

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Курс лекций для ММФ

А.А. Васильев, А. П. Ершов

1 семестр

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Введение. ПРЕДМЕТ ФИЗИКИ

20 августа 2006 г.

Глава 1

ПРЕДМЕТ ФИЗИКИ

Мы приступаем к изучению физики. Эта обширная и развивающаяся наука не может быть определена кратко, в немногих словах, если мы хотим сохранить сколько-нибудь вразумительности. Например, если сказать, что физика суть базовая наука о природе, это будет выглядеть внушительно, но туманно. Поэтому вместо определения мы начнем с приблизительных пояснений. Возможны несколько способов такого предварительного обозначения физики.

В рамках **описательной схемы** можно понимать физику как совокупность основных разделов, которые обыкновенно перечисляют в исторической последовательности:

1. Механика.
2. Теплота и молекулярная физика.
3. Электродинамика.
4. Волновая физика и строение вещества.

Разумеется, между разделами нет жестких границ. Движение молекул – это, безусловно, механика¹. Оптика принадлежит и электродинамике, и волновой физике. Многие приемы, развитые для одного раздела физики, впоследствии пригодились для других (самый яркий пример – теория колебаний).

Основы **механики** заложили Галилей и Ньютон еще в XVII веке. Хотя современный вид эта наука приобрела в XVIII – XIX веках (Лагранж, Гамильтон), это было в основном развитие форм, методов и приемов. Механикой занимаются и до сих пор: есть сложные задачи, есть еще нерешенные, есть и такие, которые вряд ли удастся решить в обозримом будущем. Но все они в принципе уже содержатся в законах Ньютона. Успехи механики в некотором роде делают ее образцом: когда становится понятным некое явление, мы говорим, что выяснили его механизм. Механика сейчас – в большой мере математическая дисциплина, что явствует и из названия ММФ.

¹Хотя классическая механика годится не всегда.

Молекулярная физика создана в основном в XIX веке. Такая задержка вызвана тем, что объекты «теплоты» более сложны и часто плохо доступны восприятию. Вначале появилась идея тепла как неосязаемой жидкости, которая как бы плещется в нагретых кирпичах и может перетекать из одного в другой. Прорыв начался, когда была осознана идея молекулярной структуры вещества, и возникла перспектива свести теплоту к механике. Этот путь привел к частичному успеху. Например, про горячее тело мы уже думаем не как бывало, что в нем избыток теплорода, а что его молекулы быстро движутся (имеют много кинетической энергии). Но выявились проблемы следующего уровня, например свечение нагретых тел. Выяснилось, что в таких задачах классическая механика совершенно не работает.

Электродинамика – это еще более позднее достижение (конец XIX века). Выяснилось существование в природе не только тел, но и новых объектов – полей. Удалось отчасти понять, из чего состоят молекулы и что скрепляет их. Мы уже не умеем жить без электрического освещения, электромоторов, сотовых телефонов и пр. Но оставалась еще проблема, вполне грубая и зримая. Почему любой предмет делится на части только до масштаба порядка 10^{-8} см, а не дальше? Откуда взялся этот размер, который мы называем атомным?

И, наконец, в начале XX века возникли **квантовая механика** и **теория относительности**. Эти теории произвели своего рода синтез. Удалось расширить все предыдущие разделы и найти глубокие связи между ними. Сейчас понятна природа абсолютного большинства явлений, которые в жизни человека сколько-нибудь важны. Для практики человечества умения конструировать ядерные реакторы и водородные бомбы совершенно достаточно (а многие скажут, что это и больше, чем хотелось бы). Успехи физики позволяют подступиться и к задачам следующего уровня – химическим (как идут реакции, как сделать нужное вещество) и биологическим (наследственность). Чтобы найти вопрос, физикам принципиально не ясный, надо выйти за пределы нашего опыта достаточно далеко: возникновение и судьба Вселенной, строение элементарных частиц.

Специальная, или частная, теория относительности – уже привычный рабочий инструмент физиков. Общая теория относительности, описывающая гравитационные поля, несомненно, дальше от завершения (как и от практических потребностей). В последние десятилетия быстрый прогресс квантовой механики привел к появлению квантовой информатики. Парадоксы квантовой механики, которые считали чистой игрой ума, привели к возникновению идеи квантовых компьютеров, которые потенциально способны к решению так называемых NP-проблем.

Продолжением знакомства с предметом физики, начатого в этом предисловии, будут последующие три вводных параграфа. Пока что отметим, что в нашем курсе не будет раздела «Механика», поскольку теоретическая механика на ММФ излагается отдельно в достаточном объеме. Мы, однако, будем при необходимости ссылаться на этот курс. Некоторые термины (как нейтрино, электрон, ядро) ниже будут употребляться без

разъяснений, в предположении, что они, хотя бы туманно, известны даже начинающему из общего культурного контекста. Многие определения будут очевидно нестрогими, а разъяснения – неполными, что также извинительно на данной стадии.

1.1 Частицы. Поля. Волны. Фундаментальные взаимодействия. Состояния вещества

Другой способ выделить в окружающем мире физику – это обозначить ее предмет. На некотором уровне можно считать объектами физики частицы и поля.

Частицы для начала мы можем понимать как некоторое обобщение знакомых из механики «материальных частиц». Частицами являются, например, электроны, протоны, атомы, молекулы и любые агрегаты, состоящие из вышеназванных вещей (дробинки или крупинки сажи). Если размеры агрегата становятся существенными, уже говорят не о частицах, а о телах, и их движение становится предметом механики. В физике важное значение имеют **элементарные частицы**, часто именно они и подразумеваются, когда говорится о частицах «просто». Вначале полагали, что элементарные частицы – это простейшие детали более сложных образований (атом водорода состоит из электрона и протона, а электрон и протон уже на части не делятся). Теперь про части электрона по-прежнему ничего не известно, а протон считается состоящим из «более элементарных» кварков. Тем не менее за протоном сохраняется немалая часть его репутации в отношении «элементарности», поскольку он все же есть деталь атома и поскольку освободить заключенные в нем кварки, по современным представлениям, невозможно.

Опыт показывает, что между частицами существуют взаимодействия, о которых обычно говорят, как о **полях**. Например, Земля создает вокруг себя гравитационное поле, действие которого на нас обеспечивает наше притяжение к Земле или, что то же, силу тяжести. Отталкивание электронов есть проявление электрического поля, как и притяжение электрона и протона. Поля, в противоположность частицам, не локализованы в пространстве, а «размазаны».

На более глубоком уровне, в квантовой физике, разница между частицами и полями размывается. Например, фотон – квант электромагнитного поля – часто называют частицей. Электрон – как бы эталон частицы – можно считать квантом некоторого электронного поля. И фотоны, и электроны подчиняются довольно похожим волновым уравнениям и, значит, имеют волновую природу. Можно сказать, что окружающий нас мир построен из очень мелкомасштабных волн. Поэтому в физике волновые явления заслуживают гораздо большего внимания по сравнению с механикой, где волны, в общем, довольно частный вид движения.

Среди основных, или фундаментальных, взаимодействий выделяют (в порядке нарастания силы):

1. гравитационные;
2. электромагнитные (+ слабые);
3. сильные.

Гравитационное взаимодействие с соседом по парте существует, но мы его не замечаем. Можно его измерить, используя тонкие и дорогие приборы. Чтобы гравитационное воздействие на нас стало хорошо различимо, нужна огромная масса вещества (Земля). Гравитационное притяжение удерживает вместе самые крупные скопления вещества – планеты, звезды, галактики.

Электромагнитное взаимодействие сильнее на десятки порядков. Но мы редко наблюдаем его во всей красе. В отличие от гравитационного, электрическое взаимодействие обычно заэкранировано, почти все заряды компенсированы противоположными зарядами. Поэтому нам и кажется, что электрические силы только и годятся, чтобы поднимать расческой обрывки бумаги. В действительности же атомы сдерживаются вместе именно электрическими силами. Эти же силы обеспечивают прочность тел и их упругость. На них, в основном, и построен окружающий нас мир.

В списке к электромагнитным добавлены слабые взаимодействия. Ими, например, вызываются некоторые типы радиоактивного распада. Само название намекает на совершенно особую слабость (примером является поразительная проникающая способность нейтрино, которые легко проходят через всю Землю, совсем не замечая вещества). Это совершенно непохоже на электромагнитное взаимодействие. Поэтому большим сюрпризом оказалось установление единой природы слабых и электромагнитных взаимодействий в 80-х годах XX века. Видимое же различие связано с тем, что в человеческой практике слабое взаимодействие действительно очень слабо. Но на очень малых расстояниях (порядка $2 \cdot 10^{-16}$ см) разница двух взаимодействий сглаживается, и они сливаются в единое электрослабое взаимодействие. Подобным образом ранее совсем непохожими выглядели электрическое и магнитное поля, теперь же они рассматриваются как проявления единого электромагнитного поля. Поскольку «электрослабое» объединение произошло недавно, зачастую за слабым взаимодействием по традиции сохраняют статус фундаментального, так что в списке получается четыре вида сил.

Наконец, сильные взаимодействия обеспечивают стабильность атомных ядер (которые электрическое отталкивание протонов стремится разорвать). Поскольку стабильные ядра существуют, на размерах ядра эти взаимодействия гораздо сильнее электромагнитных. Однако они быстрее спадают (на расстоянии $\simeq 10^{-13}$ см). В результате нейтрон, не имеющий электрического заряда, пролетает в плотном веществе несколько сантиметров, пока не попадет в какое-то ядро. Протон, имеющий заряд, тормозится гораздо быстрее.

Частицы имеют склонность объединяться в более крупные образования. Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра. Вокруг ядер летают электроны, в числе, рав-

ном числу протонов. Число это называют атомным номером. Сейчас известно более 100 элементов (т.е. видов атомов с различными номерами), но примерно начиная с номера 93 ядра становятся настолько неустойчивы, что практически не встречаются в естественном виде, хотя некоторые из них могут готовиться искусственно. Например, элемента 94 (плутония) сделано несколько сотен тонн.

Молекулы – это образования, построенные из атомов (бывают и одноатомные молекулы). Молекулы тоже друг к другу притягиваются, и из них получается плотное вещество. При нагревании устойчивость плотного состояния уменьшается, и возрастает доля молекул в газовой фазе. Обычно молекулы остаются стабильными при испарении. Например, и жидкая, и газообразная вода состоит из трехатомных молекул H_2O (хотя нередки случаи, когда при испарении вещества получаются самые разные фрагменты). При сравнительно низких температурах жидкости затвердевают. В твердом состоянии, как правило, вещество имеет несколько фаз, или кристаллических модификаций. При достаточно высоких температурах разрушаются молекулы, а затем и атомы. Получается плазма (примеры ее – пламя и звезды).

1.2 Пространство и время. Законы сохранения

Природные объекты находятся в пространстве, а процессы разворачиваются (происходят, идут) во времени. Наше пространство трехмерно (хотя в некоторых теориях вводятся дополнительные скрытые измерения), а время одномерно (с той же оговоркой). Само по себе пространство в физике считается **однородным** и **изотропным**. Конечно, в природе бывает неоднородность (на полюсе холодно, на экваторе жарко) и анизотропность (верх-низ), но это действие не самого пространства, а находящихся в нем объектов (Солнца, Земли). Такие представления, сейчас кажущиеся единственно разумными, сформировались не сразу. Современная концепция пространства восходит к Евклиду (III век до н.э.) и Ньютону (1687)².

Время также полагают однородным. Это совсем не очевидно: как проверить, меняется ли ход времени «со временем» и чем это проконтролировать, если мы не умеем возвращаться назад? Под однородностью времени понимают нечувствительность ряда процессов к сдвигу по времени: сегодня камень летит так же, как вчера, если обеспечены те же начальные условия. В древности существовали концепции циклического времени (с возвратами к исходному состоянию), некоторые следы которых остались и в нынешней культурной традиции. Тем не менее, благодаря массовому внедрению в практику часов, возобладала идея линейно-равномерного хода времени. С изотропностью времени сложнее: далеко не все процессы идут назад с тем же успехом, что вперед; само понятие хода времени (как говорят, «стрелы времени») подразумевает необратимость.

И сейчас пространство и время, в массовом сознании образованных людей, ничем не

²Любопытно, что основные труды обоих авторов кратко назывались «Начала».

отличаются от «абсолютного» пространства и «абсолютного» времени Ньютона. Однако в XX веке ньютоновские представления подверглись ревизии. В специальной теории относительности пространство и время объединяются, приблизительно как в геометрии компоненты вектора. Оказалось, что ход времени и размеры тел зависят от системы отсчета. Хотя про это все слышали, свободно ориентируется в этих вопросах незначительное меньшинство. Если бы мы умели путешествовать с большими скоростями, порядка скорости света, все давно бы прочувствовали относительность на опыте. Например, сейчас каждый, купив билет на самолет, может убедиться, что местное (поясное) время в разных городах разное, а на некоторых рейсах попадаешь в прошлые сутки. Но это не всегда было ясно. Известен случай с экспедицией Магеллана, участники которой знали, что Земля круглая, и поневоле сотни раз должны были определять местное время, но очень удивились, когда в течение кругосветного путешествия «потеряли» один день.

Еще сложнее ситуация в общей теории относительности, где пространство искривлено вблизи тел значительной массы (стало быть, неоднородно), а время течет по-разному в разных местах. Более того, сейчас полагают, что пространство и время возникли вместе с «остальной Вселенной» около 15 миллиардов лет назад (Большой взрыв). С тех пор Вселенная расширяется, что астрономы наблюдают как разбегание галактик. Опять-таки, не имея случая побывать вблизи черных дыр, и в силу краткости нашей жизни, мы не можем привыкнуть к таким явлениям, и они остаются экзотикой, понятной немногим посвященным. Однако ограниченность нашего опыта имеет и положительную сторону. Мы вполне можем, в разумных пределах, пользоваться ньютоновскими представлениями. Поэтому по большей части будем считать пространство однородным и изотропным, а время – однородным.

Способы измерения расстояния и времени излагаются в следующем параграфе. Сейчас рассмотрим неожиданные следствия свойств пространства и времени. Оказывается, однородность пространства тесно связана с законом сохранения импульса, а однородность времени – с законом сохранения энергии.

Как известно из курса механики, уравнения движения **замкнутой**, или **изолированной** системы частиц имеют вид

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{k \neq i} \mathbf{F}_{ki},$$

где m_i – массы частиц, $\mathbf{v}_i$ – векторы их скоростей, $\mathbf{F}_{ki}$ – сила, действующая на частицу i со стороны частицы k . Поскольку система замкнута, внешних сил нет. Для упрощения удобно рассмотреть всего две частицы, движущиеся в одном измерении (вдоль оси x):

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = F_{21}, \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = F_{12}. \quad (1.1)$$

Ограничимся важным частным случаем, когда сила взаимодействия **потенциальна**,

т.е. существует потенциальная энергия, зависящая от координат, $U(x_1, x_2)$, тогда

$$F_{21} = -\frac{\partial U}{\partial x_1}, \quad F_{12} = -\frac{\partial U}{\partial x_2}.$$

В этих терминах однородность пространства означает попросту, что потенциальная энергия должна зависеть от **разности** координат частиц: $U = U(x_1 - x_2)$. Именно в этом случае (и только в этом) при сдвиге всей системы на некоторое расстояние потенциальная энергия не изменяется и, значит, не изменится поведение системы. Но при такой зависимости легко видеть, что $F_{21} = -F_{12}$ (третий закон Ньютона). Тогда, складывая уравнения движения (1.1), получим

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} + m_2 \frac{dv_2}{dt} = F_{21} + F_{12} = 0, \quad \text{или} \quad \frac{d}{dt} (m_1 v_1 + m_2 v_2) = 0,$$

что и означает сохранение (неизменность во времени) полного импульса системы:

$$P = m_1 v_1 + m_2 v_2 = \text{const}.$$

Для того, чтобы рассмотреть закон сохранения энергии, запишем выражение, следующее из уравнений динамики (1.1):

$$m_1 v_1 \frac{dv_1}{dt} + m_2 v_2 \frac{dv_2}{dt} = v_1 F_{21} + v_2 F_{12} \equiv - \left(v_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial U}{\partial x_2} \right). \quad (1.2)$$

Левая часть уравнения (1.2) – не что иное, как производная по времени кинетической энергии системы K :

$$m_1 v_1 \frac{dv_1}{dt} + m_2 v_2 \frac{dv_2}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) = \frac{dK}{dt}.$$

Теперь предположим, что потенциальная энергия не зависит от времени **явно**. Это не значит, что она вообще не изменяется со временем. Например, если частицы соединены пружинкой жесткости k , то при движении пружинка, вообще говоря, изменяет свою длину $L = x_2 - x_1$, из-за чего меняется и $U = k(L - L_0)^2/2$. Но это – **неявная** зависимость, т.е. зависимость «через координаты», а явная могла бы выглядеть так: $U = at(L - L_0)^2/2$, где a – постоянный коэффициент. В отсутствие явной зависимости производную $U(x_1(t), x_2(t))$ по времени можно записать в виде

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} = v_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial U}{\partial x_2}.$$

Именно такое выражение стоит в скобках в правой части (1.2). Поэтому можно записать

$$\frac{dK}{dt} + \frac{dU}{dt} = 0,$$

т.е. сохраняется полная механическая энергия системы:

$$E = K + U = \text{const}.$$

Условием же ее сохранения является отсутствие явной зависимости $U(t)$, что и означает однородность времени. (Если допустить явную зависимость, получилось бы равенство

$$\frac{dK}{dt} + \frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} \neq 0,$$

т.е. энергия не сохранялась бы).

Мы использовали довольно ограничительные предположения. В действительности законы сохранения в физике имеют более широкую область применимости. Например, для сохранения импульса не обязательно даже существование потенциальной энергии: импульс прекрасно сохраняется при столкновении пластилиновых шариков. Энергия сохраняется и в таких процессах, как падение камня на песок, когда и потенциальная, и кинетическая энергии обращаются в нуль. (Разумеется, в этом случае надо разумным образом обобщить понятие энергии, включив в нее тепловую составляющую). Но нам важно было указать на тесную связь между импульсом и координатами, а также энергией и временем, которую мы еще будем не раз отмечать. Именно из-за этой связи законы сохранения энергии и импульса имеют наиболее фундаментальный характер и выполняются не только в механике, но и во всех вообще физических процессах³.

1.3 Эксперимент и теория. Физические величины. Системы единиц и эталоны. Роль математики в физике.

Наряду с рассмотренной выше классификацией «по разделам» физики можно рассмотреть различные подходы. Безусловно, ключевая роль в физике принадлежит **эксперименту**. Осознание этого восходит к Галилею (1564–1642). Например, вряд ли можно какими-то рассуждениями доказать или вычислить, что есть два рода электрических зарядов (положительные и отрицательные), а вот масса бывает только положительной. Это можно установить только в опыте. В ряде случаев эксперимент давал совершенно неожиданные результаты и стимулировал новое понимание природы. Примерами являются опыт Майкельсона – Морли (опровергнута концепция эфира), и опыт Резерфорда, в котором было открыто атомное ядро. Из-за этой специфики не имели заметного успеха многочисленные попытки построить физику, следуя идеалу математиков XIX века – в виде системы аксиом, из которых чисто логически выводятся теоремы.

Однако в то же время физики считают, что только физика и владеет достаточно солидным **теоретическим** подходом среди всех наук о природе. Оставив в стороне механику, среди теоретических достижений упомянем электродинамику Максвелла, теорию

³Добавим, что есть еще один всеобщий закон сохранения (**момента импульса**), связанный с изотропностью пространства.

относительности Эйнштейна, квантовую механику (Планк, Бор, де Бройль, Шредингер, Гейзенберг, Дирак и др.). В теоретической физике широко применяются достижения математики. Достаточно сказать, что необходимый атрибут физической теории – это математические уравнения⁴. Иногда физики изобретали новые математические концепции (δ – функция Дирака), иногда сами «открывали» уже разработанные разделы математики (матричная механика Гейзенберга), иногда математики развивали свою науку для решения физических задач и под влиянием новых технических возможностей (так появилась вычислительная математика).

Бывает еще **прикладная** физика. Специалисты в этой области, не претендуя на открытие основ мироздания, пытаются применить уже известное, что-то сконструировать, изобрести и пр. Иногда получается нечто узко практическое, иногда же эти изобретения получаются неожиданными и выходят на первый план в жизни человечества (ядерное оружие, транзисторы, лазеры).

Физика, которая преподается в университете нефизическим специальностям, обыкновенно называется **общей** и рассматривает все понемножку, с тем чтобы дать студентам понятие о большем числе явлений, понятий, фактов и пр. Вместе с тем от курса требуется какая-то логическая последовательность. Поэтому принято излагать более или менее установившиеся и систематизированные результаты, в основном теоретического плана, с некоторой привязкой к основной специальности слушателей. Не будет исключением и этот курс. Основная его задача – не сделать студентов ММФ физиками, а показать на ряде примеров стиль работы и мышления физиков и тем расширить кругозор студента. Попутно будут показаны многие приложения понятий, изучаемых в математических курсах, к реальной жизни.

Хорошим примером физического подхода является практика разработки эталонов и систем единиц для измерения физических величин. Мы будем в основном пользоваться системой СГС, в которой основные единицы – сантиметр, грамм и секунда, измеряющие соответственно длину (L), массу (M) и время (T). Единицы любых других величин (как говорят, производные единицы) выражаются с использованием уравнений, связывающих эти величины с основными. Например, уравнение $x = vt$ определяет, что единицей скорости v в СГС будет сантиметр в секунду. Говорят, что **размерность** скорости $[v] = L/T$, или (что считается менее строгим) $[v] = \text{см/с}$. Иногда удобнее система СИ. В рамках механики разница между ними несущественна (смещение десятичной запятой: $0,001 \text{ м} = 0,1 \text{ см}$). Но далее мы увидим, что в СИ больше основных единиц (например, единица тока ампер в СИ основная, а в СГС единица тока производная), в результате чего может отличаться даже вид уравнений в двух этих системах.

Но в любой системе основные единицы надо определять – установить эталоны и процедуры их воспроизведения. Необходимость эталонов ощущалась всегда, но практически унифицировать их удалось не так давно. Приведенный ниже исторический об-

⁴В других науках уравнения и вообще математика не обязательны (теории Дарвина, Маркса и пр.)

зор необязательно запоминать. Его цель – продемонстрировать, насколько непростые процедуры лежат в основе сегодняшней физики и техники.

Когда-то в каждой местности были свои эталоны, вроде длины королевской ступни (foot). Новая эра началась в 1791 г., когда Национальное собрание Франции узаконило **метр** как десятимиллионную часть четверти парижского меридиана. В отличие от многих нововведений Французской революции, эта мера прижилась. После точных обмеров части парижского меридиана между Дюнкерком и Барселоной (около $1/40$ меридиана) в 1799 г. был изготовлен эталон метра в виде платиновой концевой меры (линейки; его соответствие нынешнему метру проверить нельзя, так как этот архивный эталон погиб при пожаре). В 1875 г. 17 государств подписали метрическую конвенцию, образовали Международный комитет мер и весов и постоянно действующее Международное бюро мер и весов. Еще ранее от привязки к меридиану решили отказаться⁵ и приняли за эталон архивный образец. К 1889 г. были изготовлены и сертифицированы 30 эталонов метра в виде стержней из платино-иридиевого сплава (90/10) с X-образным поперечным сечением. Стержни были изготовлены в Лондоне с использованием уральской платины, а окончательная обработка и обрезка до длины 102 см проведены в Париже. Там же были нанесены поперечные штрихи, расстояние между серединами которых при температуре тающего льда для прототипа №6 и было принято за метр. Точность эталонов составляла 0,2–0,3 мкм. Образцы метра были распределены по жребию, причем Россия получила эталоны №11 и №28. В России метрические меры введены как обязательные постановлением СНК РСФСР от 14 сентября 1918 г., но реально стали обязательными с 1 января 1927 г. Эталон №28 исправно служил до 1960 г.

Хоть эталоны и сделаны весьма прочными, они подвержены износу. Появились к тому же подозрения, что за десятки лет из-за перекристаллизации материала эталоны могли укоротиться в пределах 0,5 мкм. Развитие оптики указало нестареющий и неразрушаемый эталон – длину волны света. С 1927 г. использовался промежуточный эталон («естественный свидетель прототипа метра») – излучение атомов кадмия, причем метр равнялся $1553164,13$ длины волны красной линии кадмия. С 1960 г. Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра, основанное на излучении изотопа криптона-86 (переход $2p_{10} - 5d_5$, красная линия): $1 \text{ м} = 1650763,73$ длин волн. Точность воспроизведения этого эталона около 10^{-8} м, или $1/10$ длины волны.

Развитие лазерной техники открыло новые возможности. В 1983 г. Генеральная конференция по мерам и весам приняла определение метра, действующее и сегодня: метр – это расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды. Это определение согласовано с предыдущим в пределах его воспроизводимости. Другими словами, зафиксирована скорость света $c = 299792458$ м/с (целое число), и начиная с

⁵Если измерять расстояние вдоль земной поверхности, будут сказываться ее неровности. Если же проектировать меридиан на уровень моря, измерения становятся трудно проверяемы. На море и вовсе трудно проводить точные измерения.

1983 г. бесполезно ее уточнять. По существу, теперь основным эталоном стала секунда, которую можно зафиксировать с лучшей точностью, чем метр по определению 1960 г.

Механические приспособления позволяют измерять длины от 1 мкм до 10 – 100 м. Оптические микроскопы действуют до $\sim 10^{-5}$ см, электронные – до $\sim 10^{-8}$ см – атомных размеров. За этой гранью понятие размера уже не имеет привычного нам смысла за отсутствием четко ограниченных объектов (но понятия пространства и метрики продолжают работать). Размеры атомных ядер $10^{-13} \div 10^{-12}$ см оцениваются по взаимодействию их с быстро летящими частицами. Сейчас полагают, что можно говорить о малых длинах вплоть до планковской 10^{-33} см, вблизи которой, как предполагается, свойства пространства должны резко измениться. Возможно, меньшие размеры вообще не имеют смысла.

Расстояния и координаты на Земле определяют триангуляцией. В последнее время используется спутниковая система глобального позиционирования GPS, имеющая точность порядка 30 метров и определяющая запаздывания сигналов от группы спутников с бортовыми эталонами времени. Расстояния до планет Солнечной системы измеряют радиолокацией, теперь часто с ретрансляцией передатчиками межпланетных зондов. Для ближайших звезд (до сотен световых лет) применяют триангуляцию на базе диаметра земной орбиты. В диапазоне до 10^9 световых лет используют фотометрический метод, наблюдая определенный тип переменных звезд (цефеиды, у которых период колебаний яркости и светимость взаимосвязаны). До $\simeq 15 \cdot 10^9$ световых лет (граница видимой Вселенной) используется доплеровский сдвиг частоты света, вызванный разбеганием галактик⁶. Объекты на больших расстояниях (если таковые и есть) принципиально ненаблюдаемы, поэтому измерять такие расстояния не требуется.

Перейдем к измерению времени. Около 1657 г. Гюйгенс построил первые маятниковые часы, и с этих пор можно говорить о точных измерениях в пределах суток. Английский астроном Шорт (1710–1768) изобрел конструкцию маятниковых часов, имевших точность $2 \cdot 10^{-8}$, или 0,6 секунды за год. Эталоном вначале были **средние солнечные сутки**, содержащие 86400 секунд. Именно средние, потому что из-за неравномерности движения Земли по орбите актуальное солнечное время может уклоняться от среднего солнечного на ± 15 минут (уравнение времени). Удобнее наблюдать звезды, движущиеся по небосводу более равномерно, чем Солнце, причем звездный год содержит на одни сутки больше солнечного (366,2422 дня). Астрономические наблюдения (основанные на вращении Земли вокруг оси) были более точными, чем время механических часов. В 1884 г. введено среднее время по Гринвичу (GMT), часовые пояса, международная линия смены дат. С 1904 – 1912 начались передачи сигналов точного времени (Парижская обсерватория, ВМС США, Гринвичская обсерватория). С 1928 г. введено название UT (universal time) для астрономического «звездного» времени. В 1955 г. были предложены

⁶По последним данным (2003 г.), постоянная Хаббла составляет 21 км/с на миллион световых лет, или 70 км/с на мегапарсек, с точностью около 10%.

три астрономических шкалы: UT0 обозначает непосредственно наблюдаемое звездное время; UT1 – с поправками $\simeq 30$ мс на движение полюса (в результате получается единое время для всех точек Земли); UT2 – это UT1 с поправкой на сезонную неравномерность вращения Земли (также порядка 30 мс). Но даже UT2 не есть физически равномерная шкала, поскольку основана на вращении Земли, подверженном нерегулярности и дрейфу. Поэтому до 1956 г. секунда была непостоянной величиной.

Уточнить секунду позволили астрономические наблюдения многих небесных тел, с привлечением расчетов их движения (**эфемеридные** таблицы). Например, с 1900 г. до 1960 время UT0 отстало от эфемеридного времени ET примерно на 30 секунд. Поэтому в 1956 г. Международный комитет мер и весов зафиксировал в качестве единицы времени эфемеридную секунду, определив ее как $1/31556925,947$ часть тропического года для 1900 г. 0 января в 12 часов эфемеридного времени. Секунда стала постоянной, но трудно воспроизводимой (для требуемой точности нужны были астрономические наблюдения в течение 2 – 3 лет).

Наконец, был принят атомный стандарт времени. Все атомы данного сорта одинаковы, а влияние внешних условий на атомные процессы можно сделать малым. Поэтому можно добиться хорошей воспроизводимости эталона. С 1967 г. 1 секунда есть 9192631770 периодов излучения при переходах между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома ^{133}Cs . Поделив скорость света на это число периодов, найдем длину волны излучения – около 3,26 см. Новая секунда насколько возможно согласована с эфемеридной. Воспроизводимость цезиевого эталона составляла 10^{-11} . Равномерная физическая цезиевая шкала называется IAT (international atom time).

Однако для астрономических наблюдений и навигации по-прежнему удобнее шкала UT1. Поэтому с 1972 г. введена новая шкала времени UTC (universal time coordinated). Секунда в ней – физическая, она же атомная. Но как только между UTC и UT1 накапливается разница 0,7 секунды, UTC исправляется: добавляется или отнимается одна секунда. В результате разница никогда не превышает 0,7 с. Вставка или вырезание секунды производится обычно 31 декабря или 30 июня. Сигналы точного времени привязаны именно к шкале UTC. Поэтому точно поставленные электронные часы могут иногда «уйти» на секунду за самое короткое время.

За 10^{-24} с свет проходит размер атомного ядра, это характерное время быстрой ядерной реакции. За 10^{-19} с свет проходит через атом. Период колебаний видимого света $\sim 10^{-15}$ с. Свет проходит от этого текста к Вашему глазу за наносекунду (10^{-9} с). Характерное время взрыва – микросекунда (10^{-6} с), выстрела – миллисекунда (10^{-3} с). Около 1000 с – время жизни свободного нейтрона. В году с хорошей точностью $\pi \cdot 10^7$ с. Период полураспада ^{14}C , используемого для исторических датировок, 5717 лет. Предок человека появился миллион лет назад, ящеры вымерли 50 – 70 млн лет назад, следы жизни имеют возраст порядка миллиарда лет, древнейшие породы – до 4 млрд лет. Возраст Солнечной системы около 4,7 млрд лет, возраст Вселенной $\simeq 15$ млрд лет. Более

ранних событий не предполагается. Пока не ясно, будут ли какие-либо естественные границы для положительных значений времени (вроде момента схлapyвания Вселенной в точку), или же времени предстоит «тикать» дальше сколько угодно.

Наконец, **килограмм** вначале (1799) был определен как масса кубического дециметра воды при температуре максимальной плотности 4 °С, т.е. плотность воды в СГС ровно 1 г/см³. Однако архивный килограмм представлял собой более удобный в обращении платиновый цилиндр. Позднее более точные измерения показали, что плотность воды непостоянна, завися, в частности, от изотопного состава; масса же литра воды и систематически отклоняется от архивного эталона. Поэтому одновременно с платино-иридиевыми эталонами метра были изготовлены эталоны килограмма из того же материала в виде цилиндров высотой 39 мм и диаметром 39 мм. Из 43 международных эталонов Россия получила два (№12 и №26). Эти образцы служат и сейчас. Погрешность сличения эталонов не превышает $2 \cdot 10^{-9}$. По современным представлениям, масса эталона не подвержена изменениям со временем, таким как, например, длина. Это и объясняет историческую устойчивость эталона массы.

Поскольку данная глава – вводная, особой необходимости в изучении дополнительной литературы нет. Тем не менее можно сослаться на энциклопедию [1]. В параграфе 1.3 широко использован материал пособия [2], которое и рекомендуется для более подробного знакомства с предметом. В частности, в [2] очень интересен совершенно не затронутый выше материал о хронологии и календарях.

Литература

1. Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992–1998. Ред. А.М. Прохоров и др. В 5 тт.
Статьи: Физика. Т. 5, с. 310–321. Поля физические. Т. 4, с. 55–56; Взаимодействие. Т. 1, с. 263–264; Агрегатные состояния. Т. 1, с. 23; Фаза. Т. 5, с. 263–264. Пространство и время. Т. 4, с. 156–161; Сохранения законы. Т. 4, с. 602–603; Энергии сохранения закон. Т. 5, с. 613–614; Импульс. Т. 2, с. 129–130.
2. Пальчиков Е.И. Введение в технику физического эксперимента. Измерение длины, времени и частоты. Новосибирск: Изд. НГУ, 2001. 112 с.