

Законы Физики

- Как работают законы физики? - Блестяще.
- Как эти законы контролируют объекты Вселенной? - Никак.

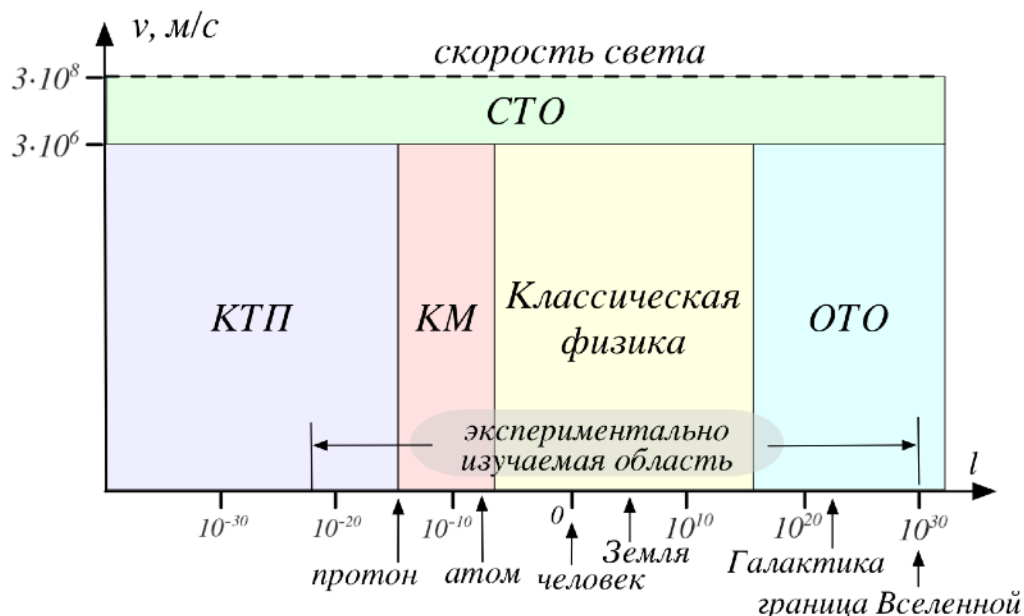
Мы все живем по собственным законам.
По вечным нормам чести и любви ...
Андрей Дементьев

Мы с вами поговорили о многих разделах физики. В каждом из них есть свои постулаты, теории и законы. Настало время упорядочить на бумаге и (надеюсь) в голове структуру этого всего физического "хозяйства".

Вся концепция физики как науки строится на предположении, что *мы не можем познать суть нашего мира такой, как она есть "на самом деле"*¹. Мы только лишь пытаемся осознать как устроен мир, причем не имея возможности осознать это напрямую, идем методом последовательных приближенных моделей: наблюдаем, экспериментируем, накапливаем данные, анализируем их и пытаемся обобщить и угадать какая модель могла бы дать такой результат. Потом на основе этой модели делаем предсказание и проверяем его экспериментально. Если работает, то модель принимается в качестве теории. Но мы на этом не останавливаемся, а продолжаем делать эксперименты, все более сложные и изощренные. В какой-то момент мы понимаем, что наша модель больше не работает, то есть мы нашли *границы её применимости* и, чтобы идти дальше, нам нужна новая модель, более тонкая, которая объяснила бы новые эффекты, *но при этом для старых результатов давала бы тот же ответ, что и старая теория*. Причем мы ничего не открываем, а именно угадываем и проверяем правильно ли мы угадали!

В итоге, для того, чтобы двигаться вперед нужны две вещи: накопленный экспериментальный материал и догадка как нужно математически описать модель, чтобы объяснить этот материал. Причем иногда догадка предшествует эксперименту, что никак не влияет на результат...

Давайте взглянем на главные теории-модели современной физики.



На картинке по осям в логарифмической шкале отложены размеры исследуемых физических объектов и скорости их движения: именно по этим двум параметрам можно классифицировать теории-модели современной физики.

¹ Формулировка "на самом деле" относится скорее к философским и теологическим категориям.

В центре на законном основании "восседает" **Классическая Физика**. Именно с неё всё и началось. Ниже мы подробно поговорим о её постулатах и структуре законов.

Развиваясь, Классическая Физика вдруг обнаружила на своих передовых рубежах явления, которые никак не могла объяснить: постоянство скорости света вне зависимости от скорости движения источника, "ультрафиолетовую катастрофу" при излучение тел, прецессию (вращение) орбиты движения Меркурия вокруг Солнца. И другие.

И объяснение этих явлений потребовало создания новых теорий-моделей:

- постоянство скорости света постулировано в **Специальной Теории Относительности** (СТО);
- полное объяснение излучения тел описывается в **Квантовой Механике** (КМ);
- прецессию орбиты Меркурия объяснила **Общая Теория Относительности** (ОТО).

Специальная Теория Относительности² постулировала а) постоянство скорости света вне зависимости от скорости движения источника-приёмника и б) скорость света как максимально возможную скорость движения материальных тел и в) по-новому взглянула на пространство-время. И стала описывать движение тел с околосветовыми скоростями. Проявляющиеся при этом эффекты увеличения массы тела, уменьшение его линейных размеров, замедление хода времени и другие полностью подтвердились многими экспериментами. Все эти эффекты присутствуют и при движении тел с малыми скоростями, но величиной их за малостью можно просто пренебречь.

Квантовая Механика³ постулировала дискретность значений энергии-импульса на уровне микро-мира. И стала описывать поведение элементарных частиц. С описанием наблюдаемых явлений и точным предсказанием еще не открытых.

Общая Теория Относительности⁴ кардинально изменила взгляд на пространство-время, показав, что масса и энергия изменяют его **геометрию**. ОТО стала инструментом астрофизических исследований.

По мере развития Квантовой Механики пришлось ещё раз пересмотреть базовые принципы - появилась **Квантовая Теория Поля** (КТП). Основная её идея: элементарные частицы - это всего-лишь локальные возбуждения и колебания различных полей микро-микро-мира. А поскольку современным экспериментальным установкам не хватает энергии для "проникновения" на расстояния менее 10^{-20} метра, то исследования КТП ведутся теоретически с использованием "головоломных" математических методов.

Ещё раз подчеркну - нет никакой "кирпичной" стены на стыке этих теорий-моделей. Да и само понятие границ между ними условно и размыто. Главный критерий того, какую теорию нам использовать - какими эффектами мы можем пренебречь: искривление пространства вследствие присутствия в данной его точке электрона (эффект ОТО) исчезающе мал, увеличение массы мальчика при спуске на санках с горки (эффект СТО) исчезающе мало, дискретность энергии камня, брошенного под углом к горизонту (эффект КМ) исчезающе мала.



² Смотри Историю про Гравитацию.

³ Смотри Историю про Атом.

⁴ Смотри Историю про Гравитацию.

➔ О законах Классической Физики

Поговорим о законах Классической Физики, которую мы знаем лучше остальных физических теорий. Границы её применимости: расстояния от $\sim 10^{-8}$ до $\sim 10^{15}$ м и скорости $\ll c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Основные постулаты классической физики⁵:

- пространство и время существуют отдельно друг от друга и не имеют прямой зависимости от материальных тел, которые в них находятся;
- процессы взаимодействия между объектами физического мира происходят мгновенно;
- все измерения параметров движения и взаимодействия можно провести с любой точностью;
- инертная и гравитационная массы равны.

Вот разделы Классической Физики:

- Классическая Механика
- Термодинамика
- Электричество и Магнетизм
- Оптика

Удивлю ли я вас, если скажу, что вся Классическая Физика основана на шести фундаментальных уравнениях? Вот они.

$$m \cdot \vec{a} = [m \cdot \vec{g} + q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B}]$$

2-й закон Ньютона
сила тяжести
сила Кулона
сила Лоренца

$$F = G \frac{m \cdot M}{r^2} \quad - \text{закон всемирного тяготения}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot Q; \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0;$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s};$$

$$\frac{1}{\mu_0} \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = I + \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- уравнения Максвелла

Все остальные уравнения Классической Физики выводятся из них. Давайте разбираться подробнее.

- ➔ Первое уравнение представляет собой Второй закон Ньютона и все виды сил, действующих в Классической Физике.

На сегодняшний день физики признают наличие в природе **только четырех видов** взаимодействий (сил): гравитационное, электромагнитное, слабое ядерное и сильное ядерное взаимодействия. Последние два вида относятся к микромиру и в Классической Физике не рассматриваются.

Вот в первом уравнении и перечислены все виды сил, действующих в Классической Физике: сила тяжести (гравитационная сила), силы Кулона и Лоренца (электромагнитные силы). И это уравнение описывает действие этих сил на движение тела в форме Второго закона Ньютона.

⁵ Эти постулаты не были сформулированы конкретно - они подразумевались. Но без них здание Классической Физики развалилось бы.

Термодинамика - это статистическое рассмотрение поведения большого ансамбля частиц (молекул газа). А в качестве физической основы взаимодействия частиц использованы законы Ньютона.

➔ Второе уравнение представляет собой закон всемирного тяготения в чистом виде.

Здесь надо сделать пару замечаний.

Во Втором законе Ньютона масса m фигурирует как коэффициент пропорциональности между силой, действующей на тело, и ускорением, которое тело приобретает вследствие действия этой силы. И поэтому массу объявляют мерой инертности тела. В законе всемирного тяготения масса m фигурирует уже как мера гравитационного взаимодействия тела. **А кто сказал, что эта одна и та же масса?** Когда мы применяем Второй закон Ньютона для тела, движущегося под действием только силы тяжести, мы записываем $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$ и, не особо задумываясь, молчаливо подразумеваем равенство инертной и гравитационной масс и сокращаем m в уравнении. И только Эйнштейн, обдумывая свою Общую Теорию Относительности, провозгласил это равенство как постулат и сформулировал свой принцип эквивалентности. К настоящему времени равенство инертной и гравитационной масс экспериментально подтверждено с относительной точностью 10^{-14} .



А вы замечали, что масса как независимая физическая величина фигурирует лишь в двух формулах Классической Физики: во Втором законе Ньютона и в законе всемирного тяготения?



"Позвольте, а уравнение состояния идеального газа $pV = \frac{m}{\mu}RT$, а формула теплообмена $Q = c \cdot m \cdot \Delta t$ или плавления-кристаллизации $Q = \lambda \cdot m$?" - вдумчивый ученик на боевом посту.

Взгляните внимательно. В этих уравнениях-формулах масса m встречается рядом с удельными коэффициентами. То есть с коэффициентами, выраженными на единицу массы. Так в уравнении состояния идеального газа присутствует не просто масса, а величина $\frac{m}{\mu}$, которая является не чем иным, как количеством молей вещества (по сути - количеством молекул газа). Поэтому масса здесь не играет своей физической роли - она присутствует лишь для пересчёта.

➔ Третья группа из четырёх уравнений Максвелла - это вся электродинамика.

Электродинамика Максвелла прекрасно описала собственно электродинамические явления. Но, показав, что свет является электромагнитной волной, она сделала Оптику своим подразделом. Все описания оптических явлений (распространение, отражение и преломление света, интерференция и дифракция) выводятся из уравнений Максвелла. Вот яркий оптический пример: показатель преломления среды $n = \sqrt{\mu \cdot \epsilon}$ напрямую связан с электромагнитными характеристиками среды (μ - магнитная и ϵ - диэлектрическая проницаемости).



Из всего сказанного можно сделать вывод: законы Ньютона, закон всемирного тяготения и законы электродинамики являются **фундаментальными законами Классической Физики**. Все её остальные законы выводятся из этих фундаментальных.

Можно сформулировать *свойства - признаки фундаментальных законов*⁶:

- фундаментальных законов немного;
- они оперируют абстрактными понятиями (масса, поле и т.д.);
- они математически просты;
- их уравнения математически точны;
- они описывают все явления в рамках данной теории;
- из их уравнений выводятся все остальные уравнения теории.



"А откуда же берутся законы сохранения?"
Хороший вопрос. Законы сохранения - это отдельная история.

➔ Законы Сохранения⁷

Даже если вы и не очень продвинутый физик, а всего лишь наблюдательный человек, то могли бы заметить некоторые общие свойства нашего мира.

Вот сегодня утром вы бросали в пруд камешки и любовались расходящимися по воде кругами. Потом вы повторите эти же действия завтра, а заодно вспомните как делали то же самое в прошлом году. Общая физическая картина будет одинакова. То есть и сегодня и завтра и год назад физические законы будут проявляться одинаково. Вне зависимости от момента времени их проявления. Физики считают это свойство нашего мира очень важным и назвали его *свойством однородности времени*.

А вот опять сегодня утром вы бросали в пруд камешки в деревне у бабушки. А после обеда вы с родителями поехали к друзьям в другой город. Там тоже есть пруд и вы бросали камешки в него. А через неделю, вернувшись домой, вы уже бросаете камешки в пруд возле вашего дома. Общая физическая картина опять будет одинакова. То есть и у бабушки и в другом городе и дома физические законы будут проявляться одинаково. Вне зависимости от места их проявления. Физики считают и это свойство нашего мира очень важным и назвали его *свойством однородности пространства*.

Не буду больше рассуждать про бросание камешков в пруд, а скажу, что при внимательном рассмотрении нашего мира выяснятся ещё несколько фундаментальных его свойств:

Свойство изотропности пространства - одинаковость свойств пространства по всем направлениям. То есть если вы повернёте физическую систему на любой угол, то это не изменит её физических свойств.

А вот есть ещё и такое свойство - *калибровочная инвариантность*. Несмотря на устрашающее название, его приближённо можно описать как неизменность физических свойств системы при повороте её на угол 360 градусов.

Эти свойства нам пока ещё интуитивно понятны и мы с ними внутренне согласны. Но физики пошли дальше и обнаружили ещё целый ряд свойств, которые невозможно представить "здоровым смыслом": *изотопическая инвариантность*, *CPT-симметрия* и пр.

⁶ Эти свойства распространяются и на фундаментальные законы других теорий-моделей (не только Классической Физики).

⁷ О них подробно говорилось в *Истории про Законы Сохранения*, но тут не грех и повторить.

Все эти свойства объединены общим понятием **симметрии**. Они прекрасно описываются математически. Они являются самыми фундаментальными физическими свойствами нашего мира. И проверены они были экспериментально многократно.

Бурный всплеск интереса к симметриям приключился у физиков в начале 20-го века в связи с появлением Специальной и Общей Теорий Относительности и Квантовой Механики. Физики поняли, что симметрии играют ключевую роль в физике. И апофеозом интереса к симметриям стало доказательство немецким математиком Эмми Нётер⁸ в 1918 году удивительно красивой и фундаментальной теоремы - **теоремы Нётер**. В доказательстве теоремы задействована весьма высокая математика, которую никак не описать словами.



Суть этой теоремы заключается в следующем: **каждому виду симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения.**

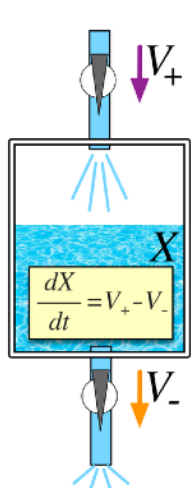
Это - общая формулировка. Конкретнее **теорема Нётер** показала как из каждого конкретного вида симметрии вытекает свой закон сохранения. И вот табличка-результат.

<i>Вид симметрии</i>	<i>Соответствующий закон сохранения</i>
однородность времени	закон сохранения энергии
однородность пространства	закон сохранения импульса
изотропность пространства	закон сохранения момента импульса
калибровочная инвариантность	закон сохранения электрического заряда

А поскольку, как я сказал выше, физики обнаружили ещё несколько видов симметрий, то теорема Нётер "нашла" законы сохранения и для них. Эти законы сохранения относятся к микро-миру и я не буду их здесь приводить.

Конечно, законы сохранения были известны и раньше, но природа их оставалась загадочной - они ниоткуда не выводились, а просто постулировались. Теорема Нётер сняла покров с этой загадки, связав законы сохранения с симметриями пространства и времени.

Ведь неожиданно, интересно и здорово!



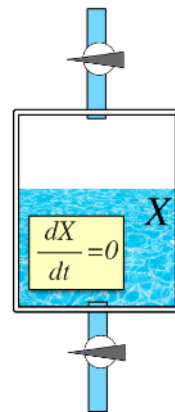
Законы сохранения можно образно представить себе как некий резервуар, хранящий в себе физический параметр X (импульс, энергию, заряд, ...). Предположим, что в этот резервуар по одной "трубе" этот физический параметр "наливается" со скоростью V_+ , а по другой "трубе" он "вытекает" со скоростью V_- .

Тогда можно записать уравнение, описывающее скорость изменения количества параметра X в резервуаре: $\frac{dX}{dt} = V_+ - V_-$. То есть скорость изменения количества параметра X в резервуаре равна скорости "наливания" минус скорость "вытекания". И такую формулу можно назвать **законом изменения параметра X** .

⁸ Эйнштейн считал Эмми Нётер наиболее значительной женщиной в истории математики.

А теперь перекроем "крантики" на обеих трубах (скорости "наливания" - "вытекания" обратятся в ноль) - получим **закон сохранения параметра X**:

$\frac{dX}{dt} = 0$. Поговорим о некоторых конкретных законах сохранения.



Закон сохранения энергии

Теорема Нётер утверждает, что *для физической системы, в которой реализуется симметрия однородности времени и которая является изолированной по энергии, полная энергия системы сохраняется.*

Про однородность времени мы уже говорили. А что такое "изолированная по энергии система" (или говорят "замкнутая по энергии система")? А это значит, что "крантики" энергии в этой системе-резервуаре перекрыты: энергия не поступает в систему и не уходит из неё. Причём эта же система может быть **не изолированной по импульсу, заряду и пр.** И в такой системе полная энергия сохраняется - не изменяется. То есть *энергию нельзя создать с помощью импульса, заряда и пр.*

А что такое "полная энергия системы"? Мы знаем, что энергия может существовать в разных формах - физических воплощениях: механической, тепловой, электромагнитной, гравитационной, ядерной, химической. Полная энергия системы есть сумма энергий системы всех форм. Закон сохранения энергии говорит, что сохраняется именно полная энергия-сумма. При этом он не запрещает энергии внутри системы переходить из одной формы в другую. Главное - сумма не изменяется!

Если мы, например, знаем дополнительно, что в *данной системе присутствует механическая энергия и она ни в какие другие формы энергии не переходит, то мы говорим о законе сохранения механической энергии в данной системе.* Это уже будет закон сохранения частной формы энергии.

Закон сохранения электрического заряда

Теорема Нётер утверждает, что *для физической системы, в которой реализуется симметрия калибровочной инвариантности⁹ и которая является изолированной по заряду, алгебраическая сумма зарядов системы сохраняется.*

Некоторая перефразировка закона сохранения электрического заряда звучит так: "Не существует процесса, в котором можно затратить энергию и в результате создать заряд". Заряд нельзя создать ни из массы, ни из энергии, ни из импульса.

Всем физикам-ядерщикам хорошо знакома реакция: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + e + \nu$ - свободный нейтрон (не заключённый в атомном ядре) превращается в среднем через 900 секунд в протон, электрон и нейтрино. Был нейтрон с электрическим зарядом 0 и превратился в протон с электрическим зарядом +1, электрон с электрическим зарядом -1 и беззарядовое нейтрино. До реакции сумма зарядов равнялась нулю, после реакции сумма зарядов тоже равняется нулю. Закон сохранения электрического заряда работает.



Но если в один ужасный день физики-ядерщики на своих чудо-ускорителях зарегистрируют реакцию ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + 2e + \nu$, то это будет катастрофа - придётся кардинально пересматривать все физические устои.

Но законы сохранения "твёрдо стоят на защите рубежей своей физической родины".

⁹ Понятно, что для вас "калибровочная инвариантность" - некая абракадабра, но тем не менее это - условие.

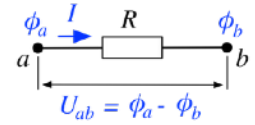
→ Эмпирические законы



"Давно хотел спросить: а откуда выводится Закон Ома?" Опять хороший вопрос.

Давайте вспомним как звучит Закон Ома в школьных учебниках.

Сила тока I , текущего по металлическому проводнику в однородной цепи (не содержащей источников ЭДС), пропорциональна напряжению U_{ab} на концах проводника: $I = \frac{1}{R} U_{ab}$, где R - электрическое сопротивление проводника.



Но при протекании тока I через проводник с сопротивлением R на этом проводнике выделяется тепловая мощность $W = I^2 \cdot R$, которая частично рассеивается в пространство, а частично идёт на нагрев проводника. Значит температура проводника повышается. А как зависит сопротивление проводника от температуры? С увеличением температуры сопротивление проводников возрастает, а с понижением уменьшается. Для всех проводников из металла это изменение сопротивления почти одинаково и в среднем равно 0,4% на 1°C. А точнее - есть формула $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$, где R_0 - сопротивление проводника при температуре $t = 0^\circ\text{C}$, α - температурный коэффициент сопротивления.

То есть, если мы увеличим напряжение на концах проводника, то по Закону Ома должен пропорционально возрасти ток. Но возрастание тока приводит к нагреву проводника, а значит - к увеличению его сопротивления, а значит - к уменьшению тока. Ой! Возрастание тока приводит к его уменьшению! Налицо явно какая-то нелинейность в Законе Ома.

И ещё. Абсолютно химически чистых проводников не бывает. В них всегда есть примеси. Примеси других металлов-проводников и примеси полупроводников. А полупроводники могут вести себя отнюдь не линейно при протекании в них тока.

Короче - куда я клоню? Я хочу сказать, что корректнее Закон Ома формулировать так:

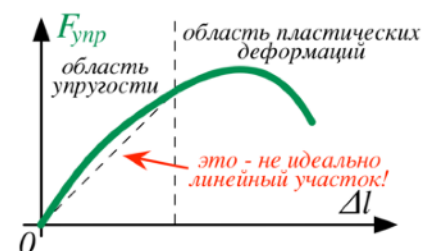
Сила тока, текущего по металлическому проводнику в однородной цепи, примерно пропорциональна напряжению на концах проводника в узком диапазоне температур проводника.

То есть Закон Ома - *приблизительный*¹⁰. И, отвечая на твой вопрос, вдумчивый ученик, скажу - **Закон Ома не выводится из фундаментальных законов физики. Он - эмпирический**, то есть получен опытным путём. Кстати, закон изменения электрического сопротивления при изменении температуры $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$ - тоже эмпирический.

Другим подобным примером является Закон Гука: Для упругих линейных деформаций сила упругости: $F_{упр} = k \cdot \Delta l$, где Δl - удлинение тела относительно нерастянутого состояния, k - коэффициент жесткости. k определяется опытным путем.

Дело в том, что в области упругих деформаций зависимость силы упругости от удлинения тела лишь **примерно** линейная.

И Закон Гука тоже **не выводится из фундаментальных законов физики. И он тоже - эмпирический.**



¹⁰ Что не мешает им пользоваться во многих приложениях. Просто надо отдавать себе отчёт в том, что в некоторых ситуациях он перестаёт точно выполняться.

И в физике масса таких эмпирических законов. Они отражают зависимости, основанные на экспериментальных данных и позволяющие получить приблизительный результат. Такие зависимости легко запоминаются и дают возможность обходиться без сложных измерений.

Можно сформулировать и **свойства - признаки эмпирических законов**:

- они описывают узкий класс физических явлений;
- они не выводятся из фундаментальных законов - они основаны на экспериментальных данных;
- их много и они наглядны;
- они математически просты и их уравнения приблизительны;
- в них присутствуют эмпирические коэффициенты.

➔ А вот и схема ...

Ну а теперь уже можно обобщить.



Вот я нарисовал схему Законов Физики. Она подробно расписывает структуру законов Классической Физики. Конечно, и у Квантовой Механики, и у Квантовой Теории Поля, и у Специальной и Общей Теорий Относительности есть свои Постулаты, Фундаментальные и Эмпирические законы. Законы Сохранения, выводимые из различных свойств Симметрий, являются **универсальными** - общими для всех теорий-моделей.



