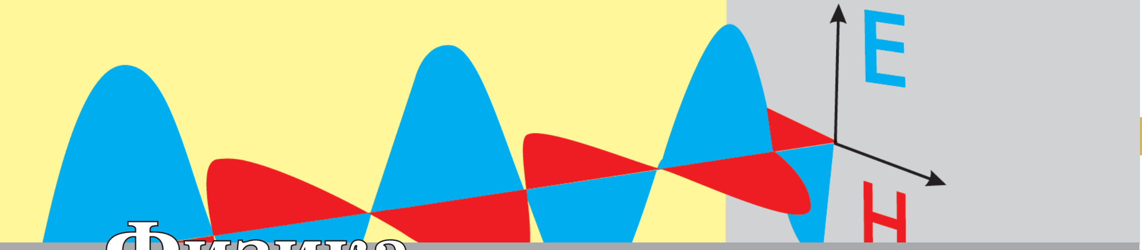

Абрамов Александр Анатольевич
Доктор физико-математических наук,
профессор Московского института
электронной техники.

Удивительная физика

Путь к истине не всегда бывает прямым.
Иногда к истине ведут разные дороги.

Рассматривается ряд неожиданных и удивительных фактов, связанных с исследованием некоторых физических явлений и с работой учёных-физиков. Как показывает история физики, её развитие происходит отнюдь не всегда прямым поступательным движением вперёд. Приводятся примеры открытий, которых не ждали, гениальных озарений, основанных на неверных или слишком упрощённых допущениях.

Неожиданные открытия

Занятие физикой полно неожиданностей. Нередко открытия физических эффектов происходят случайно, когда учёный, исследуя какое-то одно явление, наталкивается на что-то другое, ещё не известное. Так, в процессе исследования электромагнитных волн Генрих Герц в 1887 г. при работе с открытым колебательным контуром заметил, что при облучении цинкового разрядника ультрафиолетовым светом прохождение искрового разряда существенно облегчается. Так был открыт фотоэффект. Это случается не только в физике. Колумб искал кратчайший путь в Индию, а открыл Америку. Алхимики веками искали способ превращения ртути в золото. Эта задача была решена только в XX веке параллельно с фундаментальными исследованиями ядерных реакций. Правда, затраты на проведение таких реакций оказываются настолько огромными, что их смогли позволить себе только богатые государства в связи с осуществлением военных задач.

Примеров случайных открытий в физике немало. Можно вспомнить также открытия рентгеновских лучей В.К. Рентгеном, радиоактивности А.А. Беккерелем, эффекта Мёссбауэра. Впрочем, следует отметить, что такие случайности имеют место, как правило, у выдающихся экспериментаторов. Неслучайно великий физиолог Иван Павлов говорил: «Если в голове нет мыслей, глаза не видят фактов».

Нередко первооткрыватель некоторого явления или некоторой формулы оказывается не в состоянии оценить масштаб своего открытия и даже иногда не может дать правильную физическую интерпретацию этого явления или формулы. Фарадей не мог предположить, как сильно изменится мир в результате открытия им явления электромагнитной индукции. Резерфорд, предложивший планетарную модель атома, утверждал, что энергию, заключённую в атоме, никогда не удастся использовать. Макс Планк, выдвинув идею о квантовании излучения, долго не верил в реальное существование фотонов. В свою очередь, Эйнштейн, допустивший их существование и внёсший заметный вклад в основание квантовой механики, до самой смерти не желал смириться с её вероятностной интерпретацией.

Метод размерностей

Известно, что некоторые физические формулы можно получить приближённо из анализа размерностей. Более того, размерные соображения могут подсказать какие-то новые связи между физическими величинами. Когда ясно, какие физические величины ответственны за некоторое явление, то можно из них сконструировать величину, имеющую нужную размерность. При этом нередко получается выражение, отличающееся от строгого только численным множителем порядка единицы. Таким образом может быть получена формула Стокса для силы трения, испытываемой шариком, движущимся в вязкой жидкости. Логично предположить, что эта сила зависит от скорости движения шарика v, его радиуса r и коэффициента вязкости η. Произведение этих величин действительно имеет размерность силы. Строгий вывод этой формулы отличается от формулы, полученной методом размерностей $F = \eta r v$, только множителем 6π ($F = 6\pi\eta r v$).

О теории атома водорода по Бору

Интересны также ситуации, когда, исходя из неверных или приближённых предположений, удаётся получить новые верные существенные результаты. Одним из первых важных результатов при создании квантовой механики была теория атома водорода по Бору. При выводе формулы для энергетических уровней электрона в атоме водорода Бор исходил из следующих соотношений:

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}, \qquad (1)$$

$$mvr = n\hbar. \qquad (2)$$

Здесь m и e – масса и заряд электрона, $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка, $n = 1, 2, 3...$, k – постоянная в законе Кулона, r и v – радиус электронной орбиты и скорость электрона на ней. Уравнение (1) – это уравнение второго закона Ньютона для электрона, вращающегося вокруг ядра атома водорода, а уравнение (2) – это условие квантования момента импульса электрона на орбите, которая предполагалась круговой. Из этих уравнений при предположении, что энергию электрона на орбите можно представить в виде суммы кинетической и потенциальной энергий

$$E = \frac{mv^2}{2} - k\frac{e^2}{r},$$

находятся значения энергетических уровней электрона в атоме водорода. При этом с помощью постулатов Бора удалось объяснить остававшуюся долгое время совершенно загадочной картину спектральных уровней атома водорода.

При таком подходе остаётся совершенно неясным, почему соотношения (1) и (2), которые оба с точки зрения современной квантовой механики являются неверными, дают правильные и согласующиеся с опытом результаты. Формулы (1) и (2) неверны, поскольку: 1) в квантовой механике согласно принципу неопределённости Гейзенберга величины скорости электрона v и его расстояния от ядра атома водорода r не могут быть одновременно точно определены; 2) второй закон Ньютона в квантовой механике не имеет места; 3) момент импульса в квантовой механике не может быть представлен в виде произведения mvr, поскольку является квантовомеханическим оператором; 4) главному квантовому числу $n = 1$ соответствует значение орбитального квантового числа $l = 0$, при котором момент импульса электрона равен нулю. На наш взгляд эти обстоятельства могут дезориентировать вдумчивых учащихся. В этой связи уместно вспомнить, что в квантовой механике существуют теоремы Эренфеста, которые утверждают, что между квантовомеханическими операторами существуют соотношения, аналогичные классическим законам Ньютона. При больших значениях квантовых чисел начинает работать квазиклассическое приближение. Соотношение (2) фактически совпадает с весьма нетривиальным квазиклассическим утверждением о том, что на электронной орбите (длиной $2\pi r$) должно укладываться целое число длин волн де-Бройля ($\lambda = h/p$). И потому, хотя согласие теории Бора с экспериментом и было в некотором смысле случайным, всё-таки гениальная интуиция Бора вела его в правильном направлении. Постулаты Бора о дискретности энергетических уровней в атомах и об испускании и поглощении фотонов при электронных переходах с одного уровня на другой вошли в золотой фонд физики, а его модель атома водорода послужила в качестве ориентира при создании полноценной квантовой механики.

Интересно, что в работе Бора «О строении атомов и молекул» важную роль играли размерные оценки. После введения Планком в 1900 году постоянной $\hbar$, названной его именем, появилась возможность из величин m, e и $\hbar$ составить величину, имеющую размерность длины $a = \hbar/me^2$. Если подставить в эту величину численные значения, то получим $a \approx 0,5 \cdot 10^{-8}$ см. Именно такую величину имеет в теории Бора радиус первой орбиты электрона, который в модели Бора вращается вокруг ядра атома водорода. Этот факт подкреплял уверенность Бора в справедливости его теории.

Новаторский и революционный подход Нильса Бора к физике можно проиллюстрировать ещё одним примером. Бор однажды выдвинул идею, согласно которой закон сохранения энергии не выполняется в отдельных процессах взаимодействия микрочастиц, а выполняется только в среднем. Как показало дальнейшее развитие квантовой электродинамики, Бор и в этом вопросе проявил гениальную интуицию. Строгие расчёты в квантовой теории поля включают учёт процессов рождения и уничтожения виртуальных частиц, причём в этих виртуальных процессах закон сохранения энергии действительно не обязан выполняться.

Упрощённый вывод уравнения Менделеева – Клапейрона

Приведём ещё один пример, когда приближённый вывод приводит к точному результату. Уравнение Менделеева – Клапейрона можно упрощённо вывести следующим образом. Предположим, что все молекулы идеального газа имеют одинаковые скорости, равные v. Пусть также всю совокупность молекул можно разбить на 6 групп: движущихся строго вдоль оси x и против оси x, вдоль оси y и против оси y, вдоль оси z и против оси z. Тогда за одну секунду об единичную площадку, перпендикулярную оси x, ударятся $(1/6)nv$ молекул (здесь $n = N/V$ – концентрация молекул газа, N – полное число молекул в газе, V – его объём). При лобовом упругом соударении каждая молекула передаёт этой площадке импульс $2mv$. Общий импульс, переданный площадке всеми молекулами в единицу времени, равен давлению газа p на эту площадку. Тогда $p = (2/3)n(mv^2/2)$. Будем считать, что в полученной формуле кинетическую энергию отдельной молекулы $mv^2/2$ можно принять равной кинетической энергии, усреднённой по всему ансамблю молекул: $< mv^2/2 >$. Далее воспользуемся теоремой о равнораспределении энергии по степеням свободы: $< mv^2/2 > = 3kT/2$. Подставив эту величину в записанную выше формулу для давления p, получим локальную формулу уравнения Менделеева – Клапейрона $p = nkT = \left(\frac{N}{V}\right)kT$.

Умножив и разделив правую часть полученного уравнения на число Авогадро N_A, с учётом соотношений $\nu = N/N_A$ и $R = kN_A$ можно записать уравнение Менделеева – Клапейрона в традиционном виде $pV = \nu RT$ (ν – число молей газа, R – универсальная газовая постоянная). Несмотря на достаточно грубые предположения, сделанные при этом выводе, полученное уравнение является строгим. Оно также может быть выведено при использовании реального распределения Максвелла молекул газа по скоростям и при учёте того, что скорости молекул газа имеют всевозможные направления в пространстве.

Задача о перемешивании двух газов

Рассмотрим ещё следующую задачу. В двух адиабатически изолированных баллонах объёмами V_1 и V_2 находятся одинаковые газы при давлениях и температурах p_1, T_1 и p_2, T_2 соответственно. Баллоны соединяют короткой трубкой, в результате чего газы перемешиваются, и через некоторое время в системе устанавливаются давление p и температура T. Требуется найти эти установившиеся величины.

Некоторые учащиеся решают эту задачу так. Первый газ при расширении его в оба баллона по закону Бойля – Мариотта будет иметь парциальное давление

$$p_1' = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2}.$$

Аналогично для второго газа:

$$p_2' = \frac{p_2 V_2}{V_1 + V_2}.$$

По закону Дальтона

$$p = p_1' + p_2' = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}. \qquad (3)$$

Далее температуру T можно найти из уравнения Менделеева – Клапейрона, записанного для газа в обоих баллонах:

$$p(V_1 + V_2) = (\nu_1 + \nu_2)RT = \left(\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2}\right)T,$$

где $\nu_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$ и $\nu_2 = \frac{p_2 V_2}{RT_2}$ – количества молей газов в исходных баллонах. При этом получим:

$$T = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2}}. \qquad (4)$$

Несмотря на правильные ответы, полученные таким способом для величин p и T, это решение нельзя признать верным. Дело в том, что закон Бойля – Мариотта справедлив для изотермического расширения, что в рассматриваемом случае не выполняется. Правильное решение должно исходить из закона сохранения энергии. Внутренняя энергия идеального газа даётся соотношением

$$U = \frac{pV}{\gamma - 1},$$

где γ – показатель адиабаты данного газа. По закону сохранения энергии $U = U_1 + U_2$, где U_1 и U_2 – энергии газов до смешивания, а U – энергия после смешивания. Ясно, что из этих соотношений и следует полученное выше соотношение (3) для установившегося давления газа p в обоих баллонах. Совпадение полученных этими двумя способами выражений для p следует считать случайным. Это становится особенно ясным, если попытаться решить аналогичную задачу для случая, когда в исходных баллонах находятся разные газы, для которых $\gamma_1 \neq \gamma_2$. Решение задачи первым способом не зависит от величины γ, поэтому ответ для давления p и температуры T получится прежним, т. е. даваемым формулами (3) и (4). При втором (правильном) способе закон сохранения энергии даёт

$$\frac{p_1V_1}{\gamma_1-1}+\frac{p_2V_2}{\gamma_2-1}= =\left(\frac{\nu_1}{\gamma_1-1}+\frac{\nu_2}{\gamma_2-1}\right)RT, \quad (5)$$

где

$$\nu_1=\frac{p_1V_1}{RT_1},\ \ \nu_2=\frac{p_2V_2}{RT_2}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), для температуры T получим выражение

$$T=\frac{\dfrac{p_1V_1}{\gamma_1-1}+\dfrac{p_2V_2}{\gamma_2-1}}{\dfrac{p_1V_1}{(\gamma_1-1)T_1}+\dfrac{p_2V_2}{(\gamma_2-1)T_2}}. \quad (7)$$

Давление газовой смеси может быть получено из уравнения Клапейрона – Менделеева:

$$p=\frac{(\nu_1+\nu_2)RT}{(V_1+V_2)}, \quad (8)$$

если подставить в него формулы (6) и (7). Видно, что (7) и (8) переходят в (3) и (4) только в случае $\gamma_1=\gamma_2$.

Удивительная одна вторая

Действительно удивительно, как в самых различных физических ситуациях возникает множитель 1/2. Можно вспомнить о том, что плотности энергии электрического и магнитного полей в бегущей электромагнитной волне равны друг другу и составляют ровно 1/2 от общей плотности энергии электромагнитной волны.

Множитель 1/2 возникает в известной задаче о зарядке конденсатора ёмкостью C зарядом q от источника с ЭДС $\mathcal{E}$. Если сопротивление подводящих проводов R – величина не бесконечно малая, то ровно половина от общей работы источника, которая равна $q\mathcal{E}=C\mathcal{E}^2$, идёт на энергию электрического поля, запасённую в конденсаторе, а другая половина выделится в виде тепла.

Известно, что электрическое поле бесконечной пластины, заряженной с поверхностной плотностью σ, по обе её стороны перпендикулярно поверхности и равно $E=\sigma/2\varepsilon_0$. Если теперь рассмотреть электрическое поле вблизи поверхности заряженного проводника, то оно оказывается перпендикулярным поверхности и равным $E=\sigma/\varepsilon_0$. Получается, что вне зависимости от формы и размера проводника весь остальной заряд проводника создаёт вблизи любой точки поверхности поле $E=\sigma/2\varepsilon_0$, направленное вдоль внешней нормали к поверхности. При этом согласно принципу суперпозиции это поле обеспечивает выполнение равенств $E=0$ внутри проводника и $E=\sigma/\varepsilon_0$ вблизи поверхности вне проводника.

Удивительная 1/2 сыграла важнейшую роль в физике при объяснении тонкой структуры спектральных линий атомов. Известно, что наряду с механическими и магнитными моментами, связанными с орбитальным движением электронов в атоме, электроны обладают также собственными (внутренними, или, как говорят, спиновыми) механическими и магнитными моментами. Отношение механического момента к магнитному называется гиромагнитным отношением. Причём, как выяснилось, гиромагнитное отношение для орбитального движения электрона в два раза меньше, чем для собственных механического и магнитного моментов электрона. Анализ этой ситуации привёл в дальнейшем к релятивистской теории электрона, созданной Дираком, в которой практически автоматически появляется спин электрона.

О векторах и векторных диаграммах

Ньютон впервые открыл закон $\vec{F} = m\vec{a}$ (второй закон Ньютона), Максвелл впервые получил систему уравнений, названную его именем, состоящую из 4-х уравнений для векторов напряжённостей электрического ($\vec{E}$) и магнитного ($\vec{H}$) полей, а также магнитной и электрической индукций ($\vec{B}$, $\vec{D}$). Интересно, что ни Ньютон, ни Максвелл не использовали векторных обозначений. Векторы были введены в аппарат физики значительно позднее в трудах американца Гиббса и англичанина Хевисайда. Последователи Максвелла Хевисайд и Герц сумели его громоздкую систему из 20 уравнений упростить и записать в современном очень компактном виде.

Френель построил современную теорию дифракции и поляризации света, введя наглядный метод зон Френеля, и, используя изощрённый аналитический аппарат, записал ряд громоздких интегралов, позволяющих рассчитывать амплитуды световых волн в различных дифракционных опытах. Сейчас многие задачи дифракции на различных преградах легко решаются методом графических диаграмм Френеля и Корню, с помощью которых находятся длины векторов, соответствующих амплитудам световых волн. Этот мощный метод был разработан более чем через 50 лет после пионерских работ Френеля. В настоящее время векторы и векторные диаграммы применяются в механике (кинематика и динамика), в теории колебаний и волн (механических и электромагнитных), при описании переменных токов и, конечно, в оптике.

Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор Юмор

Точность исполнения

Покидая гостиницу и спеша на поезд, приезжий вдруг забеспокоился: кажется, забыл что-то в номере. Увидев в фойе мальчика, он обратился к нему:

– Сбегай, пожалуйства, в мой номер и посмотри, не оставил ли я там бритвенный прибор. И поскорее – у меня в запасе всего пять минут.

Через четыре минуты запыхавшийся мальчик прибежал и сказал:

– Я посмотрел – он лежит там.