

11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

Теоретический обзор к занятию 10.

Темы: основы специальной теории относительности (СТО), квантовая физика.

Ряд тем школьного курса посвящен изучению современной физики, то есть теорий, появившихся только в XX веке при изучении физики «очень маленьких» объектов (с размерами меньше нанометра) - физики микромира и физики «очень быстрых» объектов (имеющих скорости, по порядку приближающиеся к скорости света в вакууме) – релятивистской (от слова «relativity» - «относительность») физики.

Темы «основы СТО» и «квантовая физика» традиционно достаточно обширно представлены и в материалах ЕГЭ. При этом, как показывает практика, даже в заданиях с кратким ответом по этим темам у участников нередко встречаются ошибки. Дело, по-видимому, в том, что эти задания обычно очень просты по исполнению (в них не бывает сложных расчетов или уравнений), но уверенное их выполнение на самом деле требует более глубокого уровня **понимания** происходящего, чем то, что формально «прописано» в кодификаторе ЕГЭ. По этой причине в теоретическом обзоре не будем ограничиваться только необходимыми сведениями (лишь выделим их особо), но снабдим их дополнительными «понятийными» комментариями.

Поэтому по каждой теме в этом обзоре будут отдельно выделены перечень необходимых сведений – в абзацах с пометкой «**для ЕГЭ необходимо знать**».

Основы специальной теории относительности:

Основу механики малых (по сравнению со скоростью света) скоростей составляют законы Ньютона. В первом из них постулируется существование выделенного класса систем отсчета (СО) – инерциальных. Как могут отличаться друг от друга две системы из этого класса? Поскольку тело, на которое не действуют силы, должно иметь нулевое ускорение по отношению к обеим СО, их относительное ускорение должно равняться нулю. Таким образом, две инерциальные системы отсчета должны иметь **постоянную относительную скорость**. С физической точки зрения выделенность класса инерциальных СО можно объяснить наличием во Вселенной некоторого «центра», который «по настоящему» покоится. Тогда с этим центром можно связать абсолютную систему отсчета, а инерциальными будут те СО, которые движутся равномерно и прямолинейно относительно абсолютной. Все законы механики во всех инерциальных СО выглядят одинаково, поэтому и механические процессы в одинаковых по отношению к разным СО условиях (например, полет камня, брошенного под заданным углом к горизонту из начала координат, связанного с «неподвижной» Землей и такого же камня, брошенного под тем же углом к горизонту из начала координат, связанного с вагоном поезда, движущегося с постоянной скоростью относительно Земли) будут протекать **одинаково**. Таким образом, обнаружить факт движения инерциальной СО путем наблюдения за механическими процессами невозможно. Эти рассуждения раскрывают содержания принципа относительности Галилея:

Все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Долгое время после Галилея считалось, что другие (немеханические) физические явления могут позволить обнаружить абсолютное движение СО (т.е. измерить ее скорость относительно абсолютной системы). Большие надежды возлагались на электромагнитные явления: поскольку считалось, что свет и другие типы электромагнитных волн являются колебаниями особой среды – эфира, то естественным выглядело предположение, что эфир в целом покоится по отношению к абсолютной системе, и для обнаружения абсолютного движения наблюдателя достаточно точно измерить скорость распространения света в разных направлениях (если эта скорость имеет фиксированное значение c относительно эфира, то относительно движущегося наблюдателя эта скорость определяется векторным

соотношением $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}_H$, и минимум и максимум величины скорости света должны быть $c - v_H$ и $c + v_H$ соответственно). Однако экспериментально это различие обнаружить не удалось (наибольшую известность приобрел опыт Майкельсона-Морли, в котором пытались обнаружить смещение полос интерференции в крестообразном интерферометре за счет различия скоростей движения света вдоль его плеч). Новый взгляд на ситуацию предложен в принципе относительности Эйнштейна:

Все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

В частности, одинаково протекают электромагнитные явления, и скорость света в вакууме во всех системах отсчета должна быть **одинакова**. При этом, правда, приходится пересмотреть многие «классические» законы механики и построить новую (ее называют «релятивистской») механику. Например, закон сложения скоростей заметно усложняется:

для сонаправленных скоростей нужно считать $v_{12} = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 \cdot v_2 / c^2}$ (здесь c – скорость света

в вакууме: нетрудно убедиться, что величина скорости, получаемая сложением скорости света с любой другой, равна c). Значит, в релятивистской физике действительно «работает» принцип постоянства скорости света.

Наиболее заметное изменение в релятивистских уравнениях движения – зависимость инертной массы тела от скорости $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$. В этом выражении величина m_0 – *масса покоя* тела (при нулевой скорости). Соответственно, импульс движущегося тела в СТО

$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$. Энергия движущегося тела равна $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = mc^2$. Значение

энергии при $v = 0$ называют энергией покоя: $E_0 = m_0 c^2$, а разность энергии движущегося

тела и энергии покоя – кинетической энергией $E_K \equiv E - E_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - 1 \right)$. Те,

кто умеет работать с малыми приращениями, могут убедиться, что именно эта величина при малых скоростях $v \ll c$ переходит в «классическое» выражение, то есть

$E_K|_{v \ll c} \approx \frac{m_0 v^2}{2}$. Полезно также заметить, что энергия и модуль импульса релятивистского

тела связаны соотношением $E^2 = m_0^2 c^4 + c^2 \vec{p}^2$. Как видно, энергия и величина импульса

тела зависят от выбора инерциальной СО, но при этом комбинация $\frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = m_0^2 c^2$

одинакова во всех системах отсчета и связана с массой покоя тела!

Для ЕГЭ необходимо знать: принципы относительности Галилея и Эйнштейна; факт постоянства скорости света в вакууме во всех инерциальных системах отсчета; формулу связи энергии и массы $E = mc^2$; определение полной энергии, энергии покоя и кинетической энергии релятивистского тела, формулу связи импульса со скоростью и энергии с импульсом.

Квантовая физика: молекулы, атомы, ядра, частицы.

Главная особенность явлений, происходящих на атомном и субатомном уровнях строения материи (размеры объектов 10^{-10} м и меньше) – их **квантовый** характер. Это означает, что при взаимодействии такие объекты отдают и поглощают энергию не произвольно, а определенными *порциями* – **квантами**.

Впервые идея квантования энергии появилась при построении описания взаимодействия электромагнитного излучения с нагретым веществом. Оказалось, что для правильного

описания спектра излучения нагретых тел надо принять утверждение, что вещество и поле обмениваются энергией «порциями», величина которых пропорциональна частоте гармоник: $E = h\nu = \frac{h}{2\pi} \omega$ (это соотношение называют *формулой Планка*, а постоянная

величина $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – *постоянная Планка*). Порции и получили название «кванты». Позднее квант электромагнитного излучения назвали **фотоном** (т.е. «частицей света»). Выяснилось, что фотоны обладают многими свойствами, характерными именно для частиц: в частности, они обладают импульсом $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$, что может быть

обнаружено при их столкновениях с другими объектами. Например, при взаимодействии фотонов с электронами в веществе фотоны отдают часть своего импульса электронам, их импульс уменьшается, и они «краснеют», то есть их длина волны увеличивается (это явление называют эффект Комптона). Квантовые явления очень разнообразны, но задания ЕГЭ, посвященные квантовым свойствам света, касаются только двух из них: **фотоэффекта и атомных спектров**.

Явление фотоэффекта состоит в «выбивании» электронов из металла под действием света. Закономерности фотоэффекта удобно изучать с помощью вакуумной трубки с двумя электродами (впервые такое исследование было выполнено профессором МГУ А.Г. Столетовым в 1988-90 гг.). Если освещать один из электродов (*катод*), то из него выбиваются электроны, которые могут достигать второго электрода (*анода*), создавая электрический ток через трубку. Если подать на анод положительный потенциал относительно катода, то практически все выбитые электроны достигают анода – возникающий в таких условиях ток называют «**фототоком насыщения**». Оказалось, что **при заданной частоте света фототок насыщения пропорционален интенсивности световой волны**. Появлению фототока можно помешать, включив «запирающую» разность потенциалов между электродами, т.е. создав между ними поле, заворачивающее выбитые электроны обратно на первый электрод. Важным результатом Столетова было обнаружение связи этой разности потенциалов с частотой света: **минимальная величина запирающего напряжения зависит от частоты света линейным образом**: $U_{\min} = \alpha \cdot (\nu - \bar{\nu})$ (для $\nu \geq \bar{\nu}$). Видно, что при частоте света ниже **красной границы фотоэффекта** $\bar{\nu}$ фототок отсутствует даже при нулевой запирающей разности потенциалов. Эти закономерности долгое время не удавалось объяснить с позиций классической физики, и только после привлечения А. Эйнштейном идеи квантования удалось создать простую теорию фотоэффекта. Для ее построения достаточно заметить, что для выбивания электрона проводимости из металла надо совершить работу против удерживающих его сил притяжения со стороны кристаллической решетки – **работу выхода**. Если энергия передается от световой волны электрону квантово, т.е. в виде «порции» $h\nu$, то кинетическая энергия выбитого электрона есть разность этой «порции» и работы выхода. В этом случае для запирающего фототока поле между электродами должно полностью забирать у электрона его кинетическую энергию, то есть:

$$eU_{\min} = E_{\text{кин}} = h\nu - A \Rightarrow U_{\min} = \frac{h}{e} \cdot \left(\nu - \frac{A}{h} \right) \equiv \alpha \cdot (\nu - \bar{\nu}).$$

При этом величина фототока пропорциональна числу выбиваемых в единицу времени электронов, которое равно числу поглощенных квантов и поэтому пропорционально интенсивности световой волны.

Квантовые закономерности проявляются и в строении атома. Для его описания была предложена «**планетарная модель**», согласно которой атом состоит из компактного (размером порядка 10^{-13} см) положительно заряженного ядра и связанных с ним силами электростатического притяжения электронов, радиусы орбит которых намного больше размеров ядра (порядка 10^{-8} см). Факт существования ядра был установлен в *опыте Резерфорда* по рассеянию α -частиц (ядер атома гелия) на тонкой золотой фольге. За счет

малой толщины фольги удастся наблюдать результат взаимодействия α -частицы с отдельным атомом. Самым удивительным для Резерфорда оказалось то, что иногда они отражались от атома. В самом деле, для отражения частицы с зарядом $+2e$ от положительного заряда атома, энергия потенциального взаимодействия в точке остановки должна равняться кинетической энергии налетающей частицы (до влета ее в атом):

$k \frac{2Ze^2}{r} = E$. Тогда радиус ядра не должен превышать расстояния, на котором происходит

остановка $R \leq r = \frac{2kZe^2}{E}$, и из этого соотношения получалось, что радиус ядра порядка

10^{-13} см. Квантовый подход к задаче о движении атомных электронов в поле ядра может быть основан на **постулатах Бора**:

- Существуют стационарные орбиты электрона в атоме, на которых электрон не излучает и в отсутствие внешних воздействий может находиться вечно.
- Электрон излучает (испускает фотон) при переходе с одной стационарной орбиты на другую.

Противоречие этих постулатов с законами классической физики особенно очевидно, если вспомнить, что при движении по криволинейной орбите заряженный электрон испытывает ускорение и **обязан** излучать электромагнитные волны. Бор также предложил условие, позволяющее отобрать стационарные орбиты, и получил из него формулу для

уровней энергии электрона в атоме водорода: $E_n = -\frac{mk^2e^4}{8\pi^2 h^2 n^2} \approx -\frac{13,6 \text{ эВ}}{n^2}$.

Согласно второму постулату, электрон испустит фотон при переходе с одной орбиты на другую (с более низкой энергией). С учетом закона сохранения энергии и формулы Планка можно найти все возможные частоты фотонов, то есть **спектр** излучения атома водорода:

$$\nu = \frac{E_n - E_{n'}}{h} \equiv R \cdot \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

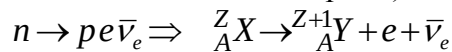
Видно, что этот спектр – **линейчатый** (набор дискретных **спектральных линий**). Кроме того, вид спектра зависит от характеристик атома (заряда ядра, количества электронов), и поэтому у каждого атома набор частот свой. На этом факте основан **спектральный анализ** – определение атомного состава вещества по спектру его излучения. С помощью метода спектрального анализа удастся даже находить новые элементы – например, гелий, линии которого были обнаружены в спектре излучения Солнца.

В материалах ЕГЭ многие задания посвящены поведению атомных ядер. Многие наблюдаемые процессы – например, **радиоактивность** (способность некоторых веществ испускать радиоактивные излучения, названные α , β и γ -лучами) – связаны именно с ядерными процессами. Дело в том, что сами ядра имеют сложную внутреннюю структуру – в самой простой модели их можно считать состоящими из **протонов** (заряд $+e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) и **нейтронов** (нейтральных частиц), удерживаемых вместе очень мощными **ядерными силами**. Строение конкретного ядра в этом случае задают следующими характеристиками: зарядовое число Z – заряд ядра в единицах элементарного заряда, равный числу протонов, и массовое число A – масса ядра в атомных единицах массы, численно равная суммарному числу протонов и нейтронов в ядре. Используется обозначение: ${}_A^Z X$, где X – символ химического элемента данного ядра.

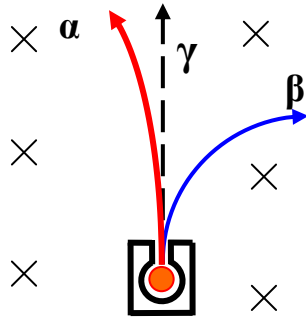
Все ядерные процессы представляют собой реакции с участием протонов и нейтронов (часто используется их общее название – **нуклоны**). Например, α -распад есть процесс

вылета из ядра α -частицы, состоящей из двух нейтронов и двух протонов. Поэтому уравнение α -распада: ${}^Z_A X \rightarrow {}^{Z-2}_{A-4} Y + \alpha$.

β -распад является в действительности реакцией распада нейтрона с образованием протона, электрона и еще одной частицы – антинейтрино):



γ -распад – это процесс испускания ядром фотона (характеристики ядра при этом не меняются). Экспериментально различная природа радиоактивных излучений была установлена по их реакции на магнитное поле: оно отклоняло α и β -лучи в разные стороны (заряд имеет разные знаки) и в разной степени (электроны намного легче ядер атома гелия, и они отклоняются значительно сильнее), а γ -лучи на поле не реагировали (см. рисунок).



Другой важный тип ядерной реакции – **деление ядер**, при котором ядра раскалываются на два других ядра, что обычно сопровождается вылетом нескольких нейтронов (обозначим их число K). Уравнение этой реакции: ${}^Z_A X \rightarrow {}^{Z'}_{A'} Y + {}^{Z''}_{A''} Z + K {}^0_1 n$, причем: $A' + A'' + K = A$, $Z' + Z'' = Z$. Реакция деления ядер урана идет в реакторе атомной электростанции и в заряде атомной бомбы. Существует и обратный процесс – слияние ядер (**термоядерный синтез**), энергетически выгодный для легких ядер. Эта реакция, по современным представлениям, обеспечивает энергией светящиеся звезды типа Солнца, она же происходит при взрыве термоядерной бомбы. Значительные усилия направлены на создание **термоядерного реактора**, которое может решить энергетические проблемы человечества.

Можно отметить, что уравнения всех перечисленных (и не упомянутых) ядерных процессов могут быть построены на основе законов сохранения суммарных значений массового A и зарядового Z чисел. Выделяющуюся или поглощаемую в каждой реакции энергию можно подсчитать, используя понятие **энергии связи** ядра. Так называется разность суммы полных энергии «отдельно расположенных» протонов и нейтронов и полной энергии ядра (напомним, что «полная» энергия тела включает и его энергию покоя). Название «энергия связи» подчеркивает смысл этой величины: она равна работе ядерных сил, «связывающих» отдельные нейтроны и протоны в ядро. Эта работа достаточно велика, и становится заметным изменение массы объекта: «связанное» ядро легче, чем отдельные нейтроны и протоны, из которых оно состоит. Соответствующую разность масс называют «**дефектом массы**» ядра: $\Delta m({}^A_Z X) \equiv Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m({}^A_Z X)$.

Из формулы Эйнштейна следует, что энергия связи и дефект масс взаимосвязаны: $E_c = \Delta m \cdot c^2$. Закон сохранения энергии позволяет утверждать, что сумма кинетических энергий и энергий связи начальных и конечных ядер в любой реакции одинакова. Впрочем, в материалах ЕГЭ этот закон в общей форме не используется.

Интенсивность ядерных процессов характеризуют **числом распадов в единицу времени** (эту величину в материалах ЕГЭ часто называют «**активностью**»: $I \equiv \frac{\Delta N}{\Delta t} |_{\Delta t \rightarrow 0}$). Очень

важной особенностью поведения радиоактивных ядер является то, что они «не стареют» – вероятность распада данного ядра за следующую секунду постоянна, и не зависит от его «возраста». Поэтому закон убывания числа «выживших» ядер с течением времени –

показательный, например $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$, где величина T называется **периодом полураспада**. Это – время, за которое число сохранившихся ядер убывает из-за распада в два раза. По этой же причине активность радиоактивного образца в любой момент времени пропорциональна числу «выживших» к этому моменту ядер и обратно пропорциональна периоду полураспада $I(t) = \frac{\ln(2)}{T} \cdot N(t) \approx 0,7 \cdot \frac{N(t)}{T}$.

Для ЕГЭ необходимо знать: правило квантования энергии (формулу Планка) $E = h\nu$ и импульса $p = \frac{h}{\lambda}$; теорию фотоэффекта и уравнение Эйнштейна для фотоэффекта $eU_{\min} = E_{\text{кин}} = h\nu - A$, связь минимальной величины запирающего напряжения и частоты света $U_{\min} = \frac{h}{e} \cdot \left(\nu - \frac{A}{h} \right) \equiv \alpha \cdot (\nu - \bar{\nu})$; постулаты Бора, вид атомных спектров и связь частоты (длины волны) излучения с разностью энергий атомных уровней, при переходе между которыми оно испускается $\nu_{12} = \frac{E_1 - E_2}{h}$, $\lambda_{12} = \frac{c}{\nu_{12}} = \frac{ch}{E_1 - E_2}$; виды радиоактивных распадов и их уравнения (основанные на законе сохранения суммарных значений массового A и зарядового Z чисел); понятие дефекта массы ядра и выражение для энергии связи ядра $E_c = \Delta m \cdot c^2$, закон распада ядер $N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$, смысл понятий «период полураспада» и «активность». Важно также уверенно использовать единицы измерения, характерные для микромира. Например, для энергии обычно используются единицы, производные от эВ (*электронвольт*) (это энергия, приобретаемая электроном при прохождении ускоряющей разности потенциалов в 1 В). Значит, $1 \text{ МэВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.