

Предисловие

nil_0: В теор. физике и математике профессионал — это человек, который сам пересобрал свою область науки: получил все ключевые результаты в своей области. То есть своими руками проделал все ключевые выкладки, построил (перепроверил) все ключевые модели.

Когда я читаю лекции по специальной теории относительности, я эту теорию строю из первых принципов, вывожу все ключевые результаты. И студент, если это станет его профессией, должен сам эти выводы проделать, повторить все ключевые выкладки в учебнике, прорешать стандартные задачи, понимать области применимости теорий и моделей. Да, специальная теория относительности была построена трудами Пуанкаре, Эйнштейна, Минковского, но при обучении это не важно. Важно, чтобы студент сам эту теорию снова построил. Если студент не собирается быть профессионалом в этой области, то он может что-то просто запомнить, профессионал должен всё построить сам.

Так что профессиональный физик-теоретик может не читать Ньютона, но основные результаты Ньютона он получил своими руками. В МФТИ если студент говорит на экзамене «я не помню», то стандартный ответ преподавателя старой школы: «не помните, так выведите». Если студент успешно вывел, то оценка за то, что он это не помнил, обычно не снижается.

Следующая ступень в профессионализме: уметь модифицировать теорию. Например, хороший студент может получить вопрос: покажите, что если вот здесь поменять знак, то станет возможной машина времени. Студенту, который хочет «хотя бы троечку», такой вопрос не зададут, но на олимпиаде по теоретической физике или хорошему студенту на экзамене такой вопрос могут задать.

Уже с экспериментальной физикой сложнее: отдельный физик уже не может пересоздать свою науку полностью, поэтому работа постоянной пересборки выполняется коллективно.

flitched9000: Из всех прочитанных ИМНО самое дельное. Вы реабилитировали в моих глазах преподавание точных наук (пусть это заявление и выглядит глупо).

Итак, проф. —

1) тот, кто способен пройти без нелепых контрфорсов путь, пройденный до него, как первооткрыватель там, где это возможно для одиночки;

2) вносит (и знает, куда вносить, а лучше — и сколько) свой вклад в цех Профессии.

Ерго, подготовлен быть а) первооткрывателем, способным б) вернуться из неведомого и в) показать путь последователям.

Пусть другие скажут лучше.

ivanov_petrov: Спасибо, мне кажется, очень хорошая формулировка. Что-то вроде онтогенеза: каждый организм должен пройти сам весь путь эволюции группы. Иначе — не состоялся как организм...

polnaya_hernyz: Угу.

Прям по даосизму: истина — не то, что ты познал (узнал), а то, что ты постиг (выстрадал, «изобрёл»), т. е. не «внешнее», а «внутреннее».

Фрагмент дискуссии в «Живом журнале»

Данная книга основана на конспекте, объединяющем материалы по двум курсам, читавшимся автором в МФТИ: по годовому курсу «Механика и теория поля», который читался автором для студентов ФБМФ¹ МФТИ с 2015/16 учебного года по 2022/23 учебный год, и факультативному курсу «Геометрические методы в классической теории поля», который читался автором начиная с весеннего семестра 2002 года как семестровый, а с 2017/16 учебного года как годовой².

Многие предметы учат решать уравнения, но очень немногие учат *писать новые уравнения и понимать уравнения*. В существенной степени этим мы и займёмся.

Аналитическая механика — инструмент не только механики как таковой, но и всей теоретической физики. Язык, который она даёт, был создан для нужд классической ньютоновской механики, но оказался намного универсальнее, чем можно было бы ожидать.

Существуют две традиции преподавания аналитической механики:

1) преподавание аналитической механики как математического аппарата классической физики³;

2) преподавание аналитической механики как математического аппарата **не**классической физики⁴.

Данный курс относится ко второй традиции с некоторыми существенными изменениями: в нём совмещён материал курсов механи-

¹ Сначала факультета биологической и медицинской физики, впоследствии Физтех-школы биологической и медицинской физики.

² В этот период курс мог бы называться «Дополнительные главы механики и теории поля», потому что курсы читались параллельно и по возможности согласованно.

³ Этой традиции придерживается кафедра теоретической механики МФТИ.

⁴ Традиция восходит к 1-му тому «Механика» курса теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица.

ки и теории поля¹. Изложение содержит заметный уклон в сторону тензорного аппарата и дифференциальной геометрии (в первую очередь нас интересуют трансформационные свойства тензоров, т. е. их поведение при замене координат). Многие темы, которые были бы, безусловно, полезны для механики и теории поля, не могут быть помещены в годовой курс.

Мы отступили от некоторых традиций преподавания аналитической механики и СТО в МФТИ. В частности, мы используем метрику Минковского с противоположным знаком (*пространственно-подобная метрика*²) по сравнению с курсом теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица. Также, вопреки теорфизическим традициям (но согласно традициям общей физики), магнитное поле в вакууме обозначается как³ **В**. Существенно изменён порядок подачи материала как по сравнению с курсом теоретической механики, так и по сравнению с «Механикой» и «Теорией поля» Ландау и Лифшица. Поэтому использовать литературу для справок следует с осторожностью.

По перечисленным выше причинам автор не может рекомендовать студентам какую-то одну книгу, чтения которой было бы достаточно и которая покрыла бы весь материал курса с использованием

¹ Традиционный для МФТИ курс теории поля включает специальную теорию относительности (СТО) и классическую электродинамику в вакууме. Такой курс теории поля ориентирован на том 2 «Теория поля» курса теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, за исключением общей теории относительности.

² Пространственноподобная метрика с сигнатурой $(-, +, +, +)$ активно используется в литературе по теории относительности, но по историческим причинам в МФТИ более распространена времениподобная метрика с сигнатурой $(+, -, -, -)$.

³ Напряжённость магнитного поля обозначается как **Н**, а индукция магнитного поля — как **В**. Для электрического поля напряжённость обозначается как **Е**, а индукция — как **Д**. Эти названия восходят к временам до создания теории относительности и не учитывают её симметрии. С современной точки зрения с учётом того, что поля **Е** и **В** образуют один тензор (являются компонентами одной антисимметричной матрицы 4×4), а поля **Д** и **Н** — другой, такая терминология ведёт к путанице. В гауссовой системе единиц в вакууме **В** = **Н**, а **Е** = **Д**. С точки зрения соответствия с электродинамикой в среде было бы естественно обозначать поля в вакууме как **Е** и **В**, но теорфизическая традиция, восходящая к временам до создания теории относительности, предписывает обозначать эти поля как **Е** и **Н** (т. е. брать обозначения для напряжённостей). Мы решились нарушить эту традицию, тем более что буква **Н** интенсивно используется для обозначения функции Гамильтона.

совместимых обозначений и соглашений. Это не должно препятствовать изучению студентом тех или иных тем по разным книгам.

В книге используются следующие обозначения:

(л) — ликбезовский материал, который напоминает необходимые разделы математики в контексте данного курса¹;

(ф) — обсуждение физического смысла;

✿ — материал для углублённого изучения;

✱ — факультативный материал;

✱✱ — факультативный материал повышенной сложности;

(~) — предварительные нестрогие соображения, полезные для понимания.

Метки типа  , подобно скобкам, обрамляют фрагмент текста, помеченный символом ~.

Аналогичные «скобки» могут использоваться для других меток.

Основной лекционный материал содержится в частях 1 и 3, которые соответствуют первому и второму семестрам годового курса «Механика и теория поля».

Части 2 и 4 содержат решение ключевых задач из частей 1 и 3, а также некоторый материал факультативного годового курса «Геометрические методы в классической теории поля», который начиная с 2017/18 учебного года читается параллельно с курсом «Механика и теория поля» как его углубление и расширение².

¹ Как обычно в теоретической физике, математика излагается «на физическом уровне строгости», т. е. все условия, которые требуются для применения используемых операций, предполагаются выполненными. Таким образом, знакомство с тем или иным математическим формализмом по данному пособию не заменяет изучения соответствующих разделов математики по учебникам, излагающим материал на математическом уровне строгости, со всеми необходимыми оговорками в определениях и формулировках теорем, со строгими доказательствами. В данном пособии математически строгое изложение всего материала не является возможным как по причине ограниченности объёма, так и потому, что основной целью пособия является обучение применению соответствующих методов к решению физических задач. Тем не менее и не до конца строгое изложение является полезным не только как шпаргалка-приложение к задачнику. При математически строгом изложении часто опускаются нестрогие наводящие соображения, благодаря которым соответствующие разделы математики могли быть созданы, в данном пособии такие соображения по возможности проговариваются явно.

² Ранее, начиная с весеннего семестра 2002 года, курс «Геометрические методы классической теории поля» читался отдельно как семестровый курс. Ин-



Каждая глава частей 2 и 4 является дополнением к соответствующей главе частей 1 и 3. Нумерация глав частей 2 и 4 в точности соответствует нумерации глав частей 1 и 3, что должно облегчить параллельное чтение частей 1 и 3 с частями 2 и 4 соответственно. После заголовка каждой главы с основным/дополнительным материалом в частях 1—4 идёт ссылка на страницу с парной главой с дополнительным/основным материалом из другой части. С точки зрения большинства студентов, материал частей 2 и 4 заведомо избыточен для первого чтения, но представляет интерес при более глубокой проработке курса.

Часть 5 «Механика классическая и квантовая как классическая теория поля» представляет собой углублённый материал, который также основан на курсе «Геометрические методы в классической теории поля».

Материалы конспекта по общей теории относительности по большей части в книгу не вошли, а вошедшие распределены по частям 2, 4. Возможно, эти материалы послужат основой отдельной книги.

Текущая версия конспекта, послужившего основой данной книги, а также электронная версия книги и ссылки на полный комплект видеозаписей лекций и семинаров доступны на авторской интернет-страничке курса «Механика и теория поля»: см. QR-код или ссылку <https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/biblio/mekhanika-i-teoriya-polya.php>.

О значении физики и математики в естественных науках

Поскольку данный курс читается для студентов Физтех-школы биологической и медицинской физики, у студентов регулярно возникает вопрос, зачем им читается этот курс, и вообще, зачем в биологии и медицине нужны физика и математика. Попробуем ответить на этот вопрос.

Прежде всего попытаемся понять, что такое физика (каков её предмет и каковы её методы) и чем она отличается от других естественных наук.

тернет-страничка курса: https://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics/courses/geomm.php.

Физика — наука о природе. Это автоматически означает, что физика — экспериментальная наука (как и любая наука из числа *естественных наук*).

Отличие физики от других наук о природе (естественных наук) состоит в том, что физика — наука о явлениях, которые можно понять и описать *из первых принципов*. Таким образом, физика занимается либо простыми системами, либо простыми свойствами сложных систем. Явления, слишком сложные для физического описания (описания из первых принципов), к предмету физики не относятся, исследование таких явлений выделяется в отдельные естественные науки. Например, атом водорода хорошо описывается в рамках квантовой теории и рассматривается в рамках физики, теория химической связи находится на стыке физики и химии, а описание сколько-нибудь сложных молекул, как правило, выходит за пределы физики и является предметом химии. В химии есть свои закономерности и методы (основанные на химическом эксперименте), которые строго физически не обосновываются, но имеют свою область применимости. Исследование систем и явлений, слишком сложных для описания в рамках химии, выделяются в отдельные естественные науки, в число которых входит, например, биология.

По мере развития физики удаётся описывать её методами некоторые системы, которые раньше описывать не удавалось. Тем самым физика расширяет свою область применимости за счёт других естественных наук. Так, упомянутый выше атом водорода стал предметом физики только с созданием квантовой теории, тем самым физика расширилась за счёт химии. Химия от этого только выиграла, так как это позволило применять к химическим задачам мощные физические методы.

Что значит *описание из первых принципов*? Обычно это означает, что первые *принципы физики* формулируются на языке математики, где они выступают в роли аксиом, после чего физическая система допускает математическое описание. Это означает, что *математика — родной язык теоретической физики*. С такой точки зрения становится понятной «непостижимая эффективность математики»¹

¹ Е. Вигнер «Непостижимая эффективность математики в естественных науках». Лекция в честь Рихарда Куранта, прочитанная 11 мая 1959 года в Нью-Йоркском университете. (Communications on Pure and Applied Mathematics. V.13. P.1—14; УФН. 1968. Т. 94, вып. 3. С. 535—546; <https://www.mathnet.ru/links/653c111e868d9f4f436fffe88573b25c/ufn11329.pdf>).

в физике и её существенно меньшая эффективность в других естественных науках.

Но что такое математика? *Математика — наука о строгом мышлении*. Любое действительно строгое рассуждение может быть переформулировано как математическое вычисление. Исследованием нестрогого мышления занимаются другие науки (в основном гуманитарные). Сама математика естественной наукой не является, но и к гуманитарным обычно не относится по причине несравнимой с гуманитарными науками строгости. Подобно тому как физика расширяется за счёт других естественных наук, обогащая их своими методами, математика расширяется за счёт гуманитарных наук, также обогащая их своими методами. Так, логика была поглощена математикой практически полностью (хотя осознание этого факта сильно затянулось во времени).

Подобно тому как любое строгое рассуждение — это математическое вычисление, *любой объективный эксперимент — физический эксперимент* (в некоторых случаях физическое содержание эксперимента может быть тривиальным и не заслуживать внимания).

Поскольку математика — язык физики, очень многие математические задачи имеют физическую интерпретацию или хотя бы физическую мотивацию. Физика часто придаёт математическим понятиям наглядность и позволяет угадывать ответы математических задач.

Физика и математика — простейшие (по кругу изучаемых явлений и структур) науки о природе и мышлении. Благодаря этому им удалось очень сильно продвинуться. Изучаемые ими сейчас явления и структуры уже не столь просты, как на заре науки, а их методы необычайно мощны и универсальны. В любой естественной науке является большим успехом обнаружить, что какое-то явление может быть рассмотрено как физическое (пусть с некоторыми упрощениями) или хотя бы исследовано физическими методами.

Задача о ёжке, брошенном под углом к горизонту, к биологии не относится. Также задача о механических нагрузках в опорно-двигательном аппарате (мышцах, связках, скелете) относится не к биологии, а к биомеханике. Кровоток (особенно в мелких сосудах) не сводится к простой гидродинамике, но использование гидродинамики позволяет выделить из сложного биофизического процесса ту часть, которой должна заниматься биология. Само по себе использование в эксперименте физических методов (рентгеновское

исследование, ультразвуковое исследование, ядерный магнитный резонанс и т. п.) сильно облегчает работу биолога.

Попробуем прикинуть в общих чертах, что должен знать современный биолог из физики и математики.

- Иметь общее представление о физике, как любой культурный естествоиспытатель.
- Идентифицировать, какие биологические процессы достаточно просты, чтобы их изучение было предметом не биологии, а физики (или хотя бы биофизики).
- Идентифицировать, какие экспериментальные физические методы применимы к биологии. Понимать физические основы и ограничения.
- Уметь разговаривать с физиком (по возможности без биологических терминов), выделяя из биологических процессов физические явления, интерпретируя физические явления с точки зрения биологии.
- Иметь общее представление о математике, как любой культурный естествоиспытатель.
- Идентифицировать, какие биологические процессы достаточно просты, чтобы их изучение допускало математическое моделирование.
- Идентифицировать, какие математические методы обработки экспериментальных данных применимы к биологии. Понимать их математические основы и ограничения.
- Уметь разговаривать с математиком (по возможности без биологических терминов), выделяя из биологических теорий логическую структуру, интерпретируя математические результаты с точки зрения биологии.

В данном списке слово «идентифицировать» подразумевает, что биолог либо знает о применимости физики/математики в конкретном случае, либо может сам опознать ситуации типа «здесь почти всё сводится к гидродинамике», «на этом физическом эффекте можно было бы построить прибор, который пригодится в моих биологических исследованиях», «это математическое понятие должно подойти для описания процесса естественного отбора», «это уравнение распространения волн в мелкой воде описывает что-то похожее на распространение нервного импульса».

Понятно, что сейчас не времена Аристотеля и даже не времена Гельмгольца и биолог, как правило, не может быть одновременно физиком и/или математиком. Но биолог может быть биофизиком, и современный биолог должен уметь сотрудничать с физиками, математиками и биофизиками, чтобы вести совместные исследования.