

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 65. Радиоактивность как свидетельство сложного строения атомов

Предположение о том, что все тела состоят из мельчайших частиц, было высказано древнегреческими философами *Левкиппом* и *Демокритом* примерно 2500 лет назад. Частицы эти были названы *атомами*, что означает «неделимые». Таким названием хотели подчеркнуть, что атом — это мельчайшая, простейшая, не имеющая составных частей и поэтому неделимая частица.

Но примерно с середины XIX в. стали появляться экспериментальные факты, которые ставили под сомнение представления о неделимости атомов. Результаты этих экспериментов наводили на мысль о том, что атомы имеют сложную структуру и что в их состав входят электрически заряженные частицы.

Наиболее ярким свидетельством сложного строения атома явилось открытие явления радиоактивности, сделанное французским физиком *Анри Беккерелем* в 1896 г.

Беккерель обнаружил, что химический элемент уран самопроизвольно (т. е. без каких-либо внешних воздействий) излучает ранее неизвестные невидимые лучи, которые позже были названы *радиоактивным излучением*.

Поскольку радиоактивное излучение обладало необычными свойствами, многие ученые занялись его исследованием. Оказалось, что не только уран, но и некоторые другие химические элементы (например, радий) тоже самопроизвольно испускают радиоактивные лучи. Эту способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению стали называть *радиоактивностью* (от латинских слов *radio* — излучаю и *activus* — действенный).

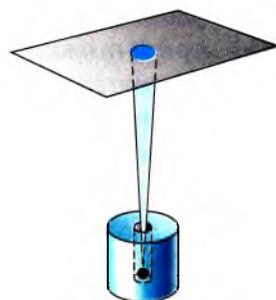
В 1899 г. в результате опыта, проведенного под руководством английского физика *Эрнеста Резерфорда*, было обнаружено, что радиоактивное излучение радия неоднородно, т. е. оно имеет сложный состав. Рассмотрим, как проводился этот опыт.

На рисунке 167, а изображен толстостенный свинцовый сосуд с крупницей радия на дне. Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия направлено во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может). После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно темное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок.

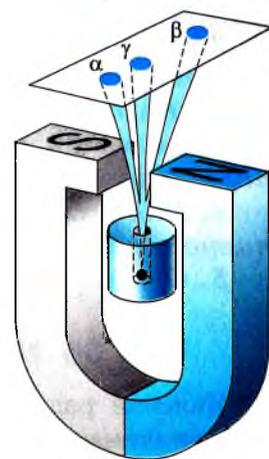
Потом опыт изменяли (рис. 167, б): создавали сильное магнитное поле, действовавшее на пучок. В этом случае на проявленной пластинке возникало три пятна: одно, центральное, было на том же месте, что и раньше, а два других — по разные стороны от центрального. Если два потока отклонились в магнитном поле от прежнего направления, значит, они представляют собой потоки заряженных частиц. Отклонение в разные стороны свидетельствовало о разных знаках электрических зарядов частиц. В одном потоке присутствовали только положительно заряженные частицы, в другом — отрицательно заряженные. А центральный поток представлял собой излучение, не имеющее электрического заряда.

Положительно заряженные частицы называли *альфа-частицами*, отрицательно заряженные — *бета-частицами*, а нейтральные — *гамма-частицами* или гамма-квантами (в сокращенном обозначении α -частицы, β -частицы и γ -частицы, называемые также γ -квантами или фотонами).

Некоторое время спустя в результате исследования различных физических характеристик и свойств этих частиц (электрического заряда, массы и др.) удалось установить, что *β -частица представляет собой электрон, а α -частица — полностью ионизированный атом химического элемента гелия (т. е. атом гелия,*



а)



б)

Рис. 167

потерявший оба электрона). Выяснилось также, что γ -излучение представляет собой один из видов, точнее, диапазонов электромагнитного излучения (см. рис. 143).

Явление радиоактивности, т. е. самопроизвольное излучение веществом α -, β - и γ -частиц, наряду с другими экспериментальными фактами, послужило основанием для предположения о том, что атомы вещества имеют сложный состав.

? Вопросы

1. В чем заключалось открытие, сделанное Беккерелем в 1896 г.?

2. Как стали называть способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению?

3. Расскажите, как проводился опыт, схема которого изображена на рисунках 167, а, б. Что выяснилось в результате этого опыта?

4. Как были названы частицы, входящие в состав радиоактивного излучения? Что представляют собой эти частицы?

5. О чем свидетельствовало явление радиоактивности?

§ 66. Модели атомов. Опыт Резерфорда

Явление радиоактивности давало основания предположить, что в состав атома входят отрицательно и положительно заряженные частицы (см. § 65). Кроме того, было известно, что атом в целом нейтрален.

Опираясь на эти и некоторые другие факты, английский физик **Джозеф Джон Томсон** предложил в 1903 г. одну из первых моделей строения атома. По предположению Томсона, атом представляет собой шар, по всему объему которого равномерно распределен положительный заряд. Внутри этого шара находятся электроны. Каждый электрон может совершать колебательные движения около своего положения равновесия. Положительный заряд шара равен по модулю суммарному отрицательному заряду электронов, поэтому электрический заряд атома в целом равен нулю.

Модель строения атома, предложенная Томсоном, нуждалась в экспериментальной проверке. В частности, важно было проверить, действительно ли положительный заряд распределен по всему объему атома с постоянной плотностью. Поэтому в 1911 г. Резерфорд совместно со своими сотрудниками провел ряд опытов по исследованию состава и строения атомов.

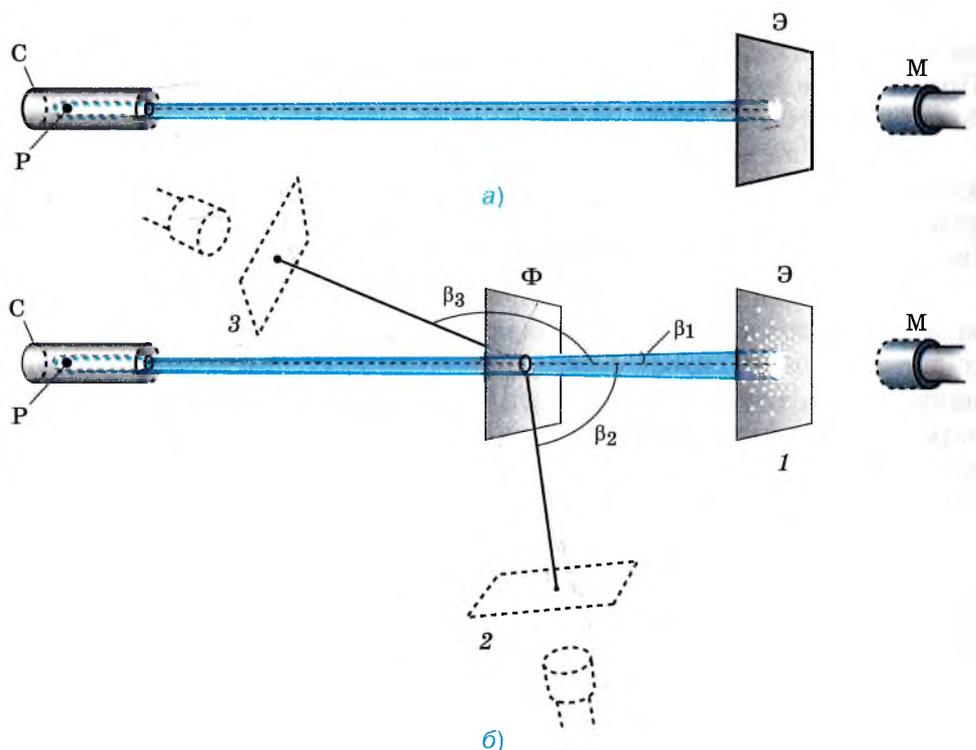


Рис. 168

Чтобы понять, как проводились эти опыты, рассмотрим рисунок 168, *а*, *б*. На каждом из них изображен свинцовый сосуд *С* с радиоактивным веществом *Р*, излучающим α -частицы (напомним, что α -частицы обладают положительным электрическим зарядом, равным модулю удвоенного заряда электрона). Из этого сосуда α -частицы вылетают через узкий канал со скоростью порядка 15 000 км/с.

Поскольку α -частицы непосредственно увидеть невозможно, то для их обнаружения служит стеклянный экран *Э*. Экран покрыт тонким слоем специального вещества, благодаря чему в местах попадания в экран α -частиц возникают вспышки, которые наблюдаются с помощью микроскопа *М*. Такой метод регистрации частиц называется *методом сцинтилляций* (т. е. вспышек).

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачан воздух (чтобы устранить рассеяние α -частиц за счет их столкновений с молекулами воздуха).

Если на пути α -частиц нет никаких препятствий, то они падают на экран узким, слегка расширяющимся пучком (см. рис. 168, а). При этом все возникающие на экране вспышки сливаются в одно небольшое световое пятно.

Если же на пути α -частиц поместить тонкую фольгу Φ из исследуемого металла (см. рис. 168, б), то при взаимодействии с веществом α -частицы рассеиваются по всем направлениям на разные углы β (на рисунке изображены только три угла: β_1 , β_2 и β_3).

Когда экран находится в положении 1, наибольшее количество вспышек расположено в центре экрана. Значит, основная часть всех α -частиц прошла сквозь фольгу, почти не изменив первоначального направления (рассеялась на малые углы). При удалении от центра экрана количество вспышек становится все меньше и меньше. Следовательно, с увеличением угла рассеяния β количество рассеянных на эти углы частиц резко уменьшается.

Перемещая экран вместе с микроскопом вокруг фольги, можно обнаружить, что некоторое (очень небольшое) число частиц рассеялось на углы, близкие к 90° (это положение экрана обозначено цифрой 2), а некоторые единичные частицы — на углы порядка 180° , т. е. в результате взаимодействия с фольгой были отброшены назад (положение 3).

Именно эти случаи рассеяния α -частиц на большие углы дали Резерфорду наиболее важную информацию для понимания того, как устроены атомы веществ. Проанализировав результаты опытов, Резерфорд пришел к выводу, что

столь сильное отклонение α -частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле. Было рассчитано, что такое поле могло быть создано зарядом, сконцентрированным в очень малом объеме (по сравнению с объемом атома).

Поскольку масса электрона примерно в 8000 раз меньше массы α -частицы, электроны, входящие в состав атома, не могли существенным образом изменить направление движения α -частиц. Поэтому в данном случае речь может идти только о силах электрического отталкивания между α -частицами и положительно заряженной частью атома, масса которой значительно больше массы α -частицы.

Исходя из этих соображений, Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель атома (о которой вы уже имеете представление из курса физики 8 класса). Напомним, что согласно этой модели в центре

атома находится положительно заряженное ядро, занимающее очень малый объем атома. Вокруг ядра движутся электроны, масса которых значительно меньше массы ядра. Атом электрически нейтрален, поскольку заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

На основании результатов вышеописанных опытов Резерфорд сумел оценить размеры атомных ядер. Оказалось, что в зависимости от массы атома его ядро имеет диаметр порядка 10^{-14} — 10^{-15} м, т. е. оно в десятки и даже сотни тысяч раз меньше атома (атом имеет диаметр около 10^{-10} м).

Рисунок 169 поясняет процесс прохождения α -частиц сквозь атомы вещества с точки зрения ядерной модели. На этом рисунке показано, как меняется траектория полета α -частиц в зависимости от того, на каком расстоянии от ядра они пролетают. Напряженность (E) создаваемого ядром электрического поля, а значит, и сила действия на α -частицу довольно быстро убывают с увеличением расстояния от ядра. Поэтому направление полета частицы сильно меняется только в том случае, если эта частица проходит очень близко к ядру.

Поскольку диаметр ядра значительно меньше диаметра атома, то большая часть из числа всех α -частиц проходит сквозь атом на таких расстояниях от ядра, где сила отталкивания создаваемого им поля слишком мала, чтобы существенно изменить направление движения α -частиц. И только очень немногие частицы пролетают рядом с ядром, т. е. в области сильного поля, и отклоняются на большие углы. Именно такие результаты и были получены в опыте Резерфорда.

Таким образом, в результате опытов по рассеянию α -частиц была доказана несостоятельность модели атома Томсона, выдвинута ядерная модель строения атома и проведена оценка диаметров атомных ядер.

? Вопросы

1. Что представлял собой атом согласно модели, предложенной Томсоном?
2. Пользуясь рисунком 168, расскажите, как проводился опыт по рассеянию α -частиц.

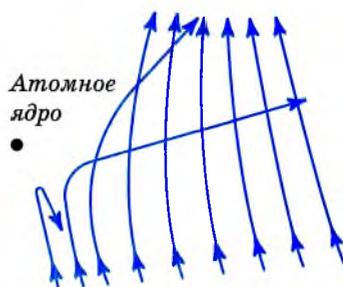


Рис. 169

3. Какой вывод был сделан Резерфордом на основании того, что некоторые α -частицы при взаимодействии с фольгой рассеялись на большие углы?

4. Что представляет собой атом согласно ядерной модели, выдвинутой Резерфордом?

5. По рисунку 169 расскажите, как проходят α -частицы сквозь атомы вещества согласно ядерной модели.

§ 67. Радиоактивные превращения атомных ядер

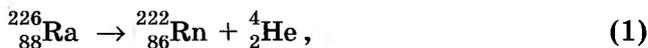
В 1903 г. (т. е. еще до обнаружения существования атомных ядер) Эрнест Резерфорд и его сотрудник, английский химик **Фредерик Содди**, обнаружили, что радиоактивный элемент радий в процессе α -распада (т. е. самопроизвольного излучения α -частиц) превращается в другой химический элемент — радон.

Радий и радон — это совершенно разные вещества, они отличаются по своим физическим и химическим свойствам. Радий — металл, при обычных условиях он находится в твердом состоянии, а радон — инертный газ. Эти химические элементы занимают разные клетки в таблице Д. И. Менделеева (см. фёрзац учебника). Их атомы отличаются массой, зарядом ядра, числом электронов в электронной оболочке. Они по-разному вступают в химические реакции.

Дальнейшие опыты с различными радиоактивными препаратами показали, что *не только при α -распаде, но и при β -распаде происходит превращение одного химического элемента в другой.*

После того как в 1911 г. Резерфордом была предложена ядерная модель атома (положительно заряженное ядро и движущиеся вокруг него электроны), стало очевидным, что *именно ядро претерпевает изменения при радиоактивных превращениях.* Действительно, если бы изменения затрагивали только электронную оболочку атома (например, потеря одного или нескольких электронов), то при этом атом превращался бы в ион того же самого химического элемента, а вовсе не в атом другого элемента, с другими физическими и химическими свойствами.

Реакция α -распада ядра атома радия с превращением его в ядро атома радона записывается так:



где знаком ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ обозначено ядро атома радия, знаком ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ — ядро атома радона и знаком ${}_2^4\text{He}$ — α -частица, или, что то же самое, ядро

атома гелия (т. е. ядра атомов обозначаются так же, как и сами атомы в таблице Д. И. Менделеева).

Число, стоящее перед буквенным обозначением ядра сверху, называется *массовым числом*, а снизу — *зарядовым числом* (или атомным номером).

В § 71 приводятся определения и условные обозначения массового и зарядового чисел, раскрывается их физический смысл, указывается, как их можно найти.

Пока же нам достаточно знать об этих числах следующее.

Массовое число ядра атома данного химического элемента с точностью до целых чисел равно числу атомных единиц массы, содержащихся в массе этого ядра. (Напомним, что одна атомная единица массы (сокращенно 1 а. е. м.) равна $1/12$ части массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$.)

Зарядовое число ядра атома данного химического элемента равно числу элементарных электрических зарядов, содержащихся в заряде этого ядра. (Напомним, что элементарным электрическим зарядом называется наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный по модулю заряду электрона.)

Можно сказать и так: *зарядовое число равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах.*

Оба эти числа — массовое и зарядовое — всегда целые и положительные. Они не имеют никакого наименования, поскольку указывают, во сколько раз масса и заряд ядра больше единичных.

Запись (1) означает, что ядро атома радия в результате излучения им α -частицы теряет приблизительно четыре атомные единицы массы и два элементарных заряда, превращаясь при этом в ядро атома радона.

Из этой записи видно, что в процессе радиоактивного распада выполняются *законы сохранения массового числа и заряда*: массовое число (226) и заряд (88) распадающегося ядра атома радия равны соответственно сумме массовых чисел ($222 + 4 = 226$) и сумме зарядов ($86 + 2 = 88$) ядер атомов радона и гелия, образовавшихся в результате этого распада.

Таким образом, из открытия, сделанного Резерфордом и Содди, следовало, что *ядра атомов имеют сложный состав*, т. е. состоят из каких-то частиц. Кроме того, стало ясно, что *радиоактивность* —

это способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.

Явление радиоактивности позволило ученым сделать вывод о сложном строении ядра.

? Вопросы

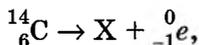
- 1. Что происходит с радием в результате α -распада?*
- 2. Что происходит с радиоактивными химическими элементами в результате α - или β -распада?*
- 3. Какая часть атома — ядро или электронная оболочка — претерпевает изменения при радиоактивном распаде? Почему вы так думаете?*
- 4. Запишите реакцию α -распада радия и объясните, что означает каждый символ в этой записи.*
- 5. Как называются верхнее и нижнее числа, стоящие перед буквенным обозначением элемента?*
- 6. Чему равно массовое число? зарядовое число?*
- 7. На примере реакции α -распада радия объясните, в чем заключаются законы сохранения заряда (зарядового числа) и массового числа.*
- 8. Какой вывод следовал из открытия, сделанного Резерфордом и Содди?*
- 9. Что такое радиоактивность?*

🔗 Упражнение 51

- Определите массу (в а. е. м. с точностью до целых чисел) и заряд (в элементарных зарядах) ядер атомов следующих элементов: углерода $^{12}_6\text{C}$; лития ^6_3Li ; кальция $^{40}_{20}\text{Ca}$.
- Сколько электронов содержится в атомах каждого из химических элементов, перечисленных в предыдущей задаче?
- Определите (с точностью до целых чисел), во сколько раз масса ядра атома лития ^6_3Li больше массы ядра атома водорода ^1_1H .
- Для ядра атома бериллия ^9_4Be определите: а) массовое число; б) массу ядра в а. е. м. (с точностью до целых чисел); в) во сколько раз масса ядра больше $1/12$ массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$ (с точностью до целых чисел); г) зарядовое число; д) заряд ядра в элементарных электри-

ческих зарядах; е) суммарный заряд всех электронов в атоме в элементарных электрических зарядах; ж) число электронов в атоме.

5. Пользуясь законами сохранения массового числа и заряда, определите массовое число и заряд ядра химического элемента X, образующегося в результате следующей реакции β -распада:



где ${}^0_{-1}e$ — β -частица (электрон).

Найдите этот элемент в таблице Д. И. Менделеева на форзаце учебника. Как он называется?

§ 68. Экспериментальные методы исследования частиц

Для дальнейшего развития ядерной физики (в частности, для исследования строения атомных ядер) необходимы были специальные устройства, с помощью которых можно было бы регистрировать ядра и различные частицы, а также изучать их взаимодействия.

Один из методов регистрации частиц — метод сцинтилляций — описан в § 66. Но этот метод не дает необходимой точности, так как результат подсчета вспышек на экране в большой степени зависит от остроты зрения наблюдателя. Кроме того, длительное наблюдение оказывается невозможным, так как глаз быстро устает.

Более совершенным прибором для регистрации частиц является так называемый *счетчик Гейгера*, изобретенный в 1908 г.

Для рассмотрения устройства и принципа действия этого прибора обратимся к рисунку 170. Счетчик Гейгера состоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (т. е. отрицательно заряженным электродом), и натянутой вдоль его оси тонкой проволочки — анода (т. е. положительного электрода). Катод и анод через сопротивление R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000 В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле.

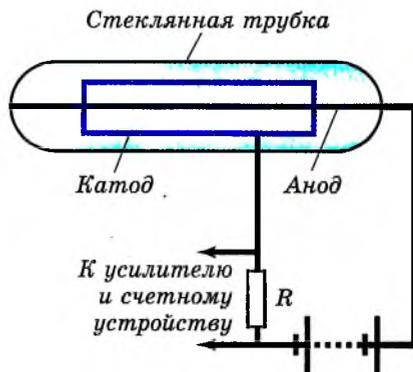


Рис. 170

Оба электрода помещают в герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь ее стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество электрон-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны на длине свободного пробега (т. е. между соударениями с молекулами газа) приобретают достаточно большую энергию и тоже ионизируют атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется так называемая электронно-ионная лавина, в результате чего происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на сопротивлении R . Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счетчик частицы, регистрируется специальным устройством.

Поскольку сопротивление R очень велико (порядка 10^9 Ом), то в момент протекания тока основная доля напряжения источника падает именно на нем, в результате чего напряжение между катодом и анодом резко уменьшается и разряд автоматически прекращается (так как это напряжение становится недостаточным для образования новых поколений электронно-ионных пар). Счетчик готов к регистрации следующей частицы.

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации γ -квантов.

Счетчик Гейгера позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица. Гораздо большие возможности для изучения микромира дает прибор, изобретенный в 1912 г. и называемый *камерой Вильсона* (рис. 171).

Камера Вильсона состоит из невысокого стеклянного цилиндра CC со стеклянной крышкой LL (на рисунке цилиндр показан в разрезе). Внутри цилиндра может двигаться поршень P . На дне камеры находится черная ткань FF . Благодаря тому что ткань увлажнена смесью воды со спиртом, воздух в камере насыщен парами этих жидкостей.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

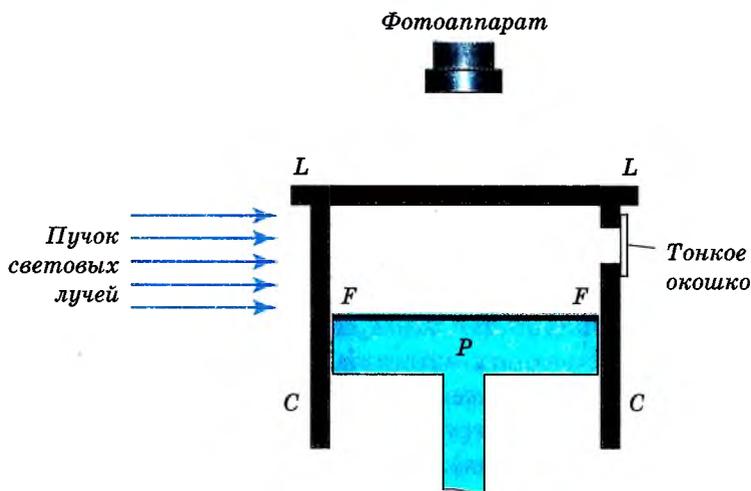


Рис. 171

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из нее предварительно удаляются так называемые **ядра конденсации** (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары становятся *пересыщенными*, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере ядрах конденсации, например на ионах.

Исследуемые частицы впускаются в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своем пути ионы. Эти ионы и становятся ядрами конденсации, на которых пары конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары этилового спирта — на положительных). Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек (*трек*), благодаря чему траектория движения становится видимой.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то траектории заряженных частиц искривляются. По направлению изгиба следа можно судить о знаке заряда частицы, а по радиусу кривизны определять ее массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок камеры, и капельки испаряются. Чтобы по-

лучить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагретый при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Обычно треки частиц в камере Вильсона не только наблюдают, но и фотографируют. При этом камеру освещают сбоку мощным пучком световых лучей, как показано на рисунке 171.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

Одной из разновидностей камеры Вильсона является изобретенная в 1952 г. *пузырьковая камера*. Она действует примерно по тому же принципу, что и камера Вильсона, но вместо пересыщенного пара в ней используется перегретая выше точки кипения жидкость (например, жидкий водород). При движении в этой жидкости заряженной частицы вдоль ее траектории образуется ряд пузырьков пара. Пузырьковая камера обладает большим быстродействием по сравнению с камерой Вильсона.

? Вопросы

1. По рисунку 170 расскажите об устройстве и принципе действия счетчика Гейгера.

2. Для регистрации каких частиц применяется счетчик Гейгера?

3. По рисунку 171 расскажите об устройстве и принципе действия камеры Вильсона.

4. Какие характеристики частиц можно определить с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле?

5. В чем преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона? Чем отличаются эти приборы?

§ 69. Открытие протона

Когда выяснилось, что ядра атомов имеют сложное строение, встал вопрос о том, из каких именно частиц они состоят.

В 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул гипотезу о том, что одной из частиц, входящих в состав атомных ядер всех химических элементов, является ядро атома водорода.

Основанием для такого предположения послужил ряд появившихся к тому времени фактов, полученных опытным путем. В част-

ности, было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз (т. е. кратны ей).

В 1919 г. Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия α -частиц с ядрами атомов азота.

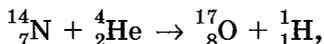
В этом опыте α -частица, летящая с огромной скоростью, при попадании в ядро атома азота выбивала из него какую-то частицу. По предположению Резерфорда, этой частицей было ядро атома водорода, которое Резерфорд назвал *протоном* (от греческого слова *prótos* — первый). Но поскольку наблюдение этих частиц велось методом сцинтилляций (т. е. вспышек на экране, в который попадали частицы), то нельзя было точно определить, какая именно частица вылетала из ядра атома азота.

Удостовериться в том, что из ядра атома действительно вылетал протон, удалось только несколько лет спустя, когда реакция взаимодействия α -частицы с ядром атома азота была проведена в *камере Вильсона*.

Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооруженным глазом можно увидеть треки (т. е. траектории) частиц, быстро движущихся в ней (рис. 172).

На рисунке видны расходящиеся веером прямые линии. Это следы α -частиц, которые пролетели сквозь пространство камеры, не испытав соударений с ядрами атомов азота. Но след одной α -частицы раздваивается, образуя так называемую «вилку». Это означает, что в точке раздвоения трека произошло взаимодействие α -частицы с ядром атома азота, в результате чего образовались ядра атомов кислорода и водорода. То, что образуются именно эти ядра, было выяснено по характеру искривления треков при помещении камеры Вильсона в магнитное поле.

Реакцию взаимодействия ядра азота с α -частицами с образованием ядер кислорода и водорода записывают так:



где символом ${}^1_1\text{H}$ обозначен протон, т. е. ядро атома водорода, с массой, приблизительно равной 1 а. е. м. (точнее, 1,0072765 а. е. м.), и поло-

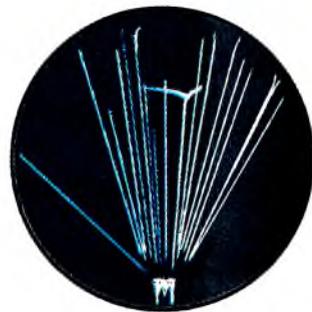


Рис. 172

жительным зарядом, равным элементарному (т. е. модулю заряда электрона). Для обозначения протона используют также символ ${}^1_1\text{p}$.

В дальнейшем было исследовано взаимодействие α -частиц с ядрами атомов других элементов: бора (B), натрия (Na), алюминия (Al), магния (Mg) и многих других. В результате выяснилось, что из всех этих ядер α -частицы выбивали протоны. Это давало основания полагать, что протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов.

? Вопросы

1. Расскажите об опыте, проведенном Резерфордом в 1919 г.
2. О чем говорит фотография треков частиц в камере Вильсона (рис. 172)?
3. Как иначе называется и каким символом обозначается ядро атома водорода? Каковы его масса и заряд?
4. Какое предположение (относительно состава ядер) позволяли сделать результаты опытов по взаимодействию α -частиц с ядрами атомов различных элементов?

🔗 Упражнение 52

Рассмотрите запись ядерной реакции взаимодействия ядер азота и гелия, в результате чего образуются ядра кислорода и водорода. Сравните суммарный заряд взаимодействующих ядер с суммарным зарядом ядер, образованных в результате этого взаимодействия. Сделайте вывод о том, выполняется ли закон сохранения электрического заряда в данной реакции.

§ 70. Открытие нейтрона

Открытие протона не давало полного ответа на вопрос о том, из каких частиц состоят ядра атомов. Если считать, что атомные ядра состоят только из протонов, то возникает противоречие.

Покажем на примере ядра атома бериллия (${}^9_4\text{Be}$), в чем заключается это противоречие.

Допустим, что ядро ${}^9_4\text{Be}$ состоит только из протонов. Поскольку заряд каждого протона равен одному элементарному заряду, то число

протонов в ядре должно быть равно зарядовому числу, в данном случае четырем.

Но если бы ядро бериллия действительно состояло только из четырех протонов, то его масса была бы приблизительно равна 4 а. е. м. (так как масса каждого протона приблизительно равна 1 а. е. м.).

Однако это противоречит опытным данным, согласно которым масса ядра атома бериллия приблизительно равна 9 а. е. м.

Таким образом, становится ясно, что в ядра атомов помимо протонов входят еще какие-то частицы.

В связи с этим в 1920 г. Резерфордом было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона.

В начале 30-х гг. XX в. были обнаружены неизвестные ранее лучи. Они были названы *бериллиевым излучением*, так как возникали при бомбардировке α -частицами бериллия.

В 1932 г. английский ученый *Джеймс Чедвик* (ученик Резерфорда) с помощью опытов, проведенных в камере Вильсона, доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток электрически нейтральных частиц, масса которых приблизительно равна массе протона. Отсутствие у исследуемых частиц электрического заряда следовало, в частности, из того, что они не отклонялись ни в электрическом, ни в магнитном поле. А массу частиц удалось оценить по их взаимодействию с другими частицами.

Эти частицы были названы *нейтронами*. Нейтрон принято обозначать символом 1_0n . Точные измерения показали, что масса нейтрона равна 1,0086649 а. е. м., т. е. чуть больше массы протона. Во многих случаях массу нейтрона (как и массу протона) считают равной 1 а. е. м. Поэтому вверху перед символом нейтрона ставят единицу. Нуль внизу означает отсутствие электрического заряда.

? Вопросы

1. К какому противоречию приводит предположение о том, что ядра атомов состоят только из протонов? Поясните это на примере.

2. Кем впервые было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона?

3. Кто и когда первым доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток нейтронов?

4. Как было доказано отсутствие у нейтронов электрического заряда? Как была оценена их масса?

5. Как обозначается нейтрон, какова его масса по сравнению с массой протона?

§ 71. Состав атомного ядра.

Массовое число. Зарядовое число

Открытие нейтрона дало толчок к пониманию того, как устроены ядра атомов.

В том же 1932 г., когда был открыт нейтрон, советским физиком *Дмитрием Дмитриевичем Иваненко* и немецким физиком *Вернером Гейзенбергом* была предложена *протонно-нейтронная модель строения ядер*, справедливость которой была впоследствии подтверждена экспериментально.

Протоны и нейтроны называются *нуклонами* (от латинского nucleus — ядро). Используя этот термин, можно сказать, что атомные ядра состоят из нуклонов.

Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом и обозначается буквой A.

Массовое число ставится сверху перед буквенным обозначением химического элемента. Так, например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ массовое число $A = 14$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $A = 56$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $A = 235$.

Понятно, что *массовое число A (т. е. общее число нуклонов в ядре) численно равно массе ядра m, выраженной в атомных единицах массы и округленной до целых чисел* (поскольку масса каждого нуклона примерно равна 1 а. е. м.). Например, для азота $A = 14$, $m \approx 14$ а. е. м., для железа $A = 56$, $m \approx 56$ а. е. м. и т. д.

Число протонов в ядре называется зарядовым числом и обозначается буквой Z.

Например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ $Z = 7$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $Z = 26$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $Z = 92$ и т. д. Как видно из приведенных примеров, зарядовое число ставится внизу перед буквенным обозначением элемента.

Заряд каждого протона равен элементарному электрическому заряду. Поэтому *зарядовое число Z (т. е. число протонов в ядре) численно равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах. Для каждого химического элемента зарядовое число равно атомному (порядковому) номеру в таблице Д. И. Менделеева.*

Ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: A_ZX (под X подразумевается символ химического элемента).

Число нейтронов в ядре обычно обозначают буквой N (не путайте с химическим символом азота). Поскольку массовое число A представляет собой общее число протонов и нейтронов в ядре, то можно записать: $A = Z + N$.

На основе протонно-нейтронной модели строения атомных ядер было дано объяснение интересным экспериментальным фактам, открытым в первые два десятилетия XX в.

Так, в ходе изучения свойств радиоактивных элементов было обнаружено, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различными по массе ядрами.

Одинаковый заряд ядер свидетельствует о том, что они имеют один и тот же порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева, т. е. занимают в таблице одну и ту же клетку, одно и то же место. Отсюда и произошло название всех разновидностей одного химического элемента: **изотопы** (от греческих слов *isos* — одинаковый и *topos* — место).

Изотопы — это разновидности данного химического элемента, различающиеся по массе атомных ядер.

Благодаря созданию протонно-нейтронной модели ядра (т. е. примерно через два десятилетия после открытия изотопов), удалось объяснить, почему атомные ядра с одним и тем же зарядом обладают разными массами. Очевидно, ядра атомов изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Так, например, существует три изотопа водорода: ${}^1_1\text{H}$ (протий), ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий) и ${}^3_1\text{H}$ (тритий). Ядро изотопа ${}^1_1\text{H}$ вообще не имеет нейтронов — оно представляет собой один протон. В состав ядра дейтерия (${}^2_1\text{H}$) входят две частицы: протон и нейтрон. Ядро трития ${}^3_1\text{H}$ состоит из трех частиц: одного протона и двух нейтронов.

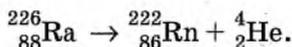
? Вопросы

1. Как называются протоны и нейтроны вместе?
2. Что называется массовым числом и какой буквой оно обозначается?
3. Что можно сказать о числовом значении массы атома (в а. е. м.) и его массовом числе?
4. Как называется и какой буквой обозначается число протонов в ядре?
5. Что можно сказать о зарядовом числе, заряде ядра (выраженном в элементарных электрических зарядах) и порядковом номере в таблице Д. И. Менделеева для любого химического элемента?
6. Как в общем виде принято обозначать ядро любого химического элемента?
7. Какой буквой обозначают число нейтронов в ядре?
8. Какой формулой связаны между собой массовое число, зарядовое число и число нейтронов в ядре?
9. Как с точки зрения протонно-нейтронной модели ядра объясняется существование ядер с одинаковыми зарядами и различными массами?

🔗 Упражнение 53

1. Сколько нуклонов в ядре атома бериллия ${}^9_4\text{Be}$? Сколько в нем протонов? нейтронов?
2. Для атома калия ${}^{39}_{19}\text{K}$ определите: а) зарядовое число; б) число протонов; в) заряд ядра (в элементарных электрических зарядах); г) число электронов; д) порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева; е) массовое число ядра; ж) число нуклонов; з) число нейтронов; и) массу ядра (в а. е. м. с точностью до целых чисел).
3. Определите с помощью таблицы Д. И. Менделеева, атом какого химического элемента имеет: а) 3 протона в ядре; б) 9 электронов.
4. При α -распаде исходное ядро, излучая α -частицу ${}^4_2\text{He}$, превращается в ядро атома другого химического элемента.

Например,

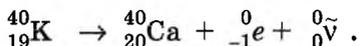


На сколько клеток и в какую сторону (к началу или к концу таблицы Д. И. Менделеева) смещен образовавшийся элемент по отношению к исходному?

Перепишите в тетрадь данное ниже *правило смещения для α -распада*, заполнив пропуски:

при α -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетки ближе к ее ..., чем исходный.

5. При β -распаде исходного ядра один из входящих в это ядро нейтронов превращается в протон, электрон ${}_{-1}^0e$ и антинейтрино ${}_{0}^0\bar{\nu}$ (частицу, легко проходящую сквозь земной шар и, возможно, не имеющую массы). Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон остается в ядре, увеличивая его заряд на единицу. Например,



Перепишите данное ниже *правило смещения для β -распада*, заполнив пропуски нужными словами:

при β -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетку ближе к ... таблицы, чем исходный.

§ 72. Ядерные силы

Гипотеза о том, что атомные ядра состоят из *протонов* и *нейтронов*, подтверждалась многими экспериментальными фактами. Это свидетельствовало о справедливости протонно-нейтронной модели строения ядра.

Но возникал вопрос: почему ядра не распадаются на отдельные нуклоны под действием сил электростатического отталкивания между положительно заряженными протонами?

Расчеты показывают, что нуклоны не могут удерживаться вместе за счет сил притяжения гравитационной или магнитной природы, поскольку эти силы существенно меньше электростатических.

В поисках ответа на вопрос об устойчивости атомных ядер ученые предположили, что *между всеми нуклонами в ядрах* действуют какие-то особые силы притяжения, которые значительно превосходят электростатические силы отталкивания между протонами. Эти силы назвали *ядерными*.

Гипотеза о существовании ядерных сил оказалась правильной. Выяснилось также, что ядерные силы являются короткодействующими: на расстоянии 10^{-15} м они примерно в 100 раз больше сил электростатического взаимодействия, но уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются ничтожно малыми. Другими словами, ядерные силы действуют на расстояниях, сравнимых с размерами самих ядер.

? Вопросы

1. Какой вопрос возникал в связи с гипотезой о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов? Какое предположение пришлось сделать ученым для ответа на этот вопрос?

2. Как называются силы притяжения между нуклонами в ядре и каковы их характерные особенности?

⌘ Упражнение 54

Как вы думаете, действуют ли между нуклонами в ядре силы гравитационного притяжения (т. е. силы всемирного тяготения)?

§ 73. Энергия связи. Дефект масс

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой (свободные) нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, т. е. сообщить ядру определенную энергию. Наоборот, при соединении свободных нуклонов в ядро выделяется такая же энергия (по закону сохранения энергии).

Минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?

Наиболее простой путь нахождения этой энергии основан на применении закона о взаимосвязи массы и энергии, открытого знаменитым ученым Альбертом Эйнштейном в 1905 г.

Согласно этому закону между массой m системы частиц и *энергией покоя*, т. е. внутренней энергией E_0 этой системы, существует прямая пропорциональная зависимость:

$$E_0 = mc^2, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме.

Значит, если энергия покоя системы частиц в результате каких-либо процессов изменится на величину ΔE_0 , то это повлечет за собой соответствующее изменение массы этой системы на величину Δm , причем связь между этими величинами выразится равенством:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}, \quad (2)$$

или

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2. \quad (3)$$

Таким образом, при слиянии свободных нуклонов в ядро в результате выделения энергии (которая уносится излучаемыми при этом фотонами) должна уменьшиться и масса нуклонов. Другими словами,

масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых оно состоит.

Недостаток массы ядра Δm по сравнению с суммарной массой составляющих его нуклонов можно записать так:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{я}}$ — масса ядра, Z и N — число протонов и нейтронов в ядре, а m_p и m_n — масса свободных протона и нейтрона.

Величина Δm в формуле (4) называется *дефектом масс*.

Наличие дефекта масс подтверждается многочисленными опытами.

Пользуясь формулой (3), рассчитаем, например, энергию связи ΔE_0 ядра атома дейтерия ${}^2_1\text{H}$ (тяжелого водорода), состоящего из одного протона и одного нейтрона. Другими словами, рассчитаем энергию, необходимую для расщепления ядра на протон и нейтрон.

Для этого определим сначала дефект масс Δm этого ядра, взяв приближенные значения масс нуклонов и массы ядра атома дейте-

¹ Греческой буквой Δ («дельта») принято обозначать изменение той физической величины, перед символом которой эта буква ставится.

рия из соответствующих таблиц. Согласно табличным данным, масса протона приблизительно равна 1,0073 а. е. м., масса нейтрона — 1,0087 а. е. м., масса ядра дейтерия — 2,0141 а. е. м. Значит,

$$\begin{aligned}\Delta m &= (1,0073 \text{ а. е. м.} + 1,0087 \text{ а. е. м.}) - 2,0141 \text{ а. е. м.} = \\ &= 0,0019 \text{ а. е. м.}\end{aligned}$$

Если мы хотим получить энергию связи в джоулях, то дефект масс нужно выразить в килограммах. Учитывая, что 1 а. е. м. = $1,6605 \cdot 10^{-27}$ кг, получим:

$$\Delta m = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,0019 = 0,0032 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Подставив это значение дефекта масс в формулу (3), получим:

$$\begin{aligned}\Delta E_0 &= 0,0032 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 0,0288 \cdot 10^{-11} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \\ &= 0,0288 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.\end{aligned}$$

По формуле (3) можно рассчитывать энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе любых ядерных реакций, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия ядер и частиц.

? Вопросы

1. Что называется энергией связи ядра?
2. Запишите формулу для определения дефекта масс любого ядра.
3. Запишите формулу для расчета энергии связи ядра по его дефекту масс.

§ 74. Деление ядер урана

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учеными *Отто Ганом* и *Фрицем Штрассманом*.

Рассмотрим механизм этого явления. На рисунке 173, а условно изображено ядро атома урана (${}_{92}^{235}\text{U}$). Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 173, б).

Мы уже знаем, что в ядре действует два вида сил: *электростатические силы отталкивания между протонами*, стремящиеся разорвать ядро, и *ядерные силы притяжения между всеми нуклонами*, благодаря которым ядро не распадается. Но ядерные силы — короткодействующие, поэтому в вытянутом ядре они уже не могут удержать сильно удаленные друг от друга части ядра. Под действием электростатических сил отталкивания ядро разрывается на две части (рис. 173, в), которые разлетаются в разные стороны с огромной скоростью и излучают при этом 2—3 нейтрона.

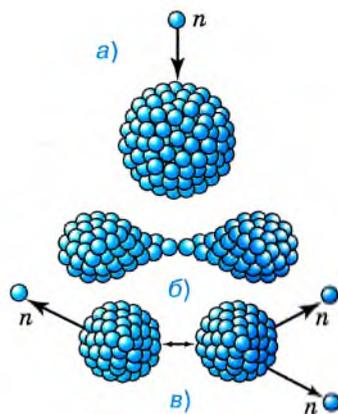


Рис. 173

Получается, что часть внутренней энергии ядра переходит в кинетическую энергию разлетающихся осколков и частиц. Осколки быстро тормозятся в окружающей среде, в результате чего их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию среды (т. е. в энергию взаимодействия и теплового движения составляющих ее частиц).

При одновременном делении большого количества ядер урана внутренняя энергия окружающей уран среды и соответственно ее температура заметно возрастают (т. е. среда нагревается).

Таким образом, *реакция деления ядер урана идет с выделением энергии в окружающую среду*.

Энергия, заключенная в ядрах атомов, колоссальна. Например, при полном делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 2,5 т нефти.

? Вопросы

1. Когда было открыто деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами?

2. Почему деление ядра может начаться только тогда, когда оно деформируется под действием поглощенного им нейтрона?

3. Что образуется в результате деления ядра?

4. В какую энергию переходит часть внутренней энергии ядра при его делении?

5. В какой вид энергии преобразуется кинетическая энергия осколков ядра урана при их торможении в окружающей среде?

6. Как идет реакция деления ядер урана — с выделением энергии в окружающую среду или, наоборот, с поглощением энергии?

§ 75. Цепная реакция

Для преобразования внутренней энергии атомных ядер в электрическую на атомных электростанциях используют так называемые *цепные реакции деления ядер*.

Рассмотрим механизм протекания цепной реакции деления ядра изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$. На рисунке 173 вверху изображено ядро атома урана, которое в результате захвата нейтрона разделилось на две части, излучив при этом три нейтрона. Два из этих нейтронов вызвали реакцию деления еще двух ядер, при этом образовалось уже четыре нейтрона. Эти, в свою очередь, вызвали деление четырех ядер, после чего образовалось девять нейтронов и т. д.

Цепная реакция возможна благодаря тому, что при делении каждого ядра образуется 2—3 нейтрона, которые могут принять участие в делении других ядер.

На рисунке показана схема цепной реакции, при которой общее число свободных нейтронов в куске урана *лавинообразно* увеличивается со временем. Соответственно резко возрастает число делений ядер и энергия, выделяющаяся в единицу времени. Поэтому такая реакция носит взрывной характер (она протекает в атомной бомбе).

Возможен другой вариант, при котором число свободных нейтронов уменьшается со временем. В этом случае цепная реакция прекращается. Следовательно, такую реакцию тоже нельзя использовать для производства электроэнергии.

В мирных целях возможно использовать энергию только такой цепной реакции, в которой число нейтронов не меняется с течением времени.

Как же добиться того, чтобы число нейтронов все время оставалось постоянным? Для решения этой проблемы нужно знать, какие факторы влияют на увеличение и на уменьшение общего числа свободных нейтронов в куске урана, в котором протекает цепная реакция.

Одним из таких факторов является *масса урана*. Дело в том, что не каждый нейтрон, излученный при делении ядра, вызывает деление других ядер (рис. 174). Если масса (и соответственно размеры)

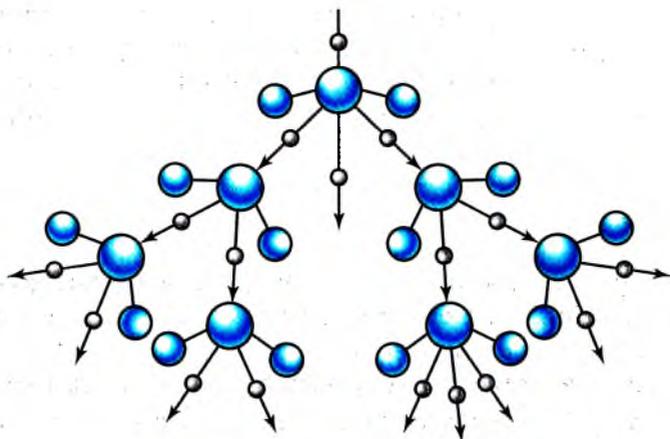


Рис. 174

куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретить на своем пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция прекратится. Чтобы реакция не прекращалась, нужно увеличить массу урана до определенного значения, называемого *критическим*.

Почему при увеличении массы цепная реакция становится возможной? Чем больше масса куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нем нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При некоторой так называемой критической массе урана число нейтронов, появившихся при делении ядер, становится равным числу потерянных нейтронов (т. е. захваченных ядрами без деления и вылетевших за пределы куска).

Поэтому их общее число остается неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретаая взрывного характера.

Наименьшая масса урана, при которой возможно протекание цепной реакции, называется критической массой.

Если масса урана больше критической, то в результате резкого увеличения числа свободных нейтронов цепная реакция приводит к

взрыву, а если меньше критической, то реакция не протекает из-за недостатка свободных нейтронов.

Уменьшить потерю нейтронов (которые вылетают из урана, не прореагировав с ядрами) можно не только за счет увеличения массы урана, но и с помощью специальной *отражающей оболочки*. Для этого кусок урана помещают в оболочку, сделанную из вещества, хорошо отражающего нейтроны (например, из бериллия). Отражаясь от этой оболочки, нейтроны возвращаются в уран и могут принять участие в делении ядер.

Помимо массы и наличия отражающей оболочки существует еще несколько факторов, от которых зависит возможность протекания цепной реакции. Например, если кусок урана содержит слишком много *примесей* других химических элементов, то они поглощают большую часть нейтронов и реакция прекращается.

Еще одним фактором, влияющим на ход реакции, является наличие в уране так называемого *замедлителя нейтронов*. Дело в том, что ядра урана-235 с наибольшей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов. А при делении ядер образуются быстрые нейтроны. Если быстрые нейтроны замедлить, то большая их часть захватится ядрами урана-235 с последующим делением этих ядер. В качестве замедлителей используются такие вещества, как *графит, вода, тяжелая вода* (в состав которой входит дейтерий — изотоп водорода с массовым числом 2) и некоторые другие. Эти вещества только замедляют нейтроны, почти не поглощая их.

Таким образом, возможность протекания цепной реакции определяется *массой урана, количеством примесей в нем, наличием оболочки и замедлителя* и некоторыми другими факторами.

Критическая масса шарообразного куска урана-235 приблизительно равна 50 кг. При этом его радиус составляет всего 9 см, поскольку уран имеет очень большую плотность.

Применяя замедлитель и отражающую оболочку и уменьшая количество примесей, удастся снизить критическую массу урана до 0,8 кг.

? Вопросы

1. Расскажите о механизме протекания цепной реакции, пользуясь рисунком 174.
2. Что называется критической массой урана?
3. Возможно ли протекание цепной реакции, если масса урана меньше критической? Почему?

4. Как идет цепная реакция в уране, если его масса больше критической? Почему?

5. За счет каких факторов можно увеличить число свободных нейтронов в куске урана, обеспечив тем самым возможность протекания в нем цепной реакции?

§ 76. Ядерный реактор.

Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию

Ядерный реактор — это устройство, предназначенное для осуществления управляемой ядерной реакции.

Управление ядерной реакцией заключается в регулировании скорости размножения свободных нейтронов в уране, чтобы их число оставалось неизменным. При этом цепная реакция будет продолжаться столько времени, сколько это необходимо, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Рассмотрим устройство и принцип действия реактора, в котором в качестве делящегося вещества (его называют также *ядерным топливом* или *горючим*) используется в основном уран-235. В природном уране этого изотопа недостаточно для протекания цепной реакции (всего 0,7%), поэтому природный уран обогащают, т. е. увеличивают процентное содержание в нем урана-235 (до 5%).

Реактор, работающий на этом изотопе урана, называется **реактором на медленных нейтронах**. Он назван так, потому что уран-235 наиболее эффективно делится под действием медленных нейтронов. Поскольку при делении ядер образуются в основном быстрые нейтроны, их необходимо замедлять. Для этого в реакторе с таким ядерным топливом используется замедлитель нейтронов.

На рисунке 175, а изображены основные части реактора на медленных нейтронах. В активной зоне находится *ядерное топливо* в виде урановых стержней (они на рисунке не показаны) и *замедлитель нейтронов* — в данном случае вода.

Масса каждого уранового стержня значительно меньше критической, поэтому в одном стержне цепная реакция происходить не может (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех урановых стержней, т. е. когда масса урана достигнет критического значения.

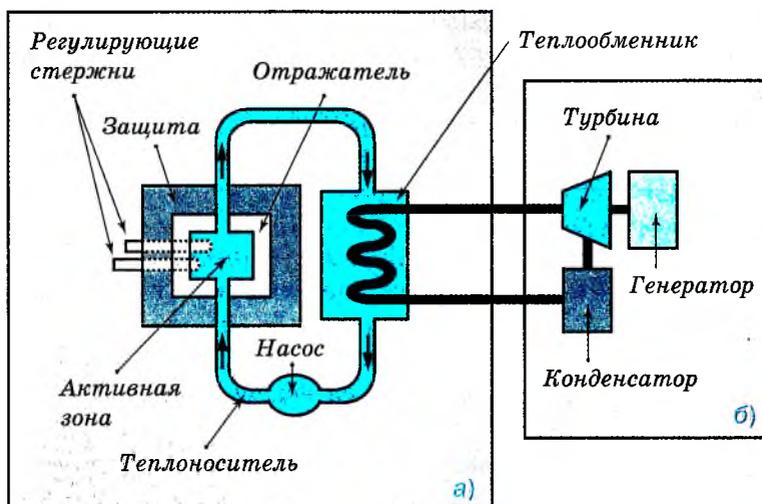


Рис. 175

Активная зона окружена слоем вещества, отражающего нейтроны (*отражатель*), и *защитной оболочкой* из бетона, задерживающей нейтроны и другие частицы.

Для управления реакцией служат *регулирующие стержни*, эффективно поглощающие нейтроны. При их полном погружении в активную зону цепная реакция идти не может. Для запуска реактора регулирующие стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнется цепная реакция деления ядер урана.

Образующиеся в процессе этой реакции нейтроны и осколки ядер, разлетаясь с большой скоростью, попадают в воду, сталкиваются с ядрами атомов кислорода и водорода, отдают им часть своей кинетической энергии и замедляются. Вода при этом нагревается, а замедленные нейтроны через какое-то время опять попадают в урановые стержни и участвуют в делении ядер.

Активная зона реактора посредством труб соединяется с *теплообменником*, образуя так называемый первый замкнутый контур. Насосы обеспечивают циркуляцию воды в этом контуре. При этом вода, нагретая в активной зоне за счет внутренней энергии атомных ядер, проходя через теплообменник, нагревает воду в змеевике второго контура, превращая ее в пар. Таким образом, *вода в активной зоне реактора служит не только замедлителем нейтронов, но и теплоносителем, отводящим тепло.*

На рисунке 175, б схематично показаны устройства, в которых энергия пара, образовавшегося в змеевике, преобразуется в электро-энергию. Посредством этого пара вращается турбина, которая, в свою очередь, приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Отработанный пар поступает в конденсатор и превращается в воду. Затем весь цикл повторяется.

Таким образом, при получении электрического тока на атомных электростанциях происходят следующие преобразования энергии: часть внутренней энергии атомных ядер урана → кинетическая энергия нейтронов и осколков ядер → внутренняя энергия воды → внутренняя энергия пара → кинетическая энергия пара → кинетическая энергия ротора турбины и ротора генератора → электрическая энергия.

? Вопросы

1. Что такое ядерный реактор?
2. В чем заключается управление ядерной реакцией?
3. Назовите основные части реактора.
4. Что находится в активной зоне?
5. Для чего нужно, чтобы масса каждого уранового стержня была меньше критической массы?
6. Для чего нужны регулирующие стержни? Как ими пользуются?
7. Какую вторую функцию (помимо замедления нейтронов) выполняет вода в первом контуре реактора?
8. Какие процессы происходят во втором контуре?
9. Какие преобразования энергии происходят при получении электрического тока на атомных электростанциях?

§ 77. Атомная энергетика

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является проблема источников энергии. Потребление энергии растет столь быстро, что известные в настоящее время запасы топлива окажутся исчерпанными в сравнительно короткое время.

Например, надежно подтверждаемых запасов угля может хватить примерно на 350 лет, нефти — на 40 лет, природного газа — на 60 лет.

Проблему «энергетического голода» не решает и использование энергии так называемых возобновляемых источников (энергии рек, ветра, солнца, морских волн, глубинного тепла Земли), так как они

могут обеспечить в лучшем случае только 5—10% наших потребностей. В связи с этим в середине XX в. возникла необходимость поиска новых источников энергии.

В настоящее время реальный вклад в энергоснабжение вносит ядерная энергетика. До 1940 г. многие ученые считали, что ядерная физика представляет чисто научный интерес, не имея при этом никакого практического применения. Так, в 1937 г. Резерфорд утверждал, что получение ядерной энергии в более или менее значительных количествах, достаточных для практического использования, никогда не будет возможным.

Однако уже в 1942 г. в США под руководством *Энрико Ферми* был построен первый ядерный реактор. Первый европейский реактор был создан в 1946 г. в Советском Союзе под руководством *Игоря Васильевича Курчатова*.

В 1954 г. в нашей стране (в г. Обнинске) была введена в действие первая в мире атомная электростанция (АЭС). Ее мощность была невелика — всего 5000 кВт. Современные АЭС имеют в сотни раз большую мощность.

АЭС имеют ряд преимуществ перед другими видами электростанций. Основное их преимущество заключается в том, что для работы АЭС требуется очень небольшое количество топлива (вспомните, что энергия, заключенная в 1 г урана, равна энергии, выделяющейся при сгорании 2,5 т нефти). В связи с этим эксплуатация атомных электростанций обходится значительно дешевле, чем тепловых (для работы которых необходимы большие затраты на добычу и транспортировку топлива).

Правда, строительство тепловых станций (ТЭС) обходится дешевле, чем атомных. Поэтому на сегодняшний день стоимость тепловых и атомных станций сопоставима. Но в перспективе атомная энергетика станет более выгодной.

Второе преимущество АЭС (при правильной их эксплуатации) заключается в их экологической чистоте по сравнению с ТЭС. Конечно, в выбросах АЭС содержатся радиоактивные газы и частицы. Но большая часть радиоактивных ядер (так называемых радионуклидов), содержащихся в выбросах АЭС, довольно быстро распадается, превращаясь в нерадиоактивные. А количество долгоживущих радионуклидов и мощность их излучения сравнительно невелики. Поэтому для населения, проживающего в районах размещения АЭС, дополнительная радиационная нагрузка не превышает нескольких десятых процента от естественного радиационного фона.

Что же касается электростанций, работающих на угле, то именно они являются одним из основных источников поступления в среду обитания человека долгоживущих радионуклидов. Дело в том, что в угле всегда содержатся микропримеси радиоактивных элементов, которые выносятся с продуктами сгорания, осаждаются на прилегающей местности и накапливаясь на зольных полях возле ТЭС.

Например, на зольных полях Рефтинской ТЭС, расположенной в 80 км от Екатеринбурга, за время ее работы накопилось до 7 кг урана, тория, радия и других радиоактивных изотопов.

Кроме того, используемое на ТЭС природное органическое топливо (уголь, нефть, газ) содержит от 1,5 до 4,5% серы. Образующийся при сгорании топлива сернистый ангидрид, даже пройдя через фильтры и системы очистки, частично выбрасывается в атмосферу. Вступая в контакт с атмосферной влагой, он образует раствор серной кислоты и вместе с дождями выпадает на землю. Такие кислотные дожди наносят огромный ущерб растительности, разрушают структуру почвы и значительно меняют ее состав (для восстановления которого необходима не одна сотня лет).

Неблагоприятные экологические последствия связаны и с использованием энергии рек. Эти последствия заключаются в отчуждении больших площадей земли (в связи со строительством водохранилищ и образованием вследствие этого болот), гибелью рыбы в результате перекрытия рек и т. д.

Для строительства электростанций достаточной мощности, преобразующих энергию солнца и ветра, тоже требуются, как оказалось, огромные территории.

Что же касается ядерной энергетики, то она не сопровождается вышеперечисленными негативными явлениями. Но это вовсе не означает, что АЭС не порождают серьезных проблем.

В настоящее время квалифицированная критика ядерной энергетики концентрируется вокруг трех ее принципиальных проблем: *действие распространению ядерного оружия, радиоактивные отходы и возможность аварий.*

Первая проблема может быть решена только в рамках мирового сообщества. Большой вклад в ее решение вносит, в частности, деятельность Международного агентства по атомной энергии при ООН (МАГАТЭ), созданного в 1957 г. для контроля за нераспространением ядерного оружия и безопасным применением ядерной энергии в мирных целях.

Обезвреживание радиоактивных отходов сводится в основном к трем задачам: 1) к совершенствованию технологий с целью уменьшения образования отходов при работе реакторов; 2) к переработке отходов для их консолидации (т. е. скрепления, связывания) и уменьшения опасности от распространения в окружающей среде; 3) к надежной изоляции отходов от биосферы и человека за счет создания могильников разных типов.

Для выполнения поставленных задач в проектах всех АЭС предусмотрены установки для отверждения жидких отходов. На Санкт-Петербургской, Тверской и многих других АЭС они уже действуют; на остальных — подготовлены к внедрению или проходят опытно-экспериментальную проверку.

Кроме того, на заводах по переработке ядерного топлива производится остеклование отходов. Газообразные отходы подвергаются очистке.

Помимо перечисленных принимаются и многие другие меры, направленные на решение проблемы радиоактивных отходов.

Что касается безопасности АЭС, деятельность МАГАТЭ в этой области включает в себя, в частности, разработку стандартов безопасности (касающихся выбора мест размещения АЭС, их проектирования, эксплуатации и пр.), консультирование стран — членов МАГАТЭ (например, по проблеме создания программы помощи состоящим в нем странам в случае аварий, по оказанию содействия развивающимся странам в вопросах безопасности и многим другим аспектам).

Проводимый экспертами МАГАТЭ анализ произошедших на атомных станциях аварий, выдача рекомендаций по их профилактике, внедрение в практику современных методов анализа безопасности и многие другие меры содействуют выравниванию и повышению в целом уровня безопасности АЭС в мире.

? Вопросы

1. В связи с чем в середине XX в. возникла необходимость нахождения новых источников энергии?

2. Назовите два основных преимущества АЭС перед ТЭС. Ответ обоснуйте.

3. Назовите три принципиальные проблемы современной атомной энергетики.

4. Приведите примеры путей решения проблем атомной энергетики.

§ 78. Биологическое действие радиации. Закон радиоактивного распада

Известно, что радиоактивные излучения при определенных условиях могут представлять опасность для здоровья живых организмов. В чем причина негативного воздействия радиации на живые существа?

Дело в том, что α -, β - и γ -частицы, проходя через вещество, ионизируют его, выбивая электроны из молекул и атомов. Ионизация живой ткани нарушает жизнедеятельность клеток, из которых эта ткань состоит, что отрицательно сказывается на здоровье всего организма.

Степень и характер отрицательного воздействия радиации зависят от нескольких факторов, в частности, от того, какая энергия передана потоком ионизирующих частиц данному телу и какова масса этого тела. Чем больше энергии получает человек от действующего на него потока частиц и чем меньше при этом масса человека (т. е. чем большая энергия приходится на каждую единицу массы), тем к более серьезным нарушениям в его организме это приведет.

Энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанная на единицу массы, называется поглощенной дозой излучения (D).

Поглощенная доза излучения D равна отношению поглощенной телом энергии E к его массе m :

$$D = \frac{E}{m}. \quad (1)$$

В СИ единицей поглощенной дозы излучения является *грэй* (Гр). Из формулы $D = \frac{E}{m}$ следует, что $1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}$. Это означает, что поглощенная доза излучения будет равна 1 Гр, если веществу массой 1 кг передается энергия излучения в 1 Дж.

В определенных случаях (например, при облучении мягких тканей живых существ рентгеновским или γ -излучением) поглощенную дозу можно измерять в *рентгенах* (Р): 1 Гр соответствует приблизительно 100 Р.

Известно, что *чем больше поглощенная доза излучения, тем больший вред (при прочих равных условиях) может нанести организму это излучение.*

Но для достоверной оценки тяжести последствий, к которым может привести действие ионизирующих излучений, необходимо учитывать также, что *при одинаковой поглощенной дозе разные виды излучений вызывают разные по величине биологические эффекты.*

Биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, принято оценивать по сравнению с эффектом от рентгеновского или от γ -излучения. Например, при одной и той же поглощенной дозе биологический эффект от действия α -излучения будет в 20 раз больше, чем от γ -излучения, от действия быстрых нейтронов эффект может быть в 10 раз больше, чем от γ -излучения, от действия β -излучения — такой же, как от γ -излучения.

В связи с этим принято говорить, что *коэффициент качества (K)* α -излучения равен 20, вышеупомянутых быстрых нейтронов — 10, при том, что коэффициент качества γ -излучения (так же, как рентгеновского и β -излучения) считается равным единице. Таким образом,

коэффициент качества K показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых поглощенных дозах).

В связи с тем, что при одной и той же поглощенной дозе разные излучения вызывают различные биологические эффекты, для оценки этих эффектов была введена величина, называемая *эквивалентной дозой (H)*.

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощенной дозы D на коэффициент качества K :

$$H = D \cdot K. \quad (2)$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощенная, однако для ее измерения существуют и специальные единицы. В Международной системе единиц единицей эквивалентной дозы служит *зиверт (Зв)*. Применяются также дольные единицы, такие как миллизиверт (мЗв), микрозиверт (мкЗв) и др.

Из формулы (2) понятно, что для рентгеновского, γ - и β -излучений (для которых $K = 1$) 1 Зв соответствует поглощенной дозе в 1 Гр, а для всех остальных видов излучения — дозе в 1 Гр, умноженной на соответствующий данному излучению коэффициент качества.

При оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм учитывают и то, что одни части тела (органы, ткани) более

чувствительны, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе. Другими словами, каждый орган и ткань имеют определенный коэффициент радиационного риска (для легких, например, он равен 0,12, а для щитовидной железы — 0,03).

Поглощенная и эквивалентная дозы зависят и от времени облучения (т. е. от времени взаимодействия излучения со средой). При прочих равных условиях эти дозы тем больше, чем больше время облучения, т. е. дозы накапливаются со временем.

При оценке степени опасности, которую радиоактивные изотопы представляют для живых существ, важно учитывать и то, что число радиоактивных (т. е. еще не распавшихся) атомов в веществе уменьшается с течением времени. При этом пропорционально уменьшается число радиоактивных распадов в единицу времени и излучаемая энергия.

Энергия, как мы уже знаем, является одним из факторов, определяющих степень отрицательного воздействия излучения на человека. Поэтому так важно найти количественную зависимость (т. е. формулу), по которой можно было бы рассчитать, сколько радиоактивных атомов остается в веществе к любому заданному моменту времени.

Для вывода этой зависимости необходимо знать, что скорость уменьшения количества радиоактивных ядер у разных веществ различна и зависит от физической величины, называемой *периодом полураспада*.

Период полураспада (T) — это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

Выведем зависимость числа N радиоактивных атомов от времени t и периода полураспада T . Время будем отсчитывать от момента начала наблюдения $t_0 = 0$, когда число радиоактивных атомов в источнике излучения было равно N_0 . Тогда через промежуток времени $t_1 = 1 \cdot T$

число радиоактивных атомов будет $N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0 = \frac{N_0}{2^1}$; через $t_2 = 2 \cdot T$

— $N_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^1} = \frac{N_0}{2^2}$; через $t_3 = 3 \cdot T$ — $N_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{2^3}$ и т. д., а через

$t = n \cdot T$ — $N = \frac{N_0}{2^n}$.

Формула $N = \frac{N_0}{2^n}$ называется **законом радиоактивного**

распада. Ее можно записать и в другом виде, например, $N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$.

Из последней формулы следует, что чем больше T , тем меньше $2^{t/T}$, и тем больше N (при заданных значениях N_0 и t). Значит, чем больше период полураспада элемента, тем дольше он «живет» и излучает, представляя опасность для живых организмов. В этом со всей наглядностью убеждают представленные на рисунке 176 графики зависимости N от t , построенные для изотопов иода (^{131}I , $T_{\text{I}} = 8$ сут.) (13) и селена (^{75}Se , $T_{\text{Se}} = 120$ сут.).

Следует знать способы защиты от радиации. Радиоактивные препараты ни в коем случае нельзя брать в руки — их берут специальными щипцами с длинными ручками.

Легче всего защититься от α -излучения, так как оно обладает низкой проникающей способностью и поэтому задерживается, например, листом бумаги, одеждой, кожей человека. В то же время α -частицы, попавшие внутрь организма (с пищей, воздухом, через открытые раны), представляют большую опасность.

β -Излучение имеет гораздо большую проникающую способность, поэтому от его воздействия труднее защититься. β -Излучение может проходить в воздухе расстояние до 5 м; оно способно проникать и в ткани

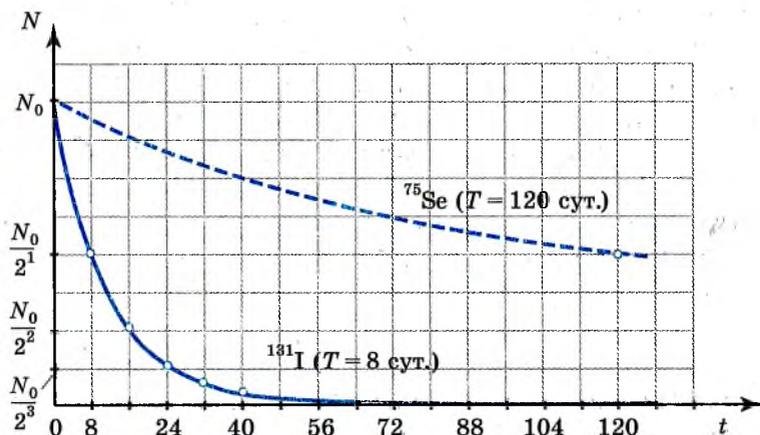


Рис. 176

организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β -излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Еще большей проникающей способностью обладает γ -излучение, оно задерживается толстым слоем свинца или бетона. Поэтому γ -радиоактивные препараты хранят в толстостенных свинцовых контейнерах. По этой же причине в ядерных реакторах используют толстый бетонный слой, защищающий людей от γ -лучей и различных частиц (α -частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).

? Вопросы

1. В чем причина негативного воздействия радиации на живые существа?

2. Что называется поглощенной дозой излучения? По какой формуле она определяется и в каких единицах измеряется?

3. При большей или меньшей дозе излучение наносит организму больший вред, если все остальные условия одинаковы?

4. Одинаковый или различный по величине биологический эффект вызывают в живом организме разные виды ионизирующих излучений? Приведите примеры.

5. Что показывает коэффициент качества излучения? Чем он равен для α -, β -, γ и рентгеновского излучений?

6. В связи с чем и для чего была введена величина, называемая эквивалентной дозой излучения? По какой формуле она определяется и в каких единицах измеряется?

7. Какой еще фактор (помимо энергии, вида излучения и массы тела) следует учитывать при оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм?

8. Какой процент атомов радиоактивного вещества останется через 6 суток, если период его полураспада равен 2 суткам?

9. Расскажите о способах защиты от воздействия радиоактивных частиц и излучений.

§ 79. Термоядерная реакция

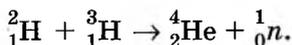
Вы уже знаете, что в середине XX в. возникла проблема поиска новых источников энергии. В связи с этим внимание ученых привлекли термоядерные реакции.

Термоядерной называется реакция слияния легких ядер (таких, как водород, гелий и др.), происходящая при температурах порядка сотен миллионов градусов.

Создание высокой температуры необходимо для придания ядрам достаточно большой кинетической энергии — только при этом условии ядра смогут преодолеть силы электрического отталкивания и сблизиться настолько, чтобы попасть в зону действия ядерных сил. На таких малых расстояниях силы ядерного притяжения значительно превосходят силы электрического отталкивания, благодаря чему возможен синтез (т. е. слияние, объединение) ядер.

В § 74 на примере урана было показано, что при делении тяжелых ядер может выделяться энергия. В случае с легкими ядрами энергия может выделяться при обратном процессе — при их синтезе. Причем реакция синтеза легких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжелых (если сравнивать выделившуюся энергию, приходящуюся на один нуклон).

Примером термоядерной реакции может служить слияние изотопов водорода (дейтерия и трития), в результате чего образуется гелий и излучается нейтрон:



Это первая термоядерная реакция, которую ученым удалось осуществить. Она была реализована в термоядерной бомбе и носила неуправляемый (взрывной) характер.

Как уже было отмечено, термоядерные реакции могут идти с выделением большого количества энергии. Но для того чтобы эту энергию можно было использовать в мирных целях, необходимо научиться проводить *управляемые* термоядерные реакции. Одна из основных трудностей в осуществлении таких реакций заключается в том, чтобы удержать внутри установки высокотемпературную плазму (т. е. почти полностью ионизированный газ, в котором и происходит синтез ядер). Плазма не должна соприкасаться со стенками установки, в которой она находится, иначе стенки обратятся в пар. В настоящее время для удерживания плазмы в ограниченном пространстве на соответствующем расстоянии от стенок применяются очень сильные магнитные поля. Но этот метод еще нуждается в совершенствовании.

Термоядерные реакции играют важную роль в эволюции Вселенной, в частности в преобразованиях химических веществ в ней.

Благодаря термоядерным реакциям, протекающим в недрах Солнца, выделяется энергия, дающая жизнь обитателям Земли.

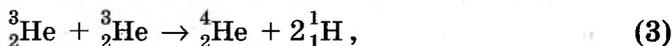
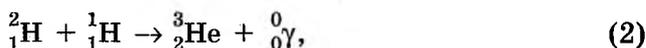
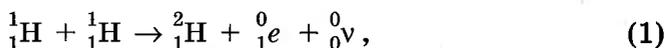
Наше Солнце излучает в пространство свет и тепло уже почти 4,6 млрд лет. Естественно, что во все времена ученых интересовал вопрос о том, что является «топливом», за счет которого на Солнце вырабатывается огромное количество энергии в течение столь длительного времени.

На этот счет существовали разные гипотезы. Одна из них заключалась в том, что энергия на Солнце выделяется в результате химической реакции горения. Но в этом случае, как показывают расчеты, Солнце могло бы просуществовать всего нескольких тысяч лет, что противоречит действительности.

Оригинальная гипотеза была выдвинута в середине XIX в. Она состояла в том, что увеличение внутренней энергии и соответствующее повышение температуры Солнца происходит за счет уменьшения его потенциальной энергии при гравитационном сжатии. Она тоже оказалась несостоятельной, так как в этом случае срок жизни Солнца увеличивается до миллионов лет, но не до миллиардов.

Предположение о том, что выделение энергии на Солнце происходит в результате протекания на нем термоядерных реакций, было высказано в 1939 г. американским физиком *Хансом Бете*.

Им же был предложен так называемый *водородный цикл*, т. е. цепочка из трех термоядерных реакций, приводящая к образованию гелия из водорода:



где ${}^0_0\nu$ — частица, называемая «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «маленький нейтрон».

Чтобы получилось два ядра ${}^3_2\text{He}$, необходимые для третьей реакции, первые две должны произойти дважды.

Мы знаем, что в соответствии с формулой $E = mc^2$ (см. § 73), с уменьшением внутренней энергии тела уменьшается и его масса.

Чтобы представить, какое колоссальное количество энергии теряет Солнце в результате превращения водорода в гелий, достаточно

знать, что масса Солнца ежесекундно уменьшается на несколько миллионов тонн.

Но, несмотря на потери, запасов водорода на Солнце должно хватить еще на 5—6 миллиардов лет.

Такие же реакции протекают в недрах других звезд, масса и возраст которых сравнимы с массой и возрастом Солнца.

? Вопросы

- 1. Какая реакция называется термоядерной?*
- 2. Почему протекание термоядерных реакций возможно только при очень высоких температурах?*
- 3. Какая реакция энергетически более выгодна (в расчете на один нуклон): синтез легких ядер или деление тяжелых?*
- 4. Приведите пример термоядерной реакции.*
- 5. В чем заключается одна из основных трудностей при осуществлении термоядерных реакций?*
- 6. Какова роль термоядерных реакций в существовании жизни на Земле?*
- 7. Какие гипотезы об источниках энергии Солнца вы знаете?*
- 8. Что является источником энергии Солнца по современным представлениям?*
- 9. На какой период должно хватить запаса водорода на Солнце по подсчетам ученых?*



§ 80. Элементарные частицы. Античастицы

(для дополнительного чтения)

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ — электрон, протон и нейтрон, — назвали элементарными. Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми. Но вскоре оказалось, что эти частицы вовсе не являются неизменными. *Все они обладают способностью превращаться друг в друга при взаимодействии.*

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется не в своем точном значении, а для наименования большой группы мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или ядрами атомов (исключение составляет протон, пред-

ставляющий собой ядро атома водорода и в то же время относящийся к элементарным частицам).

В настоящее время известно более 350 различных элементарных частиц. Частицы эти очень разнообразны по своим свойствам. Они могут отличаться друг от друга массой, знаком и величиной электрического заряда, временем жизни (т. е. временем с момента образования частицы и до момента ее превращения в какую-либо другую частицу), проникающей способностью (т. е. способностью проходить сквозь вещество) и другими характеристиками. Например, большинство частиц являются «короткоживущими» — они живут не более двух миллионных долей секунды, в то время как среднее время жизни нейтрона, находящегося вне атомного ядра, 15 мин.

Важнейшее открытие в области исследования элементарных частиц было сделано в 1932 г., когда американский физик *Карл Дейвид Андерсон* обнаружил в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, след неизвестной частицы. По характеру этого следа (по радиусу кривизны, направлению изгиба и пр.) ученые определили, что он оставлен частицей, которая представляет собой как бы электрон с положительным по знаку электрическим зарядом. Эту частицу назвали *позитроном*.

Интересно, что за год до экспериментального открытия позитрона его существование было теоретически предсказано английским физиком *Полем Дираком* (существование именно такой частицы следовало из выведенного им уравнения). Более того, Дирак предсказал так называемые процессы *аннигиляции* (исчезновения) и *рождения электронно-позитронной пары*. Аннигиляция заключается в том, что электрон и позитрон при встрече исчезают, превращаясь в γ -кванты (фотоны). А при столкновении γ -кванта с каким-либо массивным ядром происходит рождение электронно-позитронной пары.

Оба эти процесса впервые удалось пронаблюдать на опыте в 1933 г. На рисунке 177 показаны треки электрона и позитрона, образовавшихся в результате столкновения γ -кванта с атомом свинца при прохождении γ -лучей сквозь свинцовую пластинку. Опыт проводился в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Одинаковая кривизна треков свидетельствует об одинаковой массе частиц, а искривление в разные стороны — о противоположных знаках электрического заряда.

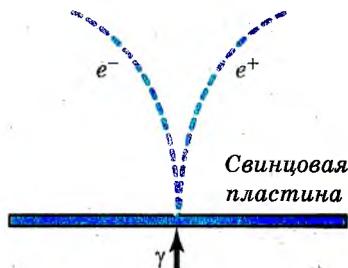


Рис. 177

В 1955 г. была обнаружена еще одна античастица — *антипротон* (существование которой тоже вытекало из теории Дирака), а несколько позже — *антинейтрон*. Антинейтрон, так же как и нейтрон, не имеет электрического заряда, но он, бесспорно, относится к античастицам, поскольку участвует в процессе аннигиляции и рождения пары нейтрон-антинейтрон.

Возможность получения античастиц привела ученых к идее о создании *антивещества*. Атомы антивещества должны быть построены таким образом: в центре атома — отрицательно заряженное ядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов, а вокруг ядра обращаются позитроны. В целом атом нейтрален. Эта идея тоже получила блестящее экспериментальное подтверждение. В 1969 г. на ускорителе протонов в г. Серпухове советские физики получили ядра атомов антигелия.

В настоящее время экспериментально обнаружены античастицы почти всех известных элементарных частиц.

✚

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

Исследование равноускоренного движения
без начальной скорости

Вариант I

Цель работы: определить ускорение движения шарика и его мгновенную скорость перед ударом о цилиндр.

Оборудование: желоб лабораторный металлический длиной 1,4 м, шарик металлический диаметром 1,5—2 см, цилиндр металлический, метроном (один на весь класс), лента измерительная, кусок мела.

Теоретические обоснования

Известно, что шарик скатывается по прямолинейному наклонному желобу равноускоренно.

При равноускоренном движении без начальной скорости пройденное расстояние определяется по формуле:

$$s = \frac{at^2}{2}, \quad (1)$$

отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}. \quad (2)$$

Зная ускорение, можно определить мгновенную скорость по формуле:

$$v = at. \quad (3)$$

Если измерить промежуток времени t от начала движения шарика до его удара о цилиндр и расстояние s , пройденное им за это время, то по формуле (2) мы вычислим ускорение шарика a , а по формуле (3) — его мгновенную скорость v .

Промежуток времени t измеряется с помощью метронома. Метроном настраивают на 120 ударов в минуту, значит, промежуток времени между двумя следующими друг за другом ударами равен 0,5 с. Удар метронома, одновременно с которым шарик начинает движение, считается нулевым.

ражают зависимость между периодом колебаний маятника T и его длиной l :

$$1) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_k}{l_1}, 2) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_1}{l_k}, 3) \frac{T_k}{T_1} = \sqrt{\frac{l_k}{l_1}}, 4) \sqrt{\frac{T_k}{T_1}} = \frac{l_k}{l_1}, 5) \left(\frac{T_k}{T_1}\right)^2 = \frac{l_k}{l_1},$$

где k может принимать следующие значения: 2, 3, 4, 5; например,

$$\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^2 = \frac{l_3}{l_1}.$$

4. Из пяти приведенных ниже утверждений выберите верное.

При увеличении длины нити маятника в 4 раза период его колебаний: а) увеличивается в 4 раза; б) уменьшается в 4 раза; в) увеличивается в 2 раза; г) уменьшается в 2 раза; д) увеличивается в 16 раз.

Лабораторная работа № 4

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы: изучить явление электромагнитной индукции.

Оборудование: миллиамперметр, катушка-моток, магнит дугообразный, источник питания, катушка с железным сердечником от разборного электромагнита, реостат, ключ, провода соединительные, модель генератора электрического тока (одна на класс).

Указания к работе

1. Подключите катушку-моток к зажимам миллиамперметра.

2. Наблюдая за показаниями миллиамперметра, подводите один из полюсов магнита к катушке, потом на несколько секунд остановите магнит, а затем вновь приближайте его к катушке, вдвигая в нее (рис. 184). Запишите, возникал ли в катушке индукционный ток во время движения магнита относительно катушки; во время его остановки.

3. Запишите, менялся ли магнитный поток Φ , пронизывающий катушку, во время движения магнита; во время его остановки.

4. На основании ваших ответов на предыдущий вопрос сделайте и запишите вывод о том, при каком условии в катушке возникал индукционный ток.

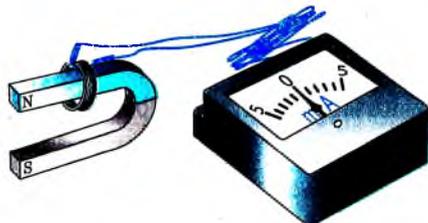


Рис. 184

5. Почему при приближении магнита к катушке магнитный поток, пронизывающий эту катушку, менялся? (Для ответа на этот вопрос вспомните, во-первых, от каких величин зависит магнитный поток Φ и, во-вторых, одинаков ли модуль вектора индукции \vec{B} магнитного поля постоянного магнита вблизи этого магнита и вдали от него.)

6. О направлении тока в катушке можно судить по тому, в какую сторону от нулевого деления отклоняется стрелка миллиамперметра.

Проверьте, одинаковым или различным будет направление индукционного тока в катушке при приближении к ней и удалении от нее одного и того же полюса магнита.

7. Приближайте полюс магнита к катушке с такой скоростью, чтобы стрелка миллиамперметра отклонялась не более чем на половину предельного значения его шкалы.

Повторите тот же опыт, но при большей скорости движения магнита, чем в первом случае.

При большей или меньшей скорости движения магнита относительно катушки магнитный поток Φ , пронизывающий эту катушку, менялся быстрее?

При быстром или медленном изменении магнитного потока сквозь катушку в ней возникал больший по модулю ток?

На основании вашего ответа на последний вопрос сделайте и запишите вывод о том, как зависит модуль силы индукционного тока, возникающего в катушке, от скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего эту катушку.

8. Соберите установку для опыта по рисунку 185.

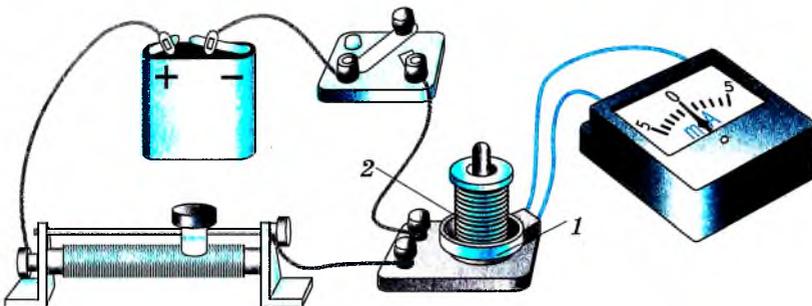


Рис. 185

9. Проверьте, возникает ли в катушке-мотке 1 индукционный ток в следующих случаях:

а) при замыкании и размыкании цепи, в которую включена катушка 2;

б) при протекании через катушку 2 постоянного тока;

в) при увеличении и уменьшении силы тока, протекающего через катушку 2, путем перемещения в соответствующую сторону движка реостата.

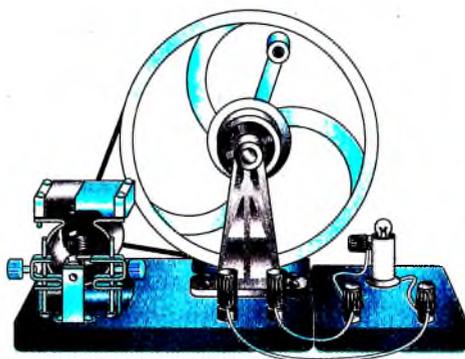


Рис. 186

10. В каких из перечисленных в пункте 9 случаев меняется магнитный поток, пронизывающий катушку 1? Почему он меняется?

11. Пронаблюдайте возникновение электрического тока в модели генератора (рис. 186). Объясните, почему в рамке, вращающейся в магнитном поле, возникает индукционный ток.

✚ Лабораторная работа № 5

Изучение деления ядра атома урана по фотографии треков

Цель работы: применить закон сохранения импульса для объяснения движения двух ядер, образовавшихся при делении ядра атома урана.

Оборудование: фотография треков заряженных частиц (рис. 187), образовавшихся при делении ядра атома урана.

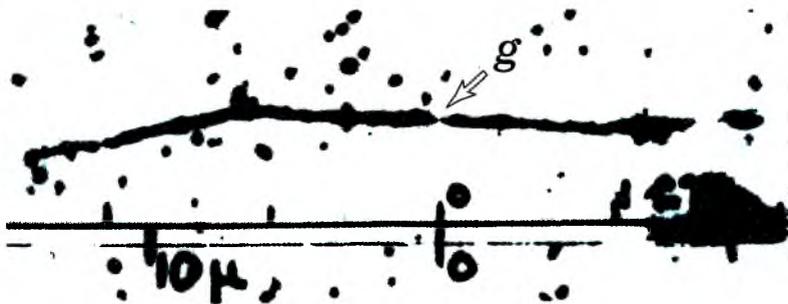


Рис. 187

Пояснения. На данной фотографии вы видите треки двух осколков, образовавшихся при делении ядра атома урана, захватившего нейтрон. Ядро урана находилось в точке g , указанной стрелочкой.

По трекам видно, что осколки ядра урана разлетелись в противоположных направлениях (излом левого трека объясняется столкновением осколка с ядром одного из атомов фотоэмульсии, в которой он двигался).

Задание 1. Пользуясь законом сохранения импульса, объясните, почему осколки, образовавшиеся при делении ядра атома урана, разлетелись в противоположных направлениях.

Задание 2. Известно, что осколки ядра урана представляют собой ядра атомов двух разных химических элементов (например, бария, ксенона и др.) из середины таблицы Д. И. Менделеева.

Одна из возможных реакций деления урана может быть записана в символическом виде следующим образом:



где символом ${}_Z\text{X}$ обозначено ядро атома одного из химических элементов.

Пользуясь законом сохранения заряда и таблицей Д. И. Менделеева, определите, что это за элемент.

Лабораторная работа № 6

Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям

Цель работы: объяснить характер движения заряженных частиц.

Оборудование: фотографии треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмульсии.

Пояснения. При выполнении данной лабораторной работы следует помнить, что:

а) длина трека тем больше, чем больше энергия частицы (и чем меньше плотность среды);

б) толщина трека тем больше, чем больше заряд частицы и чем меньше ее скорость;

в) при движении заряженной частицы в магнитном поле трек ее получается искривленным, причем радиус кривизны трека тем больше, чем больше масса и скорость частицы и чем меньше ее заряд и модуль индукции магнитного поля;

г) частица двигалась от конца трека с большим радиусом кривизны к концу с меньшим радиусом кривизны (радиус кривизны по мере движения уменьшается, так как из-за сопротивления среды уменьшается скорость частицы).

Задание 1. На двух из трех представленных вам фотографий (рис. 188, 189 и 190) изображены треки частиц, движущихся в магнитном поле. Укажите на каких. Ответ обоснуйте.

Задание 2. Рассмотрите фотографию треков α -частиц, двигавшихся в камере Вильсона (рис. 188), и ответьте на данные ниже вопросы.

а) В каком направлении двигались α -частицы?

б) Длина треков α -частиц примерно одинакова. О чем это говорит?

в) Как менялась толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?

Задание 3. На рисунке 189 дана фотография треков α -частиц в камере Вильсона, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

а) Почему менялись радиус кривизны и толщина треков по мере движения α -частиц?

б) В какую сторону двигались частицы?

Задание 4. На рисунке 190 дана фотография трека электрона в пузырьковой камере, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

а) Почему трек имеет форму спирали?

б) В каком направлении двигался электрон?

в) Что могло послужить причиной того, что трек электрона на рисунке 190 гораздо длиннее треков α -частиц на рисунке 189?

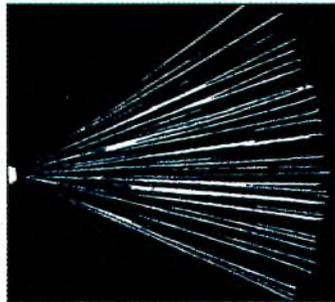


Рис. 188

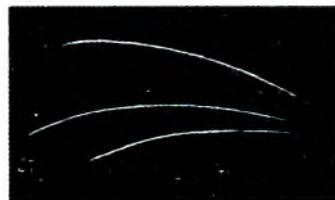


Рис. 189

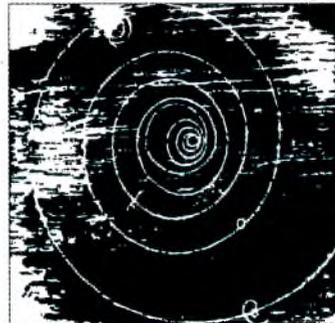


Рис. 190

ЗАДАЧИ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ И ПРИ 3 ЧАСАХ ФИЗИКИ В НЕДЕЛЮ

1. Для каждого из векторов, изображенных на рисунке 191, определите:

- координаты начала и конца;
- проекции на ось y ;
- модули проекций на ось y ;
- модули векторов.

2. На рисунке 192 векторы \vec{a} и \vec{c} перпендикулярны оси X , а векторы \vec{b} и \vec{d} параллельны ей. Выразите проекции a_x , b_x , c_x и d_x через модули этих векторов или соответствующие числа.

3. На рисунке 193 изображена траектория движения шарика, переместившегося из точки A в точку B . Определите:

- координаты начального и конечного положений шарика;
- проекции s_x и s_y перемещения шарика;
- модули $|s_x|$ и $|s_y|$ проекций перемещения;
- модуль перемещения $|\vec{s}|$.

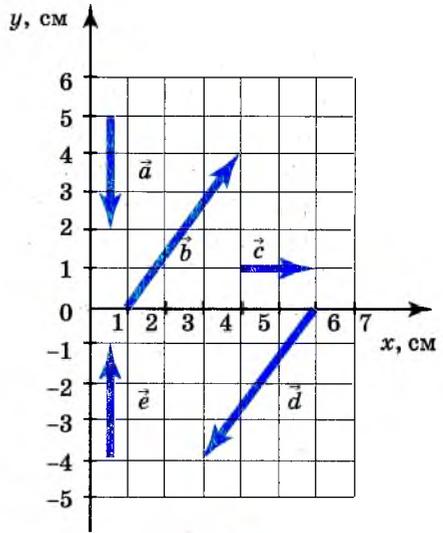


Рис.191

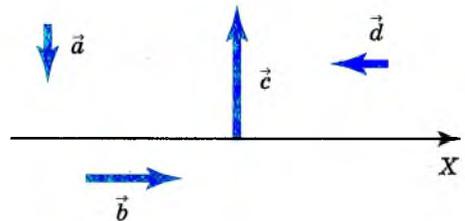


Рис.192

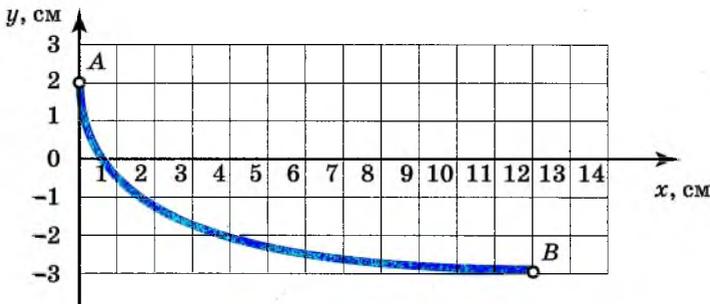


Рис.193

4. Катер переместился относительно пристани из точки $A(-8; -2)$ в точку $B(4; 3)$. Сделайте чертеж, совместив начало координат с пристанью и указав на нем точки A и B . Определите перемещение катера AB . Мог ли путь, проделанный катером, быть больше совершенного им перемещения? меньше перемещения? равен перемещению? Все ответы обоснуйте.

5. Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равномерном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения $x = x_0 + v_x t$, где x_0 и v_x — постоянные величины, а t — переменная.

6. Запишите уравнение для определения координаты тела, движущегося прямолинейно со скоростью 5 м/с вдоль оси X , если в момент начала наблюдения его координата была равна 3 м.

7. Два поезда — пассажирский и товарный — движутся по параллельным путям. Относительно здания вокзала движение пассажирского поезда описывается уравнением $x_{\text{п}} = 260 - 10t$, а товарного — уравнением $x_{\text{т}} = -100 + 8t$. Приняв вокзал и поезда за материальные точки, укажите на оси X их положения в момент начала наблюдения. Через какой промежуток времени от начала наблюдения поезда встретились? Какова координата места их встречи? Укажите положение места встречи на оси X . Считать, что ось X параллельна рельсам.

8. Туристы сплавливаются на плоту по реке. На рисунке 194 показано, как меняется со временем координата плота относительно места стоянки туристов (точки O). Начало наблюдения совпадает с моментом спуска плота на воду и началом движения.

Где плот был спущен на воду: от места стоянки, выше по течению или ниже? Если выше или ниже места стоянки, то на сколько метров?

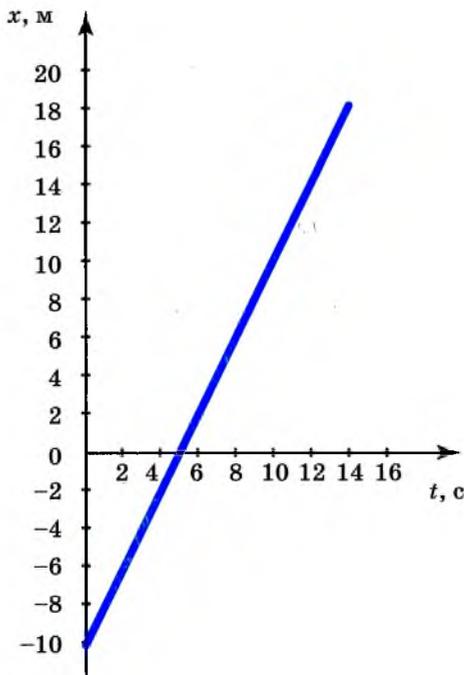


Рис.194

Определите начальную координату и скорость движения плота и запишите уравнение, описывающее зависимость координаты плота от времени.

9. Мальчик съезжает с горы на санках, двигаясь из состояния покоя прямолинейно и равноускоренно. За первые 2 с после начала движения его скорость возрастает до 3 м/с. Через какой промежуток времени от начала движения скорость мальчика станет равной 4,5 м/с? Какой путь он пройдет за этот промежуток времени?

10. Преобразуйте формулу $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$ к виду: $\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t$.

11. Исходя из того, что $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ и $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$, выведите формулу $a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2s_x}$.

12. На рисунке 27 показаны положения шарика через каждую 0,1 с его равноускоренного падения из состояния покоя. Координаты всех шести положений отмечены черточками по правому краю линейки. Пользуясь рисунком, определите среднюю скорость шарика за первые 0,3 с от начала движения и его мгновенную скорость, которую он приобрел к концу этого же промежутка времени.

13. Два лифта — обычный и скоростной — одновременно приходят в движение и в течение одного и того же промежутка времени движутся равноускоренно. Во сколько раз путь, который пройдет за это время скоростной лифт, больше пути, пройденного обычным лифтом, если его ускорение в 3 раза превышает ускорение обычного лифта? Во сколько раз большую скорость по сравнению с обычным лифтом приобретет скоростной лифт к концу этого промежутка времени?

14. На рисунке 195 представлен график зависимости проекции скорости лифта при разгоне от времени. Перечертите этот график в тетрадь и в тех же координатных осях постройте аналогичный график для скоростного лифта, ускорение которого в 3 раза больше, чем обычного.

15. Автомобиль движется прямолинейно вдоль оси X. Уравнение зависимости проекции вектора скорости автомобиля от времени в СИ выглядит так: $v_x = 10 + 0,5t$. Определите модуль и направление начальной скорости и ускорения автомобиля. Как меняется модуль вектора скорости автомобиля?

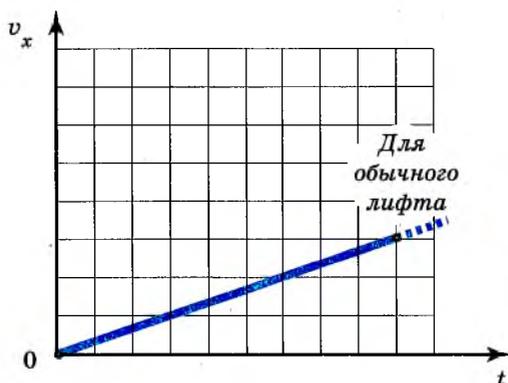


Рис.195

16. От удара клюшкой шайба приобрела начальную скорость 5 м/с и стала скользить по льду с ускорением 1 м/с². Запишите уравнение зависимости проекции вектора скорости шайбы от времени и постройте соответствующий этому уравнению график.

17. Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равноускоренном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения

$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$, где x_0 , v_{0x} и a_x — постоянные величины, а t — переменная.

18. Лыжник скатывается с горы, двигаясь прямолинейно с постоянным ускорением 0,1 м/с². Напишите уравнения, выражающие зависимость от времени координаты и проекции вектора скорости движения лыжника, если его начальные координата и скорость равны нулю.

19. Велосипедист движется по шоссе прямолинейно со скоростью, модуль которой равен 40 км/ч относительно земли. Параллельно ему движется автомобиль. Что можно сказать о модуле вектора скорости и направлении движения автомобиля относительно земли, если относительно велосипедиста модуль его (автомобиля) скорости равен: а) 0; б) 10 км/ч; в) 40 км/ч; г) 60 км/ч?

20. Скорость катера относительно воды в реке в 5 раз больше скорости течения воды относительно берега. Рассматривая движение катера относительно берега, определите, во сколько раз быстрее катер движется по течению, чем против него.

21. Мальчик держит в руках шарик массой 3,87 г и объемом $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Что произойдет с этим шариком, если его выпустить из рук?

22. Стальной шар равномерно катится по горизонтальной поверхности и сталкивается с неподвижным алюминиевым шаром, в результате чего алюминиевый шар получает некоторое ускорение. Может ли при этом модуль ускорения стального шара быть равен нулю? быть больше или меньше ускорения алюминиевого шара? Все ответы обоснуйте.

23. Пусть M_3 и R_3 — соответственно масса и радиус земного шара, g_0 — ускорение свободного падения на поверхности Земли, а g — на высоте h . Исходя из формул $g = \frac{GM_3}{(R_3 + h)^2}$ и $g_0 = \frac{GM_3}{R_3^2}$, выведите

формулу: $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$.

24. На рисунке 196 изображены равные по массе шарики 1 и 2, привязанные к нитям длиной r и $2r$ соответственно и движущиеся по окружностям с одинаковой по модулю скоростью \vec{v} . Сравните центростремительные ускорения, с которыми движутся шарики, и силу натяжения нитей.

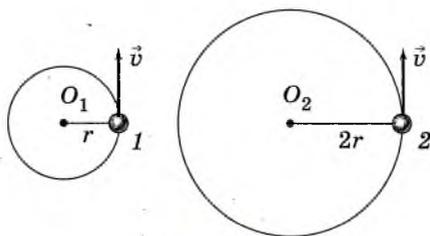


Рис.196

25. Исходя из формулы $a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}$ для определения центростремительного ускорения при движении по окружности и формулы $g = \frac{g_0 \cdot R_3^2}{(R_3 + h)^2}$, выведенной вами при решении задачи 23, получите следующую формулу для расчета первой космической скорости на

высоте h над поверхностью Земли: $v = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{R_3 + h}}$.

26. Среднее значение радиуса Земли равно 6400 км, а ускорение свободного падения у земной поверхности равно $9,8 \text{ м/с}^2$. Пользуясь только этими данными, вычислите первую космическую скорость на высоте 3600 км над поверхностью Земли.

27. Постройте график зависимости проекции вектора скорости от времени для тела, свободно падающего в течение 4 с ($v_0 = 0$, считать $g = 10 \text{ м/с}^2$).

28. Тело массой 0,3 кг свободно падает из состояния покоя в течение 3 с. На сколько увеличивается его импульс за первую секунду падения? за вторую секунду падения?

29. С помощью графика, построенного вами при решении задачи 27, покажите, что импульс свободно падающего тела за равные промежутки времени меняется на одну и ту же величину.

30. Алюминиевый и медный шарики одинакового объема свободно падают из состояния покоя с одной и той же высоты в течение 2,5 с. Импульс какого из шариков будет больше и во сколько раз к концу первой секунды падения? к концу второй секунды падения? Ответы обоснуйте.

31. Два одинаковых бильярдных шара, двигаясь вдоль одной прямой, сталкиваются друг с другом. Перед столкновением проекция вектора скорости первого шара на ось X была равна $0,2 \text{ м/с}$, а второго — $0,1 \text{ м/с}$. Определите проекцию вектора скорости второго шара после столкновения, если у первого она стала равна $0,1 \text{ м/с}$.

Сделайте два рисунка, на первом из которых изобразите ось X , шары и векторы их скоростей до столкновения, а на втором — после столкновения.

32. Решите предыдущую задачу для случая, при котором $v_{1x} = 0,2 \text{ м/с}$, $v_{2x} = -0,1 \text{ м/с}$, $v'_{1x} = -0,1 \text{ м/с}$ (где v_{1x} и v_{2x} — проекции векторов скорости соответственно 1-го и 2-го шаров до их столкновения, а v'_{1x} — проекция вектора скорости 1-го шара после столкновения).

33. Используя данные и результат решения задачи 32, покажите, что при столкновении шаров выполняется закон сохранения полной механической энергии.

34. На рисунке 197 показано, как меняется с течением времени проекция вектора скорости одной из точек сидения качелей. С какой

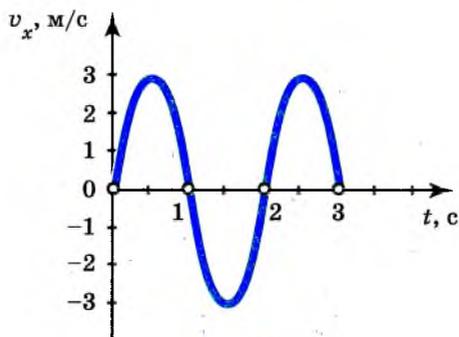


Рис.197.

частотой происходит это изменение? Какова частота изменения скорости любой другой точки качелей, совершающей колебания?

35. Струна арфы совершает гармонические колебания с частотой 40 Гц. Постройте график зависимости координаты от времени для средней точки струны, амплитуда колебаний которой равна 3 мм. (Для построения графика рекомендуем разметить ось t так, как показано на рисунке 198; ось x разметьте самостоятельно.)

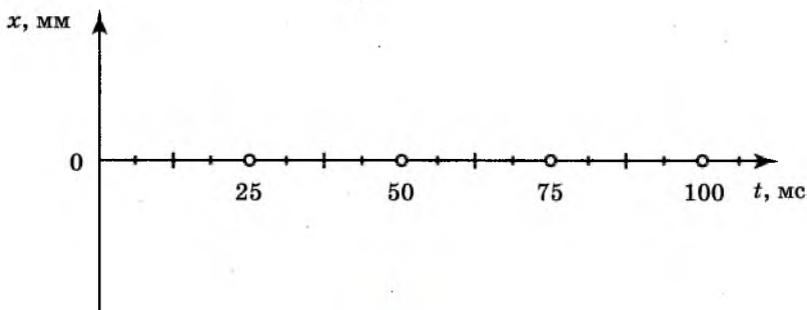


Рис.198

Годится ли построенный вами график для других точек той же самой струны? для средних точек других струн арфы? Почему?

36. Как добиться звучания одного из двух одинаковых камертонов на резонаторных ящиках, не дотрагиваясь до него? Как при этом следует расположить отверстия резонаторных ящиков по отношению друг к другу? Ответы поясните.

Какое физическое явление лежит в основе предложенного вами опыта?

37. Качели периодически подталкивают рукой, т. е. действуют на них вынуждающей силой. На рисунке 199 изображен график зависимости амплитуды установившихся колебаний качелей от частоты данной вынуждающей силы. Пользуясь этим графиком, определите:

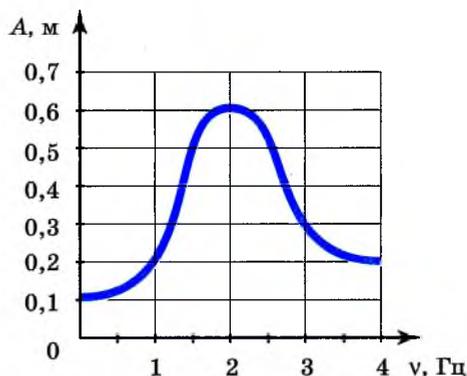


Рис. 199

а) При какой частоте воздействия на качели — при 1 Гц или при 3 Гц — амплитуда их установившихся колебаний будет больше?

б) С какой частотой надо подталкивать качели, чтобы амплитуда их установившихся колебаний достигла наибольшего значения?

в) Чему равна собственная частота качелей? На основании какого физического закона вы определили собственную частоту?

38. На рисунке 200 изображен проводник AB длиной 10 см и массой 2 г, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией $4 \cdot 10^{-2}$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводнику протекает электрический ток (подводимый по тонким проводам, на которых подвешен данный проводник). Какой должна быть сила тока, чтобы сила тяжести, действующая на проводник AB , уравновешивалась силой действия магнитного поля на ток?

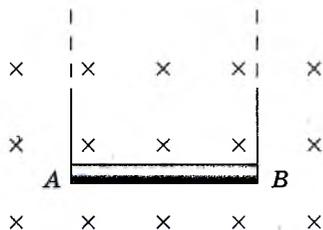


Рис. 200

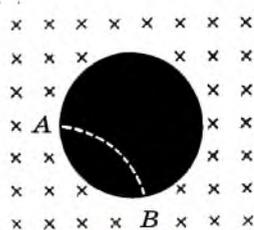


Рис. 201

39. В камеру Вильсона, помещенную в однородное магнитное поле, летает электрон и движется по дуге окружности (см. белую штриховую линию на рисунке 201). Под действием какой силы меняется направление скорости электрона? В какой точке он влетел в камеру?

40. Известно, что сила F , с которой однородное магнитное поле с индукцией B действует на частицу с зарядом e , движущуюся со ско-

ростью v перпендикулярно линиям магнитной индукции, определяется по формуле: $F = Bev$.

По дуге окружности какого радиуса будет двигаться в однородном магнитном поле электрон, если его скорость v направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции и равна $3 \cdot 10^7$ м/с, модуль заряда $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а индукция магнитного поля $B = 8,5 \cdot 10^{-3}$ Тл?

41. В результате какого радиоактивного распада углерод $^{14}_6\text{C}$ превращается в азот $^{14}_7\text{N}$?

42. При бомбардировке ядер алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ нейтронами из образовавшегося ядра выбрасывается α -частица. Напишите уравнение этой реакции.

43. Пользуясь законом сохранения массового и зарядового чисел, заполните пропуск в записи следующей ядерной реакции: $^{10}_5\text{B} + \dots \rightarrow$
 $\rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$.

44. Какой химический элемент образуется в результате α -распада изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$? Запишите эту реакцию.

45. В результате какого числа β -распадов ядро атома тория $^{234}_{90}\text{Th}$ превращается в ядро атома урана $^{238}_{92}\text{U}$?

Ответы к упражнениям

Упр. 5. 2. $1,5 \text{ м/с}^2$. 3. $0,5 \text{ м/с}^2$.

Упр. 6. 1. 1 м/с . 2. 10 с . 5. $a_1 = -0,5 \text{ м/с}^2$; $a_2 = 1 \text{ м/с}^2$.

Упр. 7. 1. $31,25 \text{ м}$. 2. 150 м . Указания: замените в формуле (1) время t его выражением, полученным из формулы (2) § 5, а площадь S — проекцией перемещения s_x ; проведите преобразования с учетом того, что $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$ и что $a + b = b + a$.

Упр. 8. 1. $0,4 \text{ м}$; $0,8 \text{ м/с}^2$. 2. 7 м/с .

Упр. 9. 5*. 248 м/с при движении на восток и 198 м/с при движении на запад.

Упр. 11. 2. $36,8 \text{ кН}$. 3. $9,6 \text{ Н}$. 4. 6 м/с^2 .

Упр. 12. 2. Не будет. 3. а) $F_{2x} = 0,3 \text{ Н}$, $F_{1x} = -0,3 \text{ Н}$; б) $F_{1x} = 0,1 \text{ Н}$, $F_{2x} = -0,1 \text{ Н}$; г) $F_x = 0,4 \text{ Н}$.

Упр. 13. 1. $78,4 \text{ м}$. 3. 3 с ; $4,9 \text{ м}$; $24,5 \text{ м}$.

Упр. 14. 1. 1 с ; $4,9 \text{ м}$.

Упр. 15. 4. в) При движении вверх \vec{v} и \vec{g} направлены в противоположные стороны, а при движении вниз — в одну и ту же.

Упр. 16. 2. Притягивается с такой же по модулю силой. 6*. $h_1 = R_3$; $h_2 = 2R_3$.

Упр. 17. 3*. На участках AB и CD . Могла.

Упр. 18. 2. $2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$. 4. 3600 . Секундная. 5. а) $\approx 1,9 \cdot 10^{20} \text{ Н}$;

б) $\approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$; в) $\approx 1 \text{ км/с}$.

Упр. 19. 1. $6,67 \text{ км/с}$. 2. $1,7 \cdot 10^3 \text{ км}$.

Упр. 20. 1. $0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; $-0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 2. $5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 4. $0,9 \text{ м/с}$.

Упр. 21. 1. $2,25 \text{ м/с}$. 2. $\approx 33 \text{ м/с}$.

Упр. 22. 2. 10 м/с . 3. $1,25 \text{ м}$.

Упр. 23. 2. а) Под действием силы упругости шнуров.

Упр. 24. 4. 10 Гц . 6. 40 см .

Упр. 27. 3. 2 с .

Упр. 28. 1. 20 м/с .

Упр. 30. 2. Понизится. 3. Понизится.

Упр. 32. 4. 20 м/с . 5*. Для того чтобы звук дошел до наблюдателя, требуется определенное время, поэтому наблюдатель должен слышать звук от удара позже, чем он видит, как ударяют в колокол. Но при небольших расстояниях между наблюдателем и колоколом это запаздывание звука настолько мало, что наблюдатель не замечает его (например, при расстоянии 10 м звук запаздывает всего на $0,03 \text{ с}$). По мере удаления наблюдателя запаздывание звука все увеличивается и становится заметным (так, при расстоянии 170 м запаздывание составляет $0,5 \text{ с}$). Когда же наблюдатель отойдет на 340 м от колокола, то звук удара запоздает на 1 с и совпадет со следующим ударом.

Упр. 33. 1. Да. 2. N, M .

Упр. 34. 1. а) C и D ; б) A . 2. Можно.

Упр. 35. 6. В первом — магнитными, а во втором — электрическими.

Упр. 36. 1. Вправо. 2. От A к B .

Упр. 37. 1. $0,5 \text{ Тл}$.

Упр. 44. 1. $5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$. 3. Нельзя.

Упр. 51. 3. В 6 раз.

Упр. 53. 1. Нуклонов — 9, протонов — 4, нейтронов — 5.

**Ответы к задачам, предлагаемым для повторения
и при 3 часах физики в неделю**

1. а) \vec{a} : (0,5; 5), (0,5; 2); \vec{b} : (1; 0), (4; 4); б) $a_y = -3$; $b_y = 4$; в) $|a_y| = 3$; $|b_y| = 4$; 4;
г) $|\vec{a}| = 3$, $|\vec{b}| = 5$.
2. $a_x = 0$, $b_x = b$.
3. г) $|\vec{s}| = 13$.
4. $|\vec{s}| = 13$.
6. $x = 3 + 5t$.
7. $t = 20$ с.
8. $x = -10 + 2t$.
9. $t_2 = 3$ с; $s_{2x} = 6,75$ м.
12. $v_{\text{ср. } x} \approx 1,4$ м/с; $v_x \approx 2,9$ м/с.
15. $v_0 = 10$ м/с; $a = 0,5$ м/с².
16. $v_x = 5 - t$.
18. $x = 0,05t^2$; $v_x = 0,1t$.
19. б) $v_a = 50$ км/ч или $v_a = 30$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$; г) $v_a = 100$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$ или $v_a = 20$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \downarrow \vec{v}_b$.
20. $\frac{v_{\text{к. по течен}}}{v_{\text{к. против течен}}} = 1,5$.
21. Шар будет покоиться на том месте, где его выпустили из рук.
22. Модуль ускорения стального шара не может быть равен нулю.
Если масса стального шара больше массы алюминиевого, то ускорение стального будет меньше ускорения алюминиевого, если же масса стального меньше, то его ускорение будет больше, чем у алюминиевого.
24. $\frac{a_{\text{ц. с 1}}}{a_{\text{ц. с 2}}} = 2$; $\frac{F_{\text{ц. с 1}}}{F_{\text{ц. с 2}}} = 2$.
26. $v \approx 6,3$ км/с.
28. $\Delta p_I = 2,94$ кг·м/с; $\Delta p_{II} = 2,94$ кг·м/с.
30. $\frac{P_{M1}}{P_{a1}} = \frac{P_{M2}}{P_{a2}} \approx 3,3$.
31. $v'_{2x} = 0,2$ м/с.
34. $\nu = 0,5$ Гц (для любой колеблющейся точки качелей).
35. Построенный график не годится ни для других точек данной струны (так как у них другие амплитуды колебаний), ни для средних точек других струн арфы (так как они колеблются с другими частотами).
37. а) $\nu = 3$ Гц.
38. $I = 5$ А.
40. $r = 2 \cdot 10^{-2}$ м.
41. ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}e$.
42. ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0n \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Альфа-распад 245
Альфа-частицы 227
Амплитуда 103
Антинейтрино 245
Атом 228
- Батарея конденсаторов 187
Бел (единица уровня громкости звука) 127
Бета-распад 245
Бета-частицы 227
- Величина векторная 11
— скалярная 10
Водородный цикл 265
Волна 114
— бегущая 114
— поперечная 115
— продольная 115
— световая 202
— упругая 114
— электромагнитная 182
Волны когерентные 138
Высота звука 124
- Гамма-частицы (гамма-кванты, гамма-излучение) 227, 228
Генератор высокочастотных электромагнитных колебаний 192
— переменного электрического тока 174
Герц (единица частоты) 99
Гравитационная постоянная 60
Громкость звука 126
- Грэй (единица поглощенной дозы излучения) 259
- Движение колебательное 93
— криволинейное 68
— неравномерное 20
— периодическое 93
— по окружности 70
— поступательное 7
— прямолинейное
 равномерное 16, 17
— — равноускоренное 20, 21
— равномерное 20, 68
— реактивное 84
Дейтерий 243
Деление ядер 248
Детектирование 199
Детектор 199
Дефект масс 247
Дефектоскопия 132
Децибел (дольная единица от бела) 127
Дисперсия света 215
Длина волны 118
— — световой 182
Доза излучения поглощенная 259
— — эквивалентная 259
- Единица громкости 127
— импульса 79
— силы 46
— уровня громкости 127
— ускорения 21
— частоты 99

- Закон всемирного тяготения 60
 — Ньютона второй 46
 — — первый (закон инерции) 40, 41
 — — третий 49, 50
 — преломления света 206, 208, 209
 радиоактивного распада 262
 — сохранения заряда 233
 — — импульса 80
 — — массового числа 233
 Заряд конденсатора 186
- Излучение видимое 143
 — инфракрасное 143
 — рентгеновское 143
 — ультрафиолетовое 143
 Изолированные атомы 220
 Изотопы 243
 Импульс тела 79
 Индуктивность 173
 Индукция магнитного поля (магнитная индукция) 156, 157
 Интерференция волн звуковых 139
 — — световых 200
 Искусственный спутник Земли 75
- Камера Вильсона 236
 — пузырьковая 238
 Камертон 121
 Квант 204
 Колебания вынужденные 108
 — гармонические 102, 104
 — затухающие 106
 — звуковые 122
 — инфразвуковые 122
 — свободные 95
 — ультразвуковые 122
 — электромагнитные 192
 — — модулированные 198
 Колебательный контур 192
 Конденсатор 185
 — бумажный 189
 — керамический 189
 — оксидно-электролитический 189
 — переменной емкости 190
- Корпускулярные (и волновые) представления о свете 204
 Коэффициент качества (радиоактивного излучения) 260
- Линии магнитной индукции 158
- Магнитный поток (поток магнитной индукции) 160
 Масса критическая 251
 Маятник математический 105
 — пружинный 96
 Метод сцинтилляций 229
 Модель ядра протонно-нейтронная 198
 Модуляция амплитудная 197
- Напряженность электрического поля 182
 Невесомость 59
 Нейтрино 265
 Нейтрон 241
 Нуклон 242
 Ньютон (единица силы) 46
- Обертон 125
 Оптическая плотность среды 210
 Опыт Юнга 200
 Опыты Резерфорда (по рассеянию α -частиц) 229
 Относительность движения 36
- Падение свободное 52, 54, 57, 63, 64
 Перемещение 11, 30, 31, 32
 Период колебаний 93, 99
 — полураспада 261
 Показатель преломления абсолютный 207
 — — относительный 206
 Поле вихревое электрическое 180
 — магнитное 140
 — электромагнитное 180
 Постоянная Планка 204

- Постулаты Бора 224
 Правило буравчика 147
 — левой руки 152, 153
 — Ленца 169
 — правой руки 148
 — смещения 245
 Протий 243
 Протон 239
- Радиоактивность 226
 Радиосвязь 196
 Разность фаз 100
 — хода (волн) 136
 Ракета 85
 Реактор ядерный 253
 Реакции термоядерные 264
 — цепные 250
 Резонанс 111
 — звуковой (акустический) 133
 Резонатор 134
 Рентген (единица дозы излучения) 259
 Ротор 174
- Самоиндукция 172
 Сегнерово колесо 84
 Сердечник 174
 Сила всемирного тяготения 60
 — вынуждающая 108
 Силы ядерные 245
 Синусоида 103
 Система единиц Международная 11
 — замкнутая 81
 — инерциальная 41
 — колебательная 95
 — неинерциальная 41
 — отсчета 8
 Скорость волны 119
 — вторая космическая 77
 — звука 130
 — мгновенная 20
 — первая космическая 76, 77
 — равномерного прямолинейного движения 17
 — света 129, 181
 — электромагнитных волн 181
- Смещение 94
 Сон (единица условной шкалы громкости звука) 127
 Сопло 85
 Спектр 215
 — испускания линейчатый 221
 — — непрерывный (сплошной) 220
 — поглощения линейчатый 221
 Спектральный анализ 222
 Спектрограф (спектроскоп) 217, 218
 Статор 174
 Счетчик Гейгера 235
- Тело отсчета 7
 Тембр 125
 Тесла (единица магнитной индукции) 157
 Ток переменный 174
 Тон основной 125
 — чистый 125
 Точка материальная 6, 7
 Трансформатор 177
 — повышающий 178
 — понижающий 178
 Трек 237
 Тритий 243
- Ускорение 21
 — свободного падения 54
 — центростремительное 71
- Фарад 186
 Физический смысл показателя преломления 210
 Фон (единица уровня громкости звука) 127
 Формула Томсона 195
 — Эйнштейна (взаимосвязи массы и энергии) 247
 Фотон 205
- Частота колебаний 99
 — — несущая 197

- Частота колебаний основная** 127
— — **собственная** 99
— — **установившихся** 109
— **переменного тока** 176
- Число зарядовое** 242
— **массовое** 242
- Электромагнитная индукция** 165
- Электрон** 230
- Емкость** 186
- Энергия магнитного поля тока** 173
- **покоя** 247
— **связи** 264
— **фотона (кванта электромагнитного излучения)** 204
— **электрического поля конденсатора** 189
- Эфир световосный** 203
- Эхолокация** 123
- Ядра конденсации** 237
- Ядро атомное** 231

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава I

ЗАКОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

§ 1. Материальная точка. Система отсчета.	5
§ 2. Перемещение	10
§ 3. Определение координаты движущегося тела.	12
§ 4. Перемещение при прямолинейном равномерном движении	16
§ 5. Прямолинейное равноускоренное движение. Ускорение . . .	20
§ 6. Скорость прямолинейного равноускоренного движения. График скорости.	24
§ 7. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении	28
§ 8. Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости.	31
§ 9. Относительность движения	34
§ 10. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. . .	39
§ 11. Второй закон Ньютона	42
§ 12. Третий закон Ньютона	48
§ 13. Свободное падение тел	52
§ 14. Движение тела, брошенного вертикально вверх. Невесомость	57
§ 15. Закон всемирного тяготения	60
§ 16. Ускорение свободного падения на Земле и других небесных телах	62
§ 17. Открытие планет Нептун и Плутон (для дополнительного чтения).	65
§ 18. Прямолинейное и криволинейное движение.	67
§ 19. Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью	70
§ 20. Искусственные спутники Земли	74
§ 21. Импульс тела. Закон сохранения импульса	79
§ 22. Реактивное движение. Ракеты	83
§ 23. Вывод закона сохранения полной механической энергии. . .	88

Глава II

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 24. Колебательное движение	92
§ 25. Свободные колебания. Колебательные системы. Маятник . .	94
§ 26. Величины, характеризующие колебательное движение	98
*§ 27. Гармонические колебания	102
§ 28. Затухающие колебания	106
§ 29. Вынужденные колебания	108
§ 30. Резонанс	110
§ 31. Распространение колебаний в среде. Волны	118
§ 32. Продольные и поперечные волны	115
§ 33. Длина волны. Скорость распространения волн	117
§ 34. Источники звука. Звуковые колебания	120
§ 35. Высота и тембр звука	123
§ 36. Громкость звука	126
§ 37. Распространение звука	128
§ 38. Звуковые волны. Скорость звука	129
§ 39. Отражение звука. Эхо	132
§ 40. Звуковой резонанс	133
*§ 41. Интерференция звука	135

Глава III

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 42. Магнитное поле и его графическое изображение	140
§ 43. Неоднородное и однородное магнитное поле	143
§ 44. Направление тока и направление линий его магнитного поля	146
§ 45. Обнаружение магнитного поля по его действию на электрический ток. Правило левой руки	150
§ 46. Индукция магнитного поля	156
§ 47. Магнитный поток	160
§ 48. Явление электромагнитной индукции	163
§ 49. Направление индукционного тока. Правило Ленца	166
§ 50. Явление самоиндукции	170
§ 51. Получение и передача переменного электрического тока. Трансформатор	173
§ 52. Электромагнитное поле	179
§ 53. Электромагнитные волны	181

§ 54. Конденсатор	185
§ 55. Колебательный контур. Получение электромагнитных колебаний	192
§ 56. Принципы радиосвязи и телевидения	196
§ 57. Интерференция света	200
§ 58. Электромагнитная природа света	203
§ 59. Преломление света. Физический смысл показателя преломления	205
§ 60. Дисперсия света. Цвета тел	212
§ 61. Спектрограф и спектроскоп	217
§ 62. Типы оптических спектров	220
§ 63. Спектральный анализ	222
§ 64. Поглощение и испускание света атомами. Происхождение линейчатых спектров	224

Глава IV

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 65. Радиоактивность как свидетельство сложного строения атомов	226
§ 66. Модели атомов. Опыт Резерфорда	228
§ 67. Радиоактивные превращения атомных ядер	232
§ 68. Экспериментальные методы исследования частиц	235
§ 69. Открытие протона	238
§ 70. Открытие нейтрона	240
§ 71. Состав атомного ядра. Массовое число. Зарядовое число	242
§ 72. Ядерные силы.	245
§ 73. Энергия связи. Дефект масс	246
§ 74. Деление ядер урана	248
§ 75. Цепная реакция	250
§ 76. Ядерный реактор. Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию	253
§ 77. Атомная энергетика	255
§ 78. Биологическое действие радиации. Закон радиоактивного распада	259
§ 79. Термоядерная реакция	263
* § 80. Элементарные частицы. Античастицы (для дополнительного чтения)	266
Лабораторные работы	269

Задачи, предлагаемые для повторения и при 3 часах физики в неделю	283
Ответы к упражнениям	292
Ответы к задачам, предлагаемым для повторения и при 3 часах физики в неделю	293
Предметный указатель	294