

ФИЗИЧЕСКОЕ МЫШЛЕНИЕ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ НАУКИ

Рассматриваются характерные черты физического мышления, позволяющие говорить о его определенной парадоксальности. Обсуждаются причины возникновения и становления, а также значение принятого в физике способа мышления в развитии этой науки. Основные положения анализируются на конкретных примерах развития квантовой механики и современной теории необратимых процессов. Сопоставляются стили мышления и философские воззрения некоторых физиков, сыгравших выдающуюся роль в развитии науки. Обсуждаются причины возникновения и роль парадоксов в развитии физического знания. Намечаются основные направления развития методики обучения физике, обеспечивающие становление парадоксального характера мышления обучаемых, в частности, последовательная реализация концепции модельного характера знаний о законах природы.

А. Kondratyev, E. Sitnova

THINKING IN PHYSICS AT THE CURRENT PERIOD OF THE DEVELOPMENT OF SCIENCE

Specific features of thinking in physics are considered, these features revealing certain paradox. The causes of the emergence and establishment of the conventional style of thinking in physics are discussed. The examples of the development of quantum physics and modern theory of irreversible processes are given to support the basic assumptions. The style of thinking and philosophical views of several outstanding physicists who played an important role in the creation of science are compared. The reasons and the significance of physical paradoxes in the development of physical knowledge are investigated. The main directions of education in physics methodology are outlined.

Корни парадоксальности мышления в современной физике

В данной работе мы остановимся на анализе характерных черт физического мышления, отличающих его от стиля

мышления в других естественных науках. Наши знания о природе не априорны, а вытекают из анализа и обобщения опыта, поэтому проникновение человеческого разума в новую, неизведанную область явлений влечет необходимость

периодического коренного пересмотра и обобщения основных понятий и представлений физики. При этом с каждым новым шагом выявляются и уточняются границы применимости понятий и законов, которые ранее считались универсальными, вскрываются закономерности более общего характера.

Требования к каждой новой теории становятся все более жесткими: она должна не только объяснять вновь открытые факты, но и содержать в качестве частного или предельного случая все ранее открытые закономерности и теории, указывая точные границы их применимости. Это придает физической теории подчас совершенно неожиданные черты, определенный элемент «сумасшествия», когда парадоксальность лежащих в ее основе положений еще более усиливается парадоксальностью получаемых результатов. Отсутствие такой парадоксальности, как правило, означает фиаско новой теории. Здесь уместно вспомнить высказывание Н. Бора по поводу теории В. Гейзенберга, пытавшегося при помощи единого спинорного поля объяснить свойства элементарных частиц: «Для подлинно новой теории теория Гейзенберга недостаточно сумасшедшая» (*not crazy enough*)¹.

Рассмотрим с этой точки зрения нерелятивистскую квантовую механику. Хотя основное для квантовой механики соотношение неопределенностей было сформулировано Гейзенбергом в 1927 г., законченная формулировка этого соотношения — принцип дополнительности, исчерпывающий анализ его физического содержания, анализ возможностей наблюдения микрообъектов и измерения их дополнительных характеристик, как и вся формальная математическая схема этой теории, появились значительно позднее², и одной из причин такого растянутого во времени развития теории послужила ее исключительная парадок-

сальность по сравнению с классической механикой.

Как подчеркивал Л. И. Мандельштам, — «всякая физическая теория состоит из двух дополняющих друг друга частей». Одна часть — это уравнения теории, устанавливающие соотношения между математическими символами. Другая часть — связь этих символов с физическим миром. Без второй части «теория иллюзорна, пуста». Без первой части «вообще нет теории»³. В рамках классической механики понятия частицы и волны — взаимоисключающие понятия. Здесь объект может быть либо частицей (характеристики — траектория, координата и т. д.), либо волной (частота, фаза, фронт волны и т. д.).

Предложив фотонную теорию света, Планк в 1900 г., и Эйнштейн в 1905 г. причудливым образом соединили несовместимые с точки зрения классической физики корпускулярные и волновые представления, причем оба рассматривали эту теорию только как эвристическую точку зрения, которая может быть наводящим соображением. Напротив, Н. Бор в своей работе исходил из убеждения, что эта двойственность, парадоксальность является самым существом новой квантовой физики.

Физический смысл корпускулярно-волнового дуализма микрообъектов, наиболее парадоксального положения квантовой физики, заключается в потенциальной возможности проявления как корпускулярных, так и волновых свойств, в зависимости от условий эксперимента. Математические соотношения Планка и де Бройля

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

связывают волновые и корпускулярные свойства: правые части содержат величины ν и λ , определяемые из интерфе-

ренционных явлений, а левые части — E и p , которые характеризуют микро-объект как частицу⁴. Отметим, что такая «физическая» трактовка соотношений (1) отличается от чисто математической трактовки равенств гораздо более глубоким содержанием, входящим за рамки их математического смысла.

Дальнейшее развитие этого вопроса вскрыло еще более глубокое физическое содержание соотношений (1), а тем самым и парадоксального характера корпускулярно-волнового дуализма. Атомные процессы сопровождаются эмиссией разных излучений — корпускулярных (пучки частиц — электроны, протоны, мезоны и т. д.) и волновых (электромагнитные волны — видимый свет, рентгеновские лучи и т. д.). Первые движутся с различными скоростями, отклоняются под действием силовых полей, т. е. ведут себя как «шарики». Вторые — распространяются со скоростью света, интерферируют и дифрагируют. Однако более поздние опыты показали, что любые виды излучения способны к проявлению и корпускулярных, и волновых свойств, при этом отношение энергии к частоте (или импульса к волновому числу $k = 2\pi/\lambda$) во всех без исключения опытах одинаково и равно введенной по иному поводу постоянной Планка h .

Создание логически полной квантовой теории потребовало отбросить некоторые принципиальные положения классической теории. И именно это «парадоксальное» действие позволило создать внутренне непротиворечивую новую теорию. При построении квантовой теории было отброшено утверждение классической физики, в соответствии с которым процесс измерения не возмущает состояние системы. Это привело к необходимости отказа от положения, согласно которому каждая динамическая переменная в любой момент времени

имеет объективное определенное значение. Оба эти положения в классической физике выглядели само собой разумеющимися, казалось, они лежат в основе каждой разумной теории. Поэтому их невозможно отбросить, не разрушая всей теории, и это явилось причиной того, что раньше их в явном виде никто не формулировал. К необходимости отказа от этих положений привело открытие соотношений неопределенностей, определивших всю внутреннюю структуру современной квантовой теории. Как отмечает Г. Фальк, — «С установлением какой-либо теории она сама становится предметом исследования прежде всего, когда она благодаря дополнениям в такой мере расширяется, что становится все труднее проникнуть в ее логические связи»⁵.

Таким образом, парадоксальное действие, соединившее, казалось бы, несовместимые представления, привело к созданию непротиворечивой новой теории. И при этом классические представления «выживают» в предельных случаях — новая теория сводится к старой в области справедливости последней⁶.

Описанная выше ситуация была характерна для первой половины XX века, когда основное внимание было приковано к созданию новой квантовой физики, которая, помимо огромного эвристического значения, оказала решающее влияние на развитие новой техники и информационных технологий. Положение стало еще более драматическим во второй половине XX века, когда на передний план поисков в физике стал выдвигаться парадокс времени — существование «стрелы времени», по терминологии, введенной А. Эддингтоном⁷. В том виде, как оно входит в фундаментальные законы физик, начиная от динамики Ньютона до теории относительности и квантовой физики, время не содержит в себе различия между прошлым и будущим. Необратимый во времени

характер реальных макроскопических явлений делает существование стрелы времени очевидным, порождая тем самым сакраментальный вопрос о том, каким образом может возникнуть стрела времени из фундаментальной концепции обратимых во времени динамических законов. Наивные первоначальные попытки утверждать, что стрела времени — «всего лишь феноменология», обусловленная особенностями нашего описания природы, оказались несостоятельными и с научной точки зрения абсурдными. Как образно отмечается у И. Пригожина и И. Стенгерса, — «Мы дети стрелы времени, эволюции, но отнюдь не ее создатели»⁸.

Уже в классической динамике в последние десятилетия обнаружилось свойства, несовместимые с понятием казалось бы навеки установленного лапласовского детерминизма. В 1986 г. президент Международного союза теоретической и прикладной механики Д. Лайтхилл так охарактеризовал сложившуюся к тому времени ситуацию: «Здесь я должен остановиться и снова выступить от имени широкого всемирного братства тех, кто занимается механикой. Мы все глубоко сознаем сегодня, что энтузиазм наших предшественников по поводу великолепных достижений ньютоновской механики побудил их к обобщениям в этой области предсказуемости, в которые до 1960 г. мы все охотно верили, но которые, как мы теперь понимаем, были ложными. Нас не покидает коллективное желание признать свою вину за то, что мы вводим в заблуждение широкие круги образованных людей, распространяя идеи о детерминизме систем, удовлетворяющих законам движения Ньютона, — идеи, которые, как выяснилось после 1960 г., оказались неправильными»⁹.

Динамические системы оказались подразделяющимися на устойчивые и неустойчивые. Крайним случаем неустойчивых систем являются «хаотиче-

ские» системы, для которых описание в терминах траекторий становится неадекватным, поскольку траектории, первоначально сколь угодно близкие, со временем экспоненциально расходятся. Здесь проявляется негативный аспект хаоса — невозможность определенных предсказаний вследствие расходимости соседних траекторий. Это соответствует чувствительности рассматриваемой системы к начальным условиям, обычно указываемой в качестве причины динамического хаоса¹⁰. Однако хаос имеет и позитивный аспект, так как вследствие того, что отдельные траектории движения становятся недопустимой идеализацией, приходится обратиться к новому, вероятному способу описания движения системы в терминах ансамбля траекторий.

Исследование квантовых систем показало, что хаос вынуждает отказаться от использования гильбертова пространства и перейти к обобщенным «оснащенным» пространствам, введенным в математике И. Гельфандом в 60-е годы XX века. При этом эволюция распределения вероятности описывается в пространстве, структура которого зависит от динамики¹¹. Относительно недавно было обнаружено, что хаотические динамические системы могут допускать дополнительные спектральные представления: помимо спектрального представления оператора эволюции в гильбертовом пространстве можно построить новое представление в обобщенном гильбертовом пространстве, которое обладает нарушенной симметрией во времени¹². При этом новое представление несводимо, оно неприменимо к отдельным траекториям¹³. Математически несводимость является следствием того, что собственные функции в обобщенных пространствах принадлежат к классу обобщенных функций.

Здесь опять в явном виде возникает вопрос о физической трактовке математических выражений. С математической точки зрения, оба представления кор-

ректны, но «парадоксальность» физического мышления помогает сделать выбор в пользу новых представлений, которые включают в спектр оператора эволюции время Ляпунова, которое характеризует временной горизонт хаотических систем¹⁴.

Традиционно приближение к равновесию было принято связывать с приближенностью, «крупнозернистостью» описания макроскопических систем — т. е. приписывать стрелу времени неполноте знаний о системе. В новом подходе необратимость и вероятность становятся объективными первичными свойствами, для характеристики которых вводится новое понятие — несводимость¹⁵. Они выражают то обстоятельство, что реальный физический мир не может быть описан отдельными траекториями или отдельными волновыми функциями. Как это уже бывало в истории физики, причина успеха нового подхода заключается в использовании более мощных математических средств. Согласно теоремам Геделя о неполноте, не существует конечной аксиоматической системы, в рамках которой были бы разрешимы все проблемы. Поэтому отношение между проблемами и средствами, необходимыми для их решения, — это открытый, творческий процесс, в котором в полной мере проявляется парадоксальность мышления, способность и на физическом, и на математическом уровне увидеть возможность неоднозначной интерпретации результата и возможность дальнейших обобщений фундаментальных понятий.

Следует отметить, что элементы нового подхода, как правило, можно обнаружить в зачаточном состоянии в недрах старой теории в виде некоторых частных моментов. Так, в квантовой механике вводятся понятия чистых (описываемых на языке волновых функций) и смешанных состояний, которым, в част-

ности, соответствуют любые равновесные состояния. Возникает вопрос, кто ответственен за появление смешанных состояний в условиях, когда над системой не производится никаких измерений и, следовательно, не происходит никакого коллапса волновых функций. В несводимой формулировке законов природы в хаотических системах невозможно отличить чистое состояние от смешанных состояний. Даже выбранное в качестве начального условия чистое состояние со временем превращается в смешанное. Введенное в стандартной квантовой механике различие в новом подходе теряет смысл¹⁶.

Перечисленные моменты должны учитываться при разработке методик развития физического мышления обучающихся на разных уровнях изучения физики. Как отмечается у Rubino¹⁷, мы должны удерживаться от платоновского искушения отождествить этику создания и хранения научных знаний с поиском незыблемых достоверностей. Парадокс времени был исследован с помощью теоремы Пуанкаре, открытия динамической неустойчивости и отказа от отдельных траекторий¹⁸. Реальный мир управляется не детерминистическими законами, но и не абсолютной случайностью. Устойчивые и обратимые во времени системы соответствуют предельным, исключительным случаям. Адекватное физическое описание хаотических систем, эволюции во времени достижимо только на уровне ансамблей. Здесь опять торжествует парадоксальный характер управляющих миром законов, соединяющий, казалось бы, несовместимые представления. Но эта несовместимость на проверку оказывается результатом слишком узких рамок теории — соответствующее ее обобщение показывает, что противоречивость положений выступает только в крайних, предельных случаях, когда старая теория соответст-

вует наблюдаемым реалиям, и пропадает в новой теории, основанной на других фундаментальных концепциях.

Принципы построения методической системы, обеспечивающей развитие парадоксальности мышления

Обсуждение принципов построения методики развития парадоксальных черт мышления при обучении физике и выяснение влияния общих психолого-педагогических аспектов на этот процесс уместно начать с краткого анализа стиля мышления хотя бы некоторых выдающихся физиков-теоретиков, научные результаты которых существенно повлияли на последующее развитие физической науки.

Прежде всего, следует отметить, что развитие парадоксального характера мышления обучаемых отнюдь не отменяет все остальные цели обучения физике, начиная от усвоения определенной совокупности конкретных физических знаний, овладения основными методологическими принципами физики и ее математическим аппаратом, развития высшей степени физического понимания и т. д. Напротив, парадоксальный характер мышления вырабатывается именно на основе этих фундаментальных моментов физического образования и параллельно с ними, представляя собой восхождение на вершину, которая включает в себя все эти моменты. Фактически это последний штрих в полноценном физическом образовании, знаменующий становление компетентности ученого как исследователя природы.

Разумеется, здесь всегда следует помнить о том, что все продуктивные физические представления основаны на анализе экспериментальных данных с последующим абстрагированием и обобщением. Поэтому, говоря о методологии физики как науки и обсуждая ме-

тодику обучения физике, следует ясно понимать, что в конечном счете парадоксальность мышления как его доминирующая черта должна быть развита и направлена таким образом, чтобы обеспечивать возможность наиболее эффективного проникновения в тайны природы. В первую очередь это связано с неординарностью мышления, определенной непредсказуемостью ходов и действий. Роль психологии и педагогики здесь заключается в установлении того, что именно и на каком уровне может быть практически реализовано на различных этапах обучения физике.

Как писал А. Эйнштейн, «содержание науки можно постигать и анализировать, не вдаваясь в рассмотрение индивидуального развития ее создателей. Но при таком односторонне-объективном изложении отдельные шаги иногда могут казаться случайными удачами. Понимание того, как стали возможными и даже необходимыми эти шаги, достигается лишь в том случае, если проследить за умственным развитием отдельных людей, содействовавших выявлению направления этих шагов»¹⁹. Парадоксальность физического мышления того или иного исследователя тесно связана с его оценкой роли философии в собственной системе взглядов и представлений. Разумеется, прежде всего здесь предполагается наличие высокого профессионального уровня. Как писал И. Е. Тамм об А. Д. Сахарове, «...у Андрея Дмитриевича очень редкое сочетание того, что особенно для теоретиков нужно, — двух основных вещей: умение ясно и наглядно представить себе картину явления и мастерское владение математическим аппаратом для решения задачи»²⁰. Это мнение очень точно и емко определяет тип мышления ученого, отличающегося высоким профессиональным уровнем. О роли философии тот же И. Е. Тамм высказывался следующим

образом: «Что такое материализм в точных науках, я вообще не понимаю — есть наука и все»²¹. Однако такое мнение требует расшифровки, поскольку само понятие науки включает и философию этой науки.

Вот как оценивал эту проблему А. Эйнштейн: «Как человек, пытающийся описать мир, не зависящий от актов восприятия, он (ученый) кажется реалистом. Как человек, считающий понятия и теории свободными (не выводимыми логическим путем из эмпирических данных) творениями человеческого разума, он кажется идеалистом. Как человек, считающий свои понятия и теории обоснованными лишь в той степени, в которой они позволяют логически интерпретировать соотношения между чувственными восприятиями, он является позитивистом. Он может показаться точно так же и платоником и пифагорийцем, ибо он считает логическую простоту непреложным и эффективным средством своих исследований»²². Трудно дать более исчерпывающую характеристику мышления действительно гениального исследователя, которая так ярко отражала бы его парадоксальность. В. Паули пишет: «Я с удовольствием присоединяюсь к словам Эйнштейна, ибо не приемлю и просто не могу мыслить в рамках “измов”»²³.

Приведенное мнение И. Е. Тамма, естественно, отражало протест против навязываемого в то время правящей идеологией скудного философского рациона. Вернадский писал в своем дневнике в 1942 году: «Вчера в разговоре с Мандельштамом — очень интересный и логический ум — он правильно сказал, что сейчас физик не может научно работать без философии, и расцвет современной физики этим обусловлен»²⁴.

Уже первые работы Эйнштейна наглядно продемонстрировали всю плодотворность метода физического мышле-

ния, который не просто опирается на авторитет и традицию, а стремится разобраться в сущности явления. Эйнштейн неоднократно показывал пример того, как физик, не ища поддержки в ходячих истинах и не следуя раз и навсегда установленным правилам, должен учиться плавать в безбрежном море идей — идей, которые могут возникать у физика под влиянием столь же необозримого моря экспериментальных фактов, но не могут быть выведены чисто логическим путем.

История физики показывает, что вопрос, считающийся в определенный момент самым главным, иногда со временем вообще теряет смысл и смывается потоком знания, а вопрос, кажущийся частным, конкретным, неожиданно открывает новое русло для этого потока. И заранее никто не знает, чего можно ждать от данной загадки природы. Такое впечатление, что сама природа не делит свои загадки на большие и маленькие. Интересно мнение ведущих физиков по этому вопросу. В философской рукописи Мандельштама (на немецком языке) есть короткая цитата, которая в вольном переводе звучит следующим образом: «Если невозможно ответить на некий вопрос, то, значит, что-то не в порядке с самим вопросом»²⁵. Здесь уместно привести две «формулы» научного прогресса в физике: «Сто загадок — одна отгадка» и «В сердцевине отгадки — новые загадки»²⁶.

Особенно ярко парадоксальность мышления проявилась у одного из величайших физиков всех времен Э. Ферми. Одной из характернейших черт его личности было стремление к простоте, а поразительное долголетие идей Ферми в науке объясняется его исключительной физической интуицией. В качестве примеров можно указать на вопросы, которые задал Э. Ферми Марии Гепперт-Майер и М. Гелл-Манну после прослу-

шивания их научных сообщений о модели ядерных оболочек (М. Гепперт-Майер) и о введении понятия «странность» для характеристики элементарных частиц (М. Гелл-Манн). Как отмечали впоследствии оба исследователя, именно эти вопросы указали направление дальнейшего развития их теорий²⁷. Огромная эрудиция сочеталась у Ферми с удивительной способностью использовать «незыблемые» законы и основы науки. Одна из самых характерных его черт — требование «золотой середины»: крайне важны основные принципы, но вредна предвзятость; да здравствует новое, но пусть новое узаконивается только тогда, когда старое оказывается негодным; физика движется вперед благодаря открытиям, но не только благодаря открытиям; очень хорошо, если физику удастся открыть новое явление или предсказать неожиданную закономерность, однако физика не делается охотой за открытиями; оригинальность и научная фантазия хороша только в сочетании с глубоким знанием²⁸. Как вспоминает ученик Ферми, нобелевский лауреат Ч. Янг, «...мы поняли, что физика... должна строиться от нуля, кирпичик за кирпичиком, слой за слоем. Мы поняли, что абстракции появляются после того, как детальные исследования заложат фундамент, а не до этого»²⁹.

Сравнивая роль качественных и количественных методов при анализе конкретных явлений, Ферми подчеркивал, что «...настолько легко ошибиться, что не следует верить результату длинных и сложных математических выкладок, если нельзя понять его физического смысла; в то же время нельзя также полагаться на длинную и сложную цепь физических доводов, если нельзя продемонстрировать ее математически»³⁰. Ярким примером справедливости последнего положения является установление нулевого начала термодинамики.

Уникальность Э. Ферми как ученого-физика, удивительным и неповторимым образом сочетавшего в себе наивысший уровень владения методами как теоретической, так и экспериментальной физики и фактически сделавшего первый шаг в будущем становлении вычислительной физики, заставляет с особым вниманием отнестись к его приведенным выше высказываниям. По существу, эти высказывания определяют основное направление развития методики обучения физике, которое, естественно, должно наполняться конкретными положениями и указаниями относительно определенных моментов, связанных с развитием тех или иных черт мышления.

Хорошо известно положение о различии психологического состояния исследователя и преподавателя: если для преподавателя доминирующей чертой является уверенность в правильности и надежности тех положений, которые он доносит до обучаемых, то основной чертой истинного исследователя является сомнение, которое обеспечивает возможность найти место для нового в уже устоявшейся картине физической теории или ее применения для анализа определенного явления. Трудность сочетания этих противоположных черт в психологическом портрете одного и того же человека и приводит к тому, что очень редко встречаются ученые, которые в одинаковой степени владели бы способностями находить действительно новое в законах природы и на высоком уровне доносить это новое до сознания обучаемых. История физики дает не слишком много примеров того, когда выдающиеся исследователи были бы и блестящими педагогами.

Проведенный выше анализ показывает, что именно это сочетание уверенности в справедливости фундаментальных положений науки и постоянного сомнения в исчерпывающем характере резуль-

тата их применения к конкретному явлению, сомнения, которое, как мы видели, может проявляться в самых разнообразных формах, и характеризует наиболее полным образом ту черту мышления, которая была названа его парадоксальностью. Э. Ферми опять выступает здесь как эталон, на который можно и следует ориентироваться, формулируя требования к методике обучения, обеспечивающей развитие парадоксальности мышления. Получая новые выдающиеся научные результаты, Ферми, по свидетельству его учеников и сотрудников, как никто другой мог наглядно и просто донести до слушателей их точный физический смысл.

Исключительно полезным для анализа обсуждаемой проблемы является изучение научного и педагогического наследия Л. И. Мандельштама, не просто ученого, а мыслителя, для которого физика была путем к пониманию «природы вещей» (в смысле «*De rerum naturae*» Лукреция Кара)³¹. Мандельштам принадлежал к редкому типу физиков, соединявших в себе теоретика, экспериментатора, инженера-изобретателя, педагога и философа. Как педагог-ученый он не только был блестящим лектором, но и создал мощную школу теоретической физики. Стиль мышления Л. И. Мандельштама характеризуется следующим мнением о его лекциях, раскрывающим многие особенности совершенного физического мышления: «Лекции Л. И. были яркой и откровенной демонстрацией самого процесса физического мышления. В них видно было, как физик спотыкается о трудности, как на его пути накапливаются парадоксы и противоречия и как ему удается — иногда ценой умственного подвига, отказа от самых укоренившихся в человеческом мышлении привычек — высвободиться из противоречий и подняться на недоступную ранее высоту, откуда от-

крываются новые горизонты. Ни одна деталь в лекциях Л. И. не была пресной, безжизненной, в каждом вопросе он умел находить и доводить до аудитории какую-то особую остроту и прелесть. Он не только принуждал посредством безупречной логики соглашаться со своими утверждениями, но и старался — и умел — найти общий язык со слушателями, убедить их «изнутри», устраняя те трудности и психологические протесты, которые так часто в физике мешают пониманию. Все это вместе взятое создавало какую-то необыкновенную эмоциональную насыщенность, благодаря которой все услышанное от Л. И. доходило до самых глубин сознания»³².

Научное знание неизбежно строится как совокупность логических и внелогических элементов. Только потому, что внелогически установленные ранее принципы — аксиомы, законы природы и т. п. — не обязательно безусловно верны на все времена и могут быть изменены при появлении новых фактов, происходит развитие науки, выражающееся в выявлении на основе нового экспериментального знания более общих закономерностей, в которых предыдущее знание оказывается частным случаем, справедливым лишь в определенных условиях. Именно такое более широкое понимание развития науки сформировалось на протяжении XX века³³. Наличие внелогических элементов и их роль в развитии науки как раз и соответствует парадоксальному характеру мышления.

Приведенные соображения позволяют перейти к обсуждению основных принципов построения методической системы, поскольку они определяют основную «философию» методики обучения физике, целью которого является выработка такого парадоксального характера мышления. Совершенно очевидно, что этого можно добиться только

на пути реализации непрерывного обучения, начиная от курса физики средней школы вплоть до изучения теоретической физики в вузах, где физика определяет профессиональную направленность образования.

Развитие мышления — это сугубо индивидуальный процесс, определяемый способностями, характером и другими психологическими чертами личности. Этот процесс сам по себе парадоксален, поскольку в свете сформулированной задачи подразумевается одновременное развитие противоположных черт психики. Как уже отмечалось выше, развитие парадоксальности мышления требует определенного смещения акцентов и введения ряда новых компонентов в методику обучения, ориентированную на развитие высшей степени физического понимания. Одним из таких новых компонентов является прослеживание преемственности в рассмотрении родственных физических явлений на разных этапах изучения физики с учетом особенностей возрастной психологии.

Парадоксальность мышления, разумеется, включает в себя такое свойство, как критичность, т. е. способность и потребность к логическому отрицанию. Но парадоксальность мышления характеризуется прежде всего способностью и нацеленностью на получение положительных результатов на основе самых разных, в том числе и внелогических, действий.

Особое значение парадоксальный характер физического мышления приобретает в свете развития информационной методической системы обучения физике на всех уровнях физического образования. Широкое внедрение персонального компьютера как в систему научных исследований, так и в среду образования означает открытие еще одного мощного потока получения информации, напрямую не связанного с традиционными

классическими методами³⁴. Установление соответствия между результатами, полученными классическими и новыми методами, зачастую представляет собой более сложную задачу, чем само получение результата, и соответственно требует более высокого уровня парадоксальности мышления. Можно обозначить характерные особенности необходимых изменений в стиле мышления при анализе результатов численного исследования сложных математических моделей реальных явлений. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Развитие математического моделирования, которое в настоящее время выступает как новый универсальный компонент методологии любой науки, в том числе и физики, вносит ряд новых принципиальных моментов в проблему развития физического мышления. Создание и исследование математических моделей реальных явлений всегда являлось краеугольным камнем развития физической науки, но вплоть до второй половины XX века научные исследования в области теоретической физики проходили под знаком поиска неких «абсолютных истин», исчерпывающего знания управляющих миром законов³⁵. Понятый и до конца осознанный модельный характер наших знаний о природе привел к кардинальной перестройке психологии исследовательской деятельности. Появились и приобрели определенный смысл такие фундаментальные понятия математического моделирования, как адекватность математических моделей изучаемому явлению, их универсальность, иерархичность, оснащенность, нелинейность, численная реализация и т. д.

Обучение основам математического моделирования при изучении физики подразумевает не просто усвоение определенных правил и способов действия, а именно развитие своеобразного стиля

мышления, отличного от того, который формировался при классическом подходе к изучению физики. Иерархичность различных моделей одних и тех же явлений, изучаемых на разном уровне, может быть аккуратно отслежена на целом ряде конкретных примеров³⁶. Это, как показывает опыт обучения, позволяет добиваться успеха при овладении наиболее трудным этапом моделирования реальных процессов — построением вербальной модели явления и переводом этой модели на математический язык.

Выбор языка описания, т. е. набора физических величин и понятий, в терминах которых описывается явление, устанавливает место данной модели в иерархической цепочке. При этом парадоксальность мышления исследователя может проявляться в постоянной психологической готовности к такой ситуации, когда достаточно простые математические модели весьма сложных систем могут дать удовлетворительное, хорошее, а иногда даже лучшее описание исследуемых процессов, чем более сложные и изощренные модели. Парадоксальность мышления проявляется в понимании места данной модели в общей иерархии возможных моделей системы, что позволяет в ряде случаев заранее устанавливать границы применимости модели, ориентироваться в возможности обобщения или конкретизации модели при движении по иерархической цепочке по принципу «сверху вниз» или «снизу вверх» и в конечном счете предсказывать или, по крайней мере, понимать причины и условия появления физических парадоксов при исследовании математических моделей реальных явлений. Проблема физических парадоксов занимает особое место как в фактической истории развития этой науки, так и в вопросах обучения физике в плане развития физического мышления.

Парадоксы — это краеугольные камни на пути развития физической теории, оказывающие решающее влияние на развитие науки. Недооценка роли парадоксов приводит к задержкам и застою, поэтому они должны входить в методологическую основу обучения физике и последовательно использоваться в учебном процессе при реализации концепции «образование как учебная модель науки»³⁷. Между тем, иногда высказываются разные — нередко полярные — точки зрения на возможность и целесообразность использования парадоксов в системе обучения физике. При оценке этого вопроса следует учитывать общее состояние методологии физической науки, в частности, проблему использования математического аппарата в теоретических исследованиях в физике. Две теоремы Геделя и теорема Черча о неполноте показывают, что в принципе недостижимо никакое завершённое аксиоматическое построение разделов математики и не может быть дано никакой надёжной гарантии того, что определённые разделы математики свободны от внутренних противоречий³⁸. Для физики это означает, что не может быть никакой гарантии от появления парадоксов, не связанных с какими-либо непоследовательностями в рассуждениях или расчетах в рамках выбранной модели изучаемого физического явления.

В практическом плане гораздо вероятнее ожидать появления парадоксов, связанных с внутренней противоречивостью используемой физической модели или с выходом за границы ее применимости. Поэтому представляется правильной точка зрения, согласно которой парадокс является непременным атрибутом любой физической теории, и вопрос может стоять только о педагогической и методической целесообразности явного представления определенного парадокса или его априорного устранения путем

перехода к более общей модели иерархической цепочки либо выбора более адекватных рассматриваемому явлению математических методов³⁹.

В ряде случаев приходится сознательно идти на возможность появления «незапрограммированных» парадоксов при решении задач, возникающих при неконтролируемом выходе за рамки справедливости модели. Ярким примером здесь являются парадоксы трения, обнаруженные П. Пенлеве при анализе уравнений движения механических систем. Эти парадоксы связаны с неприменимостью модели абсолютного твердого тела в условиях, когда уравнения приводят к неограниченным значениям сил трения. Исключительная эффективность этой модели при решении огромного числа механических задач делает беспредметным разговор о ее замене на более сложную и реалистичную модель. Однако именно эта модель дает возможность проводить последовательное обучение искусству анализа физических парадоксов.

Вычислительный эксперимент, представляющий собой определенный этап математического моделирования, в ряде случаев является единственным средством получения научного знания в связи с принципиальной невозможностью натурного эксперимента либо из-за масштаба явления, либо из-за невозможности воспроизвести необходимый диапазон физических характеристик. Такая ситуация имеет место с крупномасштабными экологическими экспериментами, глобальными климатическими изменениями, изучением эволюции галактик. Очень важным моментом, с точки зрения особенностей физического мышления, здесь является тот факт, что «экспериментатор-вычислитель» может делать то, чего не сможет сделать ни теоретик, ни физик-экспериментатор: он может проверять, как на данное явление

влияет в отдельности каждое из независимых упрощающих предположений. И здесь открываются новые возможности по сравнению с «классической» ситуацией в физике, очень метко охарактеризованной В. Паули: «...лишь в исключительных случаях появляется готовая теория и ее оправдание или опровержение, что так охотно предполагается в теоретико-познавательных исследованиях. В общем случае появляются эмпирические результаты, обработанные с помощью уже известных теорий, но выходящие за пределы объяснимого этими теориями. Так сами будни физика выдвигают в физике на передний план аспект развития, становления...»⁴⁰.

Как ясно из изложенного выше, следует различать понятия парадоксальности определенной физической ситуации или результатов ее анализа и парадоксальности физического мышления. В ряде случаев эти понятия оказываются действительно тесно связанными, и для объяснения определенного физического парадокса необходимо проявление именно парадоксальных черт мышления. Но бывает и наоборот: парадоксальная ситуация получает объяснение в результате обычных «непарадоксальных» рассуждений, проведенных на строгом уровне с исследованием всех существенных обстоятельств, а обычная, непарадоксальная, но в целом неясная ситуация требует для объяснения неординарного, парадоксального подхода. При разработке методической системы, обеспечивающей развитие парадоксального характера физического мышления, целесообразно особо подчеркивать сходство и различие отмеченных моментов, по возможности отмечать тип «парадоксальности», встречающейся в каждом рассматриваемом случае.

Значение парадоксальности мышления исследователя для развития физической науки прекрасно передается

словами де-Бройля о методологическом значении теории относительности: «Она показала нам, что можно преодолевать кажущиеся неприступными препятствия и открывать неожиданные точки зрения, стоит только отказаться от предвзятых мнений, которые считаются справедливыми скорее в силу привычки, чем логики. Теория относительности была великолепным средством упражнять дух физиков»⁴¹. Средством такого упражнения «духа физиков» должен стать каждый конкретный пример, требующий неординарного подхода для своего разрешения.

При конкретных методических разработках отдельных вопросов и тем на основе изложенных принципов прежде всего следует обращать внимание на правильную формулировку задачи или задания, которые с самого начала стимулировали бы развитие или проявление определенных парадоксальных черт мышления. Так, например, совершенно недопустимой является формулировка условия «классической» школьной задачи, встречающейся практически во всех сборниках задач: *С вершины гладкой полусферы радиусом R , неподвижно стоящей на горизонтальной поверхности, соскальзывает без трения небольшое тело. На какой высоте над этой поверхностью оно оторвется от полусферы?*

Такая формулировка не ориентирует учащегося на главное — на качественное исследование изучаемого явления и на теоретическое предсказание характера его протекания, превращая решение задачи только в предъявление конкретных знаний относительно закона сохранения механической энергии и относительно условия отрыва одного тела от поверхности другого. Здесь уже нет и речи о проявлении умения теоретического предсказания (т. е. высшей степени физического понимания), не говоря уже о развитии парадоксальности мышления⁴².

При обучении на уровне курса общей, и тем более теоретической физики, речь идет уже не о развитии отдельных черт парадоксальности мышления, а о проявлении целого комплекса таких черт, причем этот комплекс должен становиться все богаче и разнообразнее по мере усложнения изучаемого материала, анализируемых физических систем и используемых методов. Здесь все большую и большую роль начинает играть методологический принцип толерантности, указывающий на возможность использования различных подходов и различных физических понятий и законов при анализе определенной ситуации. При этом правильные результаты должны «пробивать себе дорогу» именно при различных способах изучения системы.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Тамм И. Е. Нильс Бор и современная физика // Развитие современной физики. М., 1964. С. 7–21.
2. Фок В. А. Квантовая физика и строение материи. Л., 1965.
3. Фейнберг Е. Л. Научное творчество Нильса Бора // Развитие современной физики. М., 1964. С. 50–63.
4. Фок В. А. Указ. изд.
5. Франкфурт У. И. К истории аксиоматики термодинамики // Развитие современной физики. М., 1964. С. 257–292.
6. Фок В. А. Указ. изд.
7. Пригожин И., Стенгерс И. Квант, хаос, время. К решению парадокса времени. М., 2003.
8. Там же.
9. Lighthill G. The Recently Recognized Failure of Predictability in Newtonian Dynamics. Proceedings of the Royal Society. 1986. P. 35–50.

10. *Goldstein H., Poole C., Safko J.* Classical Mechanics. Third Edition. Pearson Education. Singapore, 2004.
11. *Пригожин И., Стенгерс И.* Квант, хаос, время. К решению парадокса времени. М., 2003.
12. *Pollitt M.* Mvent. Math. 1985. V. 81. P. 413; 1986. V. 85. P. 147.
13. *Ruell O.* Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 405.
14. *Пригожин И., Стенгерс И.* Квант, хаос, время. К решению парадокса времени. М., 2003.
15. Там же.
16. Там же.
17. *Rubino C.* Managing the Future. Science and the Humanities and the Myth of Omnisaience. World Future. 2004.
18. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М., 2003.
19. *Гернек Ф.* Пионеры атомного века. М., 1974.
20. *Горелик Г.* Андрей Сахаров. М., 2004.
21. Там же.
22. *Эйнштейн А.* Собр. научн. трудов. Т. IV. М., 1967. С. 311.
23. *Паули В.* Физические очерки. М., 1975. С. 193.
24. *Горелик Г.* Указ. изд.
25. Там же.
26. Там же.
27. *Понтекорво Б., Покровский В.* Энрико Ферми в воспоминаниях учеников и друзей. М., 1972.
28. *Ферми Э.* Научные труды. Т. I, II. М., 1971.
29. *Понтекорво Б., Покровский В.* Указ. изд.
30. *Ферми Э.* Указ. изд.
31. *Фейнберг Е. Л.* Эпоха и личность. Физики. М., 2003.
32. Академик Л. И. Мандельштам. К 100-летию со дня рождения. М., 1979.
33. *Фейнберг Е. Л.* Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. М., 1992.
34. *Кондратьев А. С., Лаптев В. В., Ходанович А. И.* Информационная методическая система обучения физике в школе. СПб., 2003.
35. *Самарский А. А., Михайлов А. П.* Математическое моделирование. М., 1997; 2001.
36. *Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. Д. Р.* Физические основы математического моделирования. М., 2005.
37. *Самарский А. А.* Неизбежность новой технологии. Математика и методологическое обоснование науки // Коммунист. 1989. № 1.
38. *Eves H.* Foundations and Fundamental Concepts of Mathematics. PWS-KENT Publ. Comp. Boston, 1990.
39. *Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. Д. Р.* Указ. изд.
40. *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое. М., 1990.
41. *Гернек Ф.* Указ. изд.
42. *Кондратьев А. С., Прияткин Н. А.* Современные технологии обучения физике. СПб., 2006.