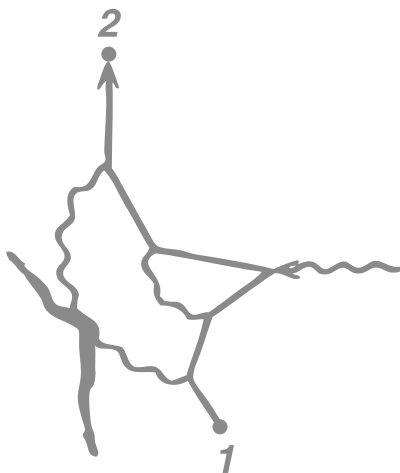


# РИЧАРД ФЕЙНМАН

## КЭД

СТРАННАЯ ТЕОРИЯ  
СВЕТА И ВЕЩЕСТВА



Издательство АСТ  
Москва

УДК 53(092)(73)

ББК 22.3г

Ф31

Серия «Наука: открытия и первооткрыватели»

Richard P. Feynman

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER

Перевод с английского *С. Г. Тиходеева, О. Л. Тиходеевой*

Под редакцией действительного члена Российской академии наук

*Л. Б. Окуня*

Серийное оформление и компьютерный дизайн *В. А. Воронина*

Печатается с разрешения издательства Princeton University Press  
при содействии литературного агентства Synopsis.

**Фейнман, Ричард.**

Ф31 КЭД — странная теория света и вещества / Ричард Фейнман ; [пер. с англ. С. Г. Тиходеева, О. Л. Тиходеевой]. — Москва : Издательство АСТ, 2018. — 192 с. — (Наука: открытия и первооткрыватели).

ISBN 978-5-17-112577-6

В основу этой книги легли знаменитые лекции Ричарда Фейнмана, прочитанные им в Калифорнийском университете.

В этих лекциях прославленный физик рассказывает о квантовой электродинамике — теории, в создании которой принимал участие он сам, — рассказывает простым и доступным языком, понятным даже самому обычному читателю.

Не зря даже о самом первом, принстонском издании «КЭД» критики писали: «Книга, которая полностью передает захватывающий и остроумный стиль Фейнмана, сделавшего квантовую электродинамику не только понятной, но и занимательной».

УДК 53(092)(73)

ББК 22.3г

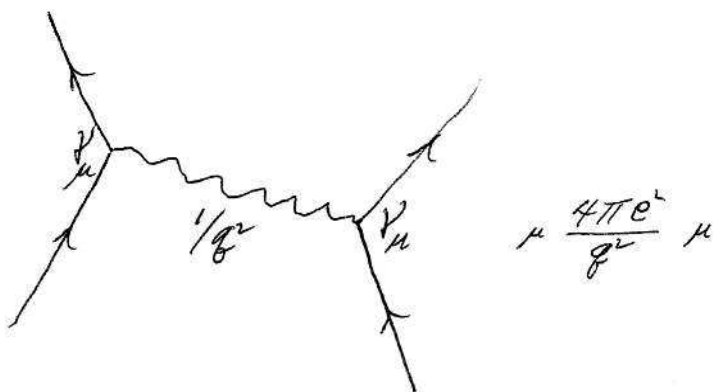
© Richard P. Feynman, 1985

© New Introduction by A. Zee Copyright 2006 by Princeton University Press

© Перевод. С.Г. Тиходеев, 2017

© Издание на русском языке AST Publishers, 2018

ISBN 978-5-17-112577-6



*Richard P. Feynman*

Уникальный автограф знаменитой диаграммы Фейнмана, подписанный самим Фейнманом; изображение любезно предоставил Дж. М. Пасачофф (Jay M. Pasachoff, Fields Memorial Professor of Astronomy at Williams College). Диаграмма была изображена на первых страницах его экземпляра первого издания *КЭД*.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ЗАРУБЕЖНОМУ ИЗДАНИЮ 2006 ГОДА

История того, как мы поняли, что такое свет, — это захватывающая драма, полная и неожиданностей, и поворотов судьбы.

Фотон — наиболее часто наблюдаемая из всех элементарных частиц: зайдите солнечным днем в пыльную комнату с одним маленьким окном и вы увидите сонм пересекающих комнату маленьких козявок. Ньютон совершенно естественно предположил, что свет состоит из потока частиц («корпускул»), но уже он испытывал некоторые сомнения; ведь даже в семнадцатом столетии можно было наблюдать дифракцию света. В конце концов дифракция и другие эффекты, казалось бы, убедительно показали, что свет является электромагнитной волной. В квинтэссенции физики девятнадцатого века, уравнениях электромагнетизма Максвелла, свет рассматривался исключительно как волна. Потом появился Эйнштейн и объяснил фотоэффект, запустив, что свет есть сумма маленьких порций («квантов») энергии. Тут возникли и слово «фотон», и квантовая теория света. (Я не буду здесь отвлекаться и обсуждать знаменитое недовольство Эйнштейна квантовой механикой, хоть он и способствовал ее рождению.) Тем временем с 1920-х по 1940-е годы физики весьма глубоко поняли квантовое поведение материи («атомов»). При этом самым удивительным оказалось то, что квантовое поведение света и его взаимодействия с электронами не поддавались усилиям сильнейших и ярчайших физиков, таких как Поль Дирак и Энрико

Ферми. Физике пришлось дожидаться появления трех молодых людей — Фейнмана, Швингера и Томонаги, получивших заряд как оптимизма, так и пессимизма, возможно благодаря Второй мировой войне, — чтобы возникла правильная формулировка квантовой электродинамики, или КЭД.

Ричард Фейнман (1918—1988) был не только экстраординарным физиком, но экстраординарной и нетривиальной личностью. Подобных ему теоретическая физика не видела ни до, ни после. Иногда в свободную минуту физики-теоретики любят сравнить вклад в науку Фейнмана и Швингера — двух блестящих еврейских мальчиков из Нью-Йорка и почти ровесников. Это совершенно никчемный спор, но факт тот, что в отличие от застенчивого и скромного Джулиана Швингера (впрочем, за маской отстраненности скрывался человек милый и добросердечный) Дик Фейнман был полным экстравертом, человеком-легендой. Со своими барабанами бонго, танцовщицами и другими атрибутами тщательно выстроенного имиджа, который с энтузиазмом поддерживался легионом почитателей, он, безусловно, стал самым популярным физиком-теоретиком после Эйнштейна.

Известно, что блестящий русский физик Лев Ландау использовал логарифмическую шкалу для оценки уровня физиков-теоретиков, с Эйнштейном на вершине. Так же хорошо известно, что после создания теории фазовых переходов Ландау передвинул себя вверх на половину деления. У меня тоже есть своя шуточная шкала, куда я помещаю известных мне лично или по работам физиков-теоретиков. Увы, большинство физиков-теоретиков невыносимо скучны и в этой логарифмической шкале занимают место неподалеку от минус бесконечности. Я бы поместил Шрендингера (о котором чуть ниже) на вершину, но Фейнман, очевидно, на следующей под ним ступеньке. Не скажу, в каком месте шкалы я помещаю себя, но стараюсь не быть занудой по мере отпущенного мне таланта и возможностей.

Но каким шутником был Фейнман! В начале моей карьеры Фейнман пригласил меня сходить вместе в ночной клуб. Один из коллег Фейнмана объяснил мне, что такое приглашение показывает, что он воспринимает меня как физика достаточно серьезно. Но как я ни старался изложить Фейнману свои соображения о теории Янга—Миллса, он интересовался лишь моим мнением о ножках танцовщиц на сцене. Разумеется, никто не будет создавать себе кумира из балбе-

са-физика, если он только играет на барабанах и интересуется танцовщицами. Так что моя шкала на самом деле — это блеск, *умноженный* на талант, — или шкала Ландау с дополнительным сомножителем — блеском, — где акции Эйнштейна падают, а Ландау — растут (он и сыграл несколько хороших шуток, пока не попал под удар КГБ).

Теперь, спустя примерно тридцать лет после того посещения ночного клуба, я польщен тем, что Ингрид Гнерлих из «Принстон юниверсити пресс» попросила меня написать предисловие к переизданию 2006 г. знаменитой книги Фейнмана «КЭД: странная теория света и вещества». Прежде всего признаюсь: я никогда не читал этой книги. Когда она появилась в 1985 году, я только что закончил писать свою первую популярную книгу по физике «Страшная симметрия»\* и старался не читать другие популярные книги по физике из опасения, что они повлияют на мой стиль. В результате я прочел присланную Ингрид книгу свежим взглядом и с огромным удовольствием. Я бесконечно ею наслаждался, кратко записывая свои соображения и замечания по мере чтения.

Я сильно пожалел, что не прочитал эту книгу раньше, поскольку это вовсе не популярная книга по физике в обычном смысле. Стив Вайнберг, предложивший мне в 1984 году написать популярную книгу по физике и познакомивший меня со своим издателем в Нью-Йорке, дал мне полезный совет. Он сказал, что большинство физиков, пишущих такие книги, не могут устоять перед искушением все объяснять, в то время как читатель хочет получить лишь иллюзию понимания и подхватить несколько словечек, чтобы блеснуть в обществе.

Я думаю, что мнение Вайнберга, пусть несколько циничное, в целом верное. Вот, например, феноменальный успех «Краткой истории времени» Хокинга (которой я не читал в соответствии со

---

\* *Fearful Symmetry. The Search for Beauty in Modern Physics*, 1st ed. published by Macmillan, 1986; 2nd ed. Princeton University Press, 2006. Книга не переводилась на русский. Данное предисловие является очевидной рекламой ее переиздания в PUP (как и учебника того же автора, см. ниже). В названии используется цитата из знаменитого стихотворения Уильяма Блейка «Тигр» (Tyger! Tyger! // burning bright // In the forests of the night, // What immortal hand or eye // Could frame thy **fearful symmetry?**). — *Примеч. пер.*

своими принципами, описанными выше). Один мой бывший коллега по Калифорнийскому университету, весьма известный профессор, теперь занимающий кафедру в Оксфорде, показал мне однажды фразу из этой книги. Мы вдвоем пытались понять ее смысл и не смогли. И, наоборот, я хочу уверить всех озадаченных читателей, что каждое предложение в этой книге, сколь бы странным оно ни казалась, имеет смысл. Но вы должны внимательно обдумывать каждое предложение и изо всех сил стараться понять, что же хотел сказать Фейнман, прежде чем продвигаться дальше. В противном случае я гарантирую, что вы безнадежно запутаетесь. И дело в странности физики, а не в изложении. В конце концов, заглавие обещает «странную теорию».

Поскольку Фейнман есть Фейнман, он выбрал путь, полностью противоположный совету Вайнберга (совету, которому я тоже не следовал полностью; см. ниже мое замечание про теорию групп). В предисловии от автора Фейнман критикует популярные книги по физике за то, что «кажущаяся простота достигается за счет описания чего-то совсем другого, за счет существенного искажения того, что берутся описывать». Напротив, он принял вызов описать КЭД для обычного читателя без «искажения истины». Так что не считайте эту книгу типичной популярной книгой по физике. Но это и не учебник. Это редкий пример гибрида.

Чтобы пояснить, какого рода эта книга, я воспользуюсь собственной аналогией Фейнмана, слегка ее модифицировав. Согласно Фейнману, у вас есть два пути, чтобы изучить КЭД: либо пройти полный курс семилетнего образования по физике, либо прочесть эту книгу. (Его цифра несколько завышена; в наши дни способный выпускник средней школы с надлежащим руководством смог бы, вероятно, преодолеть этот путь быстрее чем за семь лет.) Итак, у вас нет выбора, не правда ли? Конечно, вам надо прочесть эту книгу! Даже если вы будете обдумывать, как я вам советую, каждую фразу, это не займет и семи недель, не говоря уж о семи годах.

В чем же разница между двумя способами? Я предлагаю такую аналогию: верховный жрец маяя объявляет, что за определенную плату он готов научить вас, обычного Джо или Джейн, среднего жителя-маяя, умножать два числа, скажем, 564 на 253. Он попросит вас сначала выучить таблицу умножения до 9 9, затем скажет вам взять последние цифры справа в числах, которые надо перемножить,

именно, 4 и 3, и назвать число на пересечении 4-го ряда и 3-й колонки таблицы умножения. Вы назовете 12. Затем вы узнаете, что нужно записать 2 и «держать в уме» 1, что бы это ни значило. Затем вы должны будете назвать число на пересечении 6-го ряда с 3-й колонкой, то есть 18, к которому вы должны будете добавить число, которое «у вас в уме». Разумеется, еще год вам придется изучать, как «складывать». Ну ладно, вы уже поняли мою мысль. Это то, что вы получите, заплатив за образование в престижном университете.

Вместо этого мудрец по имени Фейнман обращается к вам со словами: «Шшш, если вы умеете считать, вам совсем не нужно учиться этим премудростям насчет держания в уме и складывания. Все, что вам нужно — это разжиться 564 банками. Затем вам надо положить в каждую банку по 253 камешка. Затем вам надо высыпать все камешки в одну большую кучу и пересчитать. И вы получите ответ!»

Так что Фейнман не только научит вас умножать, он даст вам глубокое понимание того, чем же занимаются верховные жрецы и их студенты, то есть те, кто скоро получают PhD степени в престижных университетах! С другой стороны, если вы научитесь умножать способом Фейнмана, вам не получить должности даже бухгалтера. Если ваш босс попросит вас перемножить весь день большие числа, вы скоро выдохнетесь, а бывшие студенты университета верховного жреца оставят вас глотать пыль далеко позади.

Написав и учебник («Quantum Field Theory in a Nutshell»\*, в дальнейшем «В двух словах»), и две популярные книги по физике (в том числе «Fearful Symmetry», в дальнейшем «Страшная»), я чувствую себя достаточно компетентным, чтобы советовать вам, что читать. (Между прочим, и «В двух словах» и «Страшная» были опубликованы тем же издательством «Принстон юниверсити пресс», что и данная книга.)

Давайте разделим читателей этого предисловия на три типа: 1) студентов, которых эта книга может сподвигнуть на изучение КЭД, 2) любознательных непрофессионалов, интересующихся КЭД, и 3) физиков-профессионалов, как я сам.

---

\* Quantum Field Theory in a Nutshell. 1st (2003) & 2nd (2010) ed. Princeton University Press. В русском переводе «Квантовая теория поля в двух словах», НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»(2009). — *Примеч. пер.*



Если вы принадлежите к 1-му типу, вы настолько загоритесь, прочитав эту книгу, что вам захочется немедленно взяться за изучение учебника по квантовой теории поля (и это может быть «В двух словах»!). Добавлю, что в наши дни КЭД считается относительно простым примером квантовой теории поля. Написав «В двух словах», я уверен, что по-настоящему яркий студент будет иметь хорошие шансы разобраться в квантовой теории поля, и Фейнман наверняка бы со мной согласился.

Однако, как и в приведенной выше аналогии, чтение этой книги ни в коем случае не превратит вас в профессионала. Вы должны будете изучить то, что Фейнман называет «эффективными приемами» перемножения чисел. Несмотря на заявленное Фейнманом желание объяснить все с нуля, он явно теряет обороты по мере продвижения вперед. Например, на стр. 102 и на рис. 55 он лишь описывает зависимость  $P(A-B)$  от «интервала  $I$ », и вам ничего не остается, кроме как принять его слова на веру. В книге «В двух словах» это все выведено. То же самое относится и к  $E(A-B)$ , описанной в сноске на стр. 105.

Если вы принадлежите ко 2-му типу, проявите настойчивость, и вы будете вознаграждены, поверьте мне. Не торопитесь. Даже если вы осилите только первые две главы, вы познаете многое. Почему эту книгу так трудно читать? Вернемся к аналогии про майя: это как если бы вы пытались научить кого-то умножению посредством банок и камешков, а тот не знает даже, что такое банка или камень. Фейнман пытается выкрутиться, объясняя вам, что каждый фотон переносит маленькую стрелку и как перемножать и складывать эти стрелки, растягивая их и поворачивая. Все это очень сбивает с толку; вы должны следить чрезвычайно внимательно, не пропуская ни малейшей детали. Между прочим, маленькие стрелочки — это просто комплексные числа, и если вы уже знаете про комплексные числа (и банки, и камешки), обсуждение могло бы стать не таким запутанным. Или, допустим, вы один из тех типичных непрофессионалов, описанных Вайнбергом, которому достаточно «иллюзии понимания чего-то». В таком случае вам больше подошла бы «нормальная» популярная книга по физике. Опять аналогия с майя: нормальная популярная книга по физике не затруднит вас ни изучением таблицы умножения и «держанием в уме», ни банками и камешками. Там, возможно, будет просто сказано, что если есть два

числа, верховные жрецы знают, как из них сделать третье число. На самом деле, издатели популярных книг по физике обычно настаивают на такого рода объяснениях, чтобы только не распугать покупателей (см. продолжение ниже).

Наконец, если вы относитесь к 3-му типу, вас ожидает большое удовольствие. Даже будучи квантово-полевым теоретиком и разбираясь в том, что делает Фейнман, я получаю большое удовольствие, читая его объяснение хорошо знакомого явления ослепительно оригинальным и незнакомым способом. Я наслаждаюсь, читая объяснение Фейнмана, почему свет распространяется по прямой или как на самом деле работает фокусирующая линза: «природу можно «обмануть»», замедлив свет, идущий по определенным путям, так что все стрелки повернутся на один и тот же угол!

Теперь я объясню вам, чем Фейнман отличается от большинства профессоров физики. Попробуйте-ка попросить профессора физики объяснить, почему для понимания отражения света от стеклянной пластинки достаточно рассмотреть отражение только от передней и задней поверхностей? Лишь немногие из них знают ответ. Это объясняется не тем, что у профессоров физики нет необходимых знаний, а тем, что просто никому никогда не приходило в голову задать такой вопрос. Они просто учатся по стандартному учебнику Джексона, сдают экзамен и следуют дальше. Фейнман — это тот надоедливый мальчишка, который все задает и задает вопросы: почему, ПОЧЕМУ, ПОЧЕМУ!

В соответствии с тремя типами читателей (честолюбивый студент, интеллигентный непрофессионал, профессионал) имеются и три типа книг по физике (не в точном соответствии один к одному): учебники, популярные книги и, наконец, то, что можно назвать «сверхсложные популярные книги по физике». Эта книга — редкий пример третьего типа, притом в некотором смысле она промежуточная между учебником и популярной книгой. Почему примеры таких книг столь редки? Да потому, что «сверхсложные популярные книги по физике» пугают издателей почти до полусмерти. Хокинг высказал мысль, что каждое уравнение сокращает вдвое продажи популярной книги. Не отвергая справедливости этого утверждения в общем, я бы хотел, чтобы издатели не давали себя запугать так легко. Дело не в количестве уравнений, а в том, может ли популярная книга содержать честное изложение сложных понятий. Когда я писал «Страшную», я

думал, что для того, чтобы обсуждать симметрию в современной физике, очень важно объяснить, что такое теория групп. Я попытался упростить рассказ при помощи маленьких значков: квадратиков и кружочков с буквами. Но редактор заставил меня сначала многократно упрощать мои рассуждения, так что от них практически ничего не осталось, а затем перенести большую часть оставшегося в приложение. С другой стороны, авторитет Фейнмана не сравним с таковым у большинства авторов-физиков.

Давайте вернемся к трудным местам книги Фейнмана. У многих читателей, имеющих хотя бы общее представление о квантовой физике, может возникнуть совершенно оправданное удивление по поводу, например, отсутствия волновой функции, которая играет столь существенную роль в других популярных обсуждениях квантовой физики. Квантовая физика — это головоломка; как сказал один остряк: «Когда есть квантовая физика, кому нужны наркотики?» Наверное, читателю хватит ломать голову. Я объясню.

Почти одновременно, но независимо друг от друга, Эрвин Шредингер и Вернер Гейзенберг изобрели квантовую механику. Шредингер, чтобы описать движение электрона, предложил волновую функцию, подчиняющуюся уравнению с частными производными, теперь называемому уравнением Шредингера. А Гейзенберг, напротив, мистифицировал окружающих, говоря про операторы, действующие на то, что он назвал «квантовыми состояниями». Он также провозгласил знаменитый принцип неопределенности, который заключается в том, что чем более точно измеряется, скажем, положение квантовой частицы, тем неопределеннее становится знание ее импульса, и наоборот.

Формализмы, изобретенные этими двумя людьми, разительно отличаются, но итоговые результаты, получаемые для любого физического процесса, всегда совпадают. Впоследствии была доказана полная эквивалентность обоих формализмов. В наше время любой приличный аспирант должен уметь легко переходить от одного формализма к другому, применяя тот или иной, более удобный для решаемой задачи.

Шесть лет спустя, в 1932 г., Поль Дирак предложил в несколько зачаточном виде еще и третий формализм. Идея Дирака оставалась практически забытой вплоть до 1941 г., когда Фейнман разработал и развил этот формализм, который стал известен как формализм

интеграла по траекториям, или суммы предысторий\*. (Физики иногда задаются вопросом, полностью ли независимо от Дирака Фейнман разработал свой формализм? Историки науки теперь нашли ответ: нет\*\*. Во время вечеринки в принстонской таверне визитер по имени Герберт Джель (Herbert Jehle) рассказал Фейнману про идею Дирака, и, по-видимому, уже на следующий день Фейнман изложил благоговейшему Джелю разработанный им формализм в реальном времени. См. статью Швебера (S. Schweber) 1986 года в «Reviews of Modern Physics».)

Именно этот формализм и пытается объяснить Фейнман в этой маленькой книжке. Например, на стр. 52, когда Фейнман складывает все эти стрелки, он на самом деле интегрирует (так на жаргоне математического анализа называется сложение) по амплитудам, связанным со всеми возможными траекториями, по которым фотон может попасть из точки S в точку P. Отсюда термин «формализм интеграла по траекториям». Альтернативное название «сумма предысторий» тоже легко понять. Будь законы квантовой физики заметны на макроскопических человеческих масштабах, тогда все альтернативы исторических событий, например, Наполеон, победивший при Ватерлоо, Кеннеди, уклонившийся от пули убийцы, стали бы возможны, и каждой истории соответствовали бы некоторые амплитуды, которые нужно было бы просуммировать («сложить все эти маленькие стрелки»).

Оказалось, что интеграл по траекториям, рассматриваемый как функция конечного состояния, удовлетворяет уравнению Шредингера. Так что интеграл по траекториям есть не что иное как волновая функция. Так образом, формализм интеграла по траекториям полностью эквивалентен формализмам Шредингера и Гейзенберга. На самом деле один из учебников, в котором эта эквивалентность четко описана, был написан Фейнманом и Хибсом\*\*\*. (Да, Фейнман

---

\* В русской физической литературе этот термин практически не используется. — *Примеч. пер.*

\*\* На самом деле эта история в деталях изложена самим Фейнманом в его Нобелевской лекции — см. пер. на русский в [УФН 91, 29 (1967), <http://ufn.ru/ru/articles/1967/1/c/>]. — *Примеч. пер.*

\*\*\* Р. Фейнман, А. Хибс «Квантовая механика и интегралы по траекториям» М., «Мир», 1968. — *Примеч. пер.*

был автором и учебников — этих занудных книг, которые учат вас действовать эффективно, вроде «держат в уме» и «складывать». И да, вы правильно догадались, что учебники Фейнмана часто в основном написаны его соавторами.)

Поскольку формализм интеграла по траекториям Дирака—Фейнмана полностью эквивалентен формализму Гейзенберга, он наверняка содержит в себе и принцип неопределенности. Так что, когда Фейнман с легкостью отменяет принцип неопределенности на стр. 52, в этом есть некоторый перебор. Ну по крайней мере можно поспорить семантически: что он имел в виду, говоря, что принцип неопределенности больше «не нужен»? Все дело в том, полезен он или нет.

Физики-теоретики чрезвычайно прагматичны. Они всегда пользуются самым простым методом. В них нет ничего от приверженности математиков высоким стандартам строгости доказательств. Все, что работает, годится!

Имея все это в виду, вы можете поинтересоваться, какой из трех формализмов — Шредингера, Гейзенберга или Дирака-Фейнмана — самый простой? Ответ зависит от задачи. При описании атомов, например, сам мастер признает: «на диаграммах для таких атомов было бы так много прямых и волнистых линий, что получилась бы полная неразбериха!». Шредингеровский формализм оказывается гораздо более простым, его и используют физики. На самом деле для большинства «практических» проблем пытаться использовать формализм интеграла по траекториям почти невозможно, а в некоторых случаях просто безнадежно. Я однажды спросил Фейнмана о таком очевидно безнадежном примере, и у него не было ответа. А даже начинающие студенты, использующие формализм Шредингера, легко справляются с этими очевидно безнадежными примерами!

Таким образом, какой формализм лучше — зависит от физической задачи, так что физики-теоретики в одной области — атомной физике, например, — могут предпочитать один формализм, тогда как в другой — например, в физике высоких энергий — могут предпочитать другой. Логически рассуждая, может даже случиться так, что по мере развития данной области один формализм как более удобный может сменить другой.

Для конкретности сконцентрируюсь на области, в которой сам работаю, именно, на физике высоких энергий или физике элементарных частиц, которая была также основной областью Фейнмана. Интересно, что долгое время формализм интеграла по траекториям занимал в физике частиц дальнюю третью позицию в этих скачках трех формализмов. (Между прочим, ниоткуда не следует, что формализмов может быть только три. Очень возможно, что в один прекрасный момент появится еще один способный молодой человек и предложит четвертый!) На самом деле формализм интеграла по траекториям был настолько непродуктивным для большинства задач, что к концу 1960-х годов он был почти забыт. К этому времени квантовой теории поля почти повсеместно обучали, используя канонический формализм — другое название формализма Гейзенберга, само слово «канонический» должно вам подсказать, какой из формализмов получил наивысшую оценку. Сошлюсь на то, что я сам ни разу не слышал про интеграл по траекториям за все мои студенческие годы, хотя я был студентом и аспирантом в двух достаточно хороших университетах на Восточном побережье. (Я упоминаю Восточное побережье, поскольку, насколько я знаю, интегралу по траекториям интенсивно учили в восточной части Лос-Анджелеса\*.) И только когда я уже был постдоком в Институте передовых исследований, я, как и большинство моих коллег, узнал про интеграл по траекториям из одной статьи русских авторов\*\*. Даже в то время некоторые специалисты выражали сомнение в этом формализме.

По иронии судьбы сам Фейнман был ответствен за это плачевное состояние дел. Случилось так, что студенты с легкостью обучались этим «забавным маленьким диаграммам», изобретенным Фейнманом. Джулиан Швингер однажды с горечью сказал, что «Фейнман сделал квантовую теорию поля доступной массам». Он имел в виду то, что теперь любой тупица мог запомнить несколько «пра-

---

\* Видимо, подразумевается Caltech — Калифорнийский технологический институт, расположенный на северо-востоке от Лос-Анджелеса, в котором работал сам Фейнман. — *Примеч. пер.*

\*\* По-видимому, имеется в виду статья Faddeev L.D., Popov V.N. Feynman diagrams for the Yang-Mills field. *Physics Letters B*. 1967. v. 25. pp. 29—30. — *Примеч. пер.*

вил Фейнмана», назвать себя теоретиком-полевиком и сделать неплохую карьеру. Целые поколения изучали диаграммы Фейнмана, не понимая теории поля. Ей-богу, такие профессора еще до сих пор остались!

Но затем, совершенно неправдоподобно — возможно, это часть загадочной силы Фейнмана, которая придала его карьере почти магический ореол, — в начале 1970-х, начиная с упомянутой статьи русских авторов, интегралы по траекториям Дирака—Фейнмана совершили триумфальное возвращение и быстро стали основным способом добиться успеха в квантовой теории поля.

Главное, что делает Фейнмана таким выдающимся физиком — это то, что описанная выше «битва за сердца и умы» происходила между множеством тех, кто использовал диаграммы Фейнмана и их более молодыми противниками, использующими интегралы по траекториям Фейнмана. Спешу добавить, что слово «борьба» является некоторым преувеличением: ничто не мешает физика пользоваться и тем, и другим. Я, со своей стороны, так и делал.

Мне представляется, что мой недавно изданный учебник «В двух словах» — один из немногих, в которых формализм интеграла по траекториям используется с самого начала, в отличие от предыдущих учебников, которые отдавали предпочтение каноническому формализму. Свою вторую главу я начал с раздела, названного «Кошмар профессора: умный студент в классе». В духе апокрифических историй про Фейнмана, я сочинил историю об умном студенте и назвал его Фейнманом. Формализм интеграла по траекториям вводился дзеновской процедурой с бесконечным числом экранов и сверлением бесконечного числа отверстий в каждом, так что в результате ничего от экрана не оставалось. Но как и в аналогии со жрецом майя, после такого вывода в стиле Фейнмана я должен был научить студентов, как на самом деле считать («держат в уме» и «складывать»), и тут я должен был отказаться от апокрифического Фейнмана и привести все детальные дирако-фейнмановские выкладки, включая такие технические подробности, как «добавление множителя 1, равного сумме по полному базису бра- и кет-векторов». Технические подробности — это то, чего вы не узнаете, прочтя книги Фейнмана!

Кстати, если вы об этом задумались, «бра» не имеет ничего общего с Диком Фейнманом — любителем поволочиться. Слово