

## **0: ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА**

## ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА

- 0.1 Виды человеческой деятельности
  - 0.2 Физика и математика
  - 0.3 Определение физики
  - 0.4 Пример работы физика
  - 0.5 Метод размерностей.
  - 0.6 Эксперимент
- 0.7 Границы применимости результата
  - 0.8 Оценка
  - 0.9 Метод
- 0.10 Физики: экспериментаторы и теоретики
- 0.11 Что изучают физики: пространство, время, материя
- 0.12 Чем пользуются физики в своей работе
  - 0.13 Из чего состоит физика

## ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА

What is really needed is focus and the focus is thinking.  
Peter Moxhay, former nuclear physicist

- Это ты сам додумался?
- Не то чтобы я умел думать, но иногда на меня это находит.  
А.А. Милн. "Винни-Пух и все-все-все".

Для начала хорошо бы разобраться, чем именно мы собираемся заниматься. А то получится, как у классика: "Шел в комнату, попал в другую..."

-----  
**В1:** Из какого это *классика*?

-----  
Поэтому попробуем понять, где именно расположена *Физика* на карте под названием

### 0.1 ВИДЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Сколько их?*

Ваши предложения? ...Вот естественный вариант: два вида - умственная деятельность и физическая. Обсудим такое предложение.

-----  
**В2:** Боюсь, что тут может быть слишком много сложностей. Скажем: куда отнести хирурга? А медсестру? А санитаря? А футболиста? Тренера? (Список может быть продолжен.)

-----  
В одном фильме все человечество символически представлено всего тремя героями. Их там называют Физик, Писатель и Священник. (Если быть точным, священника там называют иначе, другим словом, выдуманным авторами.) Физик - это все те, кто имеет отношение к любой науке или к технике (инженеры, историки, дорожные рабочие...). Писатель обозначает людей искусства (художники, музыканты, модельеры...). А Священник представляет всех, чья профессия связана, прежде всего, с человеческим общением: учителя, продавцы, политики...

-----  
**В3:** Куда отнести врача-стоматолога? Архитектора? Водителя автобуса? Учителя физики?

-----  
Интересно, если бы физик, писатель и священник на самом деле сошлись вместе, - что могло бы стать темой их общего разговора?

-----  
**В4:** Не было ли в истории известного вам человека, который совместил в себе все три занятия? ...Так сразу и не вспомнить.

-----  
Итак, физика - это нечто из области науки и техники. Можно попытаться уточнить: отделить науку от техники.

-----  
**В5:** Как это сделать? Чем они принципиально отличаются? Возможно ли это? (Можно заглянуть в словари.)

-----

Кстати, знаменитый американский физик и возможно не менее знаменитый *учитель физики* Ричард Фейнман (Richard P. Feynman) как-то сказал: "...не все, что не наука, уж обязательно плохо. Любовь, например, тоже не наука".<sup>1</sup>

Обычно все науки делят на *естественные* и *гуманитарные*. Физика, как вы знаете, относится к *естественным* наукам. Вместе с биологией, химией, астрономией...

-----  
**B56:** Назовите еще хотя бы одну *естественную* науку.  
 -----

**B7:** В чем же это их *естественность*?

**O7:** Естественные науки занимаются тем, что естественно, т.е природой (мертвой и живой). Они ее описывают (на своем языке), изучают и даже что-то предсказывают: что должно наблюдаться.

-----  
 Если залезть в энциклопедический словарь, то там можно найти другое деление, другую классификацию: *система наук условно делится на естественные, общественные и технические*. Общественные науки делают (или, точнее, должны делать) с обществом людей то же самое, что естественные делают с природой. Технические науки мы с вами кратко назвали техникой.

-----  
**B8:** Куда же девать математику? Ведь в природе нет ни чисел, ни точек, ни прямых, ни произведений, ни уравнений... Может это и не наука вовсе? (Вспомните замечание Фейнмана.)

**O8:** Действительно, математика стоит особняком: она, конечно, не гуманитарная, но и не естественная. *Она - сама по себе*. Более того, она объединяет вокруг себя некоторые другие науки - и тогда про них говорят - это *точные* науки.

-----  
 Но в обычном смысле слова физика - вовсе не точная наука. Ровно так же мы говорим: - Приду в семь вечера? - Точно? - Точно! И приходим, например, в 7:35 или в 7:31, или даже в 7:30 с секундами. В последнем случае все согласятся - мы были точны. Но мы не можем прийти точно в буквальном смысле этого слова, то есть *абсолютно точно*. Почему? Потому что мы приходим по часам, а любые часы врут (сильно или слабо). Точно такая ситуация в физике. Ее относят к точным наукам, просто потому, что ответы на ее главные вопросы даются на языке математики. "Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на него, и обратно пропорционально массе тела". "Энтропия замкнутой системы не убывает". "Сила тяготения одной материальной точки к другой обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними." Это все примеры физических законов. Говорят, что физика изучает *количественные* закономерности.

-----  
**B9:** Приведите пример неколичественной, т.е. *качественной*, закономерности.  
 -----

**B10:** История - точная наука или нет? А медицина?  
 -----

Итак, объект внимания физика - это природа<sup>2</sup>, и, прежде всего, неживая природа. А как же мы с вами? Это уже владения биологии? Не совсем. Конечно, биология как раз и занимается живыми организмами - людьми, животными, насекомыми, растениями. Но часто бывает так: биолог приходит в гости к физика или физик - к биологу. Тогда они пьют чай (?) и занимаются *биофизикой*. Это тоже физика? Да! Но дело не в названии. Просто

<sup>1</sup> Фейнмановские Лекции по Физике, том 1 (The Feynman Lectures on Physics).

<sup>2</sup> Греческое слово *physics* как раз и означает *природа*

объект исследования - биологический (живые организмы), а методы работы (измерения, вычисления, закономерности) - из физики. Такие пересечения, работа на стыке наук - вполне обычное дело.

## 0.2 ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

Кругом все считают их ближайшими родственниками. Еще считают, что они, как всякие члены одной семьи, живут ужасно дружно... А на самом деле? А на самом деле им, конечно, очень сложно, практически невозможно жить друг без друга.

Когда физик Ньютон стал решать задачу - найти путь, пройденный экипажем (дело происходило в 17 веке), который движется с меняющейся скоростью, то он обнаружил, что математики еще не придумали подходящего, необходимого для решения такой задачи аппарата. Обычных действий - умножения, вычитания, даже возведения в степень или извлечения корня - не хватало. Пришлось частично придумывать самому, частично - ставить задачу чистым математикам (и математик Лейбниц "откликнулся" на его призыв). Так бывало не раз в истории науки: самые передовые физики фактически вынуждали математиков придумывать новый математический аппарат, вводить новые разделы математики (или делали это сами - тогда их потом именовали физиками *и* математиками).

Но бывали и обратные случаи: когда уже имевшиеся математические результаты помогли делать открытия физиков. Так было с созданием общей теории относительности: как оказалось, для выражения идей физика Эйнштейна уже существует подходящий математический аппарат - геометрия Римана. (Здесь физику помог его друг-математик, который в силу своего образования был знаком с теорией римановых пространств.)

Короче, *физика - это главная причина возникновения новой математики*. Так считают все нормальные люди (кроме, разумеется математиков)<sup>3</sup>.

Итак, физика и математика, мягко говоря, помогают друг другу. Физика без математики, *к сожалению*, не может сказать ни слова (физического слова!). А математика обретает смысл для людей в основном благодаря физике. Можно сказать, что

*математика - способ выражения идей физики.*

(Математики, конечно, с этим не согласны.)

Но! Физика и Математика - совсем разные. (Это бывает довольно часто: даже очень разных, почти противоположных людей тянет друг к другу; другой пример: как мы еще увидим, электрические заряды противоположного знака тоже притягиваются!)

Вот простой пример: сколько будет - один плюс один? Если обойтись без некоторых оговорок, то математик скажет: два. А физик возьмет пипетку, наберет в нее воду, капнет на стеклышко каплю - одну, а потом еще одну - и они сольются; вывод :  $1+1=1$  ! Вот так.

Но главное - у них *разные "правила игры"*.

В математике *правильно* - значит, все выводы из принятых аксиом логически безупречны и не противоречат друг другу. В математике необходимо исследовать все логически возможные варианты, не оглядываясь на то, бывает ли такое в реальном мире или нет. С точки зрения математика ответ в задаче о количестве пойманных рыб - минус три рыбы - столь же важен, как и "нормальный" ответ - плюс три рыбы.

Другое дело - физика. Здесь правильно - значит совпадает с результатом опыта, эксперимента. *Минус три рыбы* не может быть правильно, потому что никто и никогда не наблюдал такого улова!

**В11:** Можете ли вы придумать какую-нибудь искусственную ситуацию, но в принципе возможную, которая позволяла бы считать улов "минус три рыбы" возможным?

<sup>3</sup> А вот академик Арнольд (математик!) считает свою науку частью физики.

-----  
 Кто-то сказал так: "Математика стремится установить *все* возможные истины, а физика - только *одну*".  
 -----

**В11а:** Какую?

**О11а:** Ту, которая реализуется в природе, а мы имеем возможность это наблюдать, ставя эксперимент.  
 -----

Итак, **физика - наука экспериментальная.**

Математик, даже если он занимается, как говорят, прикладными задачами, пришедшими из физики или биологии, берется за решение только таких проблем, которые не требуют дополнительных, недоказанных предположений.

А физик, как правило, имеет дело с задачами, в которых имеющихся доказанных данных недостаточно для решения. Его искусство состоит в том, чтобы угадать, какие недостающие соотношения на самом деле реализуются в природе. Для таких догадок требуется не математическая, а физическая интуиция.<sup>4</sup>  
 -----

**В12:** *Задача.* С какой скоростью должен ехать автомобиль, чтобы доехать из Петербурга в Москву за час? Приведите варианты решения Математика и Физика.

**О12:** *Математик.* Т.к. от Петербурга до Москвы 700 км (справочник), то скорость автомобиля будет  $V=700 \text{ км/1 час} = 700 \text{ км/час}$ . Это и есть ответ.

*Физик.* Не может автомобиль за час доехать от Питера до Москвы, т.к. обычные автомобили неспособны развить такую скорость (700 км/час), а для гоночных машин-рекордсменов трасса Петербург - Москва не приспособлена. Ответ Физика: не существует такой скорости, по крайней мере, на сегодняшний день.  
 -----

А еще рассказывают такую *историю*... Однажды Физик и Математик летели на самолете из Петербурга в Москву. День был безоблачный, и, пролетая над Валдаем - это примерно на полпути - они увидели где-то внизу пасущуюся синюю овцу. По прилете в Москву они написали отчеты про увиденное.

*Физик:* на Валдае водится синяя овца.

*Математик:* где-то между Петербургом и Москвой водится овца, синяя сверху.  
 -----

Итак,  
**физика - наука точная:** ответ на ее главные вопросы дается на языке математики. Но следует отчетливо понимать и помнить, что у физики и у математики - разные цели, разные способы их достижения и главное - **разные правила**, по которым можно достичь результата.  
**Физика - наука экспериментальная.** В ней "правильный ответ" - это ответ, совпадающий с результатом эксперимента. И только!

### 0.3 ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА

Объявляется конкурс на лучшее определение Физики. Для затравки я тут кое-что приготовил:

---

<sup>4</sup> Говорят, что за "физические" способности человека отвечает то же полушарие его мозга, что и за его способности в искусстве. А, например, умение считать (говорят) лежит в другом полушарии. Так что, если у вас что-то не идет, значит здорово получится что-то другое.

- *Физика - это то, чем занимаются физики в свободное от работы время, сидя дома за чашечкой кофе* (определение принадлежит японскому физика Риого Кубо).

Правда, к такому заманчивому определению я бы добавил вот что:

**В13:** Чем физик-профессионал отличается от физика-любителя?

**О13:** Очень просто: профессионал каждое утро, независимо от своего настроения, садится за ... (компьютер, рабочий стол, экспериментальную установку - *вставить нужное*) и старается честно делать дело. А любитель делает это, если есть настроение (иногда, правда, он может сутками не вставать из-за стола или не отходить от приборов).

Я знаю немало малоизвестных физиков-профи, и заметное число профессоров-любителей (в указанном мной смысле). Правда, большинство любителей почему-то уверены, что они-то как раз профессионалы.

**В14:** Почему они так думают, как вы думаете?

А вот известное определение, данное академиком Львом Арцимовичем:

*Физика - это лучший способ удовлетворения своего любопытства за чужой счет (государства, фирмы, университета...).*

Если бы у нас было побольше времени, мы могли бы обсудить взаимоотношения Физики и Общества, но будем осмотрительны - ведь мы еще и не начали заниматься собственно физикой, мы все еще продолжаем выяснять, *чем именно* мы будем заниматься.

Если честно, тут у меня возникает большое желание сказать вам:

*Физика - это то, чем мы будем заниматься.*

Вот такое *рабочее* определение.

- У вас есть другие варианты?

Зато они есть у Математика:

*Физик - это тот, кто считает, что число 60 делится на все числа - попробуем 1 - делится, 2 - делится, 3 - делится, 4 - делится, 5 - делится, 6 - делится! Для проверки возьмем несколько чисел наугад: 10 - делится, 20 - делится, 30 - тоже делится!*

(Взято из прекрасной книжки Поля "Математика и правдоподобные рассуждения", она давно переведена на русский язык.)

Если Вы не до конца поняли эту шутку - вернитесь в предыдущий параграф.

На самом деле Американский институт физики умудрился дать *определение Физика*. Вот оно:

*"Физиком является тот, кто использует свое образование и опыт для изучения и практического применения взаимодействий между частицами и полями в области механики, акустики, оптики, тепла, электромагнетизма, атомной структуры и ядерных явлений".*

Громоздко и не очень понятно, правда? Но отложим нашу окончательную оценку до лучших времен, когда мы будем кое-что знать про *все такое*.

А вот определение гораздо более сухое, но оно нравится мне своей определенностью (простите за каламбур), своей точностью:

***Физика - наука, изучающая наиболее простые и наиболее общие явления природы.*** Именно наиболее *простые* (движение пули или Луны, или капли дождя, но не движение нетрезвого человека). И именно наиболее *общие* (такие, которые происходят с любой пулей данного типа, а не с личными пулями Джеймса Бонда, которые он как-то по-особому подпиливает.)

## 0.4

## ПРИМЕР РАБОТЫ ФИЗИКА

Представьте себе, что однажды к Физику пришел Важный Человек (*ВЧ*) и сказал вот что. Много раз назначал я встречу разным другим *ВЧ*. И каждый раз они приходили то раньше, то позже меня. Очень это неудобно. Слышал я, что в заморских странах есть диво дивное - называется часы. И служит оно для отсчета времени. Вот и подумай: как бы и нам такое заиметь. Даром что ли мы тебе (Физику) столько денег платим?<sup>5</sup>

И пришлось Физику, вместо радовавших его душу наблюдений за Луной и звездами, заняться вполне земной, прикладной задачей: поиском (у себя в голове) идеи часов. Конечно, сегодняшний физик в такой ситуации первым делом побежал бы в библиотеку - смотреть заморские журналы или, скорее всего, полез бы в Интернет на сайт watch.com или watch.edu ...

**В15:** А что стали бы делать Вы в такой ситуации? Если искать в Интернете, то какова была бы последовательность Ваших действий?

Честно говоря, первые часы с маятником появились давно...

**В16:** Примерно когда? (Речь идет не о солнечных, а именно о маятниковых, механических часах.) Поищите такую информацию.

Но, скажем прямо, это было задолго до рождения первого человека, которого с легким сердцем можно было уже назвать Физиком.

### КИС'О 1 (Краткое ИСторическое Отступление)

По-настоящему *наука* на Земле началась, можно сказать, с *Фалеса* из греческого города *Милет*, примерно за шесть сотен лет до Рождества Христова.

**В17:** Это было до Гомера или после?

Именно там и тогда люди начали задавать себе *общие* вопросы. И появляется *Философия*. Появляется первая школа ученых-философов - в Милете. Они сумели поставить такой неожиданный и до сих пор актуальный вопрос - *из чего состоит материя?* - и размышляли над этим вопросом: (Утверждают, хотя это и сомнительно, что Фалес первым обосновал теорию подобия треугольников...) Все философы из Милета были люди, занятые очень практическими вещами. Можно сказать, что они занимались не просто философией, а *натуральной философией, натурфилософией* (сравни английское *nature* - природа). Позже (но тоже, как говорится, в *Древней Греции*) были *Демокрит* с его идеей - все тела состоят из движущихся атомов (даже душа!) и *Аристотель* из Афин - он выдвинул теорию того, что такое цвет, верно объяснил происхождение звука, создал (неверную!) теорию движения тел - а она считалась верной в течение почти 2000 лет! Все это время в физике был некоторый перерыв, точнее, она как бы размышляла: родиться или нет. И длилось это, как мы уже сказали, две тысячи лет!<sup>6</sup> Современникам Аристотель был более известен как личный учитель Александра Македонского. А первым физиком в современном смысле слова стал *Галилео Галилей*. Он много чего сделал, открыл первый закон классической

<sup>5</sup> Это шутка!

<sup>6</sup> Подробнее про философов и философию (вдруг кто заинтересуется) см., например, совсем не скучную книгу Бертрانا Рассела "Мудрость Запада".



механики, но, возможно, главное - он первым сформулировал основное правило игры в физике: *критерий истины - только опыт*. Это было где-то в районе 1600 года в итальянском городе Падуя. А уже потом были Ньютон, Фарадей, Максвелл, Эйнштейн, Бор ... Но первым был Галилей.

*Конец отступления.*

Итак, как прийти к идее механических часов? Не знаю! Но сама **ИДЕЯ** понятна и вроде бы лежит на поверхности: использовать что-то повторяющееся, какой-то повторяющийся процесс (природный или легко организуемый).

(По поводу идеи, лежащей вроде бы на поверхности, - известное замечание: всякая идея проходит три стадии: первая - *ну и чушь!*, вторая - *в этом что-то есть...*, третья - *кому же это не очевидно?!*)

Что же повторяется? Посещение школы? Закат и восход? Полнолуние? А что-нибудь происходящее почаще? Собственный пульс? (Если, конечно, не нервничать.) Может идея использовать маятник пришла в голову Гюйгенсу, когда он наблюдал за качанием детской люльки? (Дело было в 17 веке, люльки, говорят, использовались не только на Руси, но даже в передовой Голландии.)

## KISS'O! -2

Сначала идея применить маятник в часах пришла в голову Галилею. Во время богослужения в Пизанском соборе он почему-то следил не за службой, а за тем, как раскачиваются на длинном подвесе лампы. Время он измерял, кстати, по своему пульсу... Гюйгенс, создавший в 1657 году маятниковые часы и запатентовавший это изобретение, всегда отрицал, что знал о проекте Галилея. Дело в том, что отец Гюйгенса был секретарем принца Оранского и участвовал в международных переговорах, где с противоположной стороны был Галилей. Переговоры шли долго, с обедами и приемами. Очень вероятно, что Галилей не удержался и рассказал секретарю о своей идее, ведь так хочется поделиться с кем-нибудь своим открытием!

*Конец отступления.*

Итак, *есть идея* - использовать маятник для измерения времени. Как? (С этого момента мы, *размышляя, вычисляя и записывая*, начинаем создавать предварительный план, первую **теорию** того, что нас интересует.) **НАБЕРЕМСЯ ТЕРПЕНИЯ!** (Это совершенно необходимое качество для любого, кто занимается любыми исследованиями; утешает то, что обычно оно развивается по ходу занятий.)

Каким образом нечто, связанное с качанием маятника, даст нам промежуток времени между двумя событиями (я вышел из дома - я вернулся домой)? *Что* могло бы быть самым главным в описании качаний маятника? Размах колебаний? Но нам нужно что-то, что можно легко связать со временем! Тогда это, наверно, *период колебаний*  $T$  - время, за которое происходит ровно одно колебание, т.е. маятник возвращается обратно, туда, откуда он стартовал. И если этот период *не меняется* на протяжении всего интересующего нас времени, то все очень просто. Пусть за интересующее нас время  $t$  произошло  $n$  качаний маятника. Тогда  $t = nT$ . Значит, нужно запустить (толкнуть) маятник в тот момент, когда событие, продолжительность которого Вы измеряете (выход из дома), и считать число его колебаний до момента окончания события (Вы вернулись домой). Понятно, что это еще не часы, но самое главное в этой простейшей **модели** мы, кажется, *зацепили*.

Но это все - "если". *Если период  $T$  не меняется в течение всего времени  $t$* . Это во-первых. Можно так считать? Ответ может дать только эксперимент. Но еще до его начала можно *предположить*, что если трение в точке закрепления подвеса будет не слишком большим, а колебания происходят в воздухе, а не в сметане (т.е. сопротивление

окружающей среды мало), и еще само подвешенное тело, скажем, не валенок, а например, гирька, то период не должен сильно меняться! Особенно если время от времени маятник подкачивать (Как? Но это уже следующий вопрос. Ответ: пружиной!)

Но есть и более серьезное опасение: не зависит ли *период* колебаний от *размаха* колебаний маятника? Это было бы не очень хорошо для часов - потому что...

-----  
**V18:** Почему?  
 -----

Но и этот вопрос решается экспериментом: что он (эксперимент) покажет, то и есть.

...Но - как измерить период? Через период другого маятника? А самый первый?

Может период сам зависит от чего-нибудь легко измеримого?

А правда, *от чего может зависеть T* в принципе?

Ну, например, от длины маятника  $L$ . Может? В принципе может! Еще? От массы подвешенного груза  $m$ ! Возможно... Еще? От температуры! Какой? Воздуха, в котором происходят колебания. Хорошо, включим в список и температуру. Еще?

Есть еще мнение, что  $T$  должен зависеть и от тяготения Земли. Да?!

Да. Ведь почему отведенный из положения равновесия маятник "падает" обратно? Потому что его Земля туда тянет! Он, конечно, упал бы вертикально вниз, если бы не нить. Вот и получается, что скорость "падения" маятника должна зависеть от степени притяжения к Земле. А больше скорость - меньше время "падения". Итого: время одного колебания, т.е. период  $T$  должен зависеть от какой-то характеристики тяготения Земли. От какой? Не знаем! Поэтому обозначим нашу незнакомку буквой  $g$  (от слова *гравитация* - тяготение) и скажем:  $T$  вроде должен зависеть от  $g$ .

-----  
**V19:** Почему "вроде"?

**O19:** Потому что, несмотря на все логические доводы, если опыт покажет, что это не так, - придется признать: извините, но  $T$  не зависит от  $g$ !

-----  
 Не забудем и возможную зависимость от размаха колебаний, то есть, например, от угла отклонения нити от вертикали  $\alpha$ .

Подведем *некоторые итоги*. Период колебаний маятника *зависит от* (математики говорят "является функцией") следующих величин:  $L$ ,  $m$ ,  $g$ ,  $t^\circ$ ,  $p$  ... Многоточие означает нашу неуверенность в том, что этот список закрыт. Кстати, на языке математики эту гипотезу, эту зависимость, эту модель можно записать очень компактно (одно из достоинств математики как языка физики - это краткость изложения информации):

$T=f(L, m, g, t^\circ, \alpha, \dots)$  - период  $T$  является функцией от  $L, m, g, t^\circ, \alpha, \dots$

Сами величины  $L, m, g, t^\circ, \alpha, \dots$  обычно называют *параметрами* (в данном случае - параметрами колебаний маятника). Впрочем, все эти термины не обязательно знать и помнить, но это удобно - например, при чтении разных книг. И потом Вы все равно к ним постепенно привыкните.

-----  
**V20:** Чья сестра краткость?

Варианты: а) молчаливости; б) торопливости; в) безграмотности; г) таланта.

-----  
 Что дальше?

Вообще-то - *эксперимент*: надо сделать маятник и начать экспериментировать - проверять, действительно период  $T$  зависит от такого, такого и такого *параметра* колебаний или нет, выяснять вид этой зависимости (чем больше - тем больше? прямо пропорционально? обратно пропорционально? еще как-то?). Грубо говоря, если, скажем, длину нити

увеличить в два раза, то во сколько раз изменится период  $T$ . Потом - то же самое с другим подозрительным параметром, например, с массой груза: зависит ли, если да - то как....

Но можно существенно облегчить работу физика-экспериментатора - сузить список подозрительных параметров еще до начала эксперимента. Для этого существует замечательная штука, которая называется

## 0.5

## МЕТОД РАЗМЕРНОСТЕЙ

-----  
**В21:** Что бы это могло быть, исходя из названия?  
 -----

Вот типичное математическое равенство:

$$x^2 - 3 = 2(x+4) \quad ^7$$

А вот "физическое" равенство:

$$v=s/t, \text{ т.е. скорость} = \text{расстояние/время,}$$

например,  $10 \text{ м/с} = 20\text{м}/2\text{с}$ .

Чем они отличаются с первого взгляда? А вот чем:

- в физике величины имеют *размерность*: метры, секунды, метры в секунду и т.д.;
- размерность левой части равенства = размерность правой части.

-----  
**В22:** Предположим, у Вас случилось затмение памяти, и Вы забыли формулу, которая связывает

между собой скорость  $v$ , расстояние  $s$  и время  $t$ . Как легко установить правильную формулу?

-----  
**В23:** А бывают физические величины без размерности, *безразмерные величины*?

(Бывают же безразмерные перчатки...)

**О23:** Все физические величины получаются (или хотя бы в принципе могут быть получены) в результате *измерения*. А **что такое измерение** (например, длины или температуры)? Мы берем измерительный прибор (линейку или термометр) и с его помощью *сравниваем* измеряемую величину (длину отрезка или температуру тела) с величиной, принятой за единицу (расстоянием между двумя рисками на линейке, принятым за 1 метр или за 1 см; или с температурой, принятой за 1 градус). А что значит *сравнить* величину с единицей измерения? Это значит выяснить, сколько выбранных единиц содержится в измеряемой величине (10 см или 20 градусов). А *как* это выяснить? Для каждой физической величины имеется свой *рецепт* сравнения (т.е. измерения этой величины). Например, известен рецепт измерения длины (расстояния): прикладываем линейку, совмещаем "ноль" с началом отрезка и смотрим, какая риска (с каким числом) расположилась против его конца.

Для измерения температуры есть свой рецепт, свой - для силы и т.д.

Итак, любая физическая величина имеет свою размерность просто потому, что она (величина) *задается* по существу *рецептом* (процедурой) своего измерения плюс выбором единиц измерения.

-----  
**В24:** Обсудите эту мысль на примере какой-нибудь не очень понятной Вам величины (например, возьмите температуру).

<sup>7</sup> Между прочим, знаете, как выглядело подобное равенство, скажем, 500 лет назад? "*Вещь в квадрате, от которой отнимают три, равна удвоенной сумме этой вещи и четырех*". Именно так - примерно такой набор слов вместо написанного нами равенства. Мы еще поговорим о роли сокращений и об удобных обозначениях.

-----  
**B25:** А собственно говоря, почему 5 груш не могут быть равны 5 яблокам?  
 -----

А теперь поясним суть метода размерностей на примере - причем, на математическом примере.

### 0.5.1 **ВЫВОД ФОРМУЛЫ ПЛОЩАДИ КРУГА**

Согласитесь, что данный круг полностью определяется единственным параметром - его радиусом **R**. Измените радиус - и у Вас получится уже другой круг, другой площади **S**. И наоборот: невозможно нарисовать два круга разного радиуса, но одинаковой площади. Правда?

Запишем этот факт математически кратко:

$$S_{\text{круга}} = f(R)$$

Теперь решающий момент метода. Площадь круга выражается не просто числом - 10, 100, 314...,- а числом с указанием единиц измерения: 10 квадратных метров или 100 квадратных сантиметров. Запишем это так:

$$[S] = \text{м}^2 -$$

размерность площади (круга) - это метры в квадрате

Но тогда (*внимание!*) мы имеем право написать, что

$$S = kR^2.$$

Здесь **k** - постоянный коэффициент, вполне определенное число - одно и то же для любых радиусов **R** и соответствующих им площадей **S**. Математики говорят так: **S** прямо пропорционально **R**, а **k** - коэффициент пропорциональности.

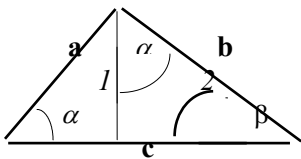
Итак, исходя из того, что выражения слева и справа от знака равенства должны быть выражены в одних и тех же единицах, иначе - иметь одну и ту же размерность, мы получили формулу для подсчета площади круга. Правда, не совсем получили. Ведь мы не знаем значения коэффициента **k**. Верно! Метод размерностей дает возможность определить *вид зависимости* между величинами (у нас - прямая пропорциональность), но *не дает значения коэффициента пропорциональности*. Как говорят, мы можем найти **S** с точностью до коэффициента.

-----  
**B26:** Как Вы полагаете, имеет ли смысл получать такие неопределенные ответы? Стоит обсудить.  
 -----

(Откроем тайну: на самом деле наш  $k = \pi \approx 3.14$  - это можно показать из других, не размерных соображений, и пусть это сделают математики, если еще не сделали.)  
 -----

**B27:** Если Вы не против, попробуйте получить методом размерности формулы для вычисления объема куба, цилиндра, конуса. Разумеется, с точностью до некоторого коэффициента.

### 0.5.2 **ПРИМЕР №2: Вывод теоремы Пифагора**



Возьмем прямоугольный треугольник и опустим из его прямого угла перпендикуляр на гипотенузу. Получили два треугольника: 1 и 2. Очевидно, что площадь большого треугольника складывается из площадей треугольников 1 и 2:

$$S=S_1+S_2 \quad (*)$$

В большом треугольнике: его площадь  $S$  однозначно определяется, если задать гипотенузу  $c$  и угол  $\alpha$ . В самом деле: возьмем лист бумаги (возьмите на самом деле!) и проведем на нем горизонтальный отрезок выбранной длины  $c$ . Из левого его конца проведем прямую под заданным углом  $\alpha$  к нашему отрезку. А из правого конца тоже проведем прямую, под тоже фактически заданным углом  $\beta=180^\circ - 90^\circ - \alpha$ . Точка пересечения этих двух прямых даст нам положение третьей вершины треугольника.<sup>8</sup>

Чему же равна площадь большого треугольника? **Понятно, что по размерности она совпадает с квадратом гипотенузы  $c^2$ .** Но (*внимание: ключевое место!*) мы выяснили, что  $S$  зависит еще и от  $\alpha$ . Это нужно учесть в формуле для  $S$ , но как? Сам угол размерности не имеет, поэтому любую комбинацию этого угла (например,  $\alpha^2$  или  $1/\alpha$ ) нельзя прибавлять или отнимать от  $c^2$ . Иначе у нас будет запрещенная формула типа  $S=c^2 + f(\alpha)$ . Здесь  $f(\alpha)$  - какая-то комбинация, какая-то функция от  $\alpha$ .

-----  
**B28:** Почему такая формула запрещена?

**O28:** По *правилам игры* размерность левой части равенства должна совпадать с размерностью правой. Как говорят физики, такая формула "не проходит по размерности".

-----  
 Хорошо, так нельзя. А как можно?  
 ...Остался единственный вариант (*внимание!*):

$$S = f(\alpha)c^2.$$

(*Опять внимание!*) Но ведь то же самое можно сказать и о треугольниках 1 и 2:

$$S_1 = f(\alpha).a^2$$

$$S_2 = f(\alpha).b^2$$

Осталось подставить три последних равенства в (\*):

$$f(\alpha).a^2 + f(\alpha).b^2 = S = f(\alpha)c^2$$

После сокращения получим выражение для известной теоремы Пифагора:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

- сумма квадратов катетов равна квадрату гипотенузы.

Так физика (метод размерностей) "расправляется" с математикой. Красиво?

-----  
**B29:** Может так вообще всю математику можно построить? (Вот было б здорово!)

-----  
 ...Я могу представить, что такой вывод теоремы вызвал у вас подозрение, что здесь не все чисто, есть какой-то скрытый фокус. Не волнуйтесь, еще привыкнете.

А теперь вернемся к тому, ради чего все затевалось:

### 0.5.3 ПРИМЕР 3: Вывод формулы для периода колебаний маятника

Итак, предположим, что период колебаний маятника  $T$  зависит от всех упомянутых выше параметров. То есть мы выдвигаем такое предположение, такую *гипотезу*:

$$T = f(L, m, t^\circ, g, \alpha, \dots)$$

Теперь аккуратно посмотрим на размерность всех величин слева и справа от знака равенства.

$[T] = c$  (секунды)

<sup>8</sup> Вы, наверно, помните, что сумма углов внутри любого треугольника равна 180 градусам.

[L] = м (метры)

[m] = кг (килограммы)

[t°] = град (градусы)<sup>9</sup>

[g] = м/с<sup>2</sup> - метр делить на секунду в квадрате - *почему?* - придется вам пока поверить на слово, что

размерность параметра **g** именно такая!

[α] = измеряется в единицах, называемых радианы, но сами радианы определены так, что длина одной величины (дуги) делится на длину другой величины (радиуса), т.е. метры делятся на метры, и получается, что угол (в этом смысле) не имеет размерности; короче: *мы должны считать α не имеющим размерности.*

А теперь переведем равенство  $T=f(L, m, t^\circ, g, \alpha, \dots)$  на язык размерности:

$$s=f(m, \text{кг}, \text{град}, \text{м}/\text{с}^2).$$

Мы видим, что из метров, килограммов, градусов и секунд в правой части нам нужно составить такую их *комбинацию*, которая давала бы нам чистые секунды - ведь в левой части стоят именно они!

Как же это сделать, как избавиться от всяких метров, килограммов и градусов?!

От метров избавиться несложно. Поскольку у нас есть не *одна* величина с метрами, а целых *две* (L и g), то можно составить их отношение (или произведение), возможно, в нужной степени, чтобы метры сократились.

Нетрудно видеть, что такая комбинация параметров, как L/g или g/L по размерности от метров уже не зависит, нет там метров:  $[L/g]=\text{с}^2$ , а  $[g/L]=1/\text{с}^2$ . И никак иначе нам этого не сделать!

А вот от килограммов и от градусов нам так просто не избавиться: ни массу, ни температуру просто не на что делить! Положение почти безвыходное. Остается прибегнуть к крайним мерам - объявить, что *ни от массы, ни от температуры период колебаний не зависит.*

-----  
**В30:** Объявить-то можно все, что угодно, а так ли это на самом деле?

**О30:** В физике не бывает "на самом деле". Могут быть лишь факты, подтверждаемые экспериментом или неподтверждаемые. Мы выдвинули гипотезу, предположение, что период T зависит от таких-то параметров. Тогда математика говорит нам: или T от температуры не зависит, или нужно вводить еще какой-то параметр с размерностью, связанной с градусами. Как нам поступить? Проще всего ответить: хорошо, пускай не зависит - посмотрим, что скажет на эту тему предстоящий эксперимент.

-----  
Что же получилось? А получилось, что

$$[T^2]=[L/g]^{10}$$

Надеюсь, вы еще помните, что равенство размерностей еще не означает равенства самих величин. Сами величины могут быть равны лишь с точностью до постоянного числового коэффициента (естественно, размерности не имеющего). Поэтому можно написать:

$$T^2=k(L/g)^{11}$$

Вот такая у нас получилась теоретическая формула для связи периода колебаний с длиной маятника и величиной земного тяготения (гравитации).

Теперь не страшно и за эксперимент взяться.

<sup>9</sup> Позже мы увидим, что градус градусу не товарищ: разные бывают градусы - но пока это нам не важно. И не спутайте эти градусы с угловыми!

<sup>10</sup> Мы написали  $T^2$ , а не T, чтобы не связываться с корнями в правой части (степени как-то приятней...)

<sup>11</sup> Не спутайте круглые скобки с квадратными!

## 0.6 ЭКСПЕРИМЕНТ

В чем он состоит? Грубо говоря: есть подозрение (гипотеза), что квадрат периода колебаний маятника  $T^2$  меняется прямо пропорционально отношению длины нити  $L$  к "показателю земной гравитации"  $g$ . Что говорит по этому поводу опыт: подтверждает это, опровергает или молчит (и такое бывает!).

Тут у нас с Вами возникает небольшая сложность: известно ли Вам, что на поверхности Земли, где мы с Вами собираемся ставить опыт, величина  $g$  практически не меняется? (Голоса: Откуда! Мы ведь даже что такое это  $g$  не знаем!) Ну, что ж, не знаете - так знайте! А иначе пришлось бы начать с еще одного опыта - по проверке неизменности земной гравитации на поверхности Земли.

Ну, если про  $g$  мы договорились, то остается фактически проверить пропорциональность  $T^2$  и  $L$ : во сколько раз увеличится (или уменьшится)  $L$  - во столько раз увеличится  $T^2$  (или уменьшится).

Все просто: возьмем достаточно высокую стойку, подготовим несколько нитей разной длины (60 см, 70 см, 80 см, 90 см и 100 см. Возьмем небольшую гирьку, скажем стограммовую, а можно и 50г. Нет гирьки? Сходите на кухню (это одно из лучших мест для занятий физикой, если Вы дома, конечно) и оглянитесь вокруг: нет ли чего подходящего... Лично я обнаружил там почему-то 9-вольтовую батарейку для моего переносного приемника. Возьмем еще кусочек скотча, чтобы подцеплять груз, и поехали: подцепили, немного аккуратно отвели в сторону, взглянули на часы - и отпустили... Теперь считаем 10 полных колебаний...

-----  
**V31:** Почему 10?  
 -----

(Только не ошибитесь - одно колебание - это до упора туда и потом обратно.<sup>12</sup>) Взгляд на часы (или нажатие кнопки) - и записываем результат - в секундах! Потом мы поделим его на 10 и получившиеся секунды (скорее всего, секунды с десятными долями) возведем в квадрат. Конечно, стоит воспользоваться калькулятором. Разумеется, калькулятор выдаст Вам ответ с громадной точностью - со многими цифрами после запятой. Но Вам, почти наверняка, стоит отбросить все цифры после запятой и забыть про них.

-----  
**V32:** Почему?  
 -----

Проделаем такую же процедуру с другими нитями. При этом постараемся каждый раз отводить груз примерно на один и тот же угол и отпускать его без толчка. Еще одно предостережение: необходимо, чтобы качание происходило в одной плоскости, без закручивания нити. Это не так легко сделать, как кажется. Во всяком случае сначала стоит попробовать, потренироваться, а лишь потом - начинать эксперимент.

Результаты опыта займут совсем немного места: две колонки чисел (в левой - измеренная длина используемой нити, в правой - измеренный квадрат периода колебаний):

$L$ (см)	$T^2$ (с <sup>2</sup> )	
60	64	→ Вот, что <i>могло</i> получиться у Вас!
70	75	
80	85	
90	97	

<sup>12</sup> Советуем Вам сначала прорепетировать и выбрать такой начальный угол отклонения нити с грузом, чтобы с одной стороны, это не было слишком быстро и было удобно считать - отличать одно колебание от другого, а с другой стороны - чтобы не слишком затягивать измерения - можно утратить внимание и ошибиться, особенно если Ваши часы без секундомера.

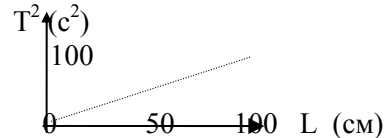
100 108

И что теперь с этой таблицей делать? Как ее понять?

*Нарисовать!* (Обычно физики так и поступают.) **Чем больше рисунков - тем физичнее!**  
Нарисуем две оси - вертикальную и горизонтальную, выберем на них разумный масштаб...

**В33:** Что значит "разумный"?

... и нанесем туда наши результаты - лучше в виде крестиков (не обязательно очень маленьких, что-то вроде курсора в компьютерной рисовалке) - чтобы их перекрестия соответствовали полученным измерениям:



Математика нам подсказывает:

геометрически, т.е. на графике, прямо пропорциональная зависимость (если она действительно есть) - это прямая, проходящая через начало осей. (В самом деле, если только  $T^2 = k(L/g)$ , то при  $L=0$   $T^2=0$ .)

Вопрос в том, "ложатся ли" экспериментальные точки на одну прямую? Возьмем линейку, совместим ее с началом осей и постараемся найти такое ее положение, чтобы все (лучше, чтобы все!) крестики оказались или просто на ней (бывает, но редко, и обычно - подозрительно)...

**В32:** Почему?

... или вблизи нее, желательно равноудаленно: некоторые выше, некоторые ниже...

**В33:** Бывает, что по результатам эксперимента *один* из многих крестиков явно не ложится на прямую. Что бы это могло означать, какую ситуацию? Что стоит сделать в таком случае?

Но у нас-то - вроде все в порядке... - вот она - прямо пропорциональная зависимость.

Итак, что - действительно мы можем утверждать, что для периода колебаний маятника справедливо такое соотношение:

$$T^2 = k(L/g) \quad ?$$

$$T = k' \sqrt{(L/g)} \quad ?$$

Или

**В34:** Почему в последней формуле  $k'$  вместо  $k$  ?

Да или нет?

- Не совсем "да".<sup>13</sup>

- То есть?

- Я бы сказал так: *это верно при определенных оговорках, в определенных условиях.*

<sup>13</sup> Вот она - "мерзкая" манера физиков: ничего не говорить определенно. Разве так можно о чем-нибудь договориться? Увы, у физиков при изучении законов природы есть три принципиальные возможности: говорить определенно, но точно неправду (с точки зрения природы); говорить часть правды, но предупредить, какова она, эта часть; или просто молчать. И что Вам ближе? Если первое, то возможно Вы - в душе математик. Если второе - то физик. А если третье - Вам лучше заняться, например, музыкой.



-----  
**В35:** А что, *любое физическое утверждение верно не всегда?*

**О35:** К сожалению, это так. К сожалению - потому что это сильно усложняет ситуацию. Ну, представьте себе: при бабушке можно говорить одно, при тетушке - другое, а всей правды - никогда высказать в принципе невозможно! Нравится? Вот так и в физике. Но физикам почему-то нравится...

### 0.7 Границы применимости результата

Мне кажется, самое интересное в полученном нами результате - то, что период колебаний  $T$  не зависит от угла начального отклонения  $\alpha$ . Неужели период будет один и тот же, если мы отведем нить чуть-чуть и если расположим ее почти горизонтально и отпустим?! Не верю!

Кто не верит - пусть проверит.

-----  
**В36:** Проверьте: вплоть до каких углов (конкретно) работает формула  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ . (Предупреждаем: это уже эксперимент посложней.)

-----  
 А вот что говорит по этому поводу теория, использующая пока недоступную нам математику: *полученная формула верна лишь для малых  $\alpha$ !*

Естественный вопрос: что значит *для малых*? В каком смысле малых?

-----  
**В37:** Какие углы  $\alpha$  Вы назвали бы малыми?

**О37:** Гулливер был мал в стране великанов и сам был великаном в стране лилипутов.

Вывод:

***степень малости любого параметра определяется в зависимости от условий конкретной задачи***

Теперь про  $\alpha$ . Очевидно, его величина определяется отношением длины дуги, которая его замыкает, к длине нити маятника (мы уже упоминали про это в разговоре про размерность  $\alpha$ ), т.е.:

$$\begin{aligned} & \text{длина дуги} \ll L \\ & \text{(длина дуги)} / L \ll 1 \end{aligned}$$

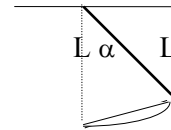
или

Но для малых дуг (малых углов) их длина почти не отличается от длины замыкающего ее отрезка (хорды).

Поэтому условием малости угла отклонения будет

$$x/L \ll 1$$

Короче говоря, полученная формула хорошо работает при начальных отклонениях  $x$ , малых по сравнению с длиной нити.



-----  
**В38:** Пусть длина нити - 100 см. При каких отклонениях можно спокойно пользоваться нашей формулой?

**О38:** Ну, положим, у нас еще не совсем формула. Скорее, это *зависимость* - про коэффициент ведь мы до сих пор ничего не знаем. Но хорошо... Я думаю (из личного опыта), что даже отклонение на  $x=30$  см от вертикали будет позволительно. Впрочем, стоит дождаться результатов эксперимента, о котором мы говорили в **В38**.

-----  
 Итак, первое *ограничение* для пользования  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$  - малость начального отклонения.

Что еще? Просто перечислим все, что может *отменить* наш результат:

- сопротивление среды движению груза (даже в воздухе, не говоря уже о воде или масле);

-----

**B39:** Как можно было бы "отбросить" упрек про неучет сопротивления среды?

**O39:** Например, так: если размеры груза очень малы (физики говорят: если считать груз *материальной точкой*), то и о сопротивлении будет говорить неуместно.

-----  
- неплоское качание (нетрудно почувствовать, что оно может очень быстро все испортить);

- малость массы нити;

-----  
**B40:** По сравнению с чем?

**O40:** А кроме груза и нити больше ничего и нет в нашем распоряжении. Поэтому масса нити должна быть мала по сравнению с массой груза:

$$m_n \ll m$$

-----  
Еще?

- постоянство длины нити за время колебаний (На самом деле любая нить может деформироваться, и обязательно это делает под действием собственного веса и груза. Но эта деформация может мала - и тогда ею можно пренебречь. Такую нить физики называют *нерастяжимой*.)

*Материальная точка и нерастяжимая нить* - это примеры того, чего в природе не бывает, это *модели* отдельных ее свойств. Но так же, как свойства самолетов удобнее (и дешевле!) изучать на их моделях, так и со многими другими движениями.

*Физики имеют дело (в своих оценках, выводах, предсказаниях) не с фотографиями природы, а с шаржами на нее. Дело физика выбрать (нарисовать) такой шарж, который подчеркивал бы самое главное, определяющее в изображаемом, и не замечал бы малосущественные мелочи.*

Все, о чем мы сейчас рассуждали (применительно к маятнику), можно сократить буквально до одной фразы:

для малых колебаний *математического маятника* справедлива такая зависимость -  
$$T = k \sqrt{L/g}.$$

Только, чтобы было понятно, нужно уточнить:

*математическим маятником* называют *материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити.*

*Математический маятник* - это *модель*, принятая нами при получении формулы для периода.

(Обратите внимание: мы заменили реальный объект не его *фотографией*, а можно сказать, *шаржем* на него - здесь некоторые свойства выделены, усилены, а другими - пренебрегают.)

Напоследок порадуем вас одним "бесплатным" результатом (в том смысле, что мы его не выводили, а просто взяли готовым):

на самом деле коэффициент  $k$  после соответствующих вычислений оказался равным  $2\pi \approx 6.28$ . Теперь мы можем окончательно записать формулу для малых колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{L/g}.^{14}$$

-----  
**B41:** Что же *САМОЕ ГЛАВНОЕ*, что стоит запомнить из нашего последнего разговора ?

**O41:** Может быть, *формулу* для колебаний математического маятника?

<sup>14</sup> Мы вынуждены пока умолчать об очень важной штуке, которую мы до сих пор игнорировали в нашем разговоре, - любое измерение делается с определенной точностью, т.к. любые приборы больше или меньше врут (они же не люди!). Но - всему свое время.

Нет! Это было бы неплохо, удобно, но это не главное! Стоит запомнить вот что:

**любое физическое утверждение (формула, закон)  
верно не всегда, а лишь при определенных условиях**

По сути дела эти условия являются частью физической модели .

## 0.8 ОЦЕНКА

Вот **вполне реальная задача**: *Чему равно давление в центре Земли?*

Первое, о чем полезно подумать (при любом вопросе) - а это правда? Или: откуда оно (давление) там взялось?

-----  
**В42:** Откуда?  
-----

Обратите внимание: эксперимент в этом случае нам не помощник - как доставить датчик давления на место опыта (в центр подземного мира)?! Вот именно в таких случаях (трудно поставить эксперимент) и хороши метод размерностей.

Вообще-то давление  $p$  на какую-то площадку  $S$  - это по определению (по договоренности физиков между собой) сила  $F$ , давящая на эту площадку, деленная на величину площадки:

$$p=F/S$$

На первый взгляд с Землей ничего не понятно:

что считать силой? что считать площадкой, на которую давят?

Это действительно непросто и требует определенного опыта и привычки.

Тем не менее, рассмотрим некоторую аналогию, **вспомогательный пример**:

*чему равно давление слона на землю?*

Здесь все гораздо яснее: нужно вес слона (а это, как мы потом увидим, произведение его массы на ту самую постоянную  $g$ , которую мы встретили в формуле для маятника) поделить на суммарную площадь его ступней:

$$p_{\text{слона}}=M_{\text{слона}}g/4S_{\text{ступни}}$$

-----  
**В43:** Откуда четверка в знаменателе?  
-----

А откуда мы возьмем массу слона и, тем более, площади его ног? Отвечаем: массу лично я взял бы из энциклопедии или залез бы в Интернет на [animals.ru](http://animals.ru) - наверняка там что-то есть. Но это, скорее всего, данные *от и до*, но ведь можно взять какое-то среднее значение... Что касается ступни, то надо призвать на помощь свой личный опыт - Вы ведь бывали в зоопарке? Вот и *прикиньте* размеры *его* ступни - примерный радиус. А площадь круга мы уже считали. Результат вычислений будет, конечно, примерным. Но это так и называется: не *измерение*, а *оценка*.

*Теперь вернемся* к давлению в центре Земли. Понятно, что в разговоре о Земле и ее действии на что-то единственной силой, которая *характерна* для Земли, является *вес* всей Земли. А единственной характеристикой Земли, имеющей размерность площади, будет квадрат земного радиуса:

$$p_{\text{центр}}=M_3g/R_3^2$$

(Не будем производить сейчас вычисления, просто заметим, что  $M_3 \cong 6 \times 10^{24}$  кг, а  $R_3 \cong 6400$  км.)

Кстати, если честно посчитать по выбранной нами (из самых общих соображений!) формуле, то мы ошибемся (против эксперимента<sup>15</sup>) всего в 4 раза.

Вы скажите: ничего себе - ВСЕГО в 4 раза! Да попробуй я на контрольной по математике ... Вряд ли меня похвалят! Все верно, но - то на контрольной, во-первых, и на математике, во-вторых. А в нашем случае - были такие варианты: а) ничего не знать; б) знать хоть с какой-то точностью. А ведь мы узнали не просто *с какой-то* точностью, а *с точностью до порядка*, т.е. ошиблись меньше, чем на порядок, меньше, чем в 10 раз! Чаше всего метод размерностей и дает нам оценку величины с точностью до порядка.

Замечательный физик *Энрико Ферми* говорил так:

"...действительно понимающие природу того или иного явления должны получать основные законы именно из соображений размерности".

Чтобы овладеть этим замечательным методом, стоит потренироваться:

-----  
**V44:** Сравните давление слона на землю с атмосферным давлением. Что больше?

**V45:** Оцените давление шариковой ручки на бумагу при письме.

**V46:** Можно ли надавить пальцем так, чтобы создать давление 1000 атмосфер?  
 -----

## 0.9 МЕТОД

Подведем некоторые итоги. Какие моменты можно выделить в решении задачи о поиске способа не опаздывать на встречу с ВЧ? Причем, нас, конечно, интересуют моменты, типичные для любой физической задачи. Вот они:



Вот такая схема... А Вы как думали - все так просто?!

Пройдемся по всем этапам нашего решения конкретной задачи:

*задача:* измерить время  $\Rightarrow$  *идея:* качание маятника  $\Rightarrow$  *модель:* математический маятник  $\Rightarrow$  *теория1:* гипотеза  $T = k\sqrt{L/g}$   $\Rightarrow$  *эксперимент:* проверка пропорциональности  $T^2$  и  $L/g$   $\Rightarrow$  *теория2:*<sup>16</sup>

$T = 2\pi \sqrt{L/g} \Rightarrow$  *следствия* (предсказания теории): ...  $\Rightarrow$  *эксперимент2:* проверка предсказаний - ....

Несколько слов о возможных в нашем случае предсказаниях. Если бы мы побольше знали о постоянной тяготения  $g$ , то сказали бы: т.к. с увеличением расстояния от Земли ее тяготение слабеет, т.е.  $g$  *уменьшается*, то период колебаний маятника должен *увеличиваться* с поднятием его повыше над землей. Иначе говоря, на вершине горы маятниковые часы должны немного отставать от таких же часов у подножия горы. Можете проверить! Нужно только заранее оценить ...

-----  
**V47:** Что?  
 -----

*Метод работы Физика* можно обозначить еще более крупными мазками:

## НАБЛЮДЕНИЕ + РАЗМЫШЛЕНИЕ + ОПЫТ

<sup>15</sup> Интересно, как все-таки его поставили?...

<sup>16</sup> У нас не было этого этапа!

## 0.10 ФИЗИКИ: ТЕОРЕТИКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАТОРЫ

Можно сказать, что физики - это люди, профессионально занимающиеся физикой.

-----  
**В48:** Что значит "профессионально"?

-----  
 Тут, конечно, может быть много разных мнений<sup>17</sup>, но особо долго разговаривать на эту тему вряд ли имеет смысл... Есть такой способ давать определение через перечисление, т.е. через примеры. Тогда физики - это такие люди, как Галилей, Ньютон, Фарадей, Максвелл, Эйнштейн, Бор...

-----  
**В49:** Люди какой профессии могли бы выстроиться в столь же блестящий ряд представителей нашей цивилизации? Кто - писатели, музыканты? Кто еще?

-----  
 Заметим, что возможна (и естественна!) некоторая путаница, смешение физиков и техников, физиков и инженеров. Недаром многие университеты выдают диплом о получении квалификации физика - тире - инженера. А ведущий русский физический центр так и называется: Физико-технический институт. И все-таки: Роберт Вуд был физиком, а Томас Эдисон - инженером. На всякий случай напомним высказывание Фейнмана: "Не все, что *нефизика*, то плохо. Любовь, например, тоже *нефизика*..."

*О теоретиках и экспериментаторах.* Поначалу, конечно, такого деления не было. Галилей бросал тела с пизанской башни и формулировал принцип инерции. Ньютон ставил опыты с разложением белого света на цветные лучи и строил теорию всемирного тяготения. Гук, Гюйгенс, Паскаль - все они были "просто физиками".

Но уже в 19 веке некоторые люди стали проводить *все свободное время* в лаборатории, придумывать и делать приборы, придумывать и ставить эксперименты, наблюдать и делать выводы. Понятно, что это были люди, склонные к работе руками, интересовавшиеся "железками", умевшие не просто разглядывать, а именно наблюдать. Наблюдать и удивляться! Впрочем, умение не пройти мимо того, что, возможно, видели тысячи людей, видели - но не увидели ничего интересного - главное, что отличает настоящего исследователя от "артиста", играющего роль ученого.

Чистыми экспериментаторами были Майкл Фарадей, "сделавший" современное электричество, Роберт Вуд<sup>18</sup> - отец физической оптики - науки о свете, Петр Капица - тоже один из отцов - физики низких температур. Наши современники швейцарцы Мюллер и Беднортц, открывшие высокотемпературную сверхпроводимость, россиянин Жорес Алферов, получивший Нобелевскую премию за создание гетеролазеров (не пугайтесь всех

<sup>17</sup> См. любопытную книжку А.Мигдала "Поиски истины", М.,1983. Аналогичная книга, посвященная труду математика (автор В.Смилга), была названа "В погоне за красотой".

<sup>18</sup> Есть книга о Вуде, написанная В.Сибруком, с таким подзаголовком: "История американского мальчика, который стал самым дерзким и оригинальным экспериментатором наших дней, но так и не вырос". Там много замечательных историй. Самая известная - про кошку (Вы прочтете ее сами). А первой публичной научной победой Вуда было применение *принципа сифона*, о котором он узнал из старой отцовской книжки. ...В январе в Бостоне случилась оттепель, и под горкой, с которой катались мальчишки, образовался маленький пруд. Это было плохо, потому что всех обдавало грязной водой. Роб появился со шлангом для полива сада и объявил, что откачает всю воду. Более старшие ребята стали смеяться: вокруг лужи было возвышение больше, чем на фут, и все хорошо знали, что вода в гору не течет. Вуд положил шланг на землю, велел одному из мальчиков заткнуть один конец пальцем, а сам стал набирать воду, пока весь шланг не наполнился. После этого достаточно было просто положить конец шланга на землю за возвышение. Но это был Вуд- не только экспериментатор, но и *демонстратор* по своей природе: он перекинул шланг через высокий забор, отделявший дорогу от канавы...

этих слов - в свое время мы разберемся и с ними), так вот - все они - тоже физики - экспериментаторы.

Одновременно с экспериментаторами появились и первые *теоретики*. Я думаю, сначала это были просто постаревшие (и обленившиеся) "просто физики": сиди себе, думай да вычисляй.<sup>19</sup> Потом к ним присоединились физики, у которых "руки не туда приставлены". По этому поводу есть много исторических анекдотов. Про Вольфганга Паули, например, утверждали, что достаточно ему войти в лабораторию, чтобы в ней что-то перестало работать ("эффект Паули"). Документально известно, что однажды в лаборатории в Геттингене случился взрыв, разрушивший дорогую установку. Время этого ЧП было точно замечено. Оказалось, что взрыв произошел в тот момент, когда Паули ехал из Цюриха в Копенгаген и его поезд на две минуты остановился в Геттингене.

Чистыми теоретиками были такие гении, как Максвелл и Эйнштейн, Бор и Фейнман, Ландау и Сахаров. Для такой работы, понятно, мало иметь "неумелые руки", и даже совсем не обязательно. Но - свободно владеть разнообразной математикой, обладать хорошим воображением, *любить* вычисления, умение связать формулу с реально происходящими явлениями - все это совершенно необходимо физики - теоретику.

О физиках-теоретиках и их работе тоже написано немало замечательных книг.<sup>20</sup> У теоретиков постоянные и непростые взаимоотношения с экспериментаторами. Вот история, которая случилась в моем институте. Однажды один экспериментатор изловил в коридоре нашего выдающегося теоретика Якова Френкеля и показал ему полученную кривую. Подумав минуту, Френкель сказал: "Ну, это понятно..." и дал объяснение виду кривой. Френкель пошел дальше (коридоры у нас в институте длинные), но через минуту его догнал тот же самый экспериментатор и сказал, что случайно показал ему свою кривую вверх ногами. Подумав минуту, Френкель сказал: "Ну, это тем более понятно..." и снова все объяснил.

Впрочем, бывали и исключения. Великий Энрико Ферми создал теорию так называемого  $\beta$ -распада - одну из красивейших физических теорий, а буквально на следующий год экспериментально открыл явление искусственной радиоактивности ядер, за что и получил Нобелевскую премию. Но все-таки - это исключение.

У экспериментаторов - свои радости. Над входом в лабораторию низких температур в Лейдене (Голландия) висит девиз: "*Знание через измерение*" (Doog Meten tot Weten). А вот как вспоминал потом Эрнест Резерфорд момент открытия им ядра в атоме: "...Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовый снаряд, выпущенный в лист папиросной бумаги, отскочил бы от нее и ударил бы в стреляющего."

-----  
**B50:** Дюйм - это сколько сантиметров?  
-----

Радость теоретика чуть-чуть понятна каждому: каждый из нас хоть раз в жизни решил трудную (такую, что можно похвастаться) задачу - логическую, математическую или бытовую. Но, возможно, главная радость теоретика - это когда его рассуждения или расчеты позволяют объявить: в мире, господа теоретики и инженеры, есть еще нечто (точнее, должно быть), мимо чего вы все до сих пор проходили не замечая! Так появились на свет радиоволны, античастицы, нейтрино и много чего замечательного другого...

---

<sup>19</sup> На самом деле уже *Коперника* (16-ый век!) можно отнести к *теоретикам* - сам он наблюдал мало, пользовался в основном результатами, полученными *Тихо Браге* (*экспериментатором?*).

<sup>20</sup> Например: Джордж (Георгий) *Гамов*. *Моя мировая линия*. Или: *Are you joking, Mr. Feynman?*

## 0.11 ЧТО ИЗУЧАЮТ ФИЗИКИ: *Пространств. Время. Материя.*

### 0.11.1 Пространство

У каждого из нас есть свои размеры - рост, толщина...

**B51:** Как (каким способом) Вы определили бы свою толщину?

Каждый из нас занимает какое-то свое место - в кресле, в комнате, в доме, в городе... Если кто-то забывает об этом, то натывается на другого: пытается сесть на уже занятый стул, войти в набитый людьми автобус, припарковать свою машину, расталкивая уже стоящие там... Можно сказать, что природа, пригласив все тела в этот мир на спектакль под названием Жизнь, выдала всем свой билет; но не просто с правом входа, а с гарантией своего места в этом мире.

Итак, наш опыт говорит, что все тела имеют какую-то протяженность, они занимают определенное место и как-то располагаются друг относительно друга. То, в чем они располагаются, мы называем *пространством*.

Иногда *все пространство*, в котором мы существуем и которое мы (или другие люди) могут наблюдать (не обязательно глазами, можно и с помощью каких-нибудь радиотелескопов), мы называем *миром* или *Вселенная*.

То, что окружающий нас мир фантастически разнообразен, не удивительно - ведь он так велик. Удивителен масштаб наших знаний о мире - откуда и докуда. Наибольшее расстояние, на которое проник человек (с помощью современных приборов) - это величина порядка  $10^{26}$  м. Наименьшее - это размер деталей элементарных частиц (они исследуются на крупнейших ускорителях) - порядка  $10^{-18}$  м.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ:** *про запись чисел в виде степени десяти.*

Вот пример: расстояние от Земли до Луны примерно 360.000 км. Перепишем эту величину так, как удобно для возможных вычислений и сравнений с другими величинами:

360.000

$\text{км} = (360 \times 1000) \text{км} = 360 \times 10^3 \text{км} = (3.6 \times 100) \times 10^3 \text{км} = 3.6 \times 10^2 \times 10^3 \text{км} = 3.6 \times 10^{2+3} \text{км} = 3.6 \times 10^5 \text{км} =$

$3.6 \times 10^5 \times 10^3 \text{м} = 3.6 \times 10^{5+3} \text{м} = 3.6 \times 10^8 \text{м}$  - заодно мы перевели километры в более удобные для физических вычислений метры.

Напомним **ПРАВИЛА РАБОТЫ СО СТЕПЕНЯМИ:**

$$\begin{array}{ll} 10^\beta \times 10^\gamma = 10^{\beta+\gamma} & (10^5 \times 10^3 = 10^{5+3}) \\ 10^{-\beta} = 1/10^\beta & (10^{-3} = 1/10^3) \\ 10^\beta / 10^\gamma = 10^{\beta-\gamma} & (10^3 / 10^5 = 10^{3-5} = 10^{-2}) \end{array}$$

Вот общий математический рецепт: записать какое-то число А "в виде степени 10" означает записать его в виде  $A = \alpha \times 10^\beta$ , где  $\alpha$  - обязательно меньше 10.

Например:  $360.000 = 3.6 \times 10^5$ .

Напомним, что когда мы говорим о *порядке величины*, то обычно подразумеваем вот что.

По порядку величины расстояние от Луны до Земли - это  $10^8$  м. То есть, говоря так, мы просто не учитываем коэффициент  $\alpha$  перед десяткой в какой-то степени, или точнее - считаем (приблизенно, для оценки)  $\alpha = 1$ .

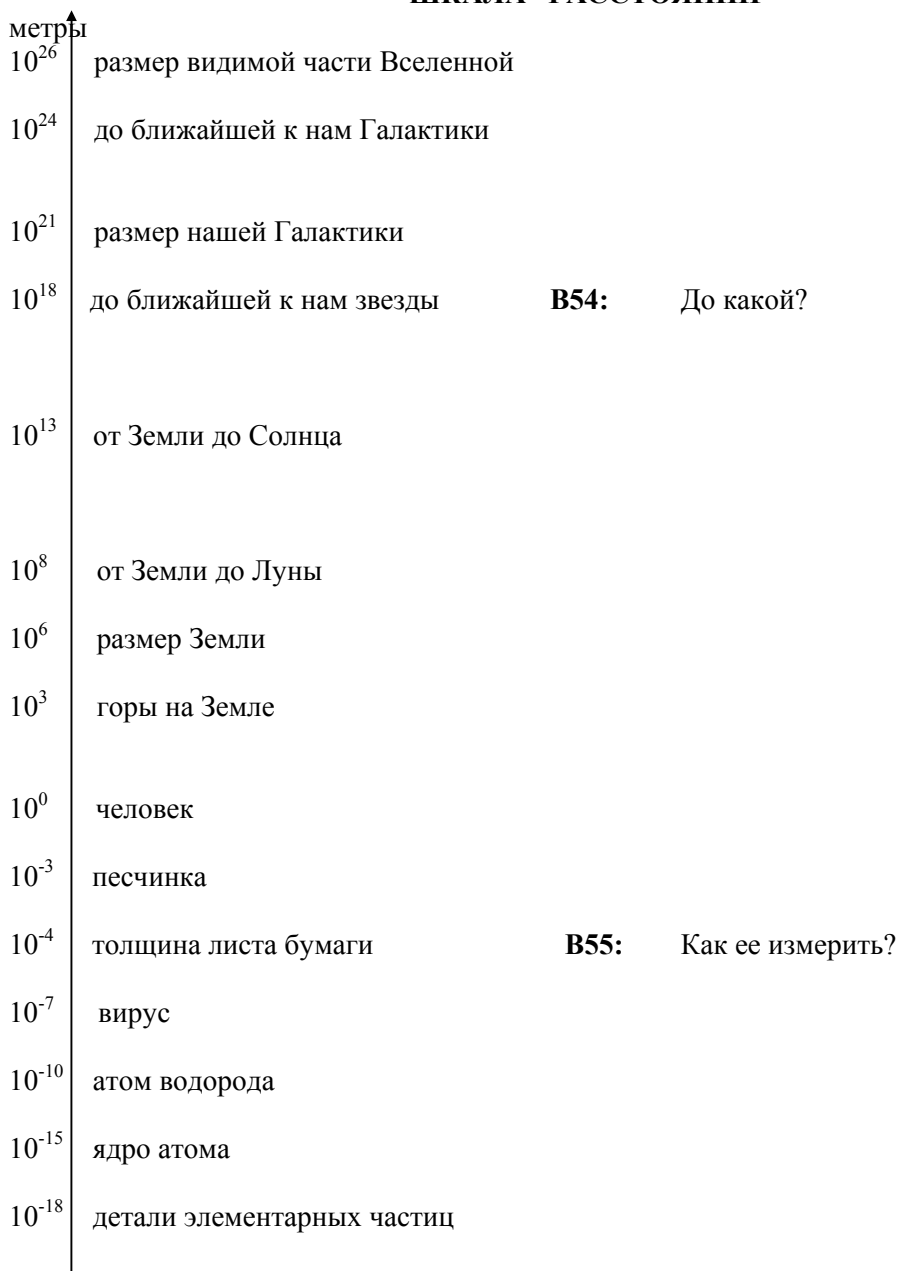
**B52:** Каков порядок радиуса Земли в метрах? Массы Земли в килограммах?

**B53:** Во сколько раз наибольшее из измеренных (или вычисленных) человеком расстояний больше наименьшего?

(Сравните полученный результат с числом атомов, составляющих человека. Человек состоит примерно из  $10^{16}$  клеток, а каждая человеческая клетка - из  $10^{13}$  атомов.)

Вернемся к пространству. Между размером видимой части Вселенной и размером деталей элементарных частиц расположились все другие размеры и расстояния нашего мира: размер нашей Галактики, Земля, горы на Земле, мы сами, песчинка, вирус, ядро атома.....

### ШКАЛА РАССТОЯНИЙ



Для измерений и вычислений всего этого диапазона величин, естественно, вводились самые разные единицы длины. Самая маленькая единица - 1 ферми (1F) - была



названа в честь Энрико Ферми.  $1\text{F}=10^{-13}\text{см}=10^{-15}\text{м}$ . Довольно часто физики пользуются такой единицей длины, как 1 Ангстрем (в честь шведского ученого):  $1\text{A}=10^{-8}\text{см}=10^{-10}\text{м}$ . (Над буквой А должен стоять маленький кружочек, вроде значка градусов.)

А самая большая единица - расстояние, которое проходит свет за 3,2 года - 1 парсек =1 пс.

-----  
**B56:** Почему был введен 1А?  
 -----

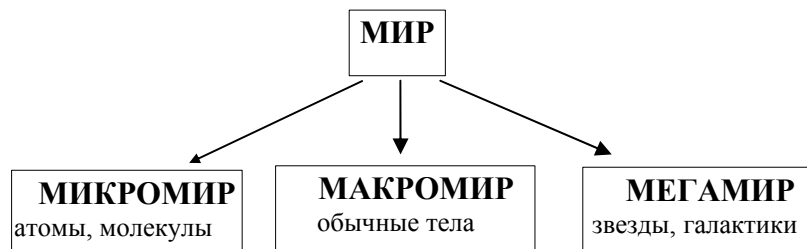
**B57:** Оцените в метрах расстояние в 1пс. Сравните его с расстоянием от Земли до Полярной звезды.  
 -----

**B58:** Оцените по порядку величины размер видимой части Веленной в световых годах, т.е. в расстояниях, которые свет проходит за 1 год своего движения.  
 -----

Опыт показывает, что законы движения очень малых тел - молекул, атомов, электронов - принципиально отличаются от тех правил, которым подчиняются обычные тела, окружающие нас - песчинки, шарики, стулья, автомобили... Если вдуматься, то это не так удивительно. Маленький человек двигается лишь несколько иначе, чем большой. Но ведь их размеры отличаются всего лишь в разы:  $200\text{см}/50\text{см}=4$ , т.е. они *одного порядка!* Обычная вода замечательно течет по трубе водопровода диаметром 2см (если ее не отключили), а сквозь узкую трубочку диаметром 1 мм=0.1см, т.е. в 20 раз меньше, ее надо специально проталкивать. А ведь размеры атомов отличаются от размеров человека на 10 порядков! Т.е. в 10.000.000.000 раз - в 10 триллионов раз!

Надо сказать, что и у очень больших тел - звезд, галактик - свои особенности поведения. Правда, законы мегамира, по крайней мере, написаны на том же языке, что и законы макромира. Разве что на разных диалектах. Хотя, правильнее будет сказать, что мы просто не знаем единого языка, но в природе он, скорее всего, существует.

Итак, в нашем мире можно (*условно!*) выделить три области:



Подчеркнем, что это деление - достаточно условное: *нельзя* сказать, что ДО такого размера - это микро-, а ПОСЛЕ - макро.  
 -----

**B59:** Опять придется в каждом случае, в каждой задаче решать этот вопрос заново?

**O59:** Не совсем. Обычно разница между макро- и микро-размерами громадна, очевидна и не требует уточнений. Но иногда (достаточно редко) требуется специальная прикидка: какое описание в данном случае правомерно, т.е. отвечает опытным фактам.  
 -----

Между прочим:  
 -----

**B60:** Знаете ли Вы, что многие единицы длины выбирались самым естественным образом, например, 1 фут (foot) - это длина некоторой средней ступни. Интересно: какому размеру обуви соответствует 1 фут?

-----  
**B61:** Знаете ли Вы: что такое 1 локоть? 1 косая сажень?  
 -----

**B62:** Знаете ли Вы: в честь чего выбрано название такой единицы, как 1 дюйм (inch)?

**O62:** Это ширина большого пальца у его основания. (Сравните со своим.)  
 -----

**B63:** С помощью увеличительного стекла (лупы) рассмотрите сахар, кофе, поверхность ножа...  
 -----

**B64:** Есть ли у Вас какие-то идеи насчет того, как лупа может увеличивать изображение предметов?  
 -----

### 0.11.2 ВРЕМЯ

Да, это действительно интересный вопрос: что такое время...

Ребенок, которому всего несколько месяцев, понимает, что такое *здесь* и *там* - у него уже есть ощущение *пространства*. Лишь после года он начинает понимать *сейчас*, потом - *скоро*, в три года появляется *сегодня*, *вчера* и *завтра*. И только где-то к семи годам складывается представление о времени как о всегда, везде и *равномерно* текущем *потоке* мгновений.  
 -----

**B65:** Каким *преимуществом* обладает пространство перед временем с точки зрения человека?

**O65:** Первое: пространство можно видеть и даже слышать. Второе: в пространстве можно перемещаться. То же самое во времени - любимый сюжет фантастической литературы. Третье: пространство "стоит", а время - неудержимо бежит. Четвертое: время имеет направление - от прошлого к будущему. Итого: ***время сложнее пространства***.  
 -----

Древний умница Гераклит две с половиной тысячи лет сказал про время так, что мы до сих пор повторяем его: "*Все течет, все изменяется*".

Мир - это не только пространство. В его театре все время происходят события (рождение человека, солнечное затмение, смена президента, покупка велосипеда, окончание школы...). События начинаются, длятся, заканчиваются. Мир, кроме пространства, - это еще и поток событий. Если вдуматься - то, что два события могут происходить одно *после* другого, одно *раньше*, а другое *позже* - вот *это мы и называем временем*.  
 -----

**B66:** Можно ли, не имея такого понятия, как *время*, объяснить кому-то, что значат слова *причина* и *следствие*?  
 -----

**B67:** Как возникают день и ночь?  
 -----

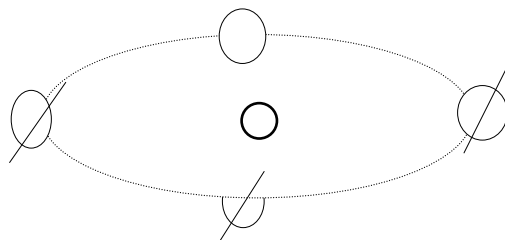
**B68:** Что такое год?  
 -----

**B69:** Что такое месяц?  
 -----

**B70:** Как получаются времена года?

**O70:** Времена года - результат наклона земной оси относительно плоскости земной орбиты.

**РИС**



Летом северное полушарие наклонено к Солнцу, зимой - наоборот. Весной и осенью - промежуточные ситуации.

Любопытно, что, в отличие от единиц пространства (версты, мили, лье, ли ...), единицы времени - одни и те же в любой стране: это секунды.

**В71:** Как Вы думаете, почему?

Что такое одна секунда? В моем детстве не было фотолабораторий Кодак или Фуджи. Надо было самому печатать фотографии. Для этого следовало научиться открывать затвор увеличителя (поворачивать темное стеклышко) на определенное время, часто на одну-две секунды. Меня учили так: скажи нормально, как ты говоришь обычно - двадцать один - это будет секунда, а двадцать один - двадцать два - это две секунды.

Но, как Вы понимаете, требовались и более точные стандарты. Сегодня самые лучшие часы позволяют измерять время с точностью до...

**В72:** Не смотрите дальше! Проверьте свою интуицию: с какой точностью работают лучшие современные часы?

**О72:** С точностью до миллиардных долей секунды в сутки!

**В73:** С какой точностью такие часы могут измерить промежуток времени в миллион лет?

**В74:** Зачем может быть нужна такая жуткая точность?

Это т.н. атомные часы: они используют строго периодические колебания излучения, испускаемого атомами. После создания атомных часов, вместо определенной части суток или года, единицей времени стала "атомная секунда":

за 1 секунду *принят* промежуток времени, в течение которого в строго определенном излучении атома цезия произойдет 9.192.631.770 колебаний.

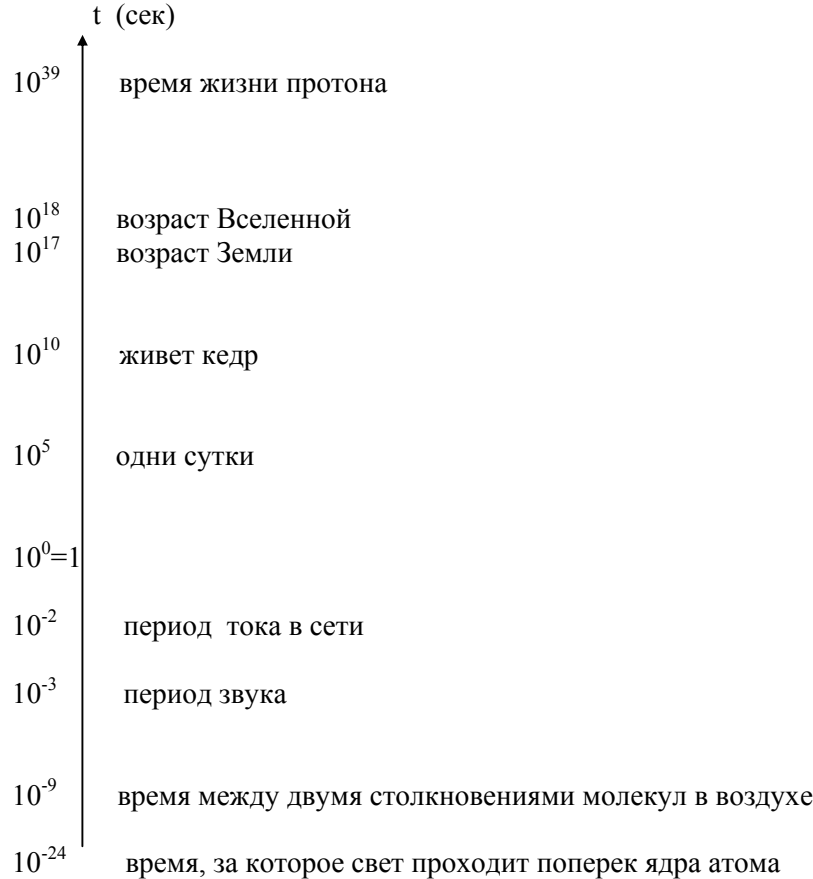
А теперь посмотрим на шкалу времен, где приведены (в секундах!) времена самых разных событий - от невысказанно длинных, для нас практически вечных, - до таких стремительных, что непонятно, как можно успеть узнать, сколько они длились.

*Заранее поясним, что*

- протон - это микрочастица, входящая (иногда не одна) в состав ядра атома;
- электрический ток в сети, к которой подключены наши дома, ведет себя, как маятник, - он все время меняет свое направление и величину, поэтому можно ввести понятие периода тока;
- звук в воздухе - это сжатия и разрежения воздуха, которые, появившись в одном месте, распространяются от него в другие места;

- воздух, как и другие вещества, состоит из молекул, которые ведут себя, подобно толпе на базаре - все время движутся, сами не зная куда, и меняют направление своего движения из-за столкновений с другими молекулами.

### ШКАЛА ВРЕМЕН



-----  
**В75:** Оцените по порядку величины (в секундах) продолжительность человеческой жизни.  
 -----

**В76:** Почему в сутках 24 часа?

**О76:** Деление на годы, месяцы и дни возникло из астрономических наблюдений, но дальнейшее деление на часы, минуты и секунды было совершенно произвольным и даже, как оказалось, не очень удобным. Сравните систему рублей и копеек с делением суток на 12 часов, часов - на 60 минут, минуты - на 60 секунд. Все понятно? В основу такого подсчета времени были положены числа 12 и 60, священные для жителей древнего Вавилона.

-----  
 Кстати, обратили ли Вы внимание, что в недавнем разговоре про разные экзотические единицы длины мы как бы забыли про *метр*. А ведь он - как бы Адам, прародитель остальных единиц длины. По крайней мере, так договорилось считать международное сообщество физиков. Но мы стараемся ничего не забывать (другое дело,

что это у нас не всегда получается). Просто в свое время мы не могли этого сделать, а теперь - время пришло.

-----  
**В77:** Догадываетесь, почему?

-----  
 Что же такое один метр?

В 1791 году Национальное собрание Франции приняло специальное постановление: считать расстоянием в 1 метр одну сорокамиллионную часть длины парижского меридиана.

-----  
**В78:** Что такое меридиан? Парижский меридиан?

-----  
 Специальная геодезическая партия на самом деле прошла от Ла Манша до Барселоны (четверть длины меридиана - от моря и до моря) и определила длину той "ленты", которая нужна, чтобы уложить ее на земле вдоль этого расстояния. И взяли указанную малую долю этой "ленты". Позже, на основании этих измерений был изготовлен специальный эталон - что-то вроде куска рельса из сплава платины с иридием. Он хранился в специальном помещении, в Севре, под Парижем. С этого эталона были сделаны другие, естественно, уже менее точные копии, а с них - остальные метры - портновские, плотницкие, землемерные, ученические и т.д.

Долгое время такое определение метра было достаточно для практических и научных нужд. Но постепенно претензии к севрскому эталону накапливались: его длина слабо, но все-таки зависела от температуры, его состав постепенно менялся (металл тоже испаряется и обменивается атомами с тем, на чем он лежит), наконец, такой эталон может быть утрачен вообще - из-за землетрясения или, например, действий террористов... И что тогда? Все переделывать заново?

Поэтому в 1983 году было принято новое соглашение: *метр есть длина пути, проходимая светом в вакууме в течение временного интервала 1/299.792.458 секунды.*

Какие можно сделать выводы из этого определения? Во-первых, очевидно, свет в вакууме (в пустоте) движется все время с одной и той же скоростью. И это постоянство очень надежно установлено. Второе: скорость движения (распространения) света умеют измерять с очень большой точностью. И третье: в вакууме свет движется всегда со скоростью 299.792 км и 458 метров в секунду.

Обратите внимание, что мы незаметно от времени и расстояния перешли к разговору о скорости. Правила хорошего тона для физиков говорят: хорошо бы уточнить, что это такое, какой смысл мы (как физики) вкладываем в это понятие. Интуитивно вроде понятно - это показатель быстроты чего-то (движения тела, процесса...). Но все-таки...

-----  
**В79:** Чем плохо определение: "скорость чего-то - это характеристика быстроты этого чего-то"?

-----  
 Но сначала о том,

## **КАК МОЖНО В ФИЗИКЕ ВВЕСТИ, Т.Е. ОПРЕДЕЛИТЬ, КАКУЮ-ТО ВЕЛИЧИНУ.**

Строго говоря, есть два способа:

а) Через другие величины (*математический метод*). Необходимый пример - определение скорости. Скорость тела - это расстояние, пройденное телом, деленное на время движения:  $V=s/t$ . По сути дела это математический способ определения. Берутся

величины, которые уже определены, и как-то математически комбинируются: делятся друг на друга, умножаются...

-----  
**В80:** А могут они складываться?  
 -----

При этом новые *единицы измерения* для новой, введенной величины можно и не вводить. Можно, конечно, вместо  $1\text{ м/с}$ , ввести специальную единицу  $1\text{ скор} = 1\text{ м/с}$ , но обычно этого не делают.

-----  
**В81:** Почему?  
 -----

**В82:** Какую величину логично назвать *ускорением*?  
 -----

Хорошо, будем вводить величины через другие, уже введенные. Но как быть с самыми *первыми* величинами?! А это мы уже знаем на примере "длины" (расстояния) и времени.

б) Поэтому существует второй (*операциональный*) метод.

*Основные* физические величины (они так и называются - *основные*) определяются так: дается определенный способ (рецепт) измерения этой величины с помощью выбранного эталона. Т.е. такое определение - это рецепт, объясняющий, как в результате измерения можно сравнить какое-то свойство нашего тела с таким же свойством эталонного, "единичного" тела.

Ну, например: путь, пройденный телом, это величина, измеряемая числом "метров", укладываемых вдоль него. Более точно: следует взять линейку (или рулетку), совместить ее нулевую риску с начальной точкой движения и одновременно посмотреть на число, стоящее против риски, совпавшей с конечной точкой. Это число и называется "путь, пройденный телом" (в метрах).

-----  
**В83:** (Это непростой вопрос.) *Если подумать:* а разве определение величины через другие величины не содержит в себе (неявно, скрыто) рецепт измерения?  
 -----

Подведем *итоги разговора про определение физических величин*. Есть два подхода. Основные физические величины (расстояние, время, массу - о ней разговор впереди) определяют через *рецепт (операции) измерения плюс задаваемый эталон*. Единица измерения такой величины всегда задается выбором эталона. Другой способ используется для задания производных величин - это *рецепт измерения плюс математическая формула* связи новой величины с уже введенными.

-----  
**В84:** Как Вам нравится такое определение: "потенциальная энергия тела - это величина, характеризующая способность тела совершать работу"?  
 -----

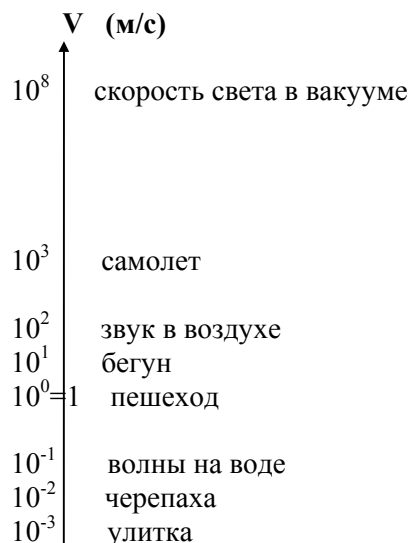
**В85:** Пофантазируйте и попробуйте ввести вымышленные физические величины, описывающие человека. Введите какие-то основные величины (Что можно принять основным для человека? Умность? Красивость? Совестьливость?...). Введите такую производную (от основных) величину, как "удачливость", а также единицу ее измерения. Как ее можно было бы назвать?  
 -----

А теперь, наконец, немного **ПРО обещанную СКОРОСТЬ**.

По сути дела мы уже знаем, что скорость (лучше говорить тела) - это то, что называется *производная* величина, она определяется через путь и время:  $v=s/t$  - если коротко.

Диапазон различных скоростей в природе тоже велик и разнообразен:

### ШКАЛА СКОРОСТЕЙ



Самое необычное в скоростях - это то, что *скорость любого материального тела имеет предел, установленный природой*. Этот предел - скорость света в вакууме, примерно 300.000 км/с. Так нам говорит опыт. И все теоретические следствия, которые следуют из этого факта (все теоретические предсказания), оправдались на практике.

**В86:** (*Очень хитрый вопрос.*) Представьте себе ужасно сильный прожектор. Пусть его луч "бьет" на расстояние 300.000 км. Теперь повернем прожектор на 90 градусов в течение 1 секунды (если ось прожектора смазана хорошо, то это не потребует каких-то усилий). Но тогда за то же время конец длинного светового луча переместится на четверть длины окружности ( $2\pi R/4 = \pi R/2 \cong 1.5R$  с радиусом 300.000 км, т.е. на 450.000 км за 1с! - в полтора раза быстрее скорости света!! Как же так?!

Скорость света  $C$  (так ее обычно обозначают) - вообще самая важная скорость в природе. Эксперименты говорят, что тела, движущиеся со скоростью много меньшей  $C$  (спутник вокруг Земли - скажем, 8 км/с), и тела, скорость которых сравнима с  $C$  (протон в ускорителе элементарных частиц  $V \cong 0.99C$ ) - движутся по разным законам. Спутник - по классическим законам Ньютона, а протон - по законам Ньютона, серьезно исправленным Эйнштейном.

### 0.11.3 МАТЕРИЯ

Так называют все, что нас окружает (и нас самих тоже).

**В87:** И пространство? И время?

**087:** Тут вопрос до сих пор открыт. Скажем, Ньютон (17-ый век) полагал, что пространство и время - что-то внешнее, нематериальное, просто в них - в пространстве и во времени происходит все то, что мы называем жизнь в широком смысле слова - жизнь человека, камня, Солнца... Существуют и другие точки зрения...

Наш опыт говорит нам то, о чем давно предупреждали умные древние греческие люди:

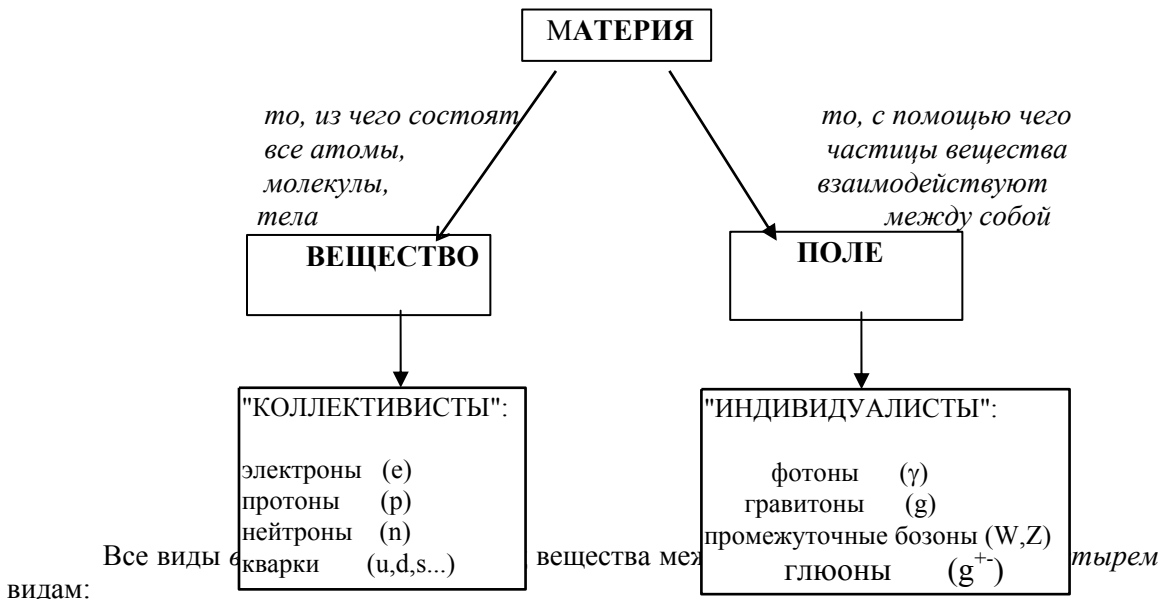
**все, что есть в мире, состоит из набора микрочастиц.**

Если эти микрочастицы собраны, грубо говоря, погуще, то они образуют *вещество* - твердое, жидкое или газообразное. Но все устроено природой еще и так, что *не любые* частицы *в принципе* могут собираться вместе, погуще. (Скажем, дирижер оркестра обречен на многолюдное регулярное общение. А композитор - наоборот: обычно работает в одиночку. На то есть свои понятные причины.) Но оказалось, что и в мире микрочастиц есть свои "коллективисты". Именно из них составляются отдельные атомы, из атомов - молекулы и макротела. Мы можем даже огласить практически весь список частиц, из которых построено *вещество* во Вселенной:

*электроны* (краткое обозначение: *e* с черточкой сверху), *протоны* (*p*), *нейтроны* (*n*) и *кварки* (несколько видов).

Другие микрочастицы играют во Вселенной другую роль. С их помощью частицы вещества взаимодействуют между собой. Если представить себе электроны, протоны, нейтроны и кварки в виде каких-то маленьких шариков (хотя это и не так!), то другие частицы - *фотоны*, *гравитоны*, *пионы* и *глюоны* - играют роль своеобразных пружинок или веревочек, или клея, передающего влияние одной частицы вещества на другую, одного атома на другой и даже одной звезды на другую. Набор этих других частиц образует то, что называется *поле*. В поле частицы расположены пореже, чем в веществе. Кроме того, все частицы, составляющие поле, являются индивидуалистами - не любят и даже не могут собираться вместе, в одном и том же состоянии.

Чтобы легче уложить весь этот набор имен в голове, нарисуем такую схему:



**ВИДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ:**



1. *Гравитационное* - притяжение всех частиц (и любых тел) друг к другу; "работает" на любых расстояниях"
2. *Электромагнитное* - оно отвечает за существование у тел формы, упругости и т.д. ; самое главное взаимодействие в нашем мире макротел
3. *Ядерное* - отвечает за взаимодействие частиц ядра, без него не было бы ядер атомов; заметно только на малых расстояниях - порядка размеров ядра.
4. *Слабое* взаимодействие - оно отвечает за превращение одной микрочастицы в другую; заметно лишь на ужасно малых расстояниях (даже меньше, чем у ядерного!)<sup>21</sup>
4. *Слабое* взаимодействие - оно отвечает за превращение одной микрочастицы в другую; заметно лишь на ужасно малых расстояниях (даже меньше, чем у ядерного!)<sup>22</sup>

-----  
**В88:** Какого порядка размер ядра (в см)?  
 -----

*Взаимодействие* - это примерно то же самое, что раньше называли *силой* (да и сейчас еще часто называют - по привычке). Так вот, считалось, что в природе есть довольно много разных сил:

сила тяжести (притягивает любое тело к Земле), упругая сила (не позволяет кружке с чаем проваливаться сквозь стол), сила сопротивления (помогает прыгать с парашютом и мешает быстро плыть в воде), электрическая (создает электрический ток), архимедова (выталкивает пробку из воды), трения - известна всем... Остановимся. Оказалось (размышления навели на предположения, подтолкнули к созданию теории, а опыты подтвердили), что все силы в принципе сводятся лишь к четырем основным (или фундаментальным). Их имена смотри выше.

-----  
**В89:** Сила трения - это на самом деле какая сила?  
 -----

**В90:** (Это трудный вопрос!) Архимедова сила - как ее истинное имя?  
 -----

**В91:** Загадка Корнея Чуковского (для тех, кто в детстве читал мало или невнимательно): *Две ноги на трех ногах, а четвертая - в зубах. Вдруг четыре прибежали и с одной убежали. Подскочили две ноги, подхватили три ноги, закричали на весь дом, да тремя по четырем!*

*Что это такое?*  
 -----

## 0.12 ЧЕМ ПОЛЬЗУЮТСЯ ФИЗИКИ В СВОЕЙ РАБОТЕ

<sup>21</sup> Строго говоря, физики установили, что электромагнитное и слабое взаимодействия можно считать двумя частными случаями одного взаимодействия - *электрослабого*. Более того, большинство специалистов уверены в том, что обоснование тройного объединения - электро-слабо-ядерного взаимодействия - вопрос только времени. А вот насчет присоединения к ним гравитации - вопрос, по меньшей мере, открытый. Может быть, кто-то из вас внесет кусочек ясности в этот вопрос?

<sup>22</sup> Строго говоря, физики установили, что электромагнитное и слабое взаимодействия можно считать двумя частными случаями одного взаимодействия - *электрослабого*. Более того, большинство специалистов уверены в том, что обоснование тройного объединения - электро-слабо-ядерного взаимодействия - вопрос только времени. А вот насчет присоединения к ним гравитации - вопрос, по меньшей мере, открытый. Может быть, кто-то из вас внесет кусочек ясности в этот вопрос?

-----  
**В92:** А что бы потребовалось Вам? Составьте список.  
 -----

### 0.12.1 ПРИБОРЫ

Поскольку главный физический судья - это опыт, то, прежде всего, позаботимся о том, что необходимо для эксперимента. Зачем нужны приборы? Можно сказать так: чтобы как-то "потрогать" исследуемый объект (электрон, атом, кристалл, воду, Луну...).

Но как можно потрогать Луну? Лучом света! Мы, например, знаем, что расстояние до Луны составляет  $(373.787.265 \pm 4)$  м. Как это узнали? Сначала доставили на Луну отражатель - кусочек металлического зеркала. А потом с Земли послали луч лазера, который дошел до отражателя и вернулся в приемное устройство. Зафиксировали время путешествия луча и, зная скорость света, посчитали расстояние. Как видите, это было сделано с громадной точностью - с точностью до 4 м! Обратите внимание на то, как мы записали этот результат - мы указали не только само расстояние, но и погрешность, с которой мы его получили. На самом деле такая запись означает следующее: мы (наш эксперимент) утверждаем, что расстояние до Луны находится в пределах от 373.787.261 м до 373.787.269 м. Результат любого эксперимента всегда указывается с погрешностью, потому что она - тоже следствие того, как был поставлен опыт: какой использовался лазер, как был установлен отражатель, даже какая была погода в момент опыта. Понятно, что по возможности стараются сделать несколько однотипных опытов, а потом усреднить их результаты.

-----  
**В93:** Что бы Вы сказали, если бы Вам предъявили такой результат измерения: длина ручки =  $(15,000 \pm 0,001)$  см? Измерьте длину Вашей пишущей ручки и укажите результат. Не забудьте про погрешность. Помните: погрешность указывает на пределы, в которых Вы *отвечаете* за правильность результата!  
 -----

**В94:** Иногда в работах моих учеников я встречаю такие ответы: длина прыжка кенгуру равна 11, 274844333 м. На вопрос - *Откуда такая точность?* - обычно следует ответ: *Это калькулятор сосчитал!* Как мне реагировать на такое заявление? Можно ли считать такой ответ в физической задаче правильным?  
 -----

**В95:** Кстати, если измерять расстояние с точностью до 4 м, то ни Землю, ни Луну нельзя считать материальными точками...  
 -----

**В96:** Помните, что такое материальная точка?  
 -----

**В95:** (*продолжение*) ...Но тогда от какой точки Земли до какой точки Луны было измерено расстояние?  
 -----

Как еще можно "потрогать" то, что изучаешь? Очень часто пользуются бомбардировкой объекта подходящими снарядами. Идея очень проста: если мы хотим выяснить, есть ли в стене окна, проще всего начать кидать в нее камни. Тогда даже в темноте и на большом расстоянии мы - по звону разбитого стекла или по комментариям обитателей дома - сможем получить ответ на наш научный вопрос. Кстати, если взять хорошие, круглые камешки, то долго кидая их в стенку, можно установить ее форму (если нам это интересно) и т.д.

Именно такова была идея классического опыта Эрнеста Резерфорда, когда он с 1908 по 1911 год бомбардировал листок золотой фольги (тонкий слой атомов) потоком т.н.  $\alpha$ -частиц. И обнаружил, что атом почти полностью пуст! Существует лишь ужасно *плотное* (99,95% массы всего атома!) и ужасно маленькое (с радиусом в 100.000 раз меньше, чем у атома) - *ядро*. Плюс набор легчайших частиц - электронов, "кружащихся" вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца.

Другой популярнейший способ "потрогать" с целью изучения - это, так сказать, "понюхать" объект - уловить его характерный "запах", точнее - его индивидуальное излучение. И по виду этого излучения установить: из чего состоит предмет X, сколько в нем чего, каковы параметры вещества (температура, состояние...). Необходимый для этого "нос" называют *спектрометром*, потому что он дает возможность получить *спектр* данного вещества.

Еще один способ изучения - "подогрев" того, что нас интересует. Каким образом психолог распознает натуру человека? Часто он задает вопросы, провоцирующие объект на такое поведение, которое он в обычной ситуации скрывает, контролирует себя. А уже из анализа поведения можно сделать нужные выводы: нетерпелив, честолюбив, аккуратен, любит делать поспешные выводы, но обаятелен... То же самое можно сделать с микрочастицей в ускорителе: при обычных скоростях и энергиях протон совсем не так интересен, как после того, как его миллион раз прогонят по кругу километрового радиуса.

Мы вовсе не исчерпали все методы физического эксперимента, но мы и не ставили перед собой такую задачу.

### 0.12.2 МАТЕРИАЛЫ

Под материалами мы имеем в виду не только то, что мы изучаем. Понятно, что кристалл кремния совершенно необходим при изучении его способности проводить электрический ток. И здесь очень часто проблема состоит в получении очень "чистого" объекта. Физикам известны многие случаи, когда присутствие одного постороннего атома среди ста тысяч основных меняет способность материала проводить ток в сто тысяч раз! А иногда необходимо наоборот - чтобы считанное число чужих атомов расположилось нужным образом среди тьмы основных.

Такие сильные требования вызвали даже появление еще одной разновидности физиков - появились физики-технологи, они изготавливали структуры со свойствами, которые им заказывали физики-экспериментаторы. А те, прежде, чем принять решение, советовались с теоретиками.

Но материалы - это и более простые вещи: проволока, азот, гелий, вода...

### 0.12.3 КОМПЬЮТЕР

Совсем недавно (я успел застать это время) компьютер (его тогда называли ЭВМ - электронная вычислительная машина) был инструментом не физиков, а программистов. По крайней мере, стояли эти шкафы не в лаборатории и, разумеется, не дома, а в специальном помещении, которое называлось Вычислительным Центром...

Точно известен день и место рождения персонального компьютера: 26 мая 1977 года двадцатипятилетний прожженный хиппи Стивен Джобс и математический вундеркинд Стефан Возняк двадцати одного года от роду в чужом гараже повернули тумблер включения того, что они назвали *Apple I*...

Некоторое время назад присутствие нескольких персоналок в одной комнате (наряду с экспериментальными установками) было признаком того, что здесь занимаются физикой. Сегодня персоналки - скорее признак офиса, школы, завода...

Что такое компьютер для физика? Мощный калькулятор? Конечно. В ряде случаев, особенно в ядерной физике, без его *вычислительной поддержки* просто не обойтись. Но

не только. Компьютер бывает необходим для управления приборами в момент сложного опыта, тогда, когда человек не успевает, не может "разорваться", не имеет доступа внутрь происходящего. И это называется *автоматизация эксперимента*.

Часто, вместо реального эксперимента, создают его математическую модель и "проигрывают" ее в компьютере - это называется *компьютерное моделирование* физических процессов. При этом возникает возможность медленно и подробно рассмотреть такие детали эксперимента, которые ускользают в настоящем опыте. Можно сказать, что компьютер выступает в роли управляемого "оживителя" происходящего.

Но возможно самое главное по поводу компьютера высказал не физик, а знаменитый писатель, Габриэль Маркес: "*Это совсем другой стиль творчества.*" А один физик добавил: "*Это совсем другой стиль жизни.*" (Может быть, не очень понятно, но точно.)

#### 0.12.4 РУЧКА, БУМАГА, ДОСКА

Зачем все это при наличии компьютера? (Уже появились вполне карманные - или, как минимум, внутрисумочные - компьютеры-блокноты.) Среди физиков стала популярной фраза: "Давненько я не брал в руки ручки..." Не будем спорить: все возможно. Но пока трудно представить себе физика без бумаги и ручки. Привычка? Может быть... По моим наблюдениям физики до сих пор чаще всего свои расчеты ведут на бумаге. А слова можно набрать и на клавиатуре. Впрочем, за всех не поручусь.

То же самое касается и доски с мелом. Во-первых, она уже во многих случаях не с мелом, а с фломастером. Во-вторых, на семинарах и совещаниях чаще пользуются прозачками и проектором. В-третьих, всех их уже вытесняет дискета с ноутбуком.

Однако, как именно работает физик? По-разному. Чаще всего - как говорят социологи, в малых группах: вдвоем, втроем - встречаются в назначенное время, разговаривают, пользуются доской - так удобней!, проводят так час, два, пять часов, пьют чай или кофе, снова расходятся, иногда на неделю, чтобы поработать это время в одиночку: теоретик - дома, экспериментатор - в лаборатории. Экспериментаторы, работающие над одной проблемой, обычно образуют группу: чаще всего из двух человек - старшего и младшего, но бывают группы в пять-шесть сотрудников - все зависит от области физики и от задачи. Семинары, где кто-то рассказывает о своих или чужих, но чем-то интересных результатах - тоже элемент работы физика. Это не только набор информации, но и способ поддержки своих мозгов в форме. И потом бывают идеи и решения, приходящие по аналогии, из других задач, областей и даже наук. Я не говорю о собственных выступлениях и подготовке публикаций. Не только ты должен знать научный мир, но, по возможности, и он тебя.

-----  
**В97:** Каков же главный инструмент физика?

**О97:** Правильный ответ: голова. Но следующее по значимости - сидячее место.  
 -----

#### 0.12.5 КНИГИ, ЖУРНАЛЫ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ

Большинство физиков много читает. Обычно они имеют привычку держать много книг даже дома. В том числе и по физике. У меня есть книги, которые я впервые попробовал читать, еще когда учился в школе, прочитал впервые - в университете, а пользуюсь для уточнения - до сих пор. Важно понимать, что практически нет

универсальных учебников - таких, которые годятся для любого человека.<sup>23</sup> Но: всегда можно найти (подобрать) книгу, подходящую именно для Вас. Более оперативная и специализированная информация есть в журналах. Правда, сегодня ее (информацию) чаще выуживают из Интернета. Но для этого тоже должна быть привычка: регулярно (раз в неделю?) проверять соответствующие сайты, просматривать новые номера журналов - как большинство населения следит за программой телепередач или прогнозом погоды.

Важно отметить, что есть два этапа обучения: через усвоение "чужой", не тобой полученной информации (чтение, слушание, обсуждение) и через создание собственной, полученной уже тобой (размышление над увиденным и услышанным, переработка его).

Как минимум, следует четко понимать, что:

- почти всегда можно найти соответствующую (проблеме) книгу (статью, заметку);
- при должной настойчивости ней можно разобраться.

-----

**В98:** Как практически отлить ровно половину из бутылки Cola или Pepsi? Оцените точность такой операции теоретически. Проведите эксперимент и сравните его результат с теоретическим.

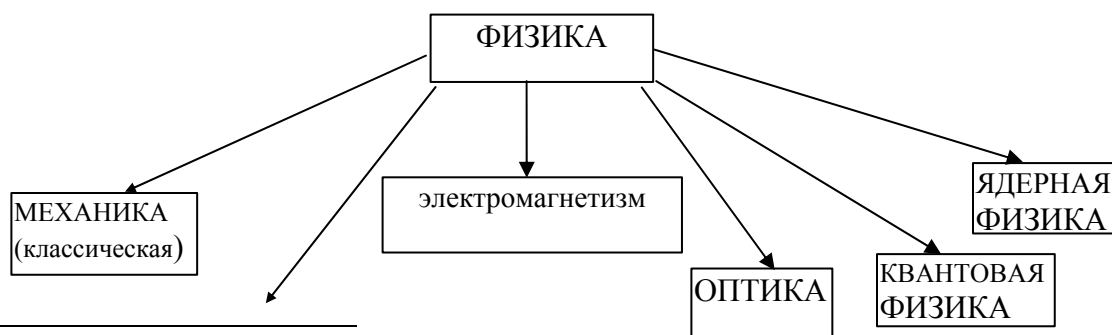
-----

**В99:** Винни-Пух и Пятачок отправляются на загородную прогулку и берут с собой кое-что перекусить. Проблема в том, что Винни любит салат с уксусом, а Пятачок - с оливковым маслом. Но две бутылки они брать не хотят - тяжело. Как им поступить?

### 0.13

### ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ ФИЗИКА

Был в истории Европы такой замечательный период (с 14 по 16 век), когда человечество "рвануло" (за триста лет!) из Средневековья в Новое время. Этот период называется Возрождение (Ренессанс). Так вот, даст ли Вам что-то новое такая информация: Возрождение условно делится на Раннее, Высокое и Позднее - ? Сомневаюсь. Тем не менее, скажу, что по традиции и договоренности, т.е. *условно*, физика делится на отдельные области, имеющие свое название, свои задачи, часто свои методы (и обычно - свои экзамены):



<sup>23</sup> Возможное исключение - третий том курса Ландау и Лифшица - для любого физика-теоретика.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
------------------------

Классическая механика изучает движение макроскопических тел, а квантовая теория - движение микрочастиц. Молекулярная физика интересуется тепловыми явлениями, а оптика - поведением и природой света. Что касается электромагнетизма и ядерной физики - то здесь все понятно из названия.

Что касается Возрождения, то возможно о нем больше скажет перечень имен тех людей, которые творили в этот период: Рабле, Шекспир, Сервантес, Эразм, Монтень, а также - Леонардо, Рафаэль, Микельанджело, Дюрер, Брейгель...

А вот типичные *примеры задач*, которые рассматривают в физике:

- Как высоко полетит камень, брошенный вверх? Когда он упадет?
- Через какое время остынет (до комнатной температуры) чай, налитый в чашку?
- Какой массы бумажку можно поднять расческой, потертой о волосы?
- Почему бассейн нам кажется мельче, чем он есть на самом деле?
- Почему электрон не падает на ядро?
- Как ядро может излучать электроны, если они не входят в состав ядра?

-----  
 Теперь отдохнем:

**В100:** Полисмен остановил мотоциклиста, проехавшего 30 миль за 30 минут. "Я вынужден тебя оштрафовать за превышение разрешенной скорости 70 миль в час. Мне особенно жаль это делать, потому что ты - мой сын, хотя я - тебе не отец.". И полисмен выписал квитанцию....

Как такое могло быть?