



4 июня 2011 года исполнилось 90 лет Моисею Исааковичу Каганову — автору и другу журнала «Квант». Мы поздравляем Моисея Исааковича с этим славным юбилеем и желаем доброго здоровья, творческого долголетия и плодотворного сотрудничества с журналом «Квант».

МОИСЕЙ ИСААКОВИЧ КАГАНОВ — физик-теоретик, специалист в области квантовой теории твердого тела. Доктор физико-математических наук, профессор МГУ им. М.В.Ломоносова и почетный доктор Вроцлавского технологического университета. Участник Великой Отечественной войны. В 1949 году окончил физико-математический факультет Харьковского государственного университета, с 1949 по 1970 год работал в Украинском физико-техническом институте, а с 1970 по 1994 год — в Институте физических проблем им. П.Л.Капицы. Сейчас живет в США.

Моисей Исаакович — автор многих научных и научно-популярных книг и статей. В журнале «Квант» опубликованы 23 его статьи: «О трении» (совместно с Г.Любарским) (1970, №12), «О механике Аристотеля» (совместно с Г.Любарским) (1972, №8), «Электрон

движется с трением» (совместно с Г.Любарским) (1973, №6), «Электрон излучает фотоны» (совместно с Г.Любарским) (1974, №12), «Выдающийся физик-теоретик XX века (Л.Д.Ландау)» (1983, №1), «Много или мало?» (1988, №1), «Взглянув на термометр...» (1989, №3), «Письма о физике» (1990, №4), «Апология физики» (1992, №10), «Из жизни физиков и физики» (1994, №1), «Вокруг шарика» (совместно с А.Гроссбергом) (1996, №2), «Как устроены металлы?» (1997, №2), «Просто физика» (1998, №4), «Законы сохранения помогают понять физические явления» (1998, №6), «Сверх...» (2000, №5), «Сверх... (2)» (2001, №5), «Об абстракции в физике» (2003, №1), «Удивление, понимание, восхищение» (2004, №2), «Как квантовая механика описывает микромир» (2006, №2, 3), «Квантовые чудеса» (2007, №4, 5), «Лев Давидович Ландау (отрывок из книги «Школа Ландау: что я о ней думаю)» (2008, №1), «Электроны, фононы, магны» (2009, №1), «Две простые, но не вполне тривиальные формулы» (2010, №1).

Предлагаем вниманию наших читателей две статьи из этого списка.

# Апология физики

**М.КАГАНОВ**

**Н**УЖНО ЛИ ФИЗИКУ ЗАЩИЩАТЬ? ОТ КОГО? ЭТИ вопросы, наверное, сразу возникают при взгляде на название статьи. Общеизвестна, например, защита физиков от обвинения в открытии способа массового уничтожения. Не об этом пойдет здесь речь. Физика, будучи источником идей и технологий, используемых в инженерной практике, воспринимается многими как приземленная наука, техническая дисциплина, якобы бездуховная по самой своей сути. Вот от этой точки зрения хочется защитить физику.

Трудно дать всех устраивающее определение духовности. Но мне кажется несомненным, что в него входит интерес человека к окружающему его миру не только как к удобной или неудобной среде обитания. Трудно назвать духовным человека, не замечающего красоты пейзажа, безразличного к восходам и закатам, не интересующегося миром животных и растений, не испытывающего почтительного удивления перед фантастическим «устройством» любого уголка живой природы. Удивление, испытываемое человеком при взгляде на окружающую природу, естественно превращается в любопытство, а развитое обучением и чтением — в любознательность.

Конечно, у разных людей любознательность останавливается на разном уровне познания. Выясняется, что, для того чтобы ответить на «детские» вопросы «почему?» и «как?», необходимо создать глубокие теории, провести огромное число тонких экспериментов. По-

степенно, переходя от простого наблюдения к фиксации строгих результатов экспериментов, а в дальнейшем все глубже проникая в суть вещей, человек постигает структуру Мира, начинает понимать движущие силы природных явлений.

В углублении процесса познания таится опасность. Любование солнечным закатом, его воспроизведение на холсте воспринимается как духовная деятельность<sup>1</sup>, а выяснение спектрального состава солнечного света, исследование механизмов излучения световых квантов многим кажется скучным, узко профессиональным занятием, требующим знания конкретных методов — правил работы с формулами или с приборами. Конечно, к исследованию явлений окружающего нас Мира необходимо подходить профессионально — знать правила работы с формулами и приборами. Дилетантство и верхоглядство особенно нетерпимы в тех науках, которые имеют сложный аппарат и инструментарий. Есть, однако, своеобразное диалектическое противоречие между простотой наиболее глубоких вопросов, которые ставит перед нами Природа, и сложностью способов ответа на них. Иногда человек, занятый (профессионально!) исследованием определенного круга явлений, не видит связи этих явлений с устройством Мира, не ощущает, что его работа вносит допол-

<sup>1</sup> Конечно, только в том случае, если в пейзаж привнесено человеческое отношение к тому, что видит художник.

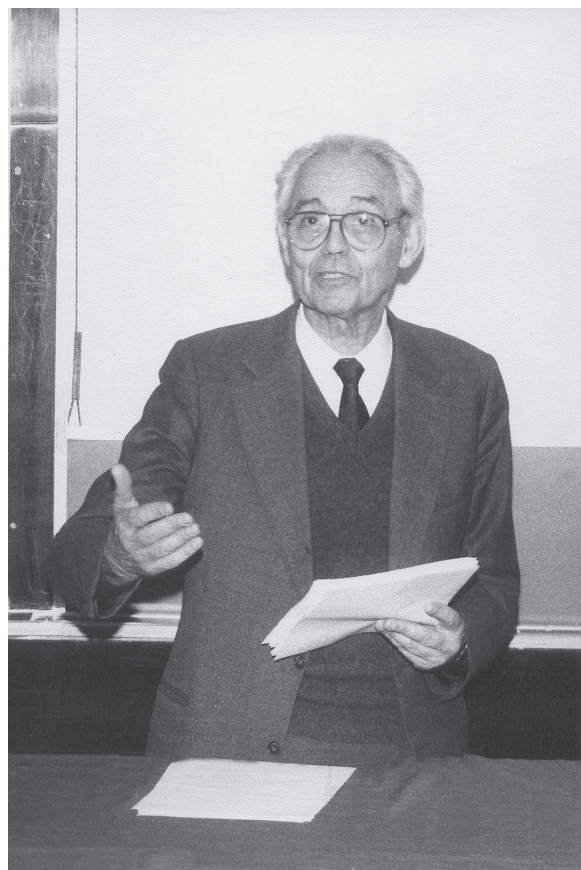
нительный мазок в Картину Мира. Даже в таком (по сути огорчительном) случае я бы не обвинил этого человека в бездуховности. Вполне могу себе представить, что он (этот гипотетический «приземленный» исследователь) бездну эмоций – а не мыслей – потратил на разработку методов вычисления или измерения.

На памяти моего поколения физиков – катастрофа, произошедшая с Л.Д.Ландау<sup>2</sup>. Спасенный врачами и физиками после автомобильной аварии, Лев Давидович не вернулся к научной деятельности. Прожил Л.Д. после катастрофы шесть лет, разговаривавшие с ним многократно убеждались, что у него сохранилась память, что он способен на тонкие оценки чужой деятельности, но работать как физик-теоретик он не мог. Врачи утверждали, что это – последствие травматического отключения той области мозга, которая ответственна за эмоциональную сферу...

Еще один пример, на первый взгляд далекий от предыдущего. Однажды на Ученом совете Института физических проблем (теперь институт носит имя Петра Леонидовича Капицы: тогда П.Л. был жив и вел Совет, о котором идет речь) выступил Яков Борисович Зельдович<sup>3</sup> и высказал (не помню, по какому поводу) общие мысли о природе творчества. Основная мысль сводилась к тому, что любознательность – одна из потребностей человека. Наука – способ удовлетворения этой потребности. И ее необходимо удовлетворять, как потребность в пище, одежде и т.п. Речь, кажется, шла о финансировании фундаментальной науки. Поэтому Я.Б. подчеркивал не практическую ценность результатов научной деятельности, а именно удовлетворение потребности человека (человечества) в знании. Мне выступление очень понравилось (поэтому и запомнил). Как всякое интересное выступление, его активно обсуждали не только на Совете, но и после. Сильное впечатление на меня произвели слова одного молодого талантливый физика-теоретика. Он не то чтобы не соглашался с Я.Б. Но признавался, что когда он занят вычислениями, то любознательность, желание получить ответ на вопрос, который привел к постановке задачи, не играет большой роли, волнует (хочется сказать, вдохновляет – так я его понял) сам процесс вычисления, радость от удивительной гармонии, которая ощущается в процессе использования строгих математических правил, и, может быть, лишь подсоз-

<sup>2</sup> Я думаю, нет необходимости представлять читателям академика, лауреата Нобелевской и Ленинской премий Л.Д.Ландау (1908–1968). Л.Д. – один из крупнейших физиков-теоретиков XX века, снискавший себе славу не только своими научными результатами, но и замечательной многотомной монографией «Курс теоретической физики», по которой учились и учатся многие поколения физиков-теоретиков, а также созданием одной из наиболее знаменитых и активных школ физиков-теоретиков.

<sup>3</sup> Я.Б.Зельдович (1914–1987) – талантливый и необычайно продуктивный физик-теоретик. Ему принадлежат выдающиеся достижения в физике горения и физике элементарных частиц, астрофизике и космологии. Вместе с А.Д.Сахаровым и Ю.Б.Харитоновым принимал участие в создании советского атомного оружия. Академик, трижды Герой Социалистического Труда.



Моисей Исаакович Каганов

нательное ощущение того, что вычисление имеет отношение к реалиям природы. Должен признаться, что слова этого молодого физика соответствуют и моему отношению к рутинному (казалось бы) процессу получения ответа...

Хочется, чтобы читатель-неспециалист имел в виду эту сторону работы физика и, думаю, любого научного работника. Есть затасканное, но точно отражающее суть дела слово – творчество. Научная работа – творчество. Творчество в любом виде человеческой деятельности вызывает вдохновение. И это превращает деятельность научных работников в духовную...

И все же. Есть процесс – творчество и есть результат. Тут, казалось бы, духовность не при чем. Получив результат (измерив или вычислив что-то), мы узнали то, что объективно существует. И, как уверено большинство научных работников, существует вне и независимо от нашего сознания. Имеет ли сам результат научной деятельности какое-либо отношение к духовности? Я уверен, что да. И попробую обосновать свою уверенность. Для этого нужно постараться понять процесс постижения устройства Мира. Далеким от физики людям может показаться, что он напоминает разгадывание головоломки. Знаете, есть такие головоломки: дается шарик или кубик, состоящие из отдельных неправильной формы кусочков. Надо уметь шарик (или кубик) разобрать и собрать из этих кусочков. При попытках разгадки головоломки очень важно то, что знаешь – решение есть. Еще: разобрав головоломку на части, уверен, что части неделимы. И наконец, всегда

известны правила сборки. Они – как законы природы, если сравнить разгадывание головоломок с процессом познания. Так вот о правилах сборки: априори известно, что они есть. Общие для всех головоломок – нельзя гнуть, прилагать силу и т.п. И вполне конкретные, для каждой головоломки свои – порядок разборки и сборки.

А теперь вернемся к Миру. Пожалуй, физики давно убедились, что все из чего-то состоит. Но из чего? Существует ли предел разложимости? Когда я учился в университете, все были уверены (и нас этому учили), что все построено из электронов, протонов и нейтронов, и для этих «кирпичей» мироздания создали специальный термин – элементарные частицы. Потом «элементарные» частицы посыпались, как из рога изобилия. Что ни год, то новая частица. Их классифицировали, распределяли по семействам, устанавливали разнообразнейшие соотношения и... поняли, что все «элементарные» частицы недостаточно элементарны. «Появились», теперь уже только в работах физиков-теоретиков, новые претенденты на роль «кирпичей» мироздания – кварки, удивительное создание человеческого ума, частицы с зарядом  $1/3$  и  $2/3$  от электронного заряда, частицы, которых никто не видел вне бывших элементарных частиц, но в реальности существования которых, пожалуй, никто не сомневается...

В контексте того, о чем я пишу, для меня важно следующее: кварки – порождение человеческого ума, необходимое для построения стройной, непротиворечивой и красивой картины Мира.<sup>4</sup>

Остановимся на пути углубления внутрь мельчайших частиц вещества и задумаемся над тем, как из них строится весь окружающий нас Мир и, конечно, мы сами.

Одно небезынтересное наблюдение. Углубление в структуру «элементарных» частиц не заставило нас пересмотреть свои взгляды на строение кристаллов, не изменило наших представлений о природе магнетизма или сверхпроводимости. В физике существует своеобразная иерархичность. Пытаясь понять свойства макроскопических объектов, нет необходимости добираться «до самой сути». Следует вовремя остановиться. Например, выясняя природу электропроводности и теплопроводности металлов, не следует задумываться о строении ядер тех атомов, из которых металл построен. Иерархичность, конечно, очень помогает и, в частности, обеспечивает консервативность (сохранность) добытых наукой результатов. Действительно, если бы не иерархичность, то любое продвижение вперед тре-

<sup>4</sup> Боюсь, в этой статье не удастся сколько-нибудь подробно обсудить важную для нашего рассказа тему: «Эстетика и наука». Хочется только отметить два обстоятельства. Первое. В оценках научной красоты ученые более едины, чем в оценке бытовой красоты. И второе. По какой-то таинственной причине красивый результат редко бывает неправильным. Если бы я был верующим, то подумал бы, что эстетические критерии у Господа Бога и ученых совпадают. Или даже так: Господь снабдил ученых эстетическими критериями, чтобы им легче было ориентироваться среди научных результатов. Наверное, чтобы последнюю фразу произнести искренне, надо быть глубоко верующим человеком.

бывало бы коренной перестройки всего здания физики. По сути это означало бы невозможность движения вперед в познании свойств Природы.<sup>5</sup>

Итак, вернемся к построению Мира (тел нашего Мира) из мельчайших частиц вещества. Ну, это уж точно конструктор! Огромный, сложный, но все же конструктор. Такое мнение часто приходится слышать, к сожалению, не только от людей, далеких от физики, но и от физиков. Особенно часто, если эти физики занимаются физикой элементарных частиц. И все же с этим суждением я в корне не согласен.

Не согласен потому, что для достижения понимания строения и устройства Мира вещей и тел нельзя сформулировать правила, пригодные для всех случаев жизни. Процесс построения, конечно же, творческий процесс. Мы уже говорили об этом. Но дело не только в том, что приходится, преодолевая трудности, использовать все свои интеллектуальные способности. Главным образом дело в том, что приходится создавать, творить те сущности, из которых, собственно говоря, и строится Мир со всем богатством его свойств.

Боюсь, читатель подумает, что ему морочат голову. «Ведь речь идет о строении Мира из электронов, протонов и нейтронов, – скажет он. – Зачем же создавать еще какие-то «сущности»?» А затем, что иначе ничего нельзя понять. Самый простой пример. Исследуя свойства твердых тел, мы обнаруживаем, что твердые тела очень похожи на... газы. «Ерунда какая-то», – заметит даже несколько обиженно читатель. – Ведь газ – совокупность почти невзаимодействующих частиц, а твердое тело состоит из сильно взаимодействующих частиц. Чтобы разделить твердое тело на части, надо потратить немало энергии. А вы говорите, что твердое тело похоже на газ частиц». «Но я и не говорил про газ частиц», – возразит автор. И действительно, твердое тело ведет себя как газ не частиц, а квазичастиц – фононов, специально введенных сущностей, позволяющих понять свойства макроскопических тел. Конечно, можно долго спорить, есть ли фононы или они *введены*. Конечно, они есть, но не как структурные единицы вещества. Не из них состоит твердое тело, а из атомов или молекул, а бывает и из ионов разных знаков. Но чтобы понять, как движутся атомные частицы, пришлось ввести фононы, т.е. выяснить (увидеть, почувствовать, угадать), что движутся атомные частицы так, будто тело состоит не из атомов (молекул, ионов), а, повторим, из квазичастиц – фононов. А введя фононы, удалось получить бесконечное число следствий, подтверждающих факт существования фононов. Твердое тело проводит тепло так, как проводит тепло газ фононов. И поглощает звук так, как поглощает газ фононов. И так далее и тому подобное...

Здесь не место перечислениям и подробным описаниям. Хочется подчеркнуть: фононы – творение ума, они

<sup>5</sup> Не стоит ли об этом задуматься творцам перестройки нашего общества? Как было бы хорошо, если бы в результате перестройки возникло общество, жизнедеятельность структур которого не зависит или хотя бы мало зависит от новаций, происходящих в политических, идеологических и других сферах. Даже пометать об этом и то приятно!



«созданы» для понимания, они – результат духовной деятельности человека, его творчества. Конечно, можно сказать и иначе: физики увидели и расшифровали, как движутся атомные частицы в твердом теле. Но что уж заведомо духовная деятельность, так это создание новых слов, а значит, и новых понятий. Для описания движения атомных частиц пришлось придумать новые слова: квазичастицы, фононы, магноны... – слова, которых не было в доквантовой физике твердого тела.

Объективность существования материи часто «доказывают» фактом существования Природы – в ее очень похожей на сегодняшнюю форме – до появления на Земле человека. Мне, должен признаться, подобное утверждение кажется убедительным. Или, точнее, не столько логически убедительным, сколько соответствующим моему восприятию Природы эволюционирующей и в результате эволюции сотворившей думающее существо – человека, способного постичь (постигать) устройство Природы.

Процесс постижения оказался необычайно трудным, необычайно продуктивным и (это – главное, что я хочу сказать) необычайно тесно связанным с самим процессом мысли. В Природе, в свойствах материи человек открывает то, что (казалось бы!) есть только продукт, результат деятельности человеческого мозга, прежде всего – логику. Математика есть материализованная логика. Почему Природа подчиняется математическим законам? Почему она описывается доступными человеческому уму законами? Опять хочется (в поисках уютного ответа) прибегнуть к религиозному мировоззрению и, как бы обратив всю постановку вопроса, сказать: «Природа создана такой, чтобы быть постижимой человеческим умом...»

Я не знаю ответов на эти вопросы. И, наверное, не умею слишком строго их формулировать. Я не философ. В разное время, в разные периоды жизни к этим вопросам у меня есть и было разное отношение. Не всегда они меня волновали. Занятый решением конкретных задач, я просто не замечал, что подобные

вопросы существуют. Встретившись с ними в статьях классиков (Эйнштейна, Бора, Шредингера, позднее Гейзенберга), я относился к ним с почтением, не допускающим «вмешательства». Но постепенно, не переставая заниматься вполне конкретной вычислительной деятельностью физика-теоретика, обнаружил, что меня волнуют общие проблемы, что интересны не только вполне определенные результаты теории или эксперимента, но и то, какое место занимают эти результаты в том, что принято называть научной картиной Мира. И, более того, возникла потребность обдумать, в каком соотношении с Миром находится научная картина Мира.

Не пытаюсь перекалцифицироваться в профессионального философа, я написал несколько статей и одну небольшую брошюру. Но ни разу я не высказался столь определенно, как здесь, не выразил своей уверенности, что Наука – одна из сторон духовной жизни человечества. Что невозможно ее свести к полезной для развития производительных сил деятельности человека. И даже к удовлетворению любознательности как жизненно важной потребности людей. Что нет ни одного сколько-нибудь важного научного результата, в который не была бы вложена частица души человеческой. И хочу повторить еще раз. Частица души вложена не только в процесс добывания истины, но и в саму истину. Наука есть в каком-то смысле результат очеловечения Природы. Слова, понятия, соотношения – это то, чем наделил Природу человек. Если художник показал людям внешнюю красоту Мира, то ученый вскрыл существование внутренней интеллектуальной красоты, прежде всего проявляющейся в познаваемости законов Природы, в удивительном многообразии проявлений сравнительно просто формулируемых основных законов, управляющих движением материи.

...Захотелось мне поделиться этими мыслями с молодыми людьми, так как заметил утрату романтического отношения к Науке и, особенно, к физике.

## Много или мало?

М.КАГАНОВ

**О**ДНАЖДЫ Я ЗАДУМАЛСЯ, СКОЛЬКО КНИГ ЧЕЛОВЕК может прочитать за жизнь. Оценил я это число так. Скажем, человек читает 60 лет. В году 52 недели. Пусть в неделю человек прочитывает две книги. Значит, около 100 в год. Итого – примерно 6000 книг за жизнь. Это число, не обсуждая, как оно получилось, я назвал разным людям. «Так мало!» – сказали одни. «Неужели так много?!» – удивились другие. И я подумал: в нас нет запрограммированной чувственной оценки чисел. Только сравнивая одно число с другим, только придавая числу определенный смысл, мы ощущаем его величину. Число прочитанных

книг, конечно, имеет вполне определенный смысл (это не просто безымянные 6000), но ощутить его (оценить, сказать – много это или мало) может только тот, кто сумеет подобрать сравнение. Например, задумавшись: «А сколько книг в неделю (месяц, год, ...) читаю я?»...

Физика имеет дело с именованными величинами. Любая физическая величина имеет размерность. Существует специальный раздел физики, изучающий принципы размерности, системы единиц, эталоны этих единиц и т.д. Должен признаться, всегда этот раздел физики мне казался достаточно скучным. Может быть, из-за того, что из него много фактов надо держать в

голове: как связаны между собой джоуль и эрг, чем отличается эрстед от гаусса, сколько кулонов в единице заряда по системе СГС и т.д. и т.п. Но, как ни грустно, без этого обойтись нельзя. Приходится, переходя от одних значений к другим, выражать их в определенных единицах, и притом в одинаковых. Сравнивая магнитное поле, созданное сверхпроводящим соленоидом, с магнитным полем Земли, оба поля надо выразить в одних единицах: в гауссах или в теслах – безразлично, отношение полей от этого не зависит. А ведь именно отношения физических величин нам, как правило, и важны, так как именно они (безразмерные отношения) определяют то, что физики любят называть «физикой явления». Эту мысль мы разовьем ниже, а сейчас еще несколько слов о размерных величинах.

Задумывались ли вы о том, почему все физические величины могут быть выражены через единицы длины (сантиметр), времени (секунду) и массы (грамм)?<sup>1</sup> Это относится и к электрическому, и к магнитному, и к тепловым, и к оптическим величинам. В физике нет величин, которые нельзя было бы записать через сантиметр, секунду и грамм. Ответ на вопрос, почему все физические величины выражаются через грамм, сантиметр и секунду, может показаться неожиданным. Дело в том, что это связано с определением физики. Физика занимается теми явлениями, которые могут быть описаны с помощью сантиметра, секунды и грамма. Сантиметр и секунда нужны для описания движения в пространстве (кинематика), а грамм необходим для связи этого движения с силой, вызывающей движение (динамика). Вспомните, что по закону Ньютона сила равна ускорению, умноженному на массу. Конечно, существует множество явлений, которые мы не можем описать с помощью физических величин. Например, все, что относится к развитию человеческого общества – к истории, экономике и т.п. Исследование этих явлений, требующее иногда сложных математических методов, не принадлежит физике. И, конечно, физика не исчерпывается измерениями. Фундаментальную роль в ней играют представления, положения, законы, иногда выраженные в виде математических уравнений, а иногда ограничивающиеся словесной формулировкой. Вот яркий пример: все тела состоят из молекул, молекулы – из атомов, атомы – из ядер и электронов, а ядра – из протонов и нейтронов. В этой фразе – огромная информация, концентрация многовекового изучения природы, изучения, основанного на измерении величин, которые (все!) могут быть выражены через сантиметр, секунду и грамм.

К основным законам природы, несомненно, следует отнести законы сохранения. Кроме хорошо извест-

ных – законов сохранения энергии и импульса – существуют и более экзотические. Например, закон сохранения барионного заряда, утверждающий, что число частиц типа протон или нейтрон не изменяется при взаимодействии между частицами.<sup>2</sup> Или другой пример: состояние атомных и субатомных частиц характеризуется некоторой величиной, которую называют волновой функцией. Чаще всего ее обозначают греческой буквой  $\Psi$ . Волновая функция  $\Psi$  – функция координаты  $\vec{r}$ . Так как все точки пустого пространства эквивалентны, то любую точку можно избрать за начало координат. Так вот, функция  $\Psi(\vec{r})$ , согласно уравнениям квантовой механики, может быть либо четной, либо нечетной –

$$\text{либо } \Psi(-\vec{r}) = \Psi(\vec{r}),$$

$$\text{либо } \Psi(-\vec{r}) = -\Psi(\vec{r}),$$

причем, что бы с частицей ни происходило, это свойство волновой функции сохраняется. Говорят, что существует закон сохранения четности. Если у частицы четная волновая функция, то такой частице можно приписать четность +1, если волновая функция нечетная – то –1. Кроме того, волновая функция нескольких не взаимодействующих друг с другом частиц есть произведение волновых функций отдельных частиц, а ее четность – произведение четностей отдельных частиц. Это дает возможность обобщить закон сохранения четности на весьма сложные случаи. Например: сталкиваются две частицы – четная и нечетная, а в результате рождаются новые частицы; если их две, то одна из них должна быть четной, а другая нечетной, а если три, то все они могут быть нечетными. Для нас важно: сохраняется безразмерное число +1 или –1.

Но для проверки такого и подобных утверждений необходимы измерения. Для этого что-то должно двигаться за счет действия на это «что-то» каких-то сил. И мы опять приходим к физическим величинам, размерность которых может быть сведена к сантиметру, секунде, грамму. Я очень не хотел бы, чтобы меня восприняли как «врага» безразмерных чисел. Наоборот: одна из задач этой статьи – убедить читателя в пользе и даже необходимости безразмерных комбинаций размерных величин. Более того, истинно безразмерные числа, т.е. не являющиеся комбинациями размерных величин, тоже часто встречаются в физике. Трудно найти формулы, в которые не входят трансцендентные числа  $e$  и  $\pi$ , не говоря уже просто о самых различных численных множителях, имеющихся в любой формуле.

Вернемся к физическим величинам, обладающим той или иной размерностью. Задача физической теории – связать различные физические величины соотношениями, которые допускают экспериментальную проверку. Например, желая проверить, как изменяется со временем путь  $s$ , проходимый частицей, движущейся с постоянным ускорением  $a$ , мы должны сравнить свои

<sup>1</sup> Статья написана в системе единиц СГС (сантиметр – грамм – секунда). В школе эту систему уже давно не изучают, однако профессиональные физики обычно пользуются именно ею (а не знакомой школьникам СИ). Дело в том, что при написании формул в этой системе единиц появляющиеся в них коэффициенты имеют ясный физический смысл. Подумав, редакция не решилась переводить формулы статьи в СИ, так как при этом аромат настоящей физики, веющий от статьи, был бы безвозвратно утерян. (Прим. ред.)

<sup>2</sup> Античастицам приписывается барионный заряд противоположного знака. Так, у протона и нейтрона барионный заряд равен 1, у антипротона и антинейтрона он равен –1.

измерения с формулой

$$s(t) = v_0 t + \frac{at^2}{2} = v_0 t \left( 1 + \frac{at}{2v_0} \right), \quad (1)$$

где  $v_0$  – начальная скорость частицы. Это – очень простая формула. Но и она (как все формулы в физике!) требует, чтобы все входящие в нее величины имели соответствующие размерности: если  $s$  измеряется в сантиметрах, а  $t$  – в секундах, то  $v_0$  – в см/с и  $a$  – в см/с<sup>2</sup>. Но пусть мы хотим не только проверить эту формулу, но и выяснить, как сказывается на характере движения частицы ускорение. Для этого удобна вторая форма записи (когда  $v_0 t$  мы вынесли за скобки). Из нее видно: сначала (при  $t \ll 2v_0/a$ ) роль ускорения незначительна – частица практически движется с постоянной скоростью  $v_0$ , зато потом (при  $t \gg 2v_0/a$ ) частица «забывает», какая у нее была начальная скорость, – ее движение определяется ускорением. Как видите, нельзя однозначно ответить на вопрос, большое или маленькое ускорение у частицы. Ответ зависит от того, какой этап движения нас интересует. А выяснили мы это, сравнив с единицей безразмерное отношение  $at^2/(2v_0 t) = at/(2v_0)$ . Строго говоря, отбрасывая первое или второе слагаемое, надо было бы учесть, с какой точностью измеряет пройденный путь наш прибор, и разрешить себе пренебрегать соответствующим слагаемым только в том случае, если оно окажется меньше относительной ошибки измерения. Мы больше не будем вдаваться в подобные тонкости, хотя они очень важны для анализа экспериментов.

При решении реальных задач мы часто должны упрощать – без этого попросту задачу решить нельзя. Упрощение всегда основано на пренебрежении малыми членами по сравнению с большими. Но для того чтобы что-то отбросить, надо произвести сравнение членов, а сравнивать можно только величины одной размерности. Сказанное формулирует первое (основное) правило пользования размерными величинами. Многие физики так боятся это правило нарушить, что, начиная решать задачу, сразу обезразмеривают входящие в нее величины.

Вернемся к движению частицы с постоянным ускорением. Давайте время будем измерять в единицах  $2v_0/a$ , т.е. введем вместо времени  $t$  «безразмерное время»  $\tau = at/(2v_0)$ , а пройденный путь – в единицах  $2v_0^2/a$ , т.е. введем «безразмерную длину»  $\sigma = as/(2v_0^2)$ . Тогда формула (1) предельно упростится:

$$\sigma = \tau(1 + \tau). \quad (2)$$

Переход от формулы (1) к формуле (2) и называется обезразмериванием. Преимущество такого подхода очевидно: изучив зависимость  $\sigma$  от  $\tau$ , мы узнаем, как движется частица с любым постоянным ускорением, какую бы начальную скорость она ни имела.

Надо признаться: в сложных случаях не всегда рекомендуют обезразмеривать формулы, так как, проверяя размерность до и после вычисления, легко найти



ошибку или убедиться, что вычисление, по-видимому, проделано правильно.

Для того чтобы сформулировать еще одно правило, которое необходимо учитывать при упрощениях, основанных на существовании в формуле (в уравнении) малой величины, чуть усложним формулу (1), считая, что в момент времени  $t = 0$  тело находилось в точке с координатой  $s_0$ :

$$s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1')$$

Теперь расстояние будем измерять в единицах  $s_0$ , а время – в единицах  $s_0/v_0$ . Тогда

$$\sigma = 1 + \tau + \epsilon \tau^2, \quad (2')$$

где  $\epsilon = as_0/(2v_0^2)$  – безразмерная величина.

Прежде всего обратим внимание на то, что, изберя мы прежние единицы для времени и расстояния, мы получили бы другое уравнение –

$$\sigma = \sigma_0 + \tau(1 + \tau),$$

с другой безразмерной величиной  $\sigma_0 = as_0/(2v_0^2)$ , входящей в формулу. Уже этот факт достоин подчеркивания: как правило, есть разные способы обезразмеривания, и нужно выбирать тот, который удобнее. Итак, пусть безразмерная величина  $\epsilon$  в уравнении (2') очень мала ( $\epsilon \ll 1$ ); ну, скажем,  $\epsilon \approx 10^{-3}$  или и того меньше. На минуточку представьте себе, что  $\epsilon$  стоит множителем не перед  $\tau^2$ , а перед какой-нибудь сложной функцией «безразмерного времени»  $\tau$ . Сколь упростилась бы формула, если бы, воспользовавшись тем, что величина  $\epsilon$  мала, мы отбросили слагаемое, содержащее  $\epsilon$ . Но мы понимаем (вернувшись от (2') к (2)), что для этого нужно было бы полностью пренебречь ускорением, или, в более общих терминах, пренебречь специфическими чертами изучаемого движения.<sup>3</sup> Именно этого делать нельзя! Выливать воду из ванночки надо осторожно – можно выплеснуть купающегося в ней ребеночка.

<sup>3</sup> Не говорю уже о формальной неправильности пренебрежения слагаемым  $\epsilon \tau^2$  при больших значениях  $\tau$ . Думаю, это совершенно понятно. И все же:  $\epsilon \tau^2$  становится порядка единицы или больше только при  $\tau \geq 1/\sqrt{\epsilon}$ . Это время стремится к бесконечности, когда  $\epsilon \rightarrow 0$ . Представим себе, что мы изучаем некий процесс, который длится небольшое конечное время, а выяснилось, что слагаемое  $\epsilon \tau^2$  достигает значения единицы тогда, когда наш процесс уже давно закончился. Конечно, в этом случае без зазрения совести такое слагаемое можно опустить.



До сих пор мы имели дело с известным законом движения и манипулировали входящими в формулу известными величинами. Теперь подумаем о значительно более сложной проблеме. Давайте мысленно перенесемся в доквантовую эру. Опыты Резерфорда показали: во-первых, атом – сложная система, масса атома сосредоточена в его положительно заряженном ядре, причем масса ядра  $M$  в тысячи раз превышает массу отрицательно заряженного электрона  $m$  (электрон уже открыт, и заряд его измерен, он равен  $e = -4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. заряда СГСЕ =  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл); во-вторых, внутри атома (на расстояниях порядка  $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$  см) действует закон Кулона.

Итак, мы знаем, что внутри атома, состоящего из тяжелого ядра – протона и легкого электрона, для простоты ограничимся атомом водорода, действует закон Кулона. Кроме того, известно (было известно и в доквантовую эру!), что все атомы водорода одинаковы, т.е. имеют одинаковые размеры порядка  $10^{-8}$  см. Обозначим размер атома водорода через  $a_0$  и постараемся понять: почему  $a_0 \sim 10^{-8}$  см? Для этого выразим  $a_0$  через характеристики составных частей атома – заряд  $e$  и массы электрона  $m$  и протона  $M$ . Массу протона, по-видимому, можно исключить, считая, что протон покоится, а электрон движется вокруг него (в действительности обе частицы движутся вокруг общего центра масс, но поправки, связанные с этим, весьма малы). Остаются величины  $m$  и  $e$ . Но легко проверить (проверьте!), что из них нельзя «построить» комбинацию размерности длины.

Вывод таков: классическая физика не может установить «природу» размеров атома. К этому, в настоящее время хорошо известному, выводу можно прийти и другими путями. И известен «выход из положения». Его обеспечила квантовая, или атомная, механика. Не входят в нашу задачу рассказывать о квантовой механике в этой статье. Напомним только, что квантовая механика ввела в физику новую мировую константу – постоянную Планку  $\hbar \sim 10^{-27}$  г·см<sup>2</sup>/с, и вернемся к атому водорода. В нашем распоряжении теперь три величины  $m$ ,  $e$  и  $\hbar$ , а из них легко построить величину размерности длины:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} \approx 0,4 \cdot 10^{-8} \text{ см}. \quad (3)$$

Мы без оговорок приравняли выведенную комбинацию размеру  $a_0$ , так как с хорошей точностью она действительно равна размеру атома водорода.

Теперь несколько серьезнее задумаемся о логике вывода формулы (3). Не решая задачи, не задумываясь над тем, какими уравнениями описывается движение электрона в атоме, только зная, какие величины ( $a_0$ ,  $e$ ,  $\hbar$ ,  $m$ ) должны входить в неизвестное уравнение, мы решаемся сделать вывод, зафиксированный формулой (3). Какие у нас для этого основания?

Ясно, что уравнение, которое нам придется решать для определения размера атома, будет содержать в виде



неизвестной величины  $x$  безразмерную<sup>4</sup> комбинацию, т.е.  $x = a_0 m e^2 / \hbar^2$ , а величина  $x$  должна быть найдена путем решения какого-то уравнения, скажем  $f(x) = 0$ . Но откуда у нас уверенность, что корень этого уравнения порядка единицы? Ведь легко себе представить, что  $x_0$  – корень уравнения  $f(x_0) = 0$  – какое-нибудь огромное или, наоборот, очень маленькое число. А тогда  $a_0 = x_0 \hbar^2 / (m e^2)$  либо значительно больше, либо значительно меньше истинных размеров атома; т.е., попросту говоря, ничего о размере атома мы сказать не можем. Здесь нас выручают интуиция, привычка, опыт. В большинстве случаев искомый корень уравнения действительно оказывается порядка единицы, и тогда наши соображения, основанные на анализе размерности, подтверждаются точным расчетом.

Но бывает и иначе.

В моей практике встретился такой случай. С моим учителем И.М.Лифшицем мы теоретически исследовали свойства вещества, в котором происходят деления радиоактивных ядер (свойства тепловыделяющих элементов реактора). Это непростая задача – выяснить, как влияют на свойства тела происходящие в нем (в случайных местах, в случайные моменты времени!) радиоактивные распады. Но оказалось, что, зная энергию, которую несут осколки ядер, можно воспользоваться соображениями размерности и оценить (прикинуть) результат сравнительно просто. Интуиция подсказала, что результат следует проверить точным расчетом. Оказалось, точное значение отличается от оценки (прикидки) множителем  $(2\pi)^{-5} \approx 10^{-4}$  (!). Я думаю, что если бы точный расчет был более сложен, чем это было в действительности, и нам пришлось бы ограничиться оценками, то мы в конце концов нашли бы (и без расчета) множитель  $(2\pi)^{-5}$  – ведь его появление отнюдь не случайность...

А вот другой, можно сказать противоположный, пример. И.М.Лифшиц и А.В.Погорелов (вы знаете А.В.Погорелова как автора учебника и книг по геометрии) исследовали закономерности деления тяжелых ядер. Аналогия с каплями обычной жидкости и сообра-

<sup>4</sup> Сколько-нибудь сложная функция, аргумент которой – размерная величина, вообще бессмысленная вещь. Ведь, как правило, функция задается рядом. Например,  $e^x = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \dots$ . А складывать можно только величины одной размерности.

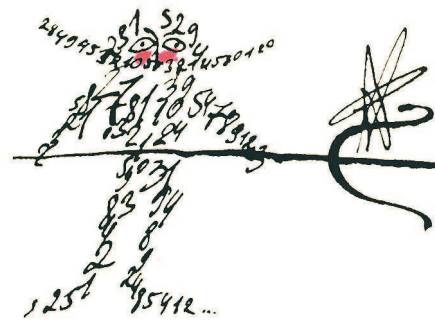


жения размерности помогли сравнительно просто решить задачу и получить ответ с точностью до безразмерного множителя. Авторам хотелось думать, что неизвестный безразмерный множитель близок к единице (насколько я помню, И.М.Лифшиц был в этом уверен). А.В.Погорелов сконструировал специальный прибор, позволяющий с помощью «обычной» жидкости измерить ту величину, которую оценили теоретически. Оказалось, что искомый множитель равен 1,1 (!).

Что следует из этих двух примеров? Только то, что надо проявлять осторожность при оценках, основанных на соображениях размерности. Проявлять осторожность, но ни в коем случае не отказываться от методов, основанных на этих соображениях.

Когда речь идет об области физики, занимающейся такими явлениями, для понимания которых достаточно использовать известные законы природы (т.е. они описываются с необходимой точностью известными уравнениями), методы размерности служат наводящими соображениями, подспорьем интуиции. С большими или меньшими трудностями можно произвести соответствующий расчет и получить точный ответ. Соображения размерности приобретают особую роль, когда физик выходит в непознанную область, когда нет строгих уравнений, на которые можно опереться, и можно только прикидывать, оценивать и угадывать. Эта деятельность физиков-теоретиков требует особого чутья, основанного на глубоком знании всей структуры физики, на понимании того, что можно подвергать сомнению (пересмотру), а что незыблемо, отказ от чего разрушает (буквально) все здание физики. Наука значительно более консервативна, чем кажется тем, кто смотрит на нее со стороны и восхищается ее успехами, кому кажется, что наука все может и что ей все доступно. Наука описывает реально существующий Мир, управляемый реально существующими законами. Эти законы наука постепенно, в мучительных поисках постигает. Построение логически непротиворечивой картины Мира – столь сложная задача, что надо с трепетной осторожностью относиться к каждой детали этой картины, непрестанно задавая себе вопрос: не нарушу ли я что-то во всей картине, если предположу нечто новое, необходимое (как мне кажется) для объяснения какого-то факта?

Я понимаю, что последний абзац выглядит совершенно абстрактным. И все же не хочу приводить примеры – главным образом потому, что не чувствую себя специалистом в той физике, из которой эти примеры следовало бы черпать: из физики элементарных частиц, из космологии. Хочу только обратить внимание на следующее. Одну и ту же размерность имеют совершенно различные величины: расстояние между Москвой и Нью-Йорком и размер атома водорода, время обращения Нептуна вокруг Солнца и период колебаний атомов в молекуле водорода, масса протона и масса электрона и т.д. и т.п. – примеры можно множить до бесконечности. Разделив размерную величину на величину той же размерности, мы получим безразмерное число. Можно задать вопрос: почему получилось именно это число, а не какое-нибудь другое? Ясно, что так



как число отношений бесконечно, то и число вопросов тоже бесконечно. Надо ли все их задавать? И нужно ли на них отвечать? Ответ дает только опыт. Опыт отдельного человека и опыт всей физики. В ходе развития науки перечень вопросов изменяется вместе с перечнем ответов на них, причем, естественно, вопросы несколько опережают ответы, правда, опережают не слишком значительно. Дело в том, что правильно сформулированный вопрос, как правило, несет в себе ответ. Иногда вопрос выглядит совершенно невинным, а ответ на него очень сложен. Чего уж проще: почему отношение массы протона  $M_p$  к массе электрона  $m_e$  равно 1838? А ответ на этот вопрос, насколько я знаю, не известен. Или другое знаменитое число – так называемая постоянная тонкой структуры  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$ . Постоянную тонкой структуры так и называют – одна сто тридцать седьмая! Почему  $1/137$  – современная наука даже не формулирует. Но использует  $\alpha$  многократно. Относительная малость заряда ( $e^2 = \hbar c/137 \ll \hbar c$ ) приводит буквально к бесконечному числу следствий.

Числа 137 и тем более 1838 – значительно больше единицы. Могут ли они быть следствием теории, корнем какого-либо уравнения? А ведь можно указать пример, который приводит к буквально астрономическому числу. Отношение силы электростатического отталкивания друг от друга двух протонов к силе гравитационного притяжения между ними:  $e^2/(M_p^2 G)$ , конечно, безразмерное число. Оно равно  $10^{36}$  (!). Решая какое уравнение, можно надеяться получить такое фантастическое число? Сейчас делается попытка построить суперфизику, объединяющую все взаимодействия между частицами. По-видимому, она – эта будущая наука – должна «выдать» в виде ответа это грандиозное число. Возможно, правда, в этом не будет ничего удивительного: просто (!) искомой величиной будет не само отношение сил, а, скажем,  $\ln \ln (e^2/(M_p^2 G)) \approx 4,4$ . Но это уже не соображение, а фантазирование... А я хотел бы предостеречь читателя от различных неоправданных сравнений величин одной размерности и обнаружения каких-то мистических соотношений. Попытка ответить на вопрос, чему должно быть равно то или другое отношение двух размерных физических величин, должна основываться на глубоком знании предмета. Озарение здесь не поможет – поверьте мне!