

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

ЛЕКЦИИ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

Журавлев Владимир

Северодвинск, 2017

Часть I

Общее введение

Добрый день, меня зовут Владимир Журавлев, на данный момент я ученик ФОПФ МФТИ и занимаюсь на кафедре "Фундаментальные проблемы физики квантовых технологий"

Проходной балл на мой факультет был около 292, а средний 301.5 из 310 возможных (три предмета и 10 баллов ИД). Я по ЕГЭ набрал 96 по физике и столько же по математике, по русскому языку мне не зачли тему сочинения и я получил 70 баллов, поэтому имея 272 балла я попал только на один из 12 факультетов МФТИ. Но я выиграл олимпиаду физтех первого уровня, поэтому мог поступить на любой физфак страны. Я, чего таить, пошел на самый сложный, не только чтобы получить лучшие знания, но и чтобы испытать себя. Со мной на факультете учатся вся сборная РФ по физике, среди них есть и девятикратный чемпион мира, и абсолютный победитель по теории на IPHO.

Некоторых такая конкуренция ломает, и они либо вылетают, либо резко сдают в учебе, аргументируя это самим себе чем-то вроде: "Я не лучший и лучшим уже не стану, поэтому и стараться не буду". Конечно, не мне вас учить жизни, но я точно могу сказать: такая жизненная позиция не приведет вас ни к какому результату, а в лучшем случае к стагнации знаний и самоуважения. Это относится не только к физике но и к любому разделу человеческой деятельности: живопись, наука, спорт. Согласитесь, не практикуя бег, вряд ли вы обгоните Олимпийского чемпиона, поэтому поэтому умение **концентрироваться, усидчиво заниматься** и как конечная стадия развития **получать удовольствие** от занятий физикой (далее я буду говорить в основном о ней) может привести вас к самому настоящему успеху, какого бы вы достигли ежедневными забегами на длинные дистанции и правильным питанием в спорте.

Эрих Фромм в своей книге "Искусство любить" практически то же самое пишет и про любое искусство, поэтому из *любви к самому себе* преодолите лень и желание поиграть в компьютер, поваляться в кровати или покататься на машине с друзьями.

Я хочу прочитать небольшой, кратенький курс, главной задачей которого будет структурировать ваши знания и дать более обширное представление о физике, чем вы имеете сейчас. Кроме того, я обращаю внимание на те области математики и физики, которые в школе изучаются позже или не изучаются совсем, но они часто оказываются полезными в решении задач и изучении науки.

Я надеюсь, новый формат получения информации не вызовет у вас отторжения, и кроме того, вы поймете это несколько лучше, несмотря на мой очень скромный преподавательский опыт, а просто потому что мы с вами почти ровесники, и вы всегда можете задать свои вопросы.

Лекции будут усложняться, и если сегодня я начну с неких общих понятий и рюкмаханательных утверждений, то в конце уже будет довольно сложная математика, которую поймут, возможно, только будущие выпускники.

Часть II

Первая лекция. Общие понятия физики

1 Понятие Физика. Стандартная модель.

Если у вас, вопреки стараниям учителей, сложилось мнение о физике как о неинтересной и скучной науке, то постарайтесь отбросить эти предубеждения и немного послушать меня, я постараюсь вас разубедить

Сначала нужно понять: что такое физика?

Физика (с древнегреческого — природа) - наука о мире. Сейчас вы получили всю возможную информацию о физике, и я помогу вам немного разобраться в этом. Начнем с конца. Последнее слово определения **мир**. Физика изучает наиболее общие законы нашего мироздания, структуру мира, выявляет его законы. Фактически, химия это тоже физика, только несколько измененная, и далее я приведу примеры это подтверждающие. Биология изучает живые организмы, у нее есть свои замечательные законы, они тоже выполняются, иногда появляются исключения и законы превращаются в правила. Но, все эти законы на самом деле очень сложные обобщения физических законов на невероятно сложные системы, такие как человек, или хотя бы одна его молекула - какая-нибудь аминокислота.

Первое слово **Наука**. И здесь кроется тоже много смысла, который было бы здорово понять. Наука по википедии, это область человеческой деятельности, направленная на выработку и систематизацию объективных знаний о действительности. Конечной целью **любой настоящей науки** является умение **предсказывать** явления, изучаемые этой наукой.

Физика еще не построена как наука до самого конца, существуют явления, которые мы предсказать пока что не в состоянии, до сих пор нет стройной модели нашей вселенной на фундаментальном уровне, но это "далекая" от нас физика, переходящая в своем высшем состоянии в топологию и другую прикладную математику. На более привычном нам уровне, физическая теория невероятно точна. Взаимодействие электронов мы можем предсказывать с точностью, не уступающей точности измерения, например, расстояния от Москвы до Нью-Йорка с точностью до толщины человеческого волоса.

Химия же, как наука "закрыта". Этим она обязана развитию некоторых областей физики: атомной физики и квантовой электродинамики. Это, конечно, не значит, что химии больше нечего изучать, зато она обладает полным набором инструментов для этого - физических законов.

Кроме того, физика это количественная наука, отличие количественного от качественного вы все понимаете.

Основа физики это законы - строгие правила описывающие действительность. Мы пользуемся языком математики, удивительным образом позволяющим нам высказать законы природы! Физику можно удобно для изучения (но не совсем удобно для понимания) разделить на несколько частей:

- Механика
- Термодинамика
- Электричество и магнетизм
- Оптика
- Квантовая физика и остальное.

Этот список опасно понятен, но "за кадром" остается весьма важная вещь - четыре из пяти пунктов описываются на самом деле двумя проявлениями природы, и с помощью математики из четырех можно сделать два - электродинамику и гравитацию. Под двумя проявлениями природы я понимаю два набора законов, универсальных для всего, что имеет массу и заряд.

Ну, мы это и сделали, и со временем родилась стандартная модель, структурирующая наши знания о мире.

2 Элементарные частицы (1)

Важной частью стандартной модели (далее - СМ.) являются частицы. Сначала человечество выдвинуло *атомистическую* теорию вещества, и это был большой прорыв, фактически положивший начало современной физике. Название *атом* означает неделимый, впрочем, в конце 19 века оказалось, что он очень даже делится. Вообще, логика довольно простая - есть много атомов, в целом похожих, но все же отличающиеся по своему поведению (инертные, радиоактивные, щелочноземельные и т.д.), тогда возникает вопрос: а не может ли быть проще? Если предположить что все атомы, подобно вообще всем телам состоят из ограниченного набора более маленьких частиц, и отличаются лишь составами этих наборов? Фактически это была своего рода атомистическая теория для атомов. Со временем люди нашли электрон, потом протон, чуть позже открыли и нейтрон.

У частиц нашли и *античастицы*, отличающиеся от своих «братьев» только знаком электрического заряда. Античастица электрона получила название *позитрон*, большинство остальных античастиц называют с помощью приставки анти-, антипротон, например. Но сегодня о них я только упомяну, интересные вещи о них расскажу на следующих лекциях.

Затем последовал логичный вопрос: а что если электрон, протон и нейтрон тоже состоят из более мелких частиц? Так появилась теория *кварков*. Протон и нейтрон оказались составными частицами, внутри которых находятся по три кварка. А вот электрон оказался частицей элементарной, т.е. *неделимой*. И хоть какого-нибудь состава у него не обнаружили.

Элементарных частиц обнаружено великое множество, среди них очень много т.н. *резонансов* - очень короткоживущих частиц. Резонансов около 200, кварков - 6, еще есть 6 частиц переносчиков¹... и еще довольно много. Конечно, все это не очень важно вам сейчас и перечислять я их не собираюсь, только хочу отметить, очень заманчиво опять построить некую «атомистическую» теорию и для этих частиц. Не так давно для этого родилась теория струн, впрочем, у нее еще много препятствий.

¹Я посчитал гравитон, как необходимую частицу для квантовой теории поля

3 Взаимодействия

Слово "взаимодействие" несет некий дополнительный смысл, "взаимо-"показывает нам то, что действие равно противодействию, а на еще более глубоком уровне понимания, чем третий закон Ньютона это превращается в *симметрию*, равенство между частицами.

О двух видах взаимодействий я уже упомянул - гравитационное и электромагнитное, но! Есть еще два, которые возникают уже в микро- даже скорее фемтомире. Они называются сильное (или ядерное) и слабое взаимодействия. Давайте я помогу вам немного улучшить свою картину мира и расскажу о каждом пару минут, все-таки это самые фундаментальные основы физики, в то же время доступные даже школьникам.

3.1 Гравитация (1)

Самое простое и одновременно самое сложное взаимодействие. Это единственное взаимодействие, у которого еще не нашли *частицы-переносчики*, хотя недавно были зарегистрированы *гравитационные волны*. Гравитация штука очень интересная, она существует между *всеми* объектами, хотя мы знаем закон

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

то может показаться, что если у тела нет массы, то и притягиваться оно не будет. На самом деле притягиваются все материальные тела, даже фотоны - безмассовые частицы (Пример - *гравитационное линзирование*). Гравитация - очень слабое взаимодействие, и ощутимо она проявляет себя на очень больших масштабах, но зато именно она ответственна за формирование звезд, планет и галактик. Гравитация еще интересна тем, что она проявляет себя только *притяжением*, не существует тел с отрицательной массой, и все тела притягиваются. Причина этого очень сложна, но и поэтому очень интересна, я ее здесь рассказать не могу. Ее *константа взаимодействия*

$$g = \gamma \frac{M_p^2}{\hbar c} = 5.3 \cdot 10^{-39} \quad (1)$$

Что же такое константа взаимодействия? В каждом из нас жив дух соперничества, и когда мы слышим, что существует четыре взаимодействия, хочется узнать, какое из них "лучше". И на количественном уровне этой характеристикой будет константа взаимодействия - чем она больше, тем сильнее взаимодействие.

3.2 Электромагнитное взаимодействие (1)

Очень важное для нас взаимодействие, которое отвечает за множество процессов в природе : строение молекул, взаимодействие между ними и атомами, например сила трения и упругости. Электромагнитное взаимодействие переносится фотонами - безмассовыми частицами, которые двигаются со скоростью света. *Они и являются светом*. Электромагнитное взаимодействие возникает между любыми заряженными частицами, как бы далеко они не находились, что напоминает нам гравитацию. Классический закон Кулона:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

тоже имеет очень много общего с законом тяготения, и это не случайно, их сходство мы обсудим далее. Конечно, в целом нейтральные частицы тоже взаимодействуют

между собой, если они состоят из заряженных частей (водородные связи между в целом нейтральными молекулами аминокислот соединяют воедино две половинки спирали ДНК) Константа взаимодействия

$$\alpha = k \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (2)$$

гораздо больше гравитационной, что находит отражение в следующем - два протона отталкиваются на тридцать порядков сильнее, чем притягиваются, поэтому в расчетах взаимодействия частиц мы всегда пренебрегаем их притяжением - это за границей точности измерения.

О следующих взаимодействиях я расскажу еще менее подробно, потому что к школе они почти никакого отношения не имеют, и я просто постараюсь утолить любопытство.

3.3 Сильное (ядерное) взаимодействие (3)

Мы состоим из молекул, молекулы из атомов, а у атомов есть ядро. В очень маленьком ядре плотно упакованы протоны и нейтроны. Я приводил оценку о взаимодействии протонов, и если бы мы просто предположили, что существует два вида сил - гравитационное притяжение и электромагнитное отталкивание, то никаких ядер кроме водорода и его изотопов бы не существовало. Т.к. уже гелий с его двумя протонами электромагнитное взаимодействие разрывало бы на части! Но мы наблюдаем другую картину - ядра того же гелия очень устойчивы, и ничто их не разрывает. На сцену выходит сила нового рода - сильное взаимодействие.

Сильное взаимодействие возникает между составляющими атомного ядра - протонами и нейтронами. Оно "склеивает" протоны и нейтроны, отсюда и название частиц-переносчиков глюонов (от англ. «glue» - клей). Вообще их история довольно интересная: на самом деле, сначала (в 1930-х годах) Японский физик Юкава построил теорию взаимодействия нуклонов² с помощью *пионов*, т.е. в те годы пионы считались переносчиками сильного взаимодействия, и самое главное, они были экспериментально обнаружены! Так почему я утверждаю, что переносчики это некие глюоны? Все просто - каждый пион на самом деле не является *элементарной* частицей, т.е. внутри него можно найти меньшие почти самостоятельные части (я специально избегаю оборота речи с фразой «разделить на части», как, например у человека можно вырезать почку)

И эти самые почти самостоятельные части это глюоны! Оказывается, глюоны, в отличие от фотонов взаимодействуют между собой! Это приводит к удивительным особенностям! Их я поясню в конце рассказа о взаимодействиях.

Если я легко привел школьные формулы для электромагнитного взаимодействия и гравитации, то здесь все гораздо сложнее, поэтому я только отмечу константу взаимодействия для ядерных сил:

$$\zeta = \frac{1}{4\pi} \frac{g^2}{\hbar c} \approx 15 \quad (3)$$

Отлично! Сильное взаимодействие имеет большую константу связи, чем электромагнитное, как мы и ожидали! И напоследок: если сильное взаимодействие притягивает протоны друг к другу, то почему мы не наблюдаем огромных (например с зарядовым

²Нуклоны - от nuclear - ядерные, составляющие атомного ядра, общее название протонов и нейтронов.

числом 1000) атомных ядер³, а атомы в молекулах не слипаются в одно целое? Еще одна особенность ядерных сил - они возникают только на определенном расстоянии порядка атомного ядра!⁴ А на сравнительно больших (например размером с атом, он больше своего ядра в тысячу раз) расстояниях работают электромагнитные силы отталкивания.

Сильное взаимодействие очень интересно к изучению, но моей целью стоит не введение в ядерную физику, поэтому дальнейшие шаги вам предстоит сделать самим. Я начинал с википедии.

3.4 Слабое взаимодействие (2)

Слабое взаимодействие так обидели названием, поскольку оно слабее двух других значимых в ядерной физике взаимодействий: сильного и электромагнитного. Слабое взаимодействие начали изучать при работе с радиоактивностью, ведь именно оно ответственно за β -распад ядра. В целом, слабое взаимодействие «ответственно» за взаимные превращения частиц друг в друга, например нейтрона в протон и электрон (и еще кое-что).

У слабого взаимодействия целых три частицы переносчика - W^+ , W^- , Z^0 бозоны. Теория слабого взаимодействия очень сложна и проиллюстрировать я хоть и хочу, но не могу, кроме как схемой Бета-распада:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Константа взаимодействия

$$\alpha_w = 1.04 \cdot 10^{-10}$$

3.5 Заключение о взаимодействиях (3)

Я надеюсь, что вы узнали хоть что-то новое, а еще больше надеюсь, что вы *поняли* что-то новое! В конце лекции добавлю немного сложности! Только не пугайтесь, ничего зубодробительного.

Вглядитесь в четыре формулы вверху: [2], [1], [3]. В них просматривается кое-что общее: в числителе стоит **элементарный заряд**. И если электромагнитный заряд электрона вам уже знаком, то вот *глюонный* заряд, наверное нет. В чем же дело?

Понятие заряда в физике я сам себе объясняю так: **заряд**, это характеристика тела, которая **сохраняется**, и при этом **обуславливает характер взаимодействия** (например «минус» с «минусом» отталкивается, а с «плюсом» притягивается и др.). Помните, что физика не объясняет *почему* «минус» с «минусом» отталкивается, а лишь *описывает* это!

Для гравитации заряд это **масса**, она определяет силу притяжения тел, и в числителе стоит масса протона. Удивительное отличие массы от остальных зарядов, конечно же в том, что она определяет не только гравитационные свойства частицы, но и инертные! Сначала даже разделяли массу инертную и массу гравитационную. Впрочем, опыты показывают что они с великолепной точностью равны, поэтому все

³См. нейтронные звезды

⁴Есть одна ошибочная формулировка, переносимая из учебника в учебник: «Ядерные силы быстро спадают с расстоянием», но в такой формулировке подразумевается невозможность *конфайнмента*! **Нуклонное взаимодействие** быстро спадает с расстоянием, (подобно силам Ван-дер-Ваальса в электромагнетизме).

успокоились. Например, опыты Галилея показали, что все тела падают с одинаковым ускорением, не зависимо от их гравитационного заряда, а ведь если бы за притяжение отвечало электромагнитное взаимодействие то ускорение бы отличалось для разных тел!

$$a = \frac{1}{m} \gamma \frac{Mm}{r^2}$$
$$a = \frac{1}{m} K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Для ядерных сил появляется так называемый **цветовой заряд**. (Ничего общего с видимым цветом он, конечно, не имеет. Просто физики люди довольно интересные, поэтому для абсолютно непривычных и странных характеристик частиц они выбирают красивые названия: цвет, аромат, странность). Электрический заряд может быть положительным и отрицательным, а вот цветовой заряд имеет три полюса, и бывает красный, синий и зеленый, которые в сумме (подобно +1 и -1) дают нулевой белый заряд.

И этот самый цветовой заряд вещь не более абстрактная чем электрический заряд. Я некоторое время мучился, пытаюсь представить себе этот цветовой заряд, пока не дошел до мысли, что на самом деле я не понимаю и что такое электрический заряд, но очень лихо с ним управляюсь!

Если переносчики электромагнитного взаимодействия сами электрически нейтральные, то вот глюоны сами имеют цветовой заряд! Пока глюон летит от одной «цветной» частицы к другой, он взаимодействует с другими глюонами, рождая новые глюоны, которые тоже взаимодействуют друг с другом... В итоге это приводит к тому, что глюонная «шуба» - облако глюонов вокруг кварков составляет 98 процентов массы протона и нейтрона!

Сегодня мы узнали очень важную вещь в физике - стандартную модель. Это основа наших представлений о мире, и теперь мы можем углубляться в физику. Я надеюсь, у меня получилось немного навести порядок у вас в головах и, возможно, рассказать что-то новое. Дальше мы с вами рассмотрим различные виды законов (в основном проявления этих самых взаимодействий), и поговорим о многих важных вещах!

Ну и в заключение хочу процитировать прекрасную мысль, которая до сих пор меня будоражит:

«Величайшее достижение человеческого разума состоит в том, что мы можем
понять то, что не можем представить.»

Л.Д. Ландау

Часть III

Лекция 2. Законы сохранения.
Механика

4 Вступление (3)

На прошлой лекции я познакомил вас со стандартной моделью - современной теорией строения вселенной. Я рассказал вам о четырех видах фундаментальных взаимодействий и о главных частицах нашего мира.

Теперь, стоит вспомнить, что физика это наука *количественная*, а это значит, что только лишь знания о существовании частиц и сил недостаточно. Нам нужны физические законы, количественно выражающие связи между величинами.

Обыкновенно, мы делим физические величины на *скаляры* и *векторы*. Ну, когда я был школьником, я считал, что единственное отличие вектора от скаляра, это то, что у вектора есть выделенное направление, а у скаляра нет. Это верно, но самое главное отличие вектора от скаляра в том, что *при изменении системы координат вектор меняется, а скаляр нет!*

Нужно, наверное, проиллюстрировать это на примере. На рисунке я изобразил некоторую скорость \vec{V} и где-то летающий в пространстве заряд $+q$.

Сначала вектор скорости представим в виде: $\vec{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ (скорость направлена под углом $\frac{\pi}{4}$), а затем вообразим, что кому-то очень не понравилась наша система координат, и он решил выбрать другую - такую, чтобы скорость была направлена строго вдоль Оу. Тогда в этой системе координат та же скорость будет уже вектором $\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}$. **Компоненты векторной величины зависят от выбора системы координат.** Но, как вы могли легко заметить, кое-что осталось тем же. Длина вектора осталась той же. Почему? Потому что длина вектора (корень из скалярного квадрата) - скаляр.

Скалярная величина не зависит от выбора системы координат, как бы мы не крутили, не двигали нашу СК, длина вектора скорости останется постоянной. (Выполняются **ортогональные преобразования векторного пространства - это важно :**), Собственно заряд электрона (скалярная величина) один и тот же на Земле и на Луне.

Однако, мы выполняли только *геометрические* преобразования - крутили и сдвигали нашу СК. А в физике появляется еще одна величина - время, и прилагающиеся к ней - скорость, ускорение и.т.д. Если совершать уже не геометрические преобразования, а например, пересечь в СО, двигающуюся относительно лабораторной с некоторой скоростью, то модуль скорости уже не сохранится.

В таких тонкостях (разбираться в них не то что бы обязательно, но вряд ли пригодится практически) «вылезает» различие между **системой координат** и **системой отсчета**.

Для величин, остающихся неизменными при изменении системы отсчета есть название - **инвариант**.

Например, скорость света - инвариант, **масса**, электрический заряд.

Энергию я здесь обошел стороной, потому что вы все знаете, что кинетическая энергия не инвариант, тогда инвариантом относительно преобразований будет некоторая другая величина:

$$E^2 - p^2 c^2 = inv$$

Сложновато получилось для вступления, ну ничего, дальше будет проще.

5 Законы сохранения (2)

5.0.1 ЗС Энергии

Для любой замкнутой системы может быть введена *скалярная* физическая величина от параметров системы - энергия. Главное свойство энергии, это не то, что она скаляр, а то, что для замкнутой системы энергия одна и та же всегда. Это, пожалуй, самое важное свойство нашей вселенной, и с энергией мы будем заниматься много и усердно. Математически формализовать это можно так:

$$\frac{dE}{dt} = 0 \quad (4)$$

Где значком

$$\frac{dX}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t} \equiv \dot{X}$$

обозначена производная по времени. (**Объяснить, если надо**)

5.0.2 ЗС Импульса

Для любой системы, на которую действует нулевая равнодействующая, выполняется ЗСИ - векторная сумма импульсов всех частиц остается постоянной. В классической механике выводится из третьего и второго закона Ньютона. Для системы из произвольного числа частиц является следствием ЗСЭ.

5.0.3 ЗС Момент импульса

В замкнутой системе сохраняется так же суммарный **момент импульса**. Что это такое, я расскажу в конце пары.

5.0.4 ЗС заряда

Об этом я говорил на первой лекции, «нормальные» заряды (электрический, цветовой) отлично сохраняются в любых условия (кстати, мне кажется, это проявления ЗСЭ). С гравитационным все несколько сложнее - вы все слышали, что при ядерном взрыве энергия выделяется именно из *дефекта массы* ядер, по формуле Эйнштейна

$$E_0 = mc^2$$

Эта связь между массой и энергией покоя переплетает закон сохранения массы и закон сохранения энергии.

Не будем лезть в квантовую и даже ядерную физику, а вернемся в обычную механику.

Все эти законы - проявления одной великолепной теоремы - Теоремы Нётер (Кстати, она, пожалуй, самая умная женщина всех времен), связывающей **симметрию и законы сохранения**.

А мы тем временем перейдем к механике, и вы поймете, как использовать ранее названные законы сохранения.

6 Механика (3)

Основные величины: Импульс, механическая энергия.

Понятия: Траектория, материальная точка, гармонический осциллятор, твердое тело, среда, потенциальная энергия.

Разберем темы: Гармонические колебания, метод фазовых плоскостей, некоторые методы решения задач, динамический и энергетический подход.

Понятия материальной точки и траектории вам хорошо знакомы из школьного курса, я на них не буду останавливаться, лишь обращаю внимание на то, что это лишь математические объекты, которые мы сопоставляем реальным физическим. Например, когда мы считаем движение спутника вокруг планеты, мы можем довольно точно считать спутник материальной точкой, т.к. по сравнению с планетой он очень мал. Однако, если нужно рассчитать, как этот спутник будет себя вести при вхождении в атмосферу, уже нельзя считать его материальной точкой, потому что от его ориентации в пространстве будет зависеть лобовое сопротивление.

То же самое происходит и с твердым телом, например, когда пуля вылетает из ствола ее можно считать твердым телом, но когда она попадает в стену, такое представление уже становится неправильным (оно приведет к бесконечно большим напряжениям внутри).

Всю нашу учебу мы будем решать задачи по физике примерно одинаково - из условий задачи выбирать математическую модель, а затем ее считать, обращая внимание только на важнейшие свойства объектов, и пренебрегая остальными.

Такой подход к вещам называется *абстракцией*, в программировании, например, он превратился в ООП.

6.0.1 Механическая энергия системы (3)

ЗСЭ гласит, что полная энергия системы сохраняется, но полная энергия складывается из механической, электрической, тепловой...

Поэтому для механики ЗСЭ можно переформулировать так: **в замкнутой системе, где действуют только консервативные силы, механическая энергия сохраняется.**

Консервативные силы - работа по замкнутой траектории всегда 0

Примером консервативной силы является - гравитационное притяжение, сила в законе Кулона. Неконсервативная сила - сила трения.

Неконсервативные силы так же называют диссипативными, что отражает факт *рассеивания энергии*. Математически формализуем:

$$E_2 - E_1 = |A_{nc}|$$

Механическая энергия представима в виде:

$$E = T + U \quad (5)$$

Где Т - кинетическая энергия системы, U - потенциальная.

С кинетической энергией системы все довольно просто.

$$T_i = \frac{m_i v_i^2}{2}$$

То с потенциальной часто возникают сложности.

Еще раз напомним определение: *Изменение* потенциальной энергии тела равно работе внешних сил движущих тело в поле. (Вам может показаться некоторым занудством, что я сейчас очевидные вещи говорю, но просто мне нужны некоторые реперные точки, из которых я получу некоторые соотношения.)

Как видно, физический смысл имеет только изменение потенциальной энергии, а не сама ее величина, т.е. потенциальная энергия определена с точностью до постоянной:

$$U = \phi(x) + C \quad (6)$$

Где С - некоторая константа **не важно, какая**. Ведь если мы подставим (6) в ЗСмЭ то получим:

$$T_2 - T_1 + \phi(x)_2 - \phi(x)_1 + C - C = -|A_{nc}| + A^{ext} \quad (7)$$

Эта константа С вообще не сыграла никакой физической роли, поэтому ее можно выбирать произвольно.

Тем не менее, кинетическая энергия - характеристика движения частиц, а потенциальная - характеристика их взаимодействия. И вот тут логично выдвинуть некоторое высказывание: **удобнее всего выбирать константу С так, чтобы потенциальная энергия на бесконечности равнялась нулю.**

У вас могут возникнуть проблемы с понятием бесконечности, тогда заменяйте это слово на «Очень далеко».

Потенциальная энергия упругой пружины:

$$U(x) = \frac{1}{2} k x^2$$

Потенциальная энергия поля земли ($h \ll R_E$)

$$U(h) = mgh$$

Давайте вычислим потенциальное поле кулоновского взаимодействия и гравитационных сил:

$$dA = (F(x)dx) \rightarrow dA = -G \frac{Mm}{x^2} dx \quad (8)$$

Просуммировав работу по перемещению получим:

$$U_2 - U_1 = A^{ext} = \int_1^2 G \frac{Mm}{x^2} dx = -GMm \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (9)$$

Подставляя это в ЗСмЭ получим

$$U(x) = -G \frac{Mm}{x} + C \quad (10)$$

Вспоминаем «правило», согласно которому потенциальную энергию удобнее всего определить так, чтобы она обращалась в ноль в очень далеких точках. Видно, что здесь коэффициент $C = 0$.

И еще одна замечание, видно, что энергия тела массой m пропорциональна m , давайте напомним U в следующем виде.

$$U(x) = \phi(x) + C = m\varphi(x) + C; \quad \varphi(x) = -G \frac{M}{x} \quad (11)$$

Величина $\varphi(x)$ называется **потенциалом** поля U . Как видим, потенциал поля умноженный на заряд дает нам потенциальную энергию, и является главной характеристикой поля.

Аналогично для электростатического поля получим потенциал:

$$\varphi(x) = -k \frac{Q}{x} \quad (12)$$

Пользуясь законом сохранения энергии найдем вторую космическую скорость:

$$-G \frac{Mm}{R} + \frac{mv^2}{2} = 0 + 0$$

$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

R, M - радиус и масса земли.

6.0.2 Связь потенциальной энергии и силы

Пусть в пространстве как-то распределена энергия $U = U(x)$. Поместим в поле небольшой заряд q . Сместим его вдоль оси Ox , на расстояние Δx , тогда можно вывести работу поля, считая, что сила остается почти постоянной на этом промежутке.

$$-F(x)dx = d(U(x)) \rightarrow F(x) = -\frac{dU}{dx} \quad (13)$$

Здесь $F(x)$ - проекция силы на ось.

Для силы гравитационного притяжения рядом с поверхностью земли:

$$F = -mg \frac{d(y)}{dy} = -mg$$

Так же можно проверить, что выражение (12) удовлетворяет выражению для потенциальной энергии.

Из всего этого можно получить интересную теорему:

[T]: Поверхность жидкости в потенциальном поле занимает эквипотенциальную поверхность.

Доказательство: Пусть это не так, тогда существуют две точки поверхности, с потенциалами $\varphi_2 = \varphi_1 + d\varphi$. Тогда на частицы жидкости будет действовать сила $F = -m \frac{d\varphi}{dx}$, которая будет смещать частицы до тех пор, пока сила не станет нулевой. Нулевой она станет только если $\frac{dU}{dx} = 0$ ЧТД.

Сразу можно решить задачку, которой и закроем тему потенциальной энергии.

6.0.3 Жидкость во вращающемся сосуде

Задача: Найти уравнение поверхности жидкости в сосуде, вращающемся с угловой скоростью ω

Решение:

Согласно теореме, жидкость займет эквипотенциальную поверхность. Введем ось Oz вертикально через ось сосуда.

В НС ИСО сосуда на каждую частицу действует сила

$$F = ma = m\omega^2 \vec{r}$$

Найдем потенциальную энергию представив, что мы тянем внешней силой из центра сосуда к его краю.

$$dA = (\vec{F}, d\vec{r}) = -m\omega^2 r dr$$

Представим суммарную работу как площадь под графиком. Тогда потенциальная энергия:

$$U(r) = -m \frac{\omega^2 r^2}{2}$$

Потенциал этого поля:

$$\varphi(r) = \frac{U(r)}{m} = -\frac{\omega^2 r^2}{2}$$

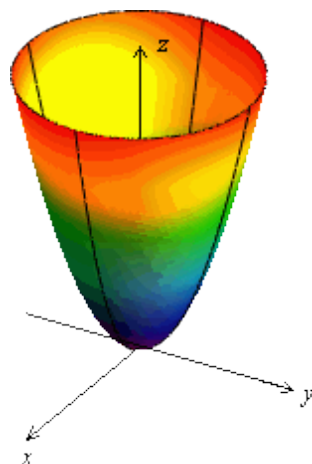
Получаем уравнение поверхности:

$$gz - \frac{\omega^2 r^2}{2} = const$$

Положив $const = 0$ (нас интересует только качественная картина) получим уравнение:

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \quad (14)$$

Что соответствует *параболоиду вращения*



6.0.4 Энергетический и динамический подход к решению задач. (2)

Для понимания этого параграфа вам необходимо уметь брать производную от сложной функции и константы. Итак, начнем!

Давайте сначала возьмем производную по времени от квадрата скорости:

$$(\dot{v}^2) = 2v\dot{v} = 2va$$

Теперь обратим внимание на уравнения, описывающие движение груза на пружине:

$$mv^2 + 2kx^2 = \text{const}$$

$$m\ddot{x} = -kx$$

Воспользуемся формулой:

$$\dot{E} = 0$$

$$2mav + 2kxv = 0 \Leftrightarrow m\ddot{x} = -kx$$

Видно, что здесь из ЗСЭ получилось второе уравнение ньютона. Так и проявляется связь между энергетическим и динамическим подходом.

—Перерыв—

6.0.5 Гармонические колебания

В классической механике есть три вида движения - поступательное, вращательное и колебательное.

Количественной характеристикой первого из является перемещение, второго угол поворота, последнего - фаза.

Колебательное движение с некоторой точки зрения неправильно выделять в отдельный вид движений (пока мы находимся в классической механике).

Поясню - колебания груза на пружине - поступательное движение, колебания математического маятника - вращательное. Другое дело - колебания полей в ЭМ-волне.

аналогии законов импульса и ЗСИ обобщенный импульс.?? мб сначала это энергия вращательного движения лекция "математика для фииков"