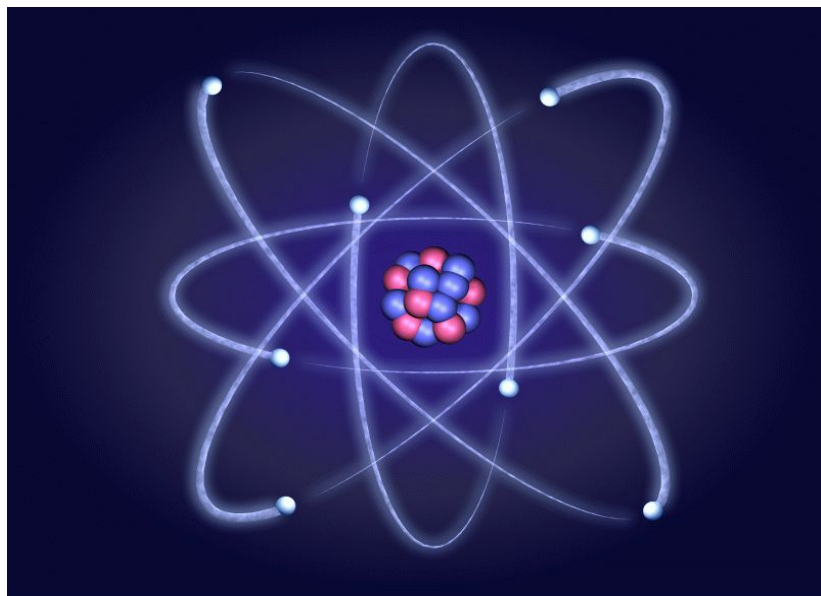


Атомное ядро



Общие сведения



Ядро атома кислорода

Атомное ядро — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса (более 99,9 %). Ядро заряжено положительно, заряд ядра определяет химический элемент, к которому относят атом. Размеры ядер различных атомов составляют несколько фемтометров, что более чем в 10 тысяч раз меньше размеров самого атома.

Атомные ядра изучает ядерная физика.

Атомное ядро состоит из нуклонов — положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые связаны между собой при помощи сильного

взаимодействия. Протон и нейтрон обладают собственным моментом количества движения (спином), равным $\frac{\hbar}{2} = \frac{\hbar}{4\pi}$ и связанным с ним магнитным моментом. Единственный стабильный атом, не содержащий нейтронов в ядре — лёгкий водород (протий).

Количество протонов в ядре называется его зарядовым числом Z — это число равно порядковому номеру элемента, к которому относится атом, в таблице (Периодической системе элементов) Менделеева. Количество протонов в ядре определяет структуру электронной оболочки нейтрального атома и, таким образом, химические свойства соответствующего элемента. Количество нейтронов в ядре называется его изотопическим числом N . Ядра с одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов называются изотопами. Ядра с одинаковым числом нейтронов, но разным числом протонов — называются изотонами. Термины изотоп и изотон используются также применительно к атомам, содержащим указанные ядра, а также для характеристики нехимических разновидностей одного химического элемента. Полное количество нуклонов в ядре называется его массовым числом A ($A = N + Z$) и приблизительно равно средней массе атома, указанной в таблице Менделеева. Нуклиды с одинаковым массовым числом, но разным протон-нейтронным составом принято называть изобарами.

История

В 1911 году Резерфорд в своём докладе «Рассеяние α - и β -лучей и строение атома» в философском обществе Манчестера заявил:

«Рассеяние заряженных частиц может быть объяснено, если предположить такой атом, который состоит из центрального электрического заряда, сосредоточенного в точке и окружённого однородным сферическим распределением противоположного электричества равной величины. При таком устройстве атома α - и β -частицы, когда они проходят на близком расстоянии от центра атома, испытывают большие отклонения, хотя вероятность такого отклонения мала».

Таким образом Резерфорд открыл атомное ядро, с этого момента и ведёт начало ядерная физика, изучающая строение и свойства атомных ядер.

После обнаружения стабильных изотопов элементов, ядру самого лёгкого атома была отведена роль структурной частицы всех ядер. С 1920 года ядро атома водорода имеет официальный термин — протон. После промежуточной протон-электронной теории строения ядра, имевшей немало явных недостатков, в первую очередь она противоречила экспериментальным результатам измерений спинов и магнитных моментов ядер, в 1932 году Джеймсом Чедвиком была открыта новая электрически нейтральная частица, названная нейтроном. В том же году Иваненко и, независимо, Гейзенберг выдвинули гипотезу о протон-нейтронной структуре ядра. В дальнейшем, с развитием ядерной физики и её приложений, эта гипотеза была полностью подтверждена.

Теории строения атомного ядра

В процессе развития физики выдвигались различные гипотезы строения атомного ядра; тем не менее, каждая из них способна описать лишь ограниченную совокупность ядерных свойств. Некоторые модели могут взаимоисключать друг друга.

Наиболее известными являются следующие:

- Капельная модель ядра — предложена в 1936 году Нильсом Бором
- Оболочечная модель ядра — предложена в 30-х годах XX века
- Обобщённая модель Бора — Моттельсона
- Кластерная модель ядра
- Модель нуклонных ассоциаций
- Оптическая модель ядра

Ядерно-физические характеристики

Зарядовым числом Z полностью определяется химический элемент. Парой чисел Z и A (массовое число) полностью определяется нуклид. Можно рассмотреть некоторые ядерно-физические характеристики нуклидов с заданными зарядовыми и массовыми числами.

Заряд

Число протонов в ядре Z определяет непосредственно его электрический заряд, у изотопов одинаковое количество протонов, но разное количество нейтронов. Ядерные свойства изотопов элемента в отличие от химических, могут различаться чрезвычайно резко.

Впервые заряды атомных ядер определил Генри Мозли в 1913 году. Свои экспериментальные наблюдения учёный интерпретировал зависимостью длины волны рентгеновского излучения от некоторой константы Z , изменяющейся на единицу от элемента к элементу и

равной единице для водорода: $\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = aZ - b$ где

a и b — постоянные.

Из чего Мозли сделал вывод, что найденная в его опытах константа атома, определяющая длину волны характеристического рентгеновского излучения и совпадающая с порядковым номером элемента, может быть только зарядом атомного ядра, что стало известно под названием закон Мозли.

Масса

Из-за разницы в числе нейтронов $A - Z$ изотопы элемента имеют разную массу $M(A, Z)$ которая является важной характеристикой ядра. В ядерной физике массу ядер принято измерять в атомных единицах массы (а. е. м.), за одну а. е. м. принимают $\frac{1}{12}$ часть массы нуклида ^{12}C . Следует отметить, что стандартная масса, которая обычно приводится для нуклида — это масса нейтрального атома. Для определения массы ядра нужно из массы атома вычесть сумму масс всех электронов (более точное значение получится, если учесть ещё и энергию связи электронов с ядром).

Кроме того, в ядерной физике часто используется энергетический эквивалент массы. Согласно соотношению Эйнштейна, каждому значению массы M соответствует полная энергия: $E = Mc^2$ где c — скорость света в вакууме.

Соотношение между а. е. м. и её энергетическим эквивалентом в джоулях:

$$E_1 = 1,660539 \cdot 10^{-27} \cdot (2,997925 \cdot 10^8)^2 = 1,492418 \cdot 10^{-10},$$

а так как 1 электронвольт = $1,602176 \cdot 10^{-19}$ Дж, то энергетический эквивалент а. е. м. в МэВ равен:

$$E_1 = 931,494.$$

Ядерно-физические характеристики (продолжение)

Радиус

● Анализ распада тяжёлых ядер уточнил оценку Резерфорда и связал радиус ядра с массовым числом простым соотношением: $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$, где r_0 — константа.

Так как радиус ядра не является чисто геометрической характеристикой и связан прежде всего с радиусом действия ядерных сил, то значение r_0 зависит от процесса, при анализе которого получено значение R , усреднённое значение

$r_0 = 1,23 \cdot 10^{-15}$ м, таким образом радиус ядра в метрах $R = 1,23 \cdot 10^{-15} A^{\frac{1}{3}}$.

Моменты ядра

Как и составляющие его нуклоны, ядро имеет собственные моменты.

Спин

Поскольку нуклоны обладают собственным механическим моментом, или спином, равным $\frac{1}{2}$, то и ядра должны иметь механические моменты. Кроме того, нуклоны участвуют в ядре в орбитальном движении, которое также характеризуется определённым моментом количества движения каждого нуклона. Орбитальные моменты принимают только целочисленные значения \hbar (постоянная Дирака). Все механические моменты нуклонов, как спины, так и орбитальные, суммируются

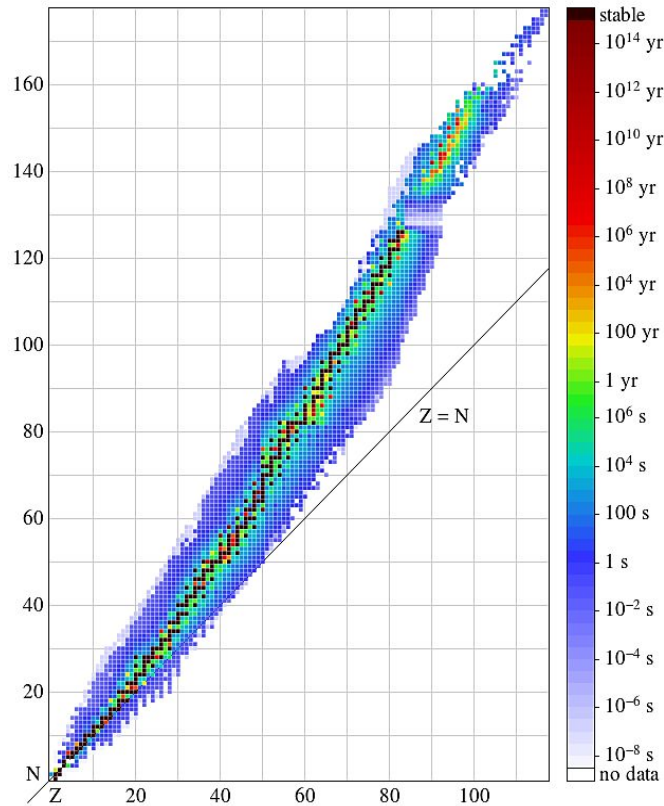
алгебраически и составляют спин ядра.

Магнитный момент

Измерения спинов стали возможными благодаря наличию непосредственно связанных с ними магнитных моментов. Они измеряются в магнетонах и у различных ядер равны от -2 до $+5$ ядерных магнетонов. Из-за относительно большой массы нуклонов магнитные моменты ядер очень малы по сравнению с магнитными моментами электронов, поэтому их измерение гораздо сложнее. Как и спины, магнитные моменты измеряются спектроскопическими методами, наиболее точным является метод ядерного магнитного резонанса.

Магнитный момент чётно-чётных пар, как и спин, равен нулю. Магнитные моменты ядер с непарными нуклонами образуются собственными моментами этих нуклонов и моментом, связанным с орбитальным движением непарного протона.

Устойчивость ядер



Зависимость числа нейтронов N от числа протонов Z в атомных ядрах ($N = A - Z$)

Из факта убывания средней энергии связи для нуклидов с массовыми числами больше или меньше 50-60 следует, что для ядер с малыми A энергетически выгоден процесс слияния — термоядерный синтез, приводящий к увеличению массового числа, а для ядер с

большими A — процесс деления. В настоящее время оба этих процесса, приводящих к выделению энергии, осуществлены, причём последний лежит в основе современной ядерной энергетики, а первый находится в стадии разработки.

Детальные исследования показали, что устойчивость ядер также существенно зависит от параметра $\frac{N}{Z}$ — отношения чисел нейтронов и протонов. В среднем для наиболее стабильных ядер $\frac{N}{Z} \approx 1 + 0,015A^{\frac{2}{3}}$, поэтому ядра лёгких нуклидов наиболее устойчивы при $N \approx Z$, а с ростом массового числа всё более заметным становится электростатическое отталкивание между протонами, и область устойчивости сдвигается в сторону $N > Z$.

Ядерные силы

Ядерные силы — это силы, удерживающие нуклоны в ядре, представляющие собой большие силы притяжения, действующие только на малых расстояниях. Они обладают свойствами насыщения, в связи с чем ядерным силам приписывается обменный характер (с помощью пи-мезонов). Ядерные силы зависят от спина, не зависят от электрического заряда и не являются центральными силами.

Уровни ядра

В отличие от свободных частиц, для которых энергия может принимать любые значения (так называемый непрерывный спектр), связанные частицы (то есть частицы, кинетическая энергия которых меньше абсолютного значения потенциальной), согласно квантовой механике, могут находиться в состояниях только с определёнными дискретными значениями энергий, так называемый дискретный спектр. Так как ядро — система связанных нуклонов, оно обладает дискретным спектром энергий. Обычно оно находится в наиболее низком энергетическом состоянии, называемом основным. Если передать ядру энергию, оно перейдёт в возбуждённое состояние.

Расположение энергетических уровней ядра в первом приближении: $D = ae^{-b\sqrt{E^*}}$, где:

D — среднее расстояние между уровнями,

E^* — энергия возбуждения ядра,

a и b — коэффициенты, постоянные для данного ядра:

a — среднее расстояние между первыми возбуждёнными уровнями (для лёгких ядер примерно 1 МэВ, для тяжёлых — 0,1 МэВ)

b — константа, определяющая скорость сгущения уровней при увеличении энергии возбуждения (для лёгких ядер примерно $2 \text{ МэВ}^{-\frac{1}{2}}$, для тяжёлых — $4 \text{ МэВ}^{-\frac{1}{2}}$).

С ростом энергии возбуждения уровни сближаются быстрее у тяжёлых ядер, также плотность уровней

зависит от чётности числа нейтронов в ядре. Для ядер с чётными (особенно магическими) числами нейтронов плотность уровней меньше, чем для ядер с нечётными, при равных энергиях возбуждения первый возбуждённый уровень в ядре с чётным числом нейтронов расположен выше, чем в ядре с нечётным.

Во всех возбуждённых состояниях ядро может находиться лишь конечное время, до тех пор, пока возбуждение не будет снято тем или иным путём. Состояния, энергия возбуждения которых меньше энергии связи частицы или группы частиц в данном ядре, называются связанными, в этом случае возбуждение может сниматься лишь гамма-излучением. Состояния с энергией возбуждения, превышающей энергию связи частиц, называются квазистационарными. В этом случае ядро может испустить частицу или гамма-квант.

Система обозначений ядер

Для обозначения атомных ядер используется следующая система:

в середине ставится символ химического элемента, что однозначно определяет зарядовое число Z ядра;

слева сверху от символа элемента ставится массовое число A .

Таким образом, состав ядра оказывается полностью определён, так как $N = A - Z$.

Пример такого обозначения: ^{238}U — ядро урана-238, в котором 238 нуклонов, из которых 92 — протоны, так как элемент уран имеет 92-й номер в таблице Менделеева.

Иногда, однако, для полноты вокруг обозначения элемента указывают все характеризующие ядро его атома числа:

слева снизу — зарядовое число Z , то есть, то же самое, что указано символом элемента;

слева сверху — массовое число A ;

справа снизу — изотопическое число N ;

если речь идёт о ядерных изомерах, к массовому числу приписывается буква из последовательности m, n, p, q, ... (иногда используют последовательность m1, m2, m3, ...). Иногда эту букву указывают в качестве самостоятельного индекса справа сверху.

Следует особо отметить, что обозначения атомных ядер совпадают с таковыми для нуклидов.

По историческим и иным причинам, некоторые ядра

имеют самостоятельные названия. Например, ядро ^4He называется α -частицей, ядро дейтерия ^2H (или D) — дейтроном, а ядро трития ^3H (или T) — тритоном. Последние два ядра являются изотопами водорода и поэтому могут входить в состав молекул воды, давая в итоге так называемую тяжёлую воду.

Литература

- М. Айзенберг, В. Грайнер. Модели ядер, коллективные и одночастичные явления. — М.: Атомиздат, 1975. — 454 с.
- М. Айзенберг, В. Грайнер. Микроскопическая теория ядра. — М.: Атомиздат, 1976. — 488 с.
- О. Бор, Б. Моттelson. Структура атомного ядра. — В 2-х т. — М.: Мир, 1971—1977.
- В. П. Крайнов. Лекции по микроскопической теории атомного ядра. — М.: Атомиздат, 1973. — 224 с.
- В. В. Маляров. Основы теории атомного ядра. 2-ое изд. — М.: Наука, 1967. — 512 с.
- Р. Натаф. Модели ядер и ядерная спектроскопия. — М.: Мир, 1968. — 404 с.
- С. М. Поликарпов. Необычные ядра и атомы. — М.: Наука, 1977. — 152 с.
- Дж. Рейнуотер. Как возникла модель сфероидальных ядер. Успехи физических наук, 1976, Том 120. Вып. 4, с. 529—541. (Нобелевская лекция по физике 1975 г.)
- А. Г. Ситенко. Теория ядерных реакций. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 352 с.
- А. Г. Ситенко, В. К. Тартаковский. Лекции по теории ядра. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
- Л. Слив М. И. Стрикман, Л. Л. Франкфурт. Проблемы построения микроскопической теории ядра и квантовая хромодинамика, Успехи физических наук, 1976, Том 145. Вып. 4, с. 553—592.
- В. Г. Соловьев. Теория атомного ядра. Ядерные модели. — М.: Энергоиздат, 1981. — 296 с.
- В. Г. Соловьев. Теория сложных ядер. — М.: Наука, 1971. — 560 с.
- Журнал: Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ) (Архив статей с 1970 г.)

Спасибо за внимание