

ГЛАВА II

СТРОЕНИЕ АТОМА И ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН

Изучая материал второй главы, вы углубите знания о составе атомного ядра и явлении радиоактивности, о состоянии электронов в атоме, расширите представления об атомной орбитали, энергетических уровнях и подуровнях. Освоение этого материала позволит вам объяснять и характеризовать закономерности изменения свойств атомов химических элементов и образуемых ими веществ по группам и периодам периодической системы.

Важнейшие понятия темы: относительная атомная масса, изотопы, радиоактивность, орбиталь, энергетический уровень, подуровень, формула электронной конфигурации, электронно-графическая схема, радиус атома, электроотрицательность, амфотерность, периодическая система химических элементов (период, группа).

§ 7. Строение атома

Одно из наиболее ранних утверждений об атомах как неделимых частицах вещества содержится в трудах древнегреческого учёного Демокрита (V–IV вв. до н. э.). Лишь в конце XIX века благодаря ряду научных открытий в области физики стало понятно, что атом имеет сложное строение.

В 1911 году Э. Резерфорд на основании экспериментальных данных предложил ядерную (планетарную) модель строения атома. В этой модели атом рассматривался как своеобразная «солнечная система», в центре которой находится положительно заряженное ядро, а вокруг ядра по своим орбитам движутся электроны.

Дальнейшие исследования физиков показали, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Нейтрон не имеет заряда, а протон несёт положительный заряд, равный величине заряду электрона. Число протонов в ядре определяет его заряд по абсолютной величине и порядковый номер элемента (рис. 11).



Доказательствами сложного строения атома послужили открытия фотоэффекта (А. Г. Столетов, 1889), радиоактивности (А. Беккерель, М. Склодовская-Кюри, 1896–1899 гг.), катодных лучей (Дж. Томсон, 1897), эксперименты по определению природы α -частиц (Э. Резерфорд, 1899–1900).

Исследования природы частиц, входящих в состав атомов, были дополнены представлениями квантовой механики, развивавшимися М. Планком А. Эйнштейном, Н. Борм, Луи де Бройлем, В. Гейзенбергом, Э. Шрёдингером.

Если заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, принять за 1, то заряд ядра любого атома будет численно равен порядковому номеру Z соответствующего химического элемента или числу протонов в ядре. В таком случае заряд ядра выражен в единицах элементарного заряда. Это безразмерная величина, как и относительная атомная масса. Например, уран — химический элемент с порядковым номером 92. Заряд его ядра в относительных единицах равен 92.

Суммарное число протонов (Z) и нейтронов (N) в ядре называется *массовым числом* (A):

$$A = Z + N.$$

Массовое число A имеет только целочисленные значения.

Атом в свободном состоянии является электронейтральной частицей. Следовательно, число протонов в ядре атома равно числу электронов. Важнейшие характеристики протонов, нейтронов и электронов приведены в таблице 4.

Таблица 4. **Важнейшие характеристики протонов, нейтронов, электронов**

Характеристики	Ядро		Оболочка
	Протон	Нейтрон	Электрон
Символ	p	n	e^-
Масса, кг	$\approx 1,673 \cdot 10^{-27}$	$\approx 1,675 \cdot 10^{-27}$	$\approx 9,109 \cdot 10^{-31}$
Масса, а. е. м.	$1,0073 \approx 1$	$1,0087 \approx 1$	$0,0005 \approx 0$
Электрический заряд, Кл	$\approx 1,602 \cdot 10^{-19}$	0	$\approx -1,602 \cdot 10^{-19}$
Электрический заряд в единицах элементарного заряда	+1	0	-1
Обозначение в уравнениях ядерных реакций	${}_1^1\text{P}$	${}_0^1\text{n}$	${}_{-1}^0\text{e}$

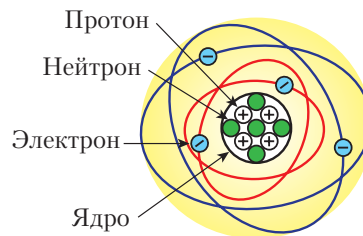


Рис. 11. Планетарная модель атома бериллия

Массу ядра (m_z) можно приблизительно определить, суммировав массы всех протонов (Zm_p) и нейтронов (Nm_n), из которых оно состоит.

Точное значение массы ядра немного меньше этой суммы:

$$m_z < Zm_p + Nm_n.$$

Например, масса ядра нуклида кислород-16 равна 15,995. Разница объясняется выделением колоссальной энергии при образовании ядра из протонов и нейтронов. Именно из-за выделения этой энергии, называемой энергией связи (ΔE), происходит потеря общей массы. Энергия связи в ядре в миллионы раз превышает прочность химической связи, поэтому ядра атомов в химических реакциях не разрушаются.



В курсе физики 11-го класса вы научитесь рассчитывать «дефект масс» и энергию связи, исходя из равенства $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$, где c — скорость света в вакууме.

При образовании из протонов и нейтронов 1 моль атомов гелия, в ядрах которых содержится по два протона и по два нейтрона, выделяется $2,73 \cdot 10^{12}$ Дж энергии. Для сравнения: при образовании очень прочной тройной химической связи в молекуле азота $N \equiv N$ выделяется энергия $9,45 \cdot 10^5$ Дж/моль, то есть почти в 3 миллиона раз меньше.

Число нейтронов в ядрах атомов одного и того же химического элемента может варьироваться в небольших пределах.

Длительное время считали, что химический элемент — это вид атомов с определённой массой. Однако в 1913 году было установлено, что у одного и того же химического элемента могут быть атомы, различающиеся по массе. Такие разновидности атомов называли **изотопами**.

Изотопы — это атомы, относящиеся к одному химическому элементу, но отличающиеся по массе. Их ядра состоят из одинакового числа протонов, но разного числа нейтронов.

Кроме понятия изотопа существует понятие **нуклид**.

Вид атомов с определённым количеством протонов и нейтронов в ядре называют **нуклидом** (от лат. *nucleus* — ядро). Совокупность атомов, в ядрах которых содержится одинаковое число протонов, относят к одному химическому элементу, то есть все атомы одного химического элемента имеют одинаковый заряд ядра.

Нуклиды принято обозначать ${}_Z^A\text{Э}$, где Э — символ химического элемента, Z — число протонов в ядре (атомный номер элемента), A — массовое число, равное суммарному числу протонов и нейтронов в ядре. Например, ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_2^4\text{He}$, ${}_{17}^{35}\text{Cl}$.

Большинство химических элементов в природе существует в виде нескольких нуклидов. Так, у кремния три стабильных нуклида, а у олова их десять.



В настоящее время для 118 элементов известно более 3400 нуклидов.

Например, существующие в природе нуклиды ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$ — изотопы водорода, так как принадлежат одному и тому же химическому элементу, но различаются числом нейтронов в ядре атома (рис. 12). Их называют водород-1, или протий (H), водород-2, или дейтерий (D), водород-3, или тритий (T). Массы атомов водорода-1, водорода-2 и водорода-3 равны 1,008, 2,014 и 3,016 а. е. м., или приблизительно 1, 2 и 3 а. е. м.

Вещества, содержащие различные изотопы, практически не отличаются химическими свойствами, но имеют различия в некоторых физических свойствах. Например, вода H_2O , в состав молекул которой входит протий, замерзает при $0\text{ }^\circ\text{C}$. В то же время вода, состоящая из молекул D_2O , замерзает при $3,81\text{ }^\circ\text{C}$, а из молекул T_2O — при $4,48\text{ }^\circ\text{C}$.

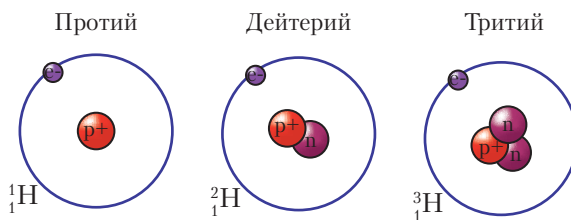


Рис. 12. Схема строения изотопов водорода

Значение атомных масс изотопов и их относительное содержание определяют методом масс-спектропии. Именно с учётом значений атомных масс изотопов и их доли в природе вычисляют *относительную атомную массу* химических элементов.

Уточним определение, приведённое ранее на с. 7. Относительная атомная масса химического элемента — физическая величина, равная отношению *усреднённой массы атомов элемента* к $\frac{1}{12}$ части массы атома углерода-12 (${}^{12}\text{C}$). Теперь становится понятным, что подразумевается под термином «усреднённая масса» атомов элемента. Её можно рассчитать, имея сведения о точном значении массы и распространённости изотопов элемента. Покажем этот расчёт на следующем примере.

Пример 1. Известно, что химический элемент кислород в природе представлен тремя изотопами: $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$ и $^{18}_8\text{O}$. Их относительные атомные массы соответственно равны 15,995, 16,999 и 17,999. В изотопной смеси на долю атомов кислорода-16 приходится 99,757 %, кислорода-17 — 0,038 %, а кислорода-18 — 0,205 %. Рассчитайте относительную атомную массу элемента кислорода.

Решение. Для наглядности расчёта выделим 100 000 атомов этой изотопной смеси. Тогда в ней будет 99 757 атомов кислорода-16, всего лишь 38 атомов кислорода-17 и 205 атомов кислорода-18. Для определения среднего значения относительной атомной массы кислорода, очевидно, надо сложить массы всех атомов и разделить на число этих атомов:

$$A_r(\text{O}) = \frac{15,995 \cdot 99\,757 + 16,999 \cdot 38 + 17,999 \cdot 205}{100\,000} = 15,999.$$

Полученное значение совпадает с тем, что приведено в периодической системе.

Относительная атомная масса химического элемента — это усреднённое значение относительных атомных масс его изотопов с учётом их распространённости.

Следует помнить, что каждому *нуклиду* присуще определённое *массовое число*. Нельзя говорить о массовом числе *химического элемента*, так как в природе у одного и того же химического элемента может быть несколько изотопов.

Небольшие различия физических свойств веществ, включающих разные изотопы одного и того же элемента, приводят к тому, что изотопный состав вещества зависит от способа его получения и существования. Например, сахара свекловичного сахара содержит меньше нуклида ^{13}C , чем сахара, выделенная из сахарного тростника. Такие различия нередко позволяют определить происхождение вещества. Сведения об изотопном составе веществ используются в геологии, медицинской диагностике, криминалистике, для контроля состояния окружающей среды.



В природе 21 химический элемент существует в виде лишь одного стабильного нуклида. К ним относятся Be, F, Na, Al, P, Sc, Mn, Co, As, Y, Nb, Rh, I, Cs, Pr, Tb, Ho, Tm, Au, Bi, Pa. Их относительные атомные массы в периодической системе указаны с точностью, значительно большей, чем для элементов, существующих в виде смеси изотопов.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Относительный заряд ядра определяется числом содержащихся в нём протонов и равен порядковому номеру соответствующего химического элемента.

Изотопы — это атомы одного и того же химического элемента, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но разного числа нейтронов.

Относительная атомная масса химического элемента — это усреднённое значение относительных атомных масс его изотопов с учётом распространённости изотопов элемента.

Вопросы, задания, задачи

1. Назовите: а) частицы, входящие в состав атома; б) нуклид, который не содержит нейтронов.
2. Приведите обозначения нуклидов хлор-35 и хлор-37, йод-127 и йод-131 в виде ${}^A_Z\text{X}$.
3. Используя данные таблицы 4, сравните характеристики: а) протона и нейтрона; б) протона и электрона.
4. Ответьте на вопросы: а) почему в результате химических реакций не происходит превращения одних элементов в другие; б) какая атомная масса химических элементов указана в периодической системе — относительная или абсолютная; в) почему масса ядра меньше суммарной массы протонов и нейтронов, составляющих ядро?
5. Определите число протонов и нейтронов в ядрах изотопов углерода с массовыми числами 12, 13 и 14.
6. Укажите число электронов в следующих атомах и ионах: H^- , H^+ , He , Au , Ca^{2+} .
7. Определите, сколько разновидностей молекул воды может образоваться из кислорода и водорода, если имеется смесь атомов водорода и кислорода, включающая нуклиды: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$.
8. Сопоставьте состав нуклидов ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, а также ${}^3_2\text{He}$, ${}^3_1\text{H}$ и ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$. Можно ли однозначно установить принадлежность атома к определённому элементу только на основании величины его массового числа?
9. Рассчитайте относительную атомную массу природной меди, если известно, что она состоит из двух изотопов ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ (69 %) и ${}^{65}_{29}\text{Cu}$ (31 %), причём $A_r({}^{63}\text{Cu}) = 62,93$, $A_r({}^{65}\text{Cu}) = 64,93$. Ответ проверьте по периодической системе Менделеева.
10. Известно, что химический элемент углерод в природе представлен двумя стабильными изотопами углерод-12 и углерод-13, относительные атомные массы которых соответственно равны 12,000000 и 13,003355. На долю атомов углерода-12 приходится 98,90 %, а на долю атомов углерода-13 — 1,10 %. Рассчитайте относительную атомную массу углерода и сопоставьте полученное значение с тем, что приведено в периодической системе.



§ 8. Явление радиоактивности

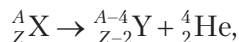
В 1896 году А. Беккерель, изучая соли урана, обнаружил, что они испускают неизвестное ранее излучение. Это явление получило название *радиоактивности*.

Радиоактивность (или радиоактивный распад) — это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер одних химических элементов в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием частиц высокой энергии, а также жёстким электромагнитным излучением.

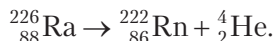
Такое превращение не является химической реакцией.

В зависимости от природы испускаемых частиц различают несколько *видов радиоактивного распада* атомных ядер. Подробно их изучает ядерная физика. Мы рассмотрим два из них — α - и β -распад.

Альфа-распад сопровождается испусканием α -частиц — положительно заряженных ядер гелия, содержащих два протона и два нейтрона: ${}^4_2\text{He}$. Этот распад можно представить в виде уравнения ядерной реакции:

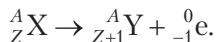


где X — неустойчивое ядро с атомным номером Z и массовым числом A ; Y — образовавшееся ядро, атомный номер которого на 2 единицы, а массовое число — на 4 единицы меньше, чем у исходного ядра. Примером такого распада является распад радия-226 с образованием газообразных радона-222 и гелия-4:

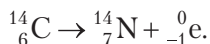


При составлении уравнений ядерных реакций следует учитывать, что сумма зарядов (Z) и сумма массовых чисел (A) в обеих частях уравнения должны быть равны.

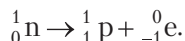
Бета-распад связан с испусканием ядром β -частицы — электрона (${}^0_{-1}\text{e}$). При этом заряд нового ядра увеличивается на единицу, а его массовое число A не изменяется:



Например, при β -распаде углерода-14 образуется азот-14:



Электроны возникают при распаде нейтрона (${}^1_0\text{n}$) на электрон (${}^0_{-1}\text{e}$) и протон (${}^1_1\text{p}$):



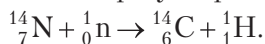
Часто радиоактивные превращения сопровождаются *гамма-излучением*. Оно представляет собой жёсткое электромагнитное излучение с длиной волны 10^{-10} – 10^{-13} м.

Стабильные и радиоактивные нуклиды

Причиной радиоактивности является неустойчивость атомных ядер ряда химических элементов. Неустойчивые нуклиды называются *радиоактивными нуклидами*, или *радионуклидами*. Радиоактивные нуклиды отличаются от стабильных соотношением протонов и нейтронов в ядре и энергией их связи.

Любой химический элемент имеет как стабильные, так и радиоактивные нуклиды. Для некоторых элементов известны только радионуклиды. К ним относятся все элементы периодической системы начиная с висмута, а также технеций Tc и прометий Pm.

В природе обнаружено 84 радионуклида. Их называют *естественными*, или *природными, радионуклидами*. К ним относятся радионуклиды, которые сохранились с момента образования Земли, а также те, которые возникают в постоянно протекающих ядерных реакциях. Эти реакции связаны либо с распадом уже существующих радионуклидов, либо со взаимодействием между высокоэнергетическими космическими частицами и ядрами атомов, присутствующих в атмосфере. Например, в граните содержится радионуклид уран-238, распад которого приводит к образованию радионуклида радон-222. В атмосфере под действием частиц, летящих из космоса (поток нейтронов и др.), образуются радиоактивные ядра углерода-14:



К наиболее распространённым природным радионуклидам относятся уран-238, уран-235, торий-232 и калий-40.

В окружающей среде присутствует и значительная часть *искусственных радионуклидов*. Их ещё называют *техногенными радионуклидами*, так как они образовались в результате работы предприятий атомной промышленности и проведения испытаний ядерного оружия в 40–80-е годы XX века, а также из-за небрежной работы с радиоактивными источниками в других отраслях промышленности.

Устойчивость радионуклидов характеризуется *периодом полураспада*. *Период полураспада* — это время, в течение которого распадается половина исходного количества ядер радиоактивного элемента.

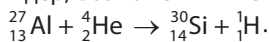
Например, период полураспада йода-131 ($T_{1/2}$) равен 8,04 суток, а периоды полураспада цезия-137 и стронция-90 составляют около 30 лет. При этом вовсе не значит, что через 60 лет радиоактивных цезия и стронция не останется. Если посчитать, то к этому времени сохранится четвертая часть, и даже через 180 лет останется около 1,5 % от их первоначального количества.

В результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции 26 апреля 1986 года в окружающую среду были выброшены радиоактивные нуклиды 37 химических элементов. Их повышенное содержание сделало часть территории нашей страны непригодной для проживания. В настоящее время

Республика Беларусь продолжает преодолевать последствия чернобыльской катастрофы. Ведущую роль в этой работе играют химики. Они осуществляют мониторинг загрязнённых территорий, участвуют в разработке проектов по их очистке и восстановлению, ищут способы снижения содержания опасных радионуклидов в сельскохозяйственной продукции.



Кроме радиоактивного распада ядер, возможен и их синтез. Например:



Знание механизма и закономерностей протекания ядерных превращений позволяет осуществлять направленный синтез химических элементов. Все элементы с порядковыми номерами больше 92 получены искусственным путём.

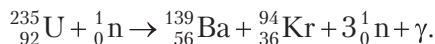
В результате ядерных реакций происходит синтез химических элементов на Солнце и других звёздах. Ядерные реакции синтеза элементов на Солнце — источник энергии звёзды и жизни на Земле.

Использование радионуклидов

Распад радиоактивных атомных ядер сопровождается выделением огромного количества энергии. Человечество научилось управлять распадом радионуклидов, а выделяющуюся при этом энергию использовать в своих интересах.

На атомных электростанциях энергия, выделяющаяся при делении ядер урана, преобразуется сначала в тепловую, а затем в электрическую энергию (рис. 13).

Процесс деления радиоактивных ядер урана-235 под действием нейтронов можно представить в виде уравнения:



Образующиеся нейтроны вызывают деление новых ядер урана-235 по цепному механизму.

Действие ядерного оружия основано на мгновенном выделении огромного количества энергии при делении ядер урана или плутония.



При полном делении 1 кг урана-235 выделяется около $7,7 \cdot 10^{13}$ Дж энергии, что эквивалентно теплоте сгорания около 3000 т высококачественного каменного угля.

В 32 странах мира функционирует около 200 атомных электростанций, обеспечивающих приблизительно 20 % от общего количества, потребляемой этими странами электроэнергии.



Рис. 13. Белорусская АЭС

Радионуклиды используют в медицинской диагностике и для лечения некоторых заболеваний.

Радиационная безопасность



В процессе распада атомных ядер или, наоборот, их синтеза происходит выброс протонов, нейтронов, электронов, сопровождающийся гамма-излучением. Этот процесс называют радиоактивным излучением, или радиацией. Его *природные источники* — это солнечная радиация и космическое излучение, а также радиоактивные вещества, находящиеся в земной коре, окружающих нас объектах, воде, воздухе и постепенно проникающие в организм человека и животных.

Существуют и *техногенные источники* радиоактивности, созданные человеком или спровоцированные его деятельностью. Негативные примеры образования таких источников — испытание ядерного оружия, захоронение радиоактивных отходов, ошибки при эксплуатации атомных электростанций, приводящие к катастрофам.

Воздействие значительных доз внешнего радиационного излучения на организм человека может вызвать тяжёлые заболевания. Ещё большую опасность представляет попадание радионуклидов в организм человека через органы дыхания, с пищей и водой (рис. 14). Излучение радионуклидов поражает отдельные клетки, блокирует синтез либо повреждает ДНК. Наибольшую опасность для человека представляют радионуклиды: ^{210}Po , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{235}U , ^{222}Rn .

Так, щитовидная железа ответственна за выработку гормонов, участвующих в обменных процессах в организме. Для нормального её функционирования необходим йод. Попадая в организм, радиоактивный йод-131 накапливается в щитовидной железе, вызывает сильнейшее облучение и приводит к образованию раковых опухолей. Чтобы уменьшить опасность такого воздействия, рекомендуется принимать препараты нерадиоактивного йода (KI).

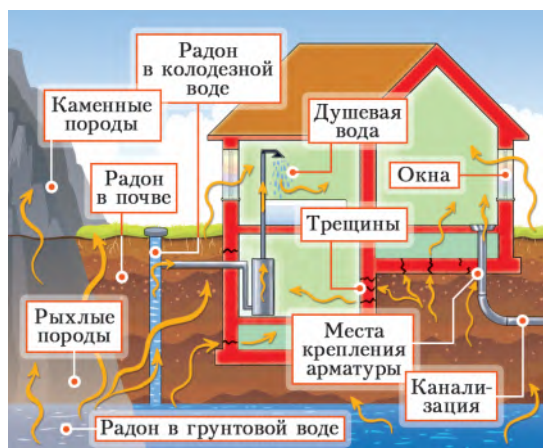


Рис. 14. Пути проникновения радиоактивного радона в жилые помещения

Радионуклид стронций-90 является химическим аналогом кальция, поэтому откладывается вместо кальция в костной ткани, вызывая поражение клеток костного мозга. Одна из мер профилактики такого заболевания на территориях, загрязнённых

стронцием-90, — это известкование почвы. Поступление нерадиоактивного кальция приводит к снижению количества стронция-90 не только в растениях, но и в организме животных и человека, употребляющих эти растения.



Радон является вторым по частоте (после курения) фактором, вызывающим рак лёгких. Он естественным образом выделяется из недр Земли и накапливается в подвальных помещениях. Оттуда по вентиляционным шахтам он проникает в жилые помещения (рис. 14). Чтобы уменьшить его содержание, а следовательно, и воздействие, необходимо хорошо проветривать помещения.

Радиоактивность (или радиоактивный распад) — это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер одних химических элементов в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием частиц высокой энергии, а также жёстким электромагнитным излучением.

Радиоактивный распад атомных ядер происходит с испусканием α -частиц (ядер гелия), β -частиц (электронов) и γ -лучей.

Вид атомов, подверженных радиоактивному распаду, называют радионуклидами.

Радиоактивные нуклиды используют в атомной энергетике, медицине, научных исследованиях и в военных целях.

Вопросы, задания, задачи

1. Что такое радиоактивность? Назовите виды радиоактивного распада.
2. Укажите характеристики α - и β -частиц, руководствуясь таблицей 4 на с. 37.
3. Назовите источники естественной радиоактивности.
4. Какую радиационную опасность для человека представляет нахождение в подвальных и непрветриваемых помещениях?
5. Сравните состав ядер нуклидов ^{131}I и ^{127}I , ^{137}Cs и ^{133}Cs , ^{90}Sr и ^{88}Sr .
6. Составьте уравнения ядерных реакций:



7. Радионуклиды ^{210}Po , ^{235}U , ^{222}Rn подвергаются α -распаду, а радионуклиды ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs — β -распаду. Составьте уравнения реакций их распада и назовите продукты.

8. Массовая доля калия в теле человека составляет 0,25 %. Из всего количества атомов калия на долю калия-40 приходится 0,0117 %. Рассчитайте число радиоактивных атомов ^{40}K в организме человека, масса которого — 60 кг.

9. Первой искусственной ядерной реакцией, которую осуществил Э. Резерфорд в 1919 году, была реакция взаимодействия атомов азота-14 с α -частицами. В ходе реакции образуется атом некоторого элемента и выделяется протон. Определите этот элемент.

10. Средняя энергия, которая выделяется при распаде одного ядра урана-235, равна $3,24 \cdot 10^{-11}$ Дж. Рассчитайте значение энергии, которая выделится при распаде урана-235:

- а) количеством 1 моль; б) массой 1 кг.

