

# Комментарии к лекциям по физике

## Тема: Введение. Принципы классической физики

### Содержание лекции

Введение. Место физики среди естественных наук. Соотношение эксперимента и теории в физике. Опыт как источник знаний и критерий истины. Эвристическая сила физических теорий. Границы применимости физических теорий. Принцип соответствия. Абстракции классической механики. Абсолютизация физического процесса (независимость от средств наблюдения) и возможность неограниченной детализации его описания. Соотношения неопределенностей и границы применимости классического описания. Роль математики в физике. Различие понятий, с которыми имеет дело чистая математика и экспериментальная наука. Физические модели и абстракции.

### Введение. Задачи курса общей физики

Основные задачи курса общей физики — дать представление о физике в целом и заложить основы будущей профессии, т. е. обеспечить студенту необходимую подготовку для сознательного выбора своей узкой специализации и последующего ее изучения. Но в первую очередь курс физики должен способствовать формированию естественнонаучного мировоззрения, т. е. создать целостную *физическую картину мира*. Место физики в общечеловеческой культуре лучше всего можно выразить словами выдающегося физика современности, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана: «Физическое представление о мире составляет сейчас главную часть истинной культуры нашей эпохи.»

Правильное мировоззрение необходимо исследователю. Но во всей истории естествознания еще не было примеров, чтобы одного лишь правильного мировоззрения было бы достаточно для построения правильной теории. Истина всегда конкретна и не может быть угадана из общих рассуждений. Поэтому прогресс научного мировоззрения следует за прогрессом самой науки.

Физика занимает особое место среди естественных наук, т. е. наук о природе. Ведущая роль физики в современном естествознании определяется несколькими факторами. Во-первых, физика составляет фундамент всех других естественных наук. Действительно, в основе всех явлений — химических, биологических, геологических, астрономических и т. п. — лежит в конечном счете взаимодействие частиц и полей, изучаемых в физике. Во вторых, бесконечность процесса постижения истины в физике диалектически сочетается с установлением окончательных, неизменных законов природы, действующих в определенных областях. В физике это общее положение формулируется как *принцип соответствия*: ньютоновская механика, электродинамика, теория относительности, квантовая механика — все они, каждая в своей области, окончательны. Каждая физическая теория, прошедшая достаточно серьезную проверку экспериментом, адекватно описывает определенный круг явлений. Любая новая теория, приходящая ей на смену, должна приводить к тем же самым результатам в пределах границ применимости старой теории.

## Эксперимент и теория в физике. Эвристическая сила физической теории

Как и все другие естественные науки, т. е. науки о природе, физика основывается на экспериментально установленных фактах. Опыт, эксперимент составляет *источник знаний* — экспериментальные факты могут привести к открытию физических законов. По словам Пуанкаре, «наука состоит из фактов подобно тому, как здание состоит из кирпичей. Но простое нагромождение фактов похоже на науку не более, чем груда кирпичей на дом. Ученый должен систематизировать факты.» Как только ставится вопрос о взаимосвязи явлений, мы вступаем в область теории. Теория должна объединить, объяснить разрозненные экспериментальные факты с единой точки зрения, основываясь на более или менее непосредственно проверяемых гипотезах. Сделанные теорией предсказания должны допускать опытную проверку. На этом этапе опыт выступает как *критерий истины*, критерий правильности физической теории.

Очень важно ясно представлять себе соотношение эксперимента и теории в физике. При изучении теоретической физики у студента может сложиться впечатление, что все известные физические законы могут быть чисто логически «выведены» или доказаны на основе некоторых общих принципов. Но сколь бы абстрактными ни казались эти принципы и гипотезы, теория берет их в конечном счете только из опыта. Лежащие в основе любой теории принципы по сути дела представляют собой сформулированное в концентрированной форме обобщение большого числа экспериментальных фактов. Основой общих физических законов не могут служить абстрактные логические рассуждения — такой основой могут быть только опытные факты.

Как уже было отмечено, теория дает для огромного экспериментального материала логическое упорядочение. Но, помимо соединения разрозненных экспериментальных фактов в единую картину, хорошая теория должна обладать способностью делать определенные новые утверждения, предсказывать новые факты, допускающие последующую проверку путем эксперимента. Это требование к теории можно сформулировать так: хорошая физическая теория должна обладать *эвристической силой*.

В качестве иллюстрации высказанных положений можно привести пример из истории физики. К середине 19 века трудами Эрстеда, Ампера и особенно Фарадея был накоплен обширный экспериментальный материал о связи электрических и магнитных явлений. Опираясь на него, Максвелл сформулировал свои знаменитые уравнения, лежащие в основе электродинамики. Все известные до Максвелла законы электричества и магнетизма могут быть «выведены» из этих уравнений. Однако с полной уверенностью можно сказать, что сформулировать эти уравнения было возможно, только опираясь на экспериментально открытые Кулоном, Эрстедом, Ампером и Фарадеем законы. Но теория Максвелла не ограничилась приведением этих законов в стройную систему. На основе своих уравнений Максвелл предсказал новое явление — электромагнитные волны. В этом предсказании проявилась эвристическая сила электродинамики. Впоследствии электромагнитные волны были экспериментально получены Герцем. Открытием электромагнитных волн мы, безусловно, обязаны теории Максвелла, но сама эта теория была бы невозможна без предшествовавших ей экспериментальных открытий. Правда, в

реальной жизни часто все происходит далеко не так гладко, как в хрестоматийных примерах. Чтобы развивать теорию, нужны новые эксперименты, но чтобы знать, какие для этого требуются эксперименты, необходима теория.

## Границы применимости физических теорий

Когда теория выдерживает одну проверку, перед ней возникает очередная задача — сделать следующее предсказание, так что открываются все новые способы проверки теории. В случае противоречия между следствиями теории и опытом теория должна быть отвергнута, но в случае совпадения следствий теории с опытом теорию нельзя считать доказанной. Окончательно «доказанных» теорий не существует — их существование означало бы конец прогресса в науке. Как это ни парадоксально, именно экспериментальное опровержение существующей теории означает, что мы находимся на пороге нового открытия — обнаруженное противоречие оказывается существенным фактором научного прогресса.

Но как быть с теорией, которая многократно проверялась и перепроверялась на опыте, а в один прекрасный день оказалась опровергнутой? Во что превращается такая теория? Если теория прошла достаточно серьезную проверку экспериментом, можно с уверенностью утверждать, что существует некоторая область явлений, которая вполне адекватно описывается существующей теорией. Любая новая теория, приходящая на смену старой, в этой области должна приводить к тем же результатам. По сути дела, это вопрос о *границах применимости* теории. Все физические теории в этом смысле являются ограниченными. Принцип соответствия требует, чтобы новая теория с более широкой областью применимости сводилась к старой теории в пределах границ ее применимости.

В качестве примера можно привести с этой точки зрения ньютоновскую теорию тяготения. За два с лишним века ее существования эта теория, как никакая другая, подвергалась бесчисленным испытаниям, проверкам и перепроверкам, и каждый раз подтверждалась с почти непостижимой степенью точности. Подлинным триумфом теории тяготения было открытие планеты Нептун. В первой половине 19 века было установлено, что планета Уран движется не в полном соответствии с законом тяготения. Станным образом она то ускоряла, то замедляла свое движение на малую, но вполне заметную величину, что не могло быть объяснено на основе известных тогда свойств солнечной системы. В 1846 году Леверрье во Франции и Адамс в Англии независимо друг от друга пришли к выводу, что аномалии в наблюдаемом движении Урана можно объяснить, предположив существование новой планеты, обладающей определенной массой и определенной орбитой, внешней по отношению к орбите Урана. Берлинский астроном Галле обнаружил новую планету (ее назвали Нептун) после всего лишь получасового поиска. Положение этой планеты отличалось от расчетного менее чем на один угловой градус.

Но все многочисленные проверки не смогли уберечь теорию от того, что она в конце концов оказалась опровергнутой. На смену ей пришла эйнштейновская теория тяготения, основанная на экспериментально установленном факте пропорциональности инертной и гравитационной масс. Эта теория предсказала новые эффекты — движение перигелия Меркурия и отклонение луча света в поле тяготения Солнца — которые были проверены в чрезвычайно тонких и точных экспериментах. Реально несостоятельность ньютоновской теории тяготения означает лишь

то, что мы не вправе ожидать от нее исчерпывающего объяснения во всех случаях. Но в тех пределах, где ньютоновская теория выдержала грандиозную серию проверок, эйнштейновская теория тяготения (гораздо более сложная) сводится к ньютоновской, и в этих пределах нет никакого смысла использовать какую-либо более сложную теорию, чем ньютоновская. Основанные на ней расчеты предсказывают положение планет, согласующиеся с результатами наблюдений в пределах нескольких угловых секунд даже в тех случаях, когда производится экстраполяция на многие годы. Но в то же время ясное понимание границ применимости теории Ньютона приводит к необходимости отказаться от нее не только в тех случаях, когда есть возможность выполнить очень точные измерения, но и тогда, когда необходимо достичь более глубокого понимания явления тяготения в целом. Релятивистская теория тяготения не только имеет более широкую область применимости, но и построена на принципиально иных концептуальных основах. Включение в теорию новых концепций создает важные предпосылки для дальнейшего развития.

## **Границы применимости классической механики и принцип ответственности**

Коротко о границах применимости классической ньютоновской механики можно сказать так: классическая (нерелятивистская) механика адекватно описывает *сравнительно медленные движения макроскопических тел*. Однако здесь требуются дополнительные разъяснения.

Заложенная Ньютоном основа физической картины мира в почти неприкосновенном виде просуществовала вплоть до начала XX столетия. Существенные изменения в мировоззрении физиков произошли лишь после создания Эйнштейном современной физической теории пространства и времени (частная теория относительности, 1905), а затем релятивистской теории тяготения (общая теория относительности, около 1916). Другие ограничения классического способа описания движения материальных тел, связанные с двойственной корпускулярно-волновой природой материи, были установлены в первой четверти XX столетия после появления старой квантовой теории и пришедшей ей на смену квантовой механики. Впрочем, все эти новые физические теории, углубив наше понимание основ мироздания, отнюдь не опровергли классическую динамику, а лишь позволили ясно определить ее *границы применимости*.

Первая из упомянутых выше границ применимости связана с ограничением на скорости тел, описание движений которых возможно на языке классической физики: эти скорости должны быть малы по сравнению со скоростью света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. В нашем непосредственном окружении наибольшая из встречающихся скоростей макроскопических тел — это скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца  $v \approx 30$  км/с =  $3 \cdot 10^4$  м/с. Для такого движения указанное ограничение выполняется с большим запасом:  $v/c \approx 10^{-4} \ll 1$ . Поэтому в вопросах, связанных с движением небесных тел, можно найти лишь несколько очень слабых эффектов, лежащих почти на пределе наших экспериментальных возможностей, для объяснения которых требуется выход за рамки классической динамики (прецессия перигелия орбиты Меркурия, составляющая 43 угловых секунды в столетие, и недавно открытое уменьшение периода обращения компонент двойной звездной системы из-за излучения гравитационных волн).

Здесь можно увидеть яркую иллюстрацию общефизического *принципа соответствия*, согласно которому любая новая физическая теория (в данном случае частная теория относительности и эйнштейновская теория тяготения), приходящая на смену старой теории (классической динамике и ньютоновской теории тяготения), должна приводить к тем же результатам в той области, где прежняя теория выдержала экспериментальную проверку.

Действительно, уравнения релятивистской теории тяготения переходят в уравнения классической динамики и ньютоновской теории тяготения, пока скорости, приобретаемые телами под влиянием тяготения, малы по сравнению с скоростью света, т.е. пока гравитационная энергия тела составляет малую часть полной энергии (включающей энергию покоя). В таком случае говорят о слабых гравитационных полях. В Солнечной системе мы имеем дело только со слабым тяготением. Поэтому и в наши дни все расчеты в небесной механике и космической динамике выполняются на основе ньютоновской теории тяготения.

Вторая граница применимости классического способа описания движения, связанная с корпускулярно-волновой природой материи, математически выражается *соотношениями неопределенностей*, впервые сформулированными Гейзенбергом и лежащими в основе современной квантовой теории. В соответствии с соотношениями неопределенностей, частица не может одновременно иметь точные значения координаты и соответствующей проекции импульса: произведение неопределенностей  $\Delta x \cdot \Delta p_x$  не может быть меньше постоянной Планка  $\hbar \approx 10^{-34}$  Дж·с. Для макроскопических тел (т.е. тел, состоящих из большого — порядка постоянной Авогадро  $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$  1/моль — числа атомов или молекул) существующие возможности измерения координат и импульсов таковы, что соотношения неопределенностей фактически не накладывают ограничений на применимость классического способа описания движения, в котором состояние частицы задается указанием ее координат и импульсов. Эта возможность связана с малой (в масштабах макроскопического мира) величиной постоянной Планка.

Более того, и при описании движения микрочастиц во многих случаях можно применять классическую механику. Например, при движении электронов в макроскопических электронных приборах экспериментальные неопределенности в координатах и импульсах электронов намного больше предельных значений, устанавливаемых соотношениями неопределенностей. Но для движения электрона в атоме классический способ описания совершенно непригоден: если принять в качестве неопределенности координаты величину порядка размера атома, то соответствующая неопределенность в значении скорости электрона, вычисленная из соотношения неопределенностей, оказывается больше, чем сама скорость.

## **Абстракции классической физики**

Описание физического процесса или явления в классической физике основано на использовании ряда абстракций. Прежде всего допускается полная независимость явления от условий и средств его наблюдения. В классической физике предполагается, что всегда можно «подсмотреть» явление, не вмешиваясь в него и не влияя на него. Физический процесс рассматривается как нечто происходящее само по себе, не зависящее от средств наблюдения за процессом. Квантовая механика показала, что для процессов с микрообъектами (электронами, протонами, атомами

и молекулами) в общем случае это не так: возможность наблюдения и выполнения измерений предполагает наличие определенных физических условий, которые могут повлиять на само явление. Пренебрежение таким влиянием средств наблюдения представляет собой абстракцию, которую можно назвать *абсолютизацией физического процесса*.

Использование этой абстракции вполне допустимо при изучении явлений макроскопического масштаба, по отношению к которым воздействие, связанное с наблюдением, практически не играет роли. Абсолютизация таких явлений настолько естественна, что до возникновения квантовой механики никогда явно не оговаривалась. Считалось, что любой физический процесс происходит «сам по себе», что чрезвычайно упрощает его описание.

Другой абстракцией классической физики, тесно связанной с абсолютизацией явлений, является допущение о возможности *неограниченной детализации* их описания. Эта абстракция проявляется, в частности, в используемых классической механикой математических средствах описания движения: протекающая во времени смена состояний характеризуется непрерывными функциями времени. Использование непрерывных функций, например, для координат и импульсов движущейся частицы предполагает существование в каждый момент времени определенных, сколь угодно точных значений этих величин.

Ограниченную применимость классического способа описания, выявленную в квантовой механике, устанавливают соотношения неопределенностей Гейзенберга, согласно которым координата и соответствующая проекция импульса частицы не могут одновременно иметь абсолютно точные значения. Например, локализация частицы (точное измерение ее координат) требует физических условий, неблагоприятных для точного измерения ее импульса, и наоборот, условия, благоприятные для точного измерения импульса, исключают возможность локализации частицы в малой пространственной области. Эти ограничения связаны с двойственной природой микрообъектов, получившей название "корпускулярно-волновой дуализм".

Количественное выражение этих ограничений применимости абстракции, т.е. допущения о возможности неограниченной детализации, дают неравенства Гейзенберга (см. выше раздел «Границы применимости классической механики»). Как уже отмечалось, для макроскопических тел соотношения неопределенностей фактически не накладывают ограничений на применимость классического способа описания движения.

Подробное и очень ясное изложение затронутых здесь вопросов можно найти в книге акад. В. А. Фока «Начала квантовой механики», М. «Наука», 1976 (3-е издание), стр. 9–17.

## **Физика и математика. Физические модели**

Физика относится к точным наукам, т. е. ее задача состоит в выражении физических закономерностей в количественной форме. Определения количественных характеристик играют в физике ключевую роль. Физические величины — это такие свойства тела, системы или процесса, которые допускают количественное выражение с помощью измерений, т. е. путем сравнения данной физической величины с определенной величиной того же рода, принятой в качестве единицы измерения. Физика, вскрывая взаимосвязь явлений, дает количественную математиче-

скую формулировку этих связей. Математика — это язык физики, язык, специально созданный и развитый для выражения количественных связей, это набор инструментов физической теории. Наиболее общая математическая формулировка изучаемых закономерностей одновременно является и физически наиболее плодотворной.

У физика, исследующего какое-либо явление, никогда не бывает (и в принципе не может быть) исчерпывающих данных об изучаемом явлении. Характерная особенность науки состоит как раз в том, что она дает возможность описывать главные черты явления, не зная многих деталей, не имея исчерпывающих данных. Когда Ньютон стал заниматься проблемой притяжения Луны Землей, его оппоненты говорили, что решить такую проблему невозможно, поскольку о внутреннем строении Земли почти ничего не известно. Но теория Ньютона работает, т. е. дает в общем правильное описание движения Луны, несмотря на то, что эта теория не учитывает внутреннего строения Земли. В сложных явлениях для выяснения основных причинных связей необходимо отделить главное от второстепенного. Для этого нужны абстракции и *физические модели*. Примерами моделей, широко применяемых в физике, могут служить материальная точка, абсолютно твердое тело, идеальный газ и т. п.

При замене реальной системы или явления некоторой идеализированной моделью производится идеализация не столько свойств реальных систем, сколько условий их движения. Применимость той или иной модели к реальной физической системе определяется прежде всего тем вопросом, на который теория должна дать ответ, а не свойствами самой системы. Точный учет всех возможных влияний и взаимосвязей сделал бы неразрешимыми даже самые простые задачи. По образному выражению Я. И. Френкеля, физик-теоретик рисует не точный портрет явления, а скорее карикатуру на него. В приведенном выше примере теория движения Луны, не учитывающая внутреннего строения Земли, не может объяснить некоторых тонких деталей. Например, невозможно понять так называемое «вековое» ускорение Луны, которое обусловлено приливным трением на Земле — для этого требуется знание упругих свойств вещества, образующего Землю. Но самые существенные черты движения Луны можно надежно выявить, не зная строения Земли и используя для нее модель материальной точки или абсолютно твердого тела.