер дейтерия ${}^2_1\text{H}$ температуру ее протекания. Для соединения ядер дейтерия их надо сблизить до расстояния $2 \cdot 10^{-15}$ м, равного радиусу действия ядерных сил, преодолевая при этом потенциальную энергию отталкивания. Средней энергии теплового движения, равной 0,5 МэВ, достаточной для преодоления отталкивания, соответствует температура, приблизительно равная $2,6 \cdot 10^9$ К. Следовательно, реакция синтеза ядер дейтерия может происходить лишь при температуре, на два порядка превышающей температуру центральных областей Солнца (примерно $1,3 \cdot 10^7$ К).

Однако оказывается, что для протекания реакции синтеза атомных ядер достаточно температуры порядка 10^7 К. Это связано с двумя факторами: 1) при температурах, характерных для реакций синтеза атомных ядер, любое вещество находится в состоянии плазмы, распределение частиц которой подчиняется закону Максвелла; поэто-

му всегда имеется некоторое число ядер, энергия которых значительно превышает среднее значение; 2) синтез ядер может происходить вследствие туннельного эффекта.

Реакции синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах (примерно 10^7 К и выше), называются **термоядерными реакциями**.

Термоядерные реакции являются, по-видимому, одним из источников энергии Солнца и звезд.

Термоядерные реакции дают наибольший выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения, в том числе и деление тяжелых ядер. Например, количество дейтерия в стакане простой воды энергетически эквивалентно примерно 60 л бензина. Поэтому заманчива перспектива осуществления термоядерных реакций искусственным путем.

Впервые искусственная термоядерная реакция осуществлена в нашей стране (1953), а затем (через полгода) в США в виде взрыва водородной (термоядерной) бомбы, являющегося неуправляемой реакцией. Взрывчатым веществом служила смесь дейтерия и трития, а запалом — «обычная» атомная бомба, при взрыве которой возникает необходимая для протекания термоядерной реакции температура.

Особый интерес представляет осуществление управляемой термоядерной реакции, для обеспечения которой необходимо создание и поддержание в ограниченном объеме температуры порядка 10^8 К. Так как при данной температуре термоядерное рабочее вещество представляет собой полностью ионизованную плазму, возникает проблема ее эффективной термоизоляции от стенок рабочего объема. На данном этапе развития считается, что основной путь в этом направлении - это удержание плазмы в ограниченном объеме сильными магнитными полями специальной формы.

Начало широкого международного сотрудничества в области физики высокотемпературной плазмы управляемого термоядерного синтеза положено работами И. В. Курчатова.

Под руководством Л. А. Арцимовича коллектив ученых Института атомной энергии (ИАЭ) им. И. В. Курчатова осуществил широкий круг исследований, результатом которых явился пуск летом 1975 г. в ИАЭ крупнейшей в мире термоядерной установки «Токамак-10» (Т-10).

В Т-10, как и во всех установках этого типа, плазма создается в тороидальной камере, находящейся в магнитном поле, а само плазменное образование — плазменный шнур - также имеет форму тора. В Т-10 плазма с температурой примерно $(7\div 8)\cdot 10^6$ К и плотностью примерно 10^{14} частиц/см³ создается в объеме, приблизительно равном 5 м³,

на время около 1 с. Однако следует отметить, что до осуществления критерия Лоусона - условия, необходимого для начала самоподдерживающейся термоядерной реакции, - еще остается значительный «путь»: примерно 20 раз по $n\tau$ (произведение плотности частиц на время удержания плазмы) и примерно 10 раз по температуре. Результаты, полученные на Т-10, вместе с результатами, ожидаемыми на создаваемых установках (например, Т-20), по мере решения разного рода инженерно-технологических проблем служат базой для создания термоядерного реактора «Токамака».

Управляемый термоядерный синтез открывает человечеству доступ к неисчерпаемой «кладовой» ядерной энергии, заключенной в легких элементах. Наиболее заманчивой в этом смысле является возможность извлечения энергии из дейтерия, содержащегося в обычной воде. В самом деле, количество дейтерия в океанской воде составляет примерно $4 \cdot 10^{13}$ т, чему соответствует энергетически запас 10^{17} МВт год. Другими словами, эти ресурсы не ограничены. Остается только надеяться, что решение этих проблем - дело недалекого будущего.