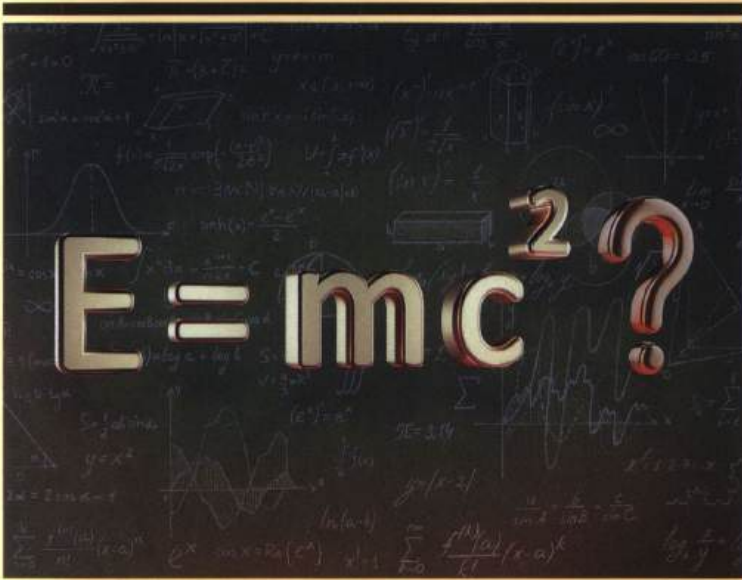



$$E = mc^2 ?$$



РИЧАРД

ФЕЙНМАН

РАДОСТЬ
ПОЗНАНИЯ

Книги, изменившие мир.
Писатели, объединившие
поколения.

Э К С К Л Ю З И В Н А Я К Л А С С И К А

РИЧАРД ФЕЙНМАН

РАДОСТЬ ПОЗНАНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ
МОСКВА

УДК 53(73)
ББК 22.3г
Ф36

Серия «Эксклюзивная классика»

Richard P. Feynman

THE PLEASURE OF FINDING THINGS OUT:

The Best Short Works of Richard P. Feynman

Перевод с английского *Т. Ломоносовой*

Серийное оформление *А. Фереца, Е. Фереца*

Компьютерный дизайн *Е. Фереца*

Печатается с разрешения издательства Basic Books,
an imprint of Perseus Books, LLC,

a subsidiary of Hachette Books, New York, New York, USA (США)
при содействии Агентства Александра Корженевского (Россия).

Фейнман, Ричард.

Ф36 Радость познания / Ричард Фейнман ;
[перевод с английского Т. Ломоносовой]. —
Москва : Издательство АСТ, 2023. — 352 с. —
(Эксклюзивная классика).

ISBN 978-5-17-136084-9

Ричард Фейнман — безусловный гений науки. Хотя сам о себе он отзывался как о человеке «с весьма ограниченным и неразвитым интеллектом». Его скромность наряду с острым умом, прямолинейностью и оригинальной манерой изложения — составные части целого феномена, за которым интересно наблюдать в «Радости познания».

В этой книге вы не найдете сложных формул и расчетов, но замечательно проведете время в компании известного ученого, дадите несколько лекций и интервью, успеете поработать над атомной бомбой, посмеетесь над его шутками и вскрыете не один сейф. Буквально. Здесь также изложены размышления Фейнмана о компьютерах будущего, ответственности ученых перед обществом, связи науки и религии.

УДК 53(73)
ББК 22.3г

© Michelle Feynman and Carl Feynman, 1999
© Вступительное слово, комментарии к главам
примечания. Jeffrey Robbins, 1999
© Перевод. Т. Ломоносова, 2020
© Издание на русском языке AST Publishers,

ISBN 978-5-17-136084-9 2023

Вступительное слово Фримена Дайсона

ЛЮБЛЮ ПОЧТИ ДО ПРЕКЛОНЕНИЯ

«Я так любил этого человека — до невозможности, почти до преклонения», — писал Бен Джонсон, драматург эпохи королевы Елизаветы. «Этим человеком» был Уильям Шекспир — друг и наставник Джонсона. Оба они, и Джонсон, и Шекспир, были успешными драматургами — усердный, хорошо образованный Джонсон и стремительный, гениальный Шекспир. Они не завидовали друг другу. Шекспир был девятью годами старше, лондонские подмостки уже были заполнены его шедеврами, когда Джонсон только начал писать. Шекспир, по словам Джонсона, был честным, открытым и свободлюбивым человеком, он оказывал своему юному другу практическую помощь и поддержку. Наиболее ошутимо он помог, сыграв одну из ведущих ролей в первой пьесе Джонсона «Всяк в своем нраве», поставленной в 1598 году. Пьеса имела громкий успех и стала отправной точкой профессио-

нальной карьеры Джонсона. Джонсону было тогда 25, Шекспиру — 34. После 1598 года Джонсон продолжал писать поэмы и пьесы, многие из которых были поставлены труппой Шекспира. Сам Джонсон стал знаменит как поэт и ученый-гуманитарий и на закате жизни удостоился чести быть похороненным в Вестминстерском аббатстве. Однако он никогда не забывал своего долга перед старым другом. Когда умер Шекспир, Джонсон написал поэму «Памяти моего горячо любимого великого автора мистера Уильяма Шекспира», в которой содержатся широко известные строки: «Он был не на годы — на все времена».

Латынь и греческий ты мало знал,
Ты к славе не стремился, не искал.
Все почести Софокла и Эсхила —
Их не сравнить с твоих трагедий силой!
Мы слушаем твоих сонетов россыпь,
Живи, неси своих котурнов поступь!

Своим творением была горда Природа,
В одежды облекла тончайших линий оду!
О, мой Шекспир! Твой стих и мудр, и нежен,
Изыскан стиль, что у других небрежен.
В изгибы бытия направлен острый взор.
О, гений! Ты паришь среди долин и гор.
В трудах, в поту провел ты столько лет,
Для этого поэт рождается на свет¹.

¹ Перевод Т. Ломоносовой. (прим. ред.)

Что общего у Джонсона и Шекспира с Ричардом Фейнманом? Я мог бы сказать словами Джонсона буквально следующее: «Я так любил этого человека — до невозможности, почти до преклонения». Судьба подарила мне огромную удачу — встретить Ричарда Фейнмана. Он был моим наставником. Я, усердный и хорошо подготовленный студент, перебрался в 1947 году из Англии в Америку в Корнелльский университет и был буквально очарован порывистым гением — Ричардом Фейнманом. С самонадеянностью юности я решил, что мог бы сыграть роль Джонсона в фейнмановском Шекспире. Я не ожидал встретить Шекспира на американской земле, однако мне не составило никакого труда распознать его при встрече.

Перед тем как познакомиться с Фейнманом, я успел опубликовать некоторое количество математических статей, полных хитроумных трюков, но совершенно незначительных. Когда я познакомился с Фейнманом, то сразу же понял, что попал в другой мир. Его не интересовали публикации популярных статей. Он боролся более яростно, чем кто-либо из ранее известных мне ученых, за понимание существа работы, выстраивая всю физику заново от начала и до конца. Мне повезло встретиться с ним к концу его восьмилетнего сражения. Новая физика, которую он придумал, будучи студентом Джона Уилера семь лет назад, впоследствии привела к единому взгляду на природу, взгляду, который он назвал «пространственно-временным подходом». В 1947 году теория была еще не завершена, полна противоречий и не связанных между собой концов,

однако я сразу же увидел, что она должна быть правильной. Я ловил каждый удобный случай послушать обсуждения Фейнмана, научиться «плавать» в потоке его идей. Он любил обсуждения и был рад мне как слушателю. Таким образом, мы стали друзьями на всю жизнь.

В течение года я наблюдал, как Фейнман развивал свой способ описания природы с помощью картинок и диаграмм, пока он не связал все концы между собой и не устранил противоречия. Затем он начал вычислять разные эффекты, используя в качестве руководящего принципа свои диаграммы. С ошеломляющей скоростью он был способен вычислять физические величины, которые можно было сравнить непосредственно с экспериментом. Эксперименты согласовывались с его цифрами. Летом 1948 года мы могли выразить истину словами Джонсона: «Природа и сама гордится его проектами и получает удовольствие, примеряя его тончайшие одежды».

В течение того же года, когда мы гуляли и разговаривали с Фейнманом, я изучал также работы физиков Швингера и Томонаги, которые следовали более традиционным путем и пришли к аналогичным результатам. Швингер и Томонага независимо достигли цели, используя более сложные и трудоемкие методики для вычисления тех же величин, которые Фейнман получал непосредственно из своих диаграмм. Швингер и Томонага не построили новую физику. Они воспользовались известной физикой и только ввели новые математические методы для получения физических результатов. Когда ста-

ло ясно, что результаты их вычислений согласуются с Фейнманом, я понял, что представился уникальный случай объединить все три теории вместе. Я написал статью под заголовком «Теории излучения Томонаги, Швингера и Фейнмана», объяснив, почему теории выглядели различными, но основывались на одних и тех же положениях. Моя статья была опубликована в журнале *Physical Review* в 1949 году и сыграла такую же решающую роль в моей профессиональной карьере, как у Джонсона пьеса «Всяк в своем нраве». Мне было тогда, как и Джонсону, 25 лет. Фейнману — 31, на три года меньше, чем Шекспиру в 1598 году. Я старался относиться к своим главным героям с одинаковым почтением, но в душе знал, что Фейнман был величайшим из трех и что основная цель моей работы — донести его революционные идеи до физиков всего мира. Фейнман активно поддерживал меня в публикации его идей и ни разу не выразил недовольства, что я перехватил у него инициативу. Он был главным актером в моей пьесе.

Я привез из Англии одну из своих драгоценных книг — «Совершенный Шекспир» Довера Уилсона — краткую биографию Шекспира со множеством цитат из Джонсона. Книга Уилсона по замыслу не относилась ни к художественной, ни к исторической литературе, а представляла нечто среднее между ними. Она основывалась на свидетельствах очевидцев, Джонсона и других современников Шекспира. Но чтобы воспроизвести жизнь Шекспира, Уилсон задействовал свое воображение, основанное на скудных исторических документах. В частности, самое раннее свидетельство того, что Шекспир участвовал

в пьесе Джонсона, следует из документа, датированного 1709 годом, т.е. более чем через сто лет после указанного события. Нам известно, что Шекспир был знаменит как актер и как писатель, и я не вижу причин сомневаться в истории, передаваемой из поколения в поколение и рассказанной Уилсоном.

К счастью, документальные свидетельства о жизни и размышлениях Фейнмана не так скудны. Данная книга — собрание документов, представляющих настоящий голос Фейнмана, записанный на его лекциях и в случайных записях. Эти неофициальные документы предназначены скорее широкой аудитории, а не его научным коллегам. В них мы видим Фейнмана таким, каким он был на самом деле, — с неизменной легкостью рассматривающим разные идеи, но с исключительной серьезностью относящимся к существенным для него вопросам. В проблемах, имеющих для него значение, он был предельно честен, независим, готов признать собственную некомпетентность. На протяжении всего жизненного пути он не признавал никакой иерархии и получал удовольствие от простого дружеского общения с людьми.

Кроме своей исключительной увлеченности наукой, Фейнман любил пошутить и был не чужд обычных человеческих радостей. Через неделю после знакомства с ним я описал его в письме к родителям как «полугения и полушута». Между своими героическими усилиями в борьбе за понимание законов природы он расслаблялся в обществе друзей, играл на барабанах бонго, развлекал окружающих розыгрышами и всевозможными историями. Его умение

объединять серьезное и смешное в чем-то роднит его с Шекспиром. В книге Уилсона меня покорило свидетельство Джонсона:

«Когда он садился писать, для него ночь сливалась с днем; он работал без отдыха, не обращая внимания ни на что, пока не падал в обморок от усталости. Потом он заканчивал работу, снова переключался на спорт, становился свободнее, «отпускал поводья»; и тогда уже было почти безнадежно привлечь его к книге, но стоило ему начать писать, как он опять с легкостью становился решительным и серьезным».

Таким был Шекспир, таким же был и Фейнман, которого я знал и любил, — человек, перед которым я преклонялся.

*Фримен Дж. Дайсон
Институт перспективных исследований
Принстон, Нью-Джерси*

Предисловие редактора иностранного издания

Недавно я присутствовал на лекции в знаменитой лаборатории Джефферсона Гарвардского университета. Лектором была доктор Лин Хау из института Роланда, которая только что провела эксперимент, о котором сообщалось не только в известном научном журнале *Nature*, но также и на первой полосе *The New York Times*. В эксперименте она (со своей исследовательской группой студентов и сотрудников) пропустила лазерный пучок через новый вид материи, так называемый бозеэйнштейновский конденсат (причудливое квантовое состояние, в котором сгусток из атомов, охлажденных почти до абсолютного нуля, практически полностью прекращает двигаться, ведет себя подобно единой частице), который замедлил данный пучок света до невероятно малой скорости, составляющей 38 миль в час.¹ Свет, который обычно распространяется в вакууме с головокружительной скоростью 186 000 миль в секунду,

¹ 17 метров в секунду. (прим. ред.)

или 669 600 000 миль в час, обычно замедляется при прохождении через любую среду, например воздух или стекло, но только на долю процента от его скорости в вакууме. Прodelайте арифметические выкладки, и вы увидите, что 38 миль в час составляют *одну шестимиллионную процента* от скорости света в вакууме. Это как если бы Галилей бросал пушечные ядра с Пизанской башни, и они падали бы на землю через два года.

Я ушел с лекции ошеломленным (думаю, даже Эйнштейн был бы потрясен). Впервые в жизни я испытал чуточку того, что Ричард Фейнман называл «кайфом от открытия», внезапное ощущение (возможно, сродни столкновению со сверхъестественным), что я постиг удивительную новую идею, что-то новое в мире, что я присутствовал в момент, имеющий важнейшее научное значение. Это было ощущение не менее драматическое и волнующее, чем то, что испытал Ньютон, когда таинственная сила, которая привела к падению апокрифического яблока ему на голову, оказалась той же силой, что заставляет двигаться Луну по орбите вокруг Земли; или ощущение Фейнмана, когда он показал, что первый шаг на пути к пониманию природы состоит во взаимодействии света и вещества, за что в дальнейшем он получил Нобелевскую премию.

Сидя в аудитории, я почти чувствовал присутствие Фейнмана. Мне казалось, что он смотрит поверх моего плеча и шепчет мне на ухо: «Видишь? Вот почему ученые так упорны в своих исследованиях, вот почему мы так отчаянно сражаемся за каждую частичку знания, просиживая ночи напролет в поисках от-

вета на вопрос, карабкаемся по крутым препятствиям к следующему витку понимания, чтобы окончательно добраться до радостного момента «кайфа от открытия», составляющего часть удовольствия постижения сути вещей»¹. Фейнман всегда говорил, что занимается физикой не ради славы или наград и премий, а для забавы, ради получения настоящего удовольствия, постигая, как устроен мир, — именно это и составляло его работать.

Наследие Фейнмана — это его погружение в науку и преданность ей: ее логике, методам, ее отказу от догм и бесконечной способности сомневаться. Фейнман верил, что наука при ответственном отношении к ней может быть не только забавной, но и принести неоценимую пользу всему человеческому сообществу. И как все великие ученые, Фейнман любил делиться своим удивлением перед законами природы с коллегами и непрофессионалами. Нигде фейнмановская страсть к знанию не выражена яснее, чем в этом наборе его коротких работ (большинство из них раньше публиковались, некоторые — нет).

¹ Другие наиболее волнующие случаи произошли если не в моей жизни, то по крайней мере в моей издательской деятельности, когда был обнаружен длительное время неизвестный и никогда ранее не публиковавшийся дубликат трех лекций, которые Фейнман передал Вашингтонскому университету в начале 1960-х. Они стали книгой «The Meaning of It All»^{**}. Однако здесь было больше радости от обнаружения вещей, чем радости от познания сути вещей. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

— «Значение всего сущего» (англ.).

Лучший способ оценить тайны мастерства Фейнмана — прочитать эту книгу; здесь вы найдете широкий спектр вопросов, над которыми он размышлял. Он рассуждает не только о физике — где ему не было равных, — но также о религии, философии, о своем неприятии академического поприща; о будущем вычислительной техники, о нанотехнологии, в которой он был первопроходцем; о скромности и уместности шуток в науке, о будущем науки и цивилизации; о том, как истинные ученые должны видеть мир. А также о проблемах трагической бюрократической слепоты, которая привела к несчастью с космическим челноком «Челленджер» — речь идет о его докладе с заголовком, сделавшим имя Фейнмана почти нарицательным.

Удивительно, но эти работы пересекаются лишь в незначительной части; в тех немногих местах, где рассказ повторяется в другой истории, я позволил себе вольность выбросить один из двух эпизодов, чтобы устранить для читателя повторы. Я ставил скобки (...) для указания, откуда удалена повторная «жемчужная россыпь».

Фейнман обладал весьма своеобразным отношением к правильной грамматике, что становится очевидным из большинства его заметок, которые записаны на основе его лекций или интервью. Поэтому, чтобы сохранить фейнмановский дух, я позволил себе оставить неправильные грамматические обороты в его фразах. Тем не менее там, где плохая или случайная транскрипция (транслитерация) делала слово или фразу малопонятными или затруднительными, я редактировал их, делая понятными для читате-

ля. Надеюсь, что получившийся результат не утратил фейнмановского духа.

Ему рукоплескали, когда он был жив, теперь благоговейно перед его памятью; он продолжает оставаться источником мудрости для людей с самым разным мировоззрением. Надеюсь, что сокровищница его лучших выступлений, интервью и статей побудит к действию новое поколение почитателей этого уникального человека и его многогранного ума.

Итак, читайте, наслаждайтесь, не бойтесь иногда громко рассмеяться или извлечь пару жизненных уроков; вдохновляйтесь и удивляйтесь; и прежде всего испытайте радость познания истины рядом с блестящей неординарной личностью.

Я хотел бы поблагодарить Мишель и Карла Фейнман за их щедрость и постоянную поддержку, приходящую с обоих берегов океана; доктора Джуди Гудстейн, Бонни Лудт и Шелли Эрвин из архивов Калтеха за их исключительно важную помощь и гостеприимство; и особенно профессора Фримена Дайсона за его изысканное и поучительное выступление.

Я хотел бы также выразить благодарность Джону Гриббину, Тони Хэй, Мелани Джексон и Ральфу Лейтону за их превосходные советы на всем протяжении работы над этой книгой.

*Джеффри Роббинс,
Рединг, штат Массачусетс,
сентябрь, 1999 г.*

РАДОСТЬ ПОЗНАНИЯ СУТИ ВЕЩЕЙ

Это отредактированный вариант интервью, взятого у Фейнмана в 1981 году для телевизионной программы «Горизонт» на канале Би-би-си, показанный в Соединенных Штатах в серии «Nova». К тому времени за его плечами была уже большая часть жизни (он умер в 1988 году), и он размышлял, опираясь на свой опыт и достижения, рассматриваемые через призму лет, что практически невозможно для молодого человека. В результате получилась откровенная, непринужденная и очень личная дискуссия на волновавшие его темы: почему название чего-либо ничего не говорит нам о сути самого предмета; как он и ученые-атомщики его коллеги по Манхэттенскому проекту, могли выпивать за успех чудовищного оружия, которое они сотворили, в то время как в другой части мира, в Хиросиме, тысячи их собратьев уже погибли или погибали от этого оружия; и почему Фейнман мог обойтись без Нобелевской премии.

Красота цветка

У меня был друг, художник, и он иногда высказывал точку зрения, с которой я никак не мог согласиться. Он держал цветок и говорил: «Смотри, как он красив». У меня не было возражений. Он продолжал: «Погляди, я как художник могу увидеть, насколько

ко он красив, а ты как ученый — ну, для тебя все это очень далеко, а цветок становится просто скучным предметом». Думаю, он был помешан на красоте. Однако красота, которую видит он, доступна каждому, и мне в том числе. Хотя допускаю, что я не такой рафинированный эстет, как он, но и я способен оценить красоту цветка. В то же время я вижу в цветке гораздо больше, чем он. Я могу представить его клеточную структуру, сложные взаимодействия внутри клеток тоже обладают своей красотой. Я имею в виду не только красоту в масштабах одного сантиметра, существует также красота в меньших масштабах, во внутренней структуре. Возьмем другой процесс. Удивительный факт, что краски цветка вырабатываются, чтобы привлечь насекомых для его опыления, — значит, насекомые могут видеть цвет. Напрашивается вопрос: эстетические чувства существуют и в низших формах? Почему эстетические? Всевозможные интересные вопросы доказывают, что научное знание лишь добавляет благоговейного трепета перед цветком. Научное знание только *добавляет*; не понимаю, как оно может что-то *вычитать*.

Бегство от гуманитарных наук

Я всегда был очень односторонним в науке и, когда был моложе, концентрировал на ней почти все свои усилия. У меня не было времени учиться и не было достаточного терпения для так называемых гуманитарных наук, хотя даже в университете существовали гуманитарные дисциплины, которые я должен был выбирать. Я почитал за лучшее как-нибудь

избежать их изучения и зубрежки. И только много позже, когда стал старше, я смог делать передышки и начал слегка разбрасываться. Я научился рисовать и немного читал, но я действительно все еще очень односторонний человек и многого не знаю. У меня ограниченный ум, и я использую его целенаправленно.

Тираннозавр в окне

У меня дома была Британская энциклопедия, и даже когда я был маленьким мальчиком, отец, бывало, сажал меня на колени и читал что-нибудь из энциклопедии. Мы читали, рассуждали о динозаврах, а может быть, это были бронтозавры или еще кто-нибудь, или беседовали о короле тираннозавров. И он говорил что-нибудь вроде: «Этот предмет имеет двадцать пять футов в высоту, а голова его шесть футов в поперечнике. Понял?» Затем он останавливался и говорил: «Давай подумаем, что это значит. Подумай, если он стоит на нашем переднем дворе, его высоты достаточно, чтобы просунуть голову в окно, но это не совсем так — его голова немного шире, и когда он будет пролезать, то разобьет окно».

Все, о чем мы читали, переводилось на язык, как это лучше сделать на самом деле, — так я учился что-то делать. Из всего, что я прочитывал, я старался вычислить, что это означает в действительности и как будет звучать на языке реальности. Таким способом (*смеется*) ребенком я обычно читал энциклопедию, но с переводом. Знаете, мне было очень интересно, что существуют животные такого размера — но как следствие, я не боялся, что

одно из них залезет ко мне в окно; я просто думал, было бы очень-очень интересно понять, как все они вымерли, и до сего времени никто не знает почему.

Обычно мы ездили в Катскильские горы. Мы жили в Нью-Йорке, и горы были тем местом, куда летом приезжали люди; в будни отцы уезжали на работу и возвращались только на выходные. Когда приезжал мой отец, он брал меня на прогулку в лес и рассказывал о различных интересных штуковинах, которые происходили в лесу, и я их сейчас же объяснял. Однако матери моих сверстников, наблюдая за нами, конечно же, думали, как было бы здорово, если бы и другие отцы брали своих сыновей на прогулку, и они пытались заставить остальных отцов, но те поначалу никуда не ходили и хотели, чтобы мой отец собирал всех ребятешек, но он отказывался, потому что у нас были особенные отношения — общие личные разговоры о сути вещей. Итак, все кончилось тем, что в следующие выходные другие отцы вынуждены были тащить своих детей на прогулку. А в следующий понедельник, когда они вернулись на работу и дети играли на лугу, один из ребят спросил меня: «Видишь ту птичку, что это за птичка?» И я ответил: «У меня нет ни малейшего представления о том, что это за птичка». Он говорит: «Это коричневый певчий дрозд. Вот так — твой отец ничего тебе не рассказывает». А все было наоборот: мой отец *учил* меня. Глядя на птицу, он говорил: «Ты знаешь, что это за птица? Это коричневый певчий дрозд, но в Португалии его называют так-то, в Италии — так-то, в Китае — так-то, а в Японии —

так-то», — и т.д. и т.п. «Теперь, — говорил он, — ты знаешь, как звучит на всех языках имя этой птицы, и когда ты покончишь со всем этим, ты ровным счетом ничего не будешь знать об этой птице. Ты только знаешь о людях в разных местах земли и что они называют птицей. А теперь, — продолжал он, — давай посмотрим на эту птицу».

Он учил меня подмечать существенное. Однажды я был поглощен игрой с маленькой тележкой для детских игр, огороженной со всех сторон — мы называли ее «экспресс-вагон», — дети могли толкать ее со всех сторон. Помню, в тележке находился мячик, да, именно мячик. Я толкал тележку и заметил кое-что в движении мяча. Тогда я пошел к отцу и заявил: «Скажи, па, я заметил кое-что: когда я толкаю тележку, мячик катится обратно к концу тележки, а когда я тяну ее вперед и внезапно останавливаюсь, мячик катится к переднему краю тележки». И спросил: «Почему так происходит?» Отец ответил: «Этого никто не знает». И продолжил: «Общий принцип состоит в том, что движущиеся предметы стремятся сохранить движение, а неподвижные склонны оставаться неподвижными, пока ты сильно по ним не ударишь». И прибавил: «Это свойство называется инерцией, но никто не знает, почему это правильно». Теперь я глубоко понимаю это — тогда он не дал мне названия, он знал разницу между знанием названия чего-то и знанием сути чего-то, — я усвоил этот урок очень рано. Отец дальше пояснил: «Если ты всмотришься повнимательнее, то увидишь, что мячик не устремляется к концу тележки, это конец тележки, которую ты тянешь против мя-

ча, движется; а мяч все еще стоит на месте или в конечном счете от трения начинает реально двигаться вперед, а не назад». Итак, я побежал обратно к маленькой тележке, снова установил мячик и потянул тележку под ним, глядя во все глаза, и увидел — отец действительно был прав — мяч никогда не двигался в тележке назад, когда я тянул ее вперед. Он двигался назад относительно тележки, но относительно боковой дорожки он сдвигался немного вперед, тележка догоняла его. Итак, это был метод, которому я научился у отца, с разными примерами и обсуждениями, без всякого давления, просто в ходе приятных интересных бесед.

Алгебра для практичного человека

В то время мой кузен, который был на три года меня старше, учился в средней школе и испытывал значительные трудности с алгеброй. К нему приходил репетитор, а мне позволяли сидеть в уголке, пока (*смеется*) репетитор пытался научить моего кузена алгебре, задачам вроде $2x$ плюс что-то. После урока я сказал кузену: «Чем вы там занимались? Видишь ли, я слышал, что он рассказывал об x ». Он говорит: «Если $2x + 7$ равно 15, то как найти, чему равен x ?» Я отвечаю: «Он равен 4». Он заявляет: «Ну да, но ты сделал это арифметически, а должен — алгебраически». Вот почему мой кузен никак не мог освоить алгебру — не было метода. К счастью, я учил алгебру не в школе и знал, что вся идея заключалась в том, чтобы найти x ; какая разница, как вы это сделали. Понимаете, нет такой проблемы — сде-

лать арифметически или сделать алгебраически. Это ошибочная вещь, которую изобрели в школе, так что дети, которые должны учить алгебру, могут все перепутать. В школе изобрели набор правил, которые, если вы следуете им бездумно, могут привести к ответу: вычтите 7 с обеих сторон; если у вас есть множитель, поделите на него обе стороны и т.п. — целый набор шагов, с помощью которых вы могли бы получить ответ, если не понимаете, что вы пытаетесь сделать.

Существует серия книг по математике. Первая — «Арифметика для практичного человека», далее следует «Алгебра для практичного человека» и последняя — «Тригонометрия для практичного человека». Я выучил тригонометрию для практичного человека по этой книге. Вскоре я опять забыл ее, поскольку понял ее не очень хорошо, но серия продолжала выходить, и библиотека собиралась получить «Исчисление для практичного человека». К этому моменту я знал, читая энциклопедию, что исчисление было важным предметом и к тому же интересным, я был обязан выучить его. Теперь я стал старше, мне было около тринадцати; книжка по исчислению наконец вышла, и я был так воодушевлен, что пошел за ней в библиотеку, а библиотекарь посмотрела на меня и сказала: «О, ты совсем ребенок, зачем тебе такая книга — она для взрослых?» То был один из немногих случаев в моей жизни, когда мне было неловко, — я соврал, сказав, что книжка для моего отца, он ее отобрал. Так или иначе, я принес ее домой, выучил из нее исчисление и попробовал объяснить его отцу, он осилил ее начальный этап и при-

шел к заключению, что она запутанная, и мне немного поднадоело его обучать. Я удивился, что он не понял; мне казалось, что в книге все относительно просто и ясно, — а он не понял. Это был первый случай, когда я узнал в некотором смысле больше, чем отец.

Эполеты и Папа Римский

Есть еще кое-что, чему отец научил меня — кроме физики (*смеется*). Мы обсуждали, можно ли выражать неуважение пользующимся уважением персонам... к персонам определенного рода. Например, когда я был маленьким мальчиком, в «Нью-Йорк таймс» стали выходить ротографии — печатные картинки в газетах. Отец обычно сажал меня на колени, открывал картинку, это была ротография римского Папы, и на ней все склонялись перед ним. Отец говорил: «Посмотри-ка на этих людей. Здесь стоит только один человек, все остальные склонились перед ним. Подумай, в чем между ними разница? Этот один — Папа». Отец терпеть не мог Папу. И он пояснял: «Разница в эполетах. Конечно, не в случае Папы. Возьми, например, генерала — форма, положение, — но у этого человека такие же человеческие проблемы, он обедает, как и все остальные, принимает ванну, у него обычные проблемы, как у всех, — он простой человек. Почему все они склоняются перед ним? Только из-за его имени и его положения, из-за его формы, а не потому, что он сделал что-то особенное, или из-за его славы, или чего-нибудь в этом роде». Отец, кста-

ти, занимался выпуском форменной одежды и потому знал, в чем разница между человеком в форме и человеком без формы; для него это были одни и те же люди.

Мне кажется, он был счастлив со мной. Хотя однажды, когда я возвратился из MIT (Массачусетского технологического института) — я учился там несколько лет, — он сказал мне: «Теперь ты стал образованным человеком. Есть один вопрос, в котором я никогда не мог до конца разобраться. Ты все это изучал и, надеюсь, сможешь объяснить мне». Я спросил, что он имеет в виду. И он ответил, что знает: когда атом переходит из одного состояния в другое, он излучает частицу света, называемую фотоном. Я сказал: «Совершенно верно». И отец продолжал: «А все-таки существовал фотон в атоме до того, как он излучился, или до того в нем не было никаких фотонов?» Я отвечаю: «Фотонов в атоме нет; просто, когда электрон совершает переход, возникает фотон». А он опять задает вопрос: «Хорошо, тогда откуда он берется, как появляется?» Не мог же я просто сказать ему: «Дело в том, что число фотонов не сохраняется, они рождаются благодаря движению электрона». Не мог я также попытаться объяснить ему нечто вроде: звук, который я издаю сейчас, не существовал во мне. Другое дело, мой маленький сын, который, когда начинал рассказывать, вдруг заявлял, что больше не может сказать определенного слова — это было слово «кошка», — потому что его словарный запас иссяк на слове «кошка» (смеется). Итак, у вас отсутствует запас слов, так что вы пользуетесь словами по мере надобности и про-

сто строите их по ходу дела. В том же смысле нет запаса фотонов в атоме, и, когда фотоны появляются, они не появляются откуда-нибудь, — я не мог объяснить ему лучше. Его мой ответ не удовлетворил, учитывая, что я никогда не был способен объяснить тех вещей, которых он не понимал (*смеется*). Так что он остался недоволен — он посылал меня во все эти университеты, чтобы выяснить суть вещей, а я так ничего и не выяснил (*смеется*).

Приглашение делать бомбу

(В период работы над докторской диссертацией Фейнман был приглашен в проект по разработке атомной бомбы.)

Это вещь совершенно иного порядка. Это значило, что я должен был прекратить свою исследовательскую работу, которая была смыслом моей жизни, зачеркнуть потраченное на нее время и делать то, что, по моему мнению, было необходимо для защиты цивилизации. Правильно ли это? Я обсудил проблему с самим собой. Моя первая реакция состояла в том, что я не хочу прерывать текущую работу ради этого нового проекта. Конечно, существовала проблема морального толка, в том числе война. Я не слишком много с ней сталкивался, но мне становилось не по себе, когда я представлял, какое оружие предстоит сделать. И поскольку это могло стать реальностью — оно должно было стать реальностью. Подобное оружие могли создать и нацисты, поэтому я решил принять участие в проекте.

(В начале 1943 года Фейнман присоединился к команде Oppenгеймера в Лос-Аламосе.)

Скажу несколько слов относительно моральной стороны дела. Основной причиной начать проект послужила опасность со стороны Германии, которая и заставила меня примкнуть к разработке первой стадии в Принстоне, а затем в Лос-Аламосе к работе над бомбой. Тогда были сконцентрированы все усилия для превращения ее в самую мощную бомбу. Это был проект, над которым мы работали сверхнапряженно, объединив все силы. Как на любом проекте такого рода, вы работаете на конечный результат. Однако, работая, — возможно, это аморально — перестаете думать о причине, побудившей вас это делать. И когда причина исчезла, поскольку Германия потерпела поражение, мне не однажды приходила в голову мысль, что пора бы заново переосмыслить, почему я продолжаю заниматься этим. Должен признаться, в то время я так и не сделал этого.

Успех и страдания

(6 августа 1945 года атомная бомба взорвалась над Хиросимой.)

Единственной реакцией, которая мне запомнилась — возможно, я был ослеплен собственными переживаниями, — была страшная эйфория и возбуждение. Устраивались вечеринки, люди выпивали — был грандиозный контраст между тем, что происходило в Лос-Аламосе, и тем, что в то же время

творилось в Хиросиме. Я был вовлечен в эту радостную вакханалию, тоже выпивал и развлекал коллег игрой на барабанах, сидя на капоте машины, — сидел на капоте джипа и изо всех сил колотил по барабанам, подчиняясь всеобщему настроению, царившему в Лос-Аламосе, а в это время в Хиросиме люди умирали и боролись за жизнь.

У меня наступила очень сильная реакция после войны, реакция своеобразного характера, — возможно, это было вызвано самой бомбой или рядом психологических причин — я только что потерял жену, а может быть, было что-то еще. Но я помню, что сидел с матерью в ресторане в Нью-Йорке непосредственно после [Хиросимы], вглядывался в город и, зная, насколько большой была бомба в Хиросиме и какую огромную территорию она разрушила, собственно, зная о ней все, я вдруг подумал: «А что, если сбросить ее в районе 34-й улицы?» Она накроет и территорию, где мы сидим — кажется, это была 59-я улица, — и все люди будут убиты, все здания уничтожены, а ведь существует не одна такая бомба. Легко продолжить их производство — и все живое на земле будет обречено. Эта мысль зародилась у меня очень рано, раньше, чем у других, более оптимистично настроенных людей. Мне казалось, что международные отношения и характер поведения людей не отличаются от существовавших раньше и что этот путь будет продолжаться. Я был уверен, что все идет к тому, чтобы снова применить бомбу в ближайшем будущем. Я чувствовал себя не в своей тарелке и думал: «Как все глупо: я вижу людей, строящих мост, и говорю себе “они просто ни-

чего не понимают”». Я действительно верил в тот момент, что бессмысленно пытаться что-либо предпринять, поскольку все равно вскоре все будет разрушено и уничтожено. Я смотрел чужим, отстраненным взглядом на здания вокруг и все думал: «Как глупо, что они должны что-то строить». Я был в состоянии депрессии.

«Я не должен быть хорошим только потому, что кто-то полагает, будто я собираюсь быть хорошим»

(После войны Фейнман работал с Гансом Бете¹ в Корнеллском университете. Он отказался от предложения работать в Принстонском институте перспективных исследований.)

Все полагали, что я буду воодушевлен предложением работать в Принстоне, но меня оно не воодушевило, и я взял на вооружение новый принцип, состоящий в том, что я не несу никакой ответственности за то, чего от меня ожидают другие. Я не должен быть хорошим потому, что от меня этого ждут. Во всяком случае, я мог успокоиться на сей счет и рассудил сам с собой, что никогда я не делал того, что казалось важным другим, и не намерен впредь этого делать. Но я всегда получал удовольствие, занимаясь физикой и математическими вычислениями, и по-

¹ Бете (1906–2005) — лауреат Нобелевской премии по физике 1967 года за вклад в теорию ядерных реакций, в особенности за его открытия, связанные с образованием энергии в звездах. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

этому, когда работал над теорией, за которую впоследствии получил Нобелевскую премию¹, обычно разделялся с работой так же быстро, как с блюдом быстрого приготовления.

Нобелевская премия — заслуженна ли она?

(Фейнман был удостоен Нобелевской премии за работы по квантовой электродинамике.)

Что я сделал существенного и что было сделано независимо другими физиками, Томонагой в Японии и Швингером, — это разгадка того, каким образом контролировать, анализировать и обсуждать исходные процессы квантовой теории электричества и магнетизма, основы которой были заложены в 1928 году; как интерпретировать их так, чтобы избежать бесконечностей, проводить вычисления разумным образом, получать результаты, которые приводили бы к точному согласию с каждым экспериментальным фактом, известным на сегодняшний день, — квантовая электродинамика должна описывать все доступные детали эксперимента без учета, естественно, ядерных сил, — это была работа, которую я сделал в 1947 году, в которой говорилось, как все это раскрутить. За эту работу я и получил Нобелевскую премию.

¹ В 1965 году Нобелевскую премию по физике разделили Р. Фейнман, Дж. Швингер и С. Томонага за фундаментальные работы по созданию квантовой электродинамики и общий вклад в физику элементарных частиц. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

(Корреспондент ВВС: Это была заслуженная Нобелевская премия?)

Как сказать *(смеется)*. ...Я не знаю ничего о Нобелевской премии, я не понимаю, что она значит и чего стоит, но если члены Шведской академии решают, что x , y или z достоин Нобелевской премии, так оно и будет. Мне нечего делать с Нобелевской премией... это головная боль... *(смеется)*. Я не люблю награды. Они имеют значение для оценки сделанной мной работы и для людей, которые ее оценили. Я знаю, что многие физики используют мою работу — ничего другого мне и не нужно, — думаю, остальное не имеет значения. Я не считаю особенно важным тот факт, что в Шведской академии признали данную работу достаточно выдающейся для получения премии. Я уже получил свою премию. Моя премия — это удовольствие от познания сути вещей, кайф от сделанного открытия. Мне важно знать, что другие люди пользуются плодами моего труда. Вот что существенно, а награды — это так... чья-то выдумка. Я не доверяю наградам; награды, черт возьми, докучают, награды — это видимость, как эполеты, как красивая военная форма. Мой отец растолковывал мне это именно так. Я не могу на это повлиять, но награды мне мешают.

Когда я учился в средней школе, одной из первых моих наград было получение членства в обществе «Ариста», которое представляло группу детей, получавших хорошие отметки — ну, как? — и все хотели быть членами «Аристы», и, когда я вошел в эту группу, я узнал, что они делали на своих собраниях — они сидели и обсуждали, кто еще достоин во-

йти в эту замечательную группу, — вы понимаете мою мысль? Так они и просиживали, стараясь решить, кому разрешить присоединиться к «Аристе». Такого рода вещи беспокоят меня психологически по разным причинам. Я не понимаю самого себя, с тех пор и поныне награды меня всегда беспокоят. Когда я стал членом Национальной академии наук, я в конечном счете вынужден был отказаться от этой чести, поскольку это был другой пример организации, члены которой тратили почти все время на выяснение того, кто достаточно знаменит, чтобы позволить ему стать членом академии. Кроме того, они решали, должны ли мы, физики, поддерживать друг друга, когда у них есть кандидатура очень хорошего химика, которого они пытаются проташить на выборах, а у нас нет достаточных оснований по таким-то и таким-то причинам. Разве вызывают возражения химики? Просто все в целом прогнило — основной их целью было решать, кто мог бы получить награду. Вы улавливаете, о чем я говорю? Я не люблю наград.

Правила игры

(С 1950 по 1988 год Фейнман преподавал теоретическую физику в Калифорнийском технологическом институте.)

Один из способов понять некоторую идею, — что мы и делаем, пытаясь постичь природу, — это представить себе, что боги играют с вами в грандиозную игру, скажем, в шахматы, и вы не знаете

правил игры. Но вам разрешается смотреть на доску, по крайней мере время от времени, может быть, в ее маленький уголок, и, исходя из этих наблюдений, вы пытаетесь вывести, каковы правила игры, по каким законам двигаются фигуры. Через некоторое время вы могли бы подметить, что, например, только один слон на доске движется по клеткам одного цвета. Немного погодя вы могли бы открыть закон, согласно которому слон передвигается по диагонали, и тем самым объяснить ранее открытый вами закон, что слон движется по клеткам того же цвета. Это аналогично открытию некоторого закона и последующего более глубокого его осмысления. Затем могут происходить разные события, все складывается благоприятно, вы нашли все законы, и общая картина выглядит весьма неплохо, и вдруг где-то в уголке происходит одно необычное явление, например рокировка, — словом, что-то, чего вы не ожидали. Между прочим, в фундаментальной физике мы пытаемся исследовать такие вещи, относительно которых не можем сделать заключений. Потом мы многократно проверяем их и говорим: все в порядке!

Именно то, что не вписывается в теорию, представляет наибольший интерес, то, что не согласуется с тем, чего вы ожидали. Кроме того, вы могли бы совершить революцию в физике: после того как вы открыли, что слоны поддерживают свой цвет и ходят по диагонали, — и так происходит достаточно долго, и всем известно, что это правда, — в один прекрасный день вы замечаете в одной шахматной игре, что слон не поддерживает свой цвет, он его меня-

ет. Только позднее вы открываете новую возможность — слон захвачен, и пешка прошла через всю доску и стала новым слоном — такое может случиться, но вы об этом не знали. Это очень похоже на тот причудливый путь, с помощью которого открывают законы природы: иногда они выглядят точными, они продолжают работать, но вдруг какая-то хитроумная диковинка указывает, что они не верны; и тогда вам приходится исследовать условия, при которых слон поменял цвет и тому подобное, и наконец вы вывели новое правило, которое глубже объясняет закон. Хотя в отличие от игры в шахматы, в которой правила усложняются по мере вашего продвижения, в физике, где вы открываете новые явления, все выглядит много проще. Кажется, что в целом все более сложно, поскольку вы получаете большее количество опытных данных, — то есть вы узнаете о большем разнообразии частиц и новых явлений — и законы опять выглядят сложными. Но если вы будете постоянно представлять, насколько они удивительные, то есть если мы распространим наш опыт на все более неизведанные области, время от времени объединяя все в единое целое, когда все работает сообща в дружном союзе, мы поймем, что все проще, чем казалось раньше.

Если вас интересуют основные принципы устройства физического мира или завершенная картина мира, то в настоящий момент наш единственный путь познания связан с умозаключениями, основанными на математическом аппарате. Не думаю, что человек без знания математики сможет сегодня полностью или хотя бы частично оценить

специфику особенностей мира, чрезвычайно глубокую универсальность законов, взаимосвязь явлений. Я не знаю никакого другого пути... мы не знаем другого способа точного описания мира... или способа увидеть его внутренние взаимосвязи без математики. Полагаю, что человек, не разработавший некоторой математической процедуры, не способен оценить эту сторону мира. Не поймите меня неправильно — существует множество сторон мира, где математика не нужна, например любовь, оценка которой восхитительна и тонка, это чувство внушает трепет и благоговение. Я не имею в виду, что в жизни есть только одна вещь — физика, но мы беседуем о физике, и коль скоро мы говорим о ней, то незнание математики ведет к жестким ограничениям в понимании мира.

Сокрушительные атомы

Понимаете, то, над чем я работаю в физике именно сейчас, — это очень важная задача, в которой мы столкнулись с трудностями; попробую описать ее. Вы знаете, что все состоит из атомов, мы поняли это давно, и многие знают, что атом состоит из ядра и электронов, движущихся вокруг него. Поведение внешней части, электронов, теперь полностью известно, законы для них хорошо изучены, насколько их можно трактовать в рамках квантовой электродинамики, о ней я вам уже рассказывал. И после того как все это раскрутили, оставался вопрос, как работает ядро, как взаимодействуют в нем частицы, как они удерживаются вместе? Одним из побочных

продуктов ядерной физики оказалось открытие деления ядра и создание атомной бомбы. Но исследование сил, которые удерживают ядерные частицы в ядре, — это давно существующая сложная задача. Во-первых, считается, что силы возникают благодаря внутреннему обмену частицами определенного сорта, такую модель придумал Юкава, а частицы называли пионами. Предположим, вы ударяете протонами по ядру — протон является одной из частиц, входящих в состав ядра, — протоны будут выбивать пионы, и они будут, конечно, вырываться наружу, испускаться.

Испускаются не только пионы, но и другие частицы — и мы придумываем им имена, пока они не иссякнут, — каоны, сигма-гипероны и лямбда-барионы и прочие. Все они теперь называются адронами, и, если увеличивать энергию реакции, вы получите все больше и больше частиц, до сотен различных частиц; проблема, в период от 1940—1950 годов и до наших дней, без сомнения, состояла в том, чтобы найти заложенную в их основе структуру. Казалось бы, среди этих частиц должно существовать множество интереснейших связей и структур, пока теория не нашла объяснения их строения, — все эти частицы состоят из чего-то еще — и это что-то мы называли кварками. Например, три кварка образуют протон, а протон — одна из частиц ядра; другая частица ядра — нейтрон. Существуют несколько кварков — сначала фактически были нужны только три кварка, чтобы объяснить все разнообразие сотен частиц, эти три различных кварка называли кварками *u*-типа, *d*-типа и *s*-типа. Протон состоит из двух *u*-кварков

и одного d-кварка, а нейтрон — из двух d-кварков и одного u-кварка. Если бы кварки двигались внутри различными путями, они представляли бы некоторую другую частицу. Тогда возникает вопрос: каково точное поведение кварков и что удерживает их вместе? Теория предположительно очень проста, очень близка аналогия с квантовой электродинамикой — не полностью, но очень похожа — кварки подобны электрону, а частицы, названные глюонами, которые курсируют между кварками, заставляя их притягиваться друг к другу, подобны фотону, который тоже путешествует между электронами, создавая электромагнитные силы. И математика здесь очень похожа, но содержит несколько немного отличающихся членов. Разгаданное различие в форме уравнений привело к разгадке принципов такой красоты и простоты, что их никак нельзя считать случайными, они очень и очень определенные. Пока не выяснено, сколько существует различных видов кварков¹.

Тут есть кардинальное отличие от электродинамики, в которой два электрона могут расходиться сколь угодно далеко, а когда они далеки друг от друга, то силы между ними, в сущности, становятся совсем ничтожными. Если бы это было справедливо для кварков, то мы ожидали бы, что, когда достаточно сильно ударяешь по какой-либо ядерной частице (адрону), должны испускаться кварки. Однако вместо этого, когда проводятся эксперимен-

¹ На текущий момент экспериментально подтверждено существование шести кварков и шести антикварков — *Примеч. ред.*

ты при энергии, достаточной для вылета кварков, вы обнаруживаете большую струю — иначе говоря, много частиц, идущих в том же направлении, что и первоначальные адроны, но в струе нет кварков — и это требование теории: когда вылетают кварки, они образуют что-то вроде новых пар кварков, они входят в состав маленьких групп кварков, представляющих адроны.

Вопрос, почему существуют такие отличия от электродинамики, как работает это малое различие в математических формулах, эти малые члены, которые незначительно изменяют уравнения, но приводят к таким различающимся эффектам, к полностью иным эффектам? То, что происходит в реальности, было действительно удивительным для большинства ученых, и первое, что приходит в голову, что теория неправильна. Но чем больше ею занимались, тем яснее становилось, что, по-видимому, виной всему оказываются именно эти дополнительные члены, приводящие к таким различающимся эффектам. Теперь мы полагаем, что физика претерпевает кардинальные изменения. Мы имеем теорию, полную и вполне определенную теорию всех этих адронов, и у нас есть огромное количество экспериментальных данных с кучей подробностей — почему же мы не можем немедленно проверить теорию, обнаружить, правильна она или нет? Потому что нам нужно вычислить следствия теории. Если теория верна, что должно произойти и как это произойдет? В данный момент трудность заключается в первом шаге. Математика, необходимая для разгадывания следствий теории, в настоящее вре-

мя непреодолимо сложна. В настоящее время — да! И поэтому очевидно, какова моя задача. Моя задача — попытаться разработать способ доведения теории до числа, тщательно ее проверить, не просто качественно, а увидеть, может ли она привести к правильным результатам.

Я потратил несколько лет, пытаясь изобрести математические трюки, которые позволили бы мне решить уравнения, но я, в общем, ничего не добился, и тогда я решил, что для начала должен представить себе, как может выглядеть решение. Трудно объяснить это доходчиво, но перед тем как оценить идею количественно, я должен уяснить качественный принцип, как работает явление. Иначе говоря, люди не понимали даже, как работает идея в грубом приближении. Я работал в последнее время, в последние год-два, над осмыслением того, как приблизительно работает теория, пока не количественно, надеясь, что в будущем это приближенное понимание сможет перерасти в точный математический аппарат, способ или алгоритм для перехода от теории к частицам. Понимаете, мы находимся в забавном положении: не то чтобы мы ищем теорию, мы ее получили — очень хорошего кандидата на роль теории, — мы находимся на той ступени, когда нам необходимо сравнить теорию с экспериментом, увидеть, какие появятся следствия и проверить исходную теорию. Мы зациклились на следствиях; тем не менее моя цель, мое страстное желание — понять, смогу ли я разработать адекватный способ решения задачи, чтобы понять, каковы следствия этой теории (*смеется*). Это один из видов сумасшествия —

иметь теорию, из которой не можешь найти следствий... Я не могу этого перенести, я должен все понять. Может быть, когда-нибудь...

«Пусть это сделает Джордж»

Чтобы сделать настоящую, действительно хорошую работу в физике, абсолютно необходимо иметь много времени, чтобы запомнить те смутные и труднодоступные идеи, которые приходят тебе в голову, — это очень похоже на то, как строится картонный домик, где каждая карта стоит непрочной, и если вы забудете про одну из них, вся конструкция развалится. Вы не знаете, как это построить, и выстраиваете карты снова и снова — и если вы прерветесь, это все равно что забыть половину идей, то есть как карты соединялись прежде, чтобы выстроилась идея, — ваши карты символизируют различные части идеи. Главное, вы соединяете вместе головоломку, и получается башня, но легко ошибиться, нужна огромная концентрация, то есть нужна масса времени для обдумывания, — правда, если вы работаете в административной сфере, вам не нужно так много времени. Если кто-нибудь попросит меня присутствовать на заседании приемной комиссии — ну уж нет, за это я не несу ответственности — и мне плевать на студентов — конечно, мне вовсе не наплевать на студентов, но я знаю, что кто-нибудь еще сделает это за меня, — я придерживаюсь точки зрения: «Пусть это сделает Джордж». Понимаете, вы не обязаны придерживаться этой точки зрения, поскольку она не совсем верна, но я поступаю так, поскольку

мне нравится заниматься физикой, и я все-таки хочу кое-что сделать, поэтому я и эгоистичен. Я хочу заниматься физикой.

Скучающие на истории науки

Вот сидят студенты в аудитории, и вы спрашиваете, как мне удастся хорошо преподавать? Должен ли я учить, исходя из истории науки или ее применения? Моя теория состоит в том, что наилучший способ обучения — не вдаваться в философию, она только приводит к хаосу и запутывает науку в том смысле, что вы используете каждый возможный способ что-то в ней сделать. Я вижу единственный способ ответа: когда ты продвигаешься вперед, надо взбудоражить этих парней или поймать их на различные крючки так, чтобы никому не было скучно — ни парню, которому интересна история и скучна абстрактная математика, а с другой стороны, парню, которому нравится абстракция и скучна история. Если ты сможешь сделать так, чтобы никому из них не было скучно, возможно, тогда ты чего-то стоишь. Я действительно не знаю, как это сделать. Я не знаю, как ответить на этот вопрос для людей с различным складом ума и различными пристрастиями — какими крючками их зацепить, чем заинтересовать, как управлять их интересами. Один способ — применить своего рода силу: ты должен пройти данный курс и сдать экзамен. Это очень эффективный путь. Многие таким образом проходят через школьное обучение, и, может быть, это наиболее эффективный путь. Прошу прощения, но после

многих лет, когда я пытался учить и пытался применить различные методики, я и в самом деле не знаю, как это сделать.

Сын, похожий на отца

Когда я был маленьким мальчиком, я получал удовольствие от рассказов отца о сущности вещей, и я старался рассказывать своему сыну о распространенных в мире вещах. Когда он был совсем маленьким, укачивая его в постельке, мы рассказывали ему всевозможные истории, и я выдумывал сказки о «маленьком народце», который ютится где-то наверху. Они гуляют, ездят на пикники или что-то в этом роде, а живут они в вентиляторе; и эти маленькие люди пробегают через лес, полный больших, длинных и толстых синих чудищ наподобие деревьев, но без листьев, а с одними стволами, и они вынуждены передвигаться между ними и тому подобное. Постепенно он уловил, что это коврик, ворсовый коврик, синий коврик, и он любил эту игру, поскольку я мог описывать все окружающие вещи со своеобразной точки зрения, а ему нравилось слушать сказки, и мы описали кучу удивительных вещей. Он даже сунулся на прогулке в мокрую собачью ноздрю, где свистел ветер, всасывался холод и выдувалось тепло. И я таким образом смог рассказать ему о физиологии и о прочих вещах. Он любил все это, и я рассказывал ему массу всяких шуток, и сам получал от этого удовольствие, поскольку рассказывал ему о вещах, которые сам любил, и мы оба веселились, когда он угадывал, что это значит. А по-

том у меня появилась дочь, и я пытался сделать то же самое, но у нее был совсем другой характер, она не хотела слушать мои истории, она хотела слушать то, что ей читали и перечитывали из книг. Она просила меня почитать ей, а не выдумывать всяческие истории — совсем другая индивидуальность. И поэтому, если мы говорим о наилучшем методе обучения детей науке, я должен сказать, что истории о «маленьком народце» не сработали в случае моей дочери и сработали по случайным причинам с моим сыном. Вы понимаете меня?

«Наука, которая вовсе не наука...»

Несмотря на прогресс в науке, параллельно с ней существует в некотором роде и псевдонаука. Социология служит примером науки, которая таковой не является. Она трактует явления не с научной точки зрения. В социологии следуют формальностям — вы собираете даты, делаете то-то и то-то, но не получаете никаких законов и не можете добраться до истины. К тому же в этой науке пока нет никаких результатов — может быть, они появятся когда-нибудь в будущем, — эта область плохо разработана, даже если что-то случится на мировом уровне. Здесь мы имеем знатоков на все случаи жизни, которые считают себя научными экспертами. Так называемые научные эксперты просто сидят за пишущими машинками и выдумывают всякую чушь вроде того, что пища, выращенная на органических удобрениях, полезнее, чем на неорганических; может, это и правда, а может, — и нет, и нет способа дока-

зять это утверждение. Но они будут сидеть за своими пишущими машинками и комплектовать всю эту ерунду, как будто это наука, а они эксперты по продуктам, органическим удобрениям и прочим вещам. Каких только вымыслов и псевдонаук не существует на свете!

Может быть, я совершенно не прав, может быть, они действительно знают все эти вещи, но я не понимаю, в чем я не прав. Видите ли, у меня есть преимущество — я понимаю, как тяжело добывать истинное знание, как тщательно надо перепроверить результаты экспериментов, как легко ошибиться и оказаться в дураках. Я понимаю, что значит узнать что-то стоящее, и поэтому, видя, как они получают информацию, я не верю, что они осмысливают ее — они не выполняют необходимой работы, не выполняют необходимых проверок, не уделяют работе должного внимания. Я очень сомневаюсь в том, что они делают все это по недомыслию: я полагаю, что они сознательно пугают людей. Я так думаю. Я не знаю жизнь во всех деталях, но таково мое мнение.

Сомнения и колебания

Если вы ждете, что наука даст все ответы на волнующие нас вопросы: кто мы есть, где мы существуем, что такое Вселенная и многие-многие другие, то вы легко можете разрушить иллюзии и начнете искать мистические ответы на эти вопросы. Может ли ученого удовлетворить мистический ответ, я не знаю, поскольку ученому важно понимать — не важ-

но что. Так или иначе, если я чего-то не понимаю, я думаю о том, как мне в этом разобраться, как проанализировать, пытаюсь выяснить, насколько далеко здесь можно продвинуться. Люди скажут: «Вы ищете основные законы физики?» Нет же, я просто смотрю, смогу ли узнать больше о нашем мире, и если выяснится, что существует простой основной закон, который объясняет все, это было бы очень здорово — настоящее открытие. И да будет так!

Может статься, что мир подобен луковице с миллионом слоев, и мы придем в отчаяние, устав рассматривать эти слои, но это не значит, что нет способа познания мира и природы вещей. У Природы свой путь, и когда мы собираемся исследовать этот путь, нет смысла ставить конкретные задачи, нужно просто попытаться как можно больше узнать о мире, в котором мы живем. Может статься, что мы не сумеем получить ответы на все свои вопросы, но я этого и не жду. Мое любопытство в науке состоит в том, чтобы просто узнать о мире что-то новое, и чем больше я узнаю, тем будет лучше для познания.

Существуют предположения, что человек в отличие от животных занимает особое место в этом мире. Мне хотелось бы исследовать эти тайны, но я не особенно доверяю историям, которые были придуманы о наших взаимоотношениях со Вселенной, так как они кажутся слишком простыми, слишком ассоциированными, слишком частными и провинциальными. Возьмем Землю. Он, Бог, пришел на землю — это один из аспектов Бога, — пришел на землю и наблюдает, что там происходит. Это

не количественное соотношение. В любом случае с этим нет смысла спорить, и я не буду с этим спорить. Я только попытаюсь объяснить вам, почему научный взгляд на вещи, которого я придерживаюсь, повлиял на мою веру. Если это истинно и если различные религии имеют различные теории на этот счет, то как совместить это с вашим собственным знанием? Вы начинаете удивляться, у вас закрадываются сомнения. А как только вы начинаете сомневаться, просто, предположительно сомневаться, вы задаете себе вопрос: а можно ли доверять науке? Вы говорите: нет, вы не знаете, что есть истина, вы только пытаетесь найти ее и, возможно, идете неверным путем.

Отталкивайтесь в понимании религии из посылки, что все неверно. Но как только вы это сделаете, вы начнете соскальзывать с высоты, которую будет трудно восстановить. С научной точки зрения или с точки зрения моего отца, мы должны понять, что такое истина и что может быть или не может быть истиной. И раз вы начали сомневаться, — а это неотъемлемая часть моего характера, — сомневаться и задавать вопросы, ваша вера становится менее твердой.

У меня есть одно свойство — я совершенно спокойно уживаюсь со своими сомнениями, и колебаниями, и незнанием. Думаю, гораздо интереснее жить, не зная чего-то, чем иметь ответы, которые могут оказаться неправильными. У меня есть приблизительные ответы, и сносные убеждения, и различная степень уверенности относительно различных вещей, но у меня нет абсолютной уверенности

относительно всего сущего, я многого не знаю, например имеет ли смысл вопрос, почему мы здесь, и что такой вопрос мог бы означать. Я мог бы немного подумать об этом, но, если чувствую бесперспективность этих размышлений, переключаюсь на что-нибудь другое. Ведь я и не должен знать ответ на любой вопрос. Я не чувствую страха, не зная, например, таких вещей, почему мы затерялись в загадочной Вселенной, не имея какой-либо цели, кроме пути, нам уготованного. Все это далеко от понимания — и это совершенно меня не пугает.

КОМПЬЮТЕРЫ БУДУЩЕГО

Через сорок лет после атомной бомбардировки Нагасаки ветеран Манхэттенского проекта Ричард Фейнман выступил с докладом в Японии. Тема доклада была мирной, тема, которая занимает многие проницательные умы: будущее компьютеров, в том числе вопросы компьютерной науки, которые сделали Фейнмана провидцем, современным Нострадамусом — нижний предел размера компьютера. Может быть, эта глава вызовет вопросы у некоторых читателей; однако это такая важная часть вклада Фейнмана в науку, что, я надеюсь, они выберут время для ее чтения, даже если пропустят некоторые сугубо технические детали. Глава заканчивается кратким обсуждением одной из любимых идей Фейнмана, которая инициировала современную революцию в нанотехнологиях.

Введение

Для меня большая честь и удовольствие присутствовать здесь в качестве докладчика в память об ученом, которого я исключительно уважал и восхищался — профессора Нишины. Приехать в Японию и рассказывать о компьютерах — это все равно что читать проповедь Будде. Но я много размышлял о компьютерах — и это единственное, о чем я мог думать, когда меня пригласили сделать доклад.

Первое, что я хотел бы сказать, — я не собирался говорить о компьютерах. Я хочу рассказать об их будущем. Однако наиболее важные разработки будущего составляют предмет, о котором я не буду говорить. Например, существует великое множество работ, посвященных разработке более интеллектуальных машин, — машин, умеющих лучше взаимодействовать с людьми, так чтобы ввод и вывод данных осуществлялся с меньшими усилиями по сравнению с тем сложным программированием, которое мы имеем сегодня. Это часто называют искусственным интеллектом, но мне этот термин не нравится. Возможно, неинтеллектуальные машины могут работать даже лучше, чем интеллектуальные.

Другая проблема состоит в стандартизации языков программирования. Сегодня их существует слишком много, и мне кажется разумной идея просто выбрать один из них. (Я не решаюсь упомянуть, что в Японии должно существовать больше стандартных языков — поскольку у вас имеется четыре способа письма, я думаю, что попытки стандартизации чего-либо здесь, очевидно, приведут к еще большему числу стандартов, а не к меньшему!)

Другая интересная проблема будущего состоит в том, что лучше выполнять работу на автоматически отлаженных программах, но об этом я тоже не буду говорить. Отладка означает поиск ошибок в программе или в машине; но на редкость трудно отлаживать программы, когда они становятся все более сложными.

Еще одно направление усовершенствования — сделать машины трехмерными вместо построенных

на чипах, расположенных на плоскости. Это должно быть сделано поэтапно, а не сразу — вы можете создать несколько слоев, а затем добавлять постепенно все большее их число. Другое важнейшее устройство — прибор, автоматически обнаруживающий дефектные элементы на чипе; тогда чип будет автоматически перезаписывать сам себя так, чтобы избежать дефектных элементов. В настоящее время, когда мы пытаемся делать большие чипы, в них часто образуются трещины или дефектные участки, и мы выбрасываем целиком весь чип. Если мы сможем использовать действующую часть чипа, эффективность станет намного выше. Я упоминал, что попытаюсь рассказать вам об известных мне реальных проблемах машин будущего. Однако то, о чем я хочу говорить, — простые, небольшие, технически и физически добротные вещи, которые можно в принципе сделать в соответствии с физическими законами. Иначе говоря, я хотел бы обсудить механизм, а не способ, которым мы используем машины.

Я буду рассказывать о некоторых технических возможностях для создания машин. Будут затронуты три темы. Одна — это машины с параллельной обработкой, представляющие устройства очень близкого будущего, почти настоящего, которые разрабатываются в настоящее время. Более отдаленное будущее — это вопрос о потреблении энергии машинами, который на первый взгляд кажется ограниченным, но в действительности это не так. И в заключение я буду говорить о размерах. Всегда лучше иметь машины поменьше, и вопрос заключается в том, насколько малым может стать допустимый размер,

чтобы в принципе машины согласовывались с законами природы? Я не буду обсуждать, какова и в чем состоит актуальность каждой из перечисленных проблем в будущем. Это зависит от экономических и социальных условий, и я не собираюсь ломать над ними голову.

Параллельные компьютеры

Первая тема касается параллельных компьютеров. Почти все современные компьютеры, обычные компьютеры, работают на компоновке или архитектуре, придуманной фон Нейманом¹, в которой существуют очень большая память, где хранится вся информация, и одна центральная область, в которой проводятся простые вычисления.

Мы берем одно число из одного отдела памяти, а другое — из другого отдела памяти, посылаем их в центральное арифметическое устройство для их сложения, а затем отсылаем ответ обратно в некоторое место памяти. Существует, по сути, один центральный процессор, который работает очень-очень быстро и очень напряженно, в то время как память в целом не участвует в процессе и представляет картотеку с файловой структурой, которая очень редко используется. Совершенно очевидно, что чем больше процессоров работают одновременно, тем быстрее мы должны выполнять вычисления. Но здесь

¹ Джон фон Нейман (1903–1957) — венгерско-американский математик, его считают одним из отцов вычислительных машин. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

возникает затруднение: допустим, кому-то, работающему на одном процессоре, понадобится та же самая информация из памяти, что и другому, пользующемуся другим процессором, — и тогда все перепутывается. В связи со сказанным очень трудно разместить параллельно для работы много процессоров.

Некоторые шаги в этом направлении были приняты на так называемых векторных процессорах. Если иногда вам необходимо выполнить одинаковые действия на многих различных элементах, вы, возможно, выполняете их одновременно. В принципе можно написать правильные программы стандартным способом, и тогда интерпретирующая программа автоматически поймет, когда полезно использовать эту векторную возможность. Такая идея применяется в компьютерах американской фирмы «Cray» и в японских «суперкомпьютерах». Другой проект состоит в том, чтобы взять большое число эффективно работающих относительно простых (но не слишком упрощенных) компьютеров и соединить их вместе в некоторую структуру. Тогда все они могут работать, составляя часть схемы. Каждый компьютер является совершенно независимым, причем они будут передавать информацию от одного к другому, когда один или другой в ней нуждается. Такого рода схема реализована, например, в Калтехе (Калифорнийском технологическом институте), в гиперкубе *Cosmic Cube*, и представляет только одну из многочисленных возможностей. Сегодня многие конструируют такие машины. Другая возможность — распределить очень большое число очень малых центральных процессоров вокруг па-

мости. Каждый процессор общается только с малой частью памяти, и существует детально разработанная система взаимосвязей между ними. Примером такой машины является *Connection Machine* (машина с переменной структурой связей с параллельными процессорами), созданная в MIT (Массачусетском технологическом институте). Она имеет 64 000 процессоров и систему маршрутизации, в которой каждые 16 могут переговариваться с другими 16, и, таким образом, получается 4000 возможностей маршрутного соединения.

Многие научные задачи, такие, например, как прохождение волн через некоторые материалы, можно было бы очень легко решить, применив параллельное соединение процессоров. Дело в том, что происходящее в данной части пространства в некоторый момент времени может быть определено локально — нужно только знать давление и напряжение от соседних объемов. Ответ можно вычислить одновременно для каждого объема, и эти граничные условия соединяются с различными объемами. Вот почему такой тип модели работает для решения подобных задач. Если задача достаточно обширна, следует выполнить большой объем вычислений. Параллельное соединение компьютеров может значительно ускорить время решения задачи, и этот принцип применяется не только в решении научных задач.

Куда подевалось предубеждение двухлетней давности, будто параллельное программирование трудновыполнимо? Выходит, то, что было сложным и почти невыполнимым, вскоре станет обыч-

ной программой и продемонстрирует на примере этой программы эффективность параллельного соединения компьютеров. Принимая во внимание, что мы имеем возможность параллельных вычислений, нужно полностью переписать программы, по-новому переосмыслив, что происходит внутри машины. Невозможно эффективно использовать старые программы. Это колоссальное неудобство для большинства промышленных приложений, из-за этого идея может натолкнуться на значительное сопротивление. Но большие программы, как правило, дело ученых или специалистов — умных и способных программистов. Они любят свое дело и горят желанием начать все заново. Они готовы переписать программы, если это позволит сделать их более эффективными. Итак, следует перепрограммировать тяжелые, огромные программы новым способом, и когда все в конце концов придут к этому, появится все больше и больше новых программ, и программисты научатся с ними работать.

Снижение энергетических потерь

Вторая тема, о которой я хочу рассказать, — это энергетические потери в компьютерах. Тот факт, что они должны охлаждаться, является очевидным ограничением для создания больших компьютеров — уже немало усилий потрачено для охлаждения такой машины. Я хотел бы объяснить, что это просто результат плохой разработки и не содержит ничего фундаментального. Внутри компьютера каждый бит информации контролируется проводом, находя-

щимся под тем или иным напряжением. Это называется «один бит», и нам нужно менять напряжение на проводе от одного значения до другого, увеличивать или снимать с него заряд. Я приведу аналогию с водой: мы наполняем сосуд водой до определенного уровня или опустошаем его до другого уровня. Это только аналогия — если вам нравится более реалистичная задача с подачей электричества, вы можете придумать более точную электрическую схему. То, что мы сделаем сейчас, есть аналог происходящего в случае с водой: напомним сосуд, наливая в него воду до верхнего края (Рис. 1), и будем понижать ее уровень, открыв нижний кран и позволив всей воде вытечь из сосуда. В обоих случаях существуют потери энергии из-за внезапного перепада уровня воды от высоты верхнего уровня, до которого она была налита, до нижнего уровня дна, и когда вы начинаете снова наливать воду — наоборот. В случае напряжения и заряда возникает та же самая ситуация.

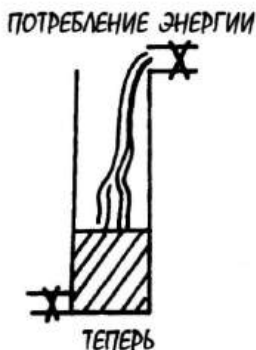
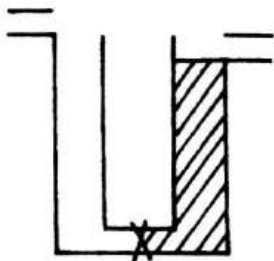


Рис. 1

Это аналогично тому, как объяснял мистер Беннет, управляя автомобилем, — он начинает двигаться при включении зажигания и останавливается при нажатии на тормоз. Каждый раз при включении зажигания и затем при нажатии на тормоз вы теряете мощность. Другой способ провести аналогию с автомобилем — обеспечение связи колес с маховиками. Когда автомобиль останавливается, скорость маховика увеличивается; таким образом, сохраняя энергию, связь может заработать, и автомобиль опять начнет двигаться. Аналог с водой будет следующим: пусть у вас есть U-образная трубка с краном в центре на ее дне, соединяющая два рукава U-образной трубки (*Рис. 2*). Мы начинаем заполнять ее доверху справа, причем левая часть остается пустой, кран перекрыт. Если теперь открыть кран, вода будет перетекать в другую часть трубки, мы снова своевременно перекроем кран, вода сохранится в левой стороне. Теперь мы хотим двигаться в другую сторону — снова откроем кран, и вода потечет обратно, мы ее там опять сохраним. Но налицо некоторые потери, вода уже не поднялась так же высоко, как прежде, и нам надо добавить немного воды, чтобы скорректировать потерю — потеря энергии много меньше, чем в методе прямого заполнения. Эта хитрость использует инерцию воды, аналог этого для электричества — индуктивность. Однако на современных кремниевых транзисторах очень трудно скомпенсировать индуктивность на чипах. Поэтому эта методика не слишком удобна при существующей технологии.



ИНЕРЦИЯ (ИНДУКТИВНОСТЬ)

Рис. 2

Еще один способ — наполнить резервуар с помощью источника напряжения, который устанавливается лишь не намного выше уровня воды. Источник своевременно поднимается, когда мы заполняем резервуар (Рис. 3), так что перепад уровня воды всегда мал на протяжении всего опыта. Таким же образом мы могли бы воспользоваться выпускным отверстием для понижения уровня в резервуаре, но сбрасывать воду вблизи верха и низа трубки так, чтобы тепловые потери в месте расположения транзистора не возникали или были небольшими. Реальный объем потерь будет зависеть от того, насколько велико расстояние между источником напряжения и поверхностью воды, когда мы наполняем резервуар. Этот метод соответствует изменению со временем подачи напряжения на источник. Итак, если пользоваться источником с меняющимся со временем напряжением, то можно применять этот метод. Безусловно, существуют потери энергии в самом

источнике, но все они локализованы в одном месте, где несложно создать одну большую индуктивность. Эта схема называется «горячие часы», так как источник напряжения работает одновременно и как часы, которые фиксируют продолжительность чего-либо. Кроме того, нам не требуется дополнительного сигнала часов, чтобы измерять циклы, как это делается в обычных конструкциях.



ПЕРЕМЕННАЯ ПОДАЧА НАПРЯЖЕНИЯ;
(«ГОРЯЧИЕ ЧАСЫ»).

$$\text{ПОТЕРЯ ЭНЕРГИИ} \cdot \text{ВРЕМЯ} = \text{КОНСТАНТА.}$$

Рис. 3

Оба последних устройства используют тем меньше энергии, чем медленнее они движутся. Действительно, схема U-образной трубки не будет работать, пока ее центральный кран не сможет открываться и закрываться медленнее, чем вода в трубке будет успевать перетекать туда и обратно. Следовательно, мои устройства должны быть медленными, я сохранил энергетические потери, но сделал устройства медленными. Фактически энергетические потери, умноженные на время, необходимое для рабочего цикла, остаются постоянными. И все-таки это

оказывается очень удобным, поскольку время, показываемое часами, много больше времени цикла для транзисторов, и мы можем этим воспользоваться, чтобы понизить энергию. Кроме того, если, к примеру, мы выполняем вычисления в три раза медленнее, мы могли бы использовать одну треть энергии три раза за время, которое содержит в девять раз меньшую мощность, чем должна растрачиваться. Может быть, это стоящая мысль. Может быть, при конструировании с применением параллельного соединения компьютеров или при других способах работы мы затратим немного больше времени, чем при максимальной скорости цикла, сделаем машины больше, чем обычно, но при этом еще снизим энергетические потери.

Для транзистора энергетические потери, умноженные на время, затрачиваемое на работу, являются результатом умножения нескольких факторов (Рис. 4):

$$\begin{aligned} & \text{ЭНЕРГИЯ} \cdot \text{ВРЕМЯ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРА} = \\ & = kT \cdot \frac{\text{ДЛИНА}}{\text{ТЕПЛОВАЯ СКОРОСТЬ}} \cdot \frac{\text{ДЛИНА}}{\text{СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА}} \cdot \text{ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ} \end{aligned}$$

$$\text{ЭНЕРГИЯ} \sim 10^{-11} kT$$

∴ УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРА : БЫСТРЕЕ
МЕНЬШЕ ЭНЕРГИИ

Рис. 4

1. Тепловой энергии, пропорциональной температуре, kT ;

2. Длины транзистора между источником и выводом тока, деленной на скорость внутренних электронов (тепловая скорость $\sqrt{3kT / m}$);

3. Длины транзистора в единицах среднего свободного пробега электронов до соударения в транзисторе;

4. Полного числа электронов, находящихся внутри транзистора во время его работы.

Подставляя соответствующие значения всех этих величин, получим, что энергия, используемая в транзисторах, в настоящее время приблизительно в миллиард — десять миллиардов раз больше тепловой энергии kT . Когда транзистор включен, он использует эту огромную энергию. Это очень большая величина. Безусловно, хорошая мысль — уменьшить размеры транзистора. Мы уменьшаем длину между источником и выводом тока и можем уменьшить число электронов, тем самым существенно понизив энергию. Оказывается, что чем меньше транзистор, тем быстрее он работает, так как электроны могут проходить через него быстрее и быстрее его включать. Исходя из любых соображений, хорошо бы сделать транзистор поменьше, и все пытаются это сделать.

А теперь представьте себе, что нам удалось сделать размер транзистора меньше средней длины свободного пробега. Тогда транзистор уже не будет работать должным образом. Он не будет вести себя так, как мы предполагаем. Это напоми-

нает мне, как еще несколько лет назад считался непреодолимым звуковой барьер. Считалось, что самолеты не могут летать со скоростью, превышающей скорость звука, поскольку, если вы их сконструируете обычным образом и затем попытаетесь вставить скорость звука в уравнения, пропеллер не сможет работать, а крылья не будут обладать подъемной силой, и вообще все будет работать неправильно. Тем не менее самолеты летают со скоростью, превышающей скорость звука. Необходимо понимать, что правильные законы подчиняются правильным условиям, и конструировать приборы необходимо согласно этим законам. Нельзя ждать, что старые разработки будут работать в новых обстоятельствах. В *новых* обстоятельствах могут работать только *новые* проекты. И я утверждаю, что абсолютно допустимо делать транзисторные системы, или, более правильно, системы коммутации и компьютерные устройства, размеры которых меньше средней длины свободного пробега. Я говорю, конечно, «принципиально возможно», здесь речь не идет о реальном производстве таких устройств. Давайте обсудим, что произойдет, если мы попытаемся максимально уменьшить размер приборов.

Уменьшение размеров

Итак, моя третья тема — размер компьютерных элементов, и здесь мои предложения носят исключительно теоретический характер. Первое, о чем вам следует беспокоиться, когда изделие становится

очень маленьким, — это броуновское движение¹ — все вокруг движется, вибрирует, и ничто не стоит на месте. Как в таком случае можно контролировать схемы? Более того, если схема действительно работает, разве она не имеет возможности случайно совершить обратный скачок? Если мы возьмем классическое напряжение в 2 вольта для энергии такой электрической системы (Рис. 5), что в восемьдесят раз больше тепловой энергии при комнатной температуре (энергия kT соответствует $1/40$ вольта), то вероятность скачка обратного перехода по отношению к тепловой энергии равно e^{-80} или 10^{-43} . Что это значит? Если в нашем компьютере миллиард транзисторов (пока мы такого количества не имеем) и все они включаются 10^{10} раз в секунду (время включения составляет десятые доли наносекунды), включаясь непрерывно и работая 10^9 секунд, что составляет 30 лет, то полное число операций по переключению в такой машине равно 10^{28} . Вероятность того, что один транзистор перейдет в обратное состояние, равна только 10^{-43} , следовательно, никогда в течение 30 лет не произойдет ошибки, вызванной тепловыми осцилляциями. Если вам это не нравится, используйте напряжение 2,5 вольта, и тогда вероятность будет еще меньше. Задолго до этого случится реальная катастрофа, когда космические лучи случайно пройдут через транзистор — нет ничего хуже.

¹ Толчкообразное движение частиц, вызванное постоянными случайными столкновениями молекул, впервые описано в печати в 1828 году ботаником Робертом Броуном и объяснено Альбертом Эйнштейном в его статье 1905 года в «Annalen der Physik». — *Примеч. ред. иностр. издания.*

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

$$2 \text{ ВОЛЬТА} = 80 \text{ } \mu\text{T}$$

$$\text{ВЕРОЯТНАЯ ОШИБКА } e^{-80} = 10^{-43}$$

$$10^4 \text{ ТРАНЗИСТОРОВ}$$

$$10^{10} \text{ ИЗМЕНЕНИЙ/СЕК. НА КАЖДЫЙ}$$

$$10^4 \text{ СЕКУНД (30 ЛЕТ)}$$

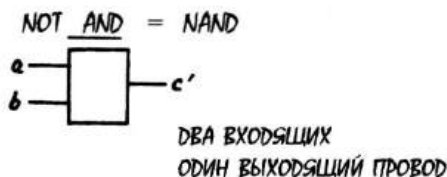
$$10^{28}$$

Рис. 5

Однако в действительности возможности гораздо шире — я хотел бы сослаться на недавнюю статью в *Scientific American* С. Беннета и Р. Ландауэра *The Fundamental Physical Limits of Computation*¹. Можно сделать компьютер, в котором каждый элемент, каждый транзистор может действовать как в прямом, так дополнительно и в обратном направлении, и все-таки компьютер будет работать. Все операции в компьютере можно проводить в обоих направлениях. Некоторое время вычисления продолжаются одним способом, а затем он сам считает результат недействительным, «развычисляется» и снова движется вперед — и так цикл продолжается. Если его немного переконструировать, можно заставить такой компьютер последовательно анализировать и заканчивать вычисления, чтобы он был более пригоден для расчетов вперед, а не назад.

¹ Sci. Am. July 1985; Japanese Transl. — SAIENSU, Sept. 1985. — Примеч. ред. иностр. издания.

Известно, что все допустимые вычисления можно выполнять, комбинируя несколько простых элементов, например транзисторов; или, если вам нужно логическое описание — работать с так называемой схемой *NAND*¹. Такая схема требует два входных «провода» и один выходной (Рис. 6). Забудем на минуту про *NOT*. Что такое схема *AND*? Схема *AND* — это устройство с выходом 1, только если оба входных провода представляют 1, в противном случае его выход равен 0. Схема *NOT-AND* означает противоположное, таким образом, выходной провод считывается как 1 (то есть имеет уровень напряжения, соответствующий 1), если только оба входа не дают 1. Если же оба входных провода дают 1, то выходной провод читается



A	B	C'
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

НЕОБРАТИМАЯ
СХЕМА

ИНФОРМАЦИЯ
ТЕРЯЕТСЯ

Рис. 6

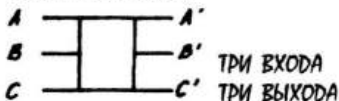
¹ “NAND = NOT-AND = НЕ-И”

как 0 (имеет уровень напряжения, соответствующий 0). На рис. 6 показана небольшая таблица входных и выходных данных для схемы *NAND*. А и В — входные данные, а С представляет выход. Если оба, А и В, равны 1, то выход есть 0, в противном случае 1. Но такое устройство необратимо: информация теряется.

Значения её входов не могут быть восстановлены из единичного выходного значения. Нельзя ждать, что устройство, двигаясь вперед, вернется назад и вычислит что-нибудь правильно. Например, если мы знаем, что выход сейчас равен 1, мы не можем восстановить, было ли на входе $A = 0$, $B = 1$, или $A = 1$, $B = 0$, или $A = 0$, $B = 0$. Это и называется «необратимая схема». Грандиозное открытие Беннета и независимо Фредкина состоит в том, что можно выполнять вычисления с различного рода фундаментальными схемами, например с обратимыми схемами. Проиллюстрирую их идею с помощью устройства, которое можно назвать обратимой схемой *NAND*. Оно имеет три входа и три выхода (Рис. 7). На выходе два значения A' и B' те же, что и на входе, а третий работает следующим образом. C' имеет то же значение, что и C , если только оба А и В не равны 1, в противном случае оно меняется, каким бы ни было C . Например, если C равно 1, C' меняется на 0; если же C равно 0, то C' меняется на 1 — но эти изменения происходят, если только оба входа А и В равны 1. Если вы поставите две эти схемы последовательно, вы увидите, что А и В проходят через схему, и если C не меняется, то C' равно C . Если же C меняется, оно меняется дваж-

ды, так что оно тоже остается постоянным. Следовательно, эта схема является обратимой, и информация не теряется.

ОБРАТИМАЯ СХЕМА



$$A' = A$$

$$B' = B$$

$$C' = C, \text{ ЕСЛИ ТОЛЬКО } A \text{ И } B \text{ НЕ РАВНЫ } 1$$

$$C' = 1 - C \text{ (НЕ } C), \text{ ЕСЛИ } A \text{ И } B \text{ РАВНЫ } 1$$

ИНФОРМАЦИЯ НЕ ТЕРЯЕТСЯ.

НЕОБХОДИМО НЕКОТОРОЕ УСИЛИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ВПЕРЕД:

ТЕРЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ · ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ВРЕМЯ = КОНСТАНТА

Рис. 7

Устройство, построенное целиком на таких схемах, выполняет вычисления при движении вперед. Но если в какой-то период времени происходит движение и вперед, и назад, в итоге оно продвигается вперед и все-таки работает правильно. Если в дальнейшем происходят рывки назад, а затем вперед, работа тем не менее остается скорректированной. Это похоже на то, как частица газа бомбардируется окружающими атомами. Такая частица обычно никуда не уходит, но при малейшем толчке, малейшей флуктуации возникает немного более вероятное движение по одному пути, а не по другому, и частица с медленным дрейфом смещается вперед и проходит от одного до другого конца, несмотря на существование броуновского движения. Так

и наш компьютер будет вычислять при условии, что мы приложим дрейфовую силу, чтобы организовать вычисления. Хотя он и не выполняет вычисления плавно, он, во всяком случае, вычисляет и вперед, и назад и в конечном счете закончит работу. Как с частицей в газе, если мы ее слегка подтолкнем, она потеряет очень мало энергии, но зато ее путь от одного конца до другого займет достаточное время. Если мы спешим и подтолкнем частицу сильно — потеряем массу энергии. То же будет с компьютером. Если мы терпеливы и двигаемся медленно, мы можем заставить компьютер работать почти без потери энергии, с потерей, даже меньшей, чем kT на один шаг — со сколь угодно малыми желаемыми потерями, — если располагаем достаточным временем. Но если вы спешите, вам приходится «транжирить» энергию, ясно, что энергия теряется на полное завершение вычислений компьютера в прямом порядке; потери энергии, умноженные на время, затраченное на выполнение вычислений, — величина постоянная.

Имея в виду эти возможности, давайте посмотрим, насколько малым можно сделать компьютер. Насколько велики будут размеры? Нам всем известно, что можно записать числа в двоичной системе, как цепочки «битов», каждая цифра — единица или ноль. Каждый атом тоже можно занумеровать нулем или единицей, поэтому маленькой цепочки атомов будет достаточно для создания некоторого числа — один атом на каждый бит. (В действительности, так как атом может находиться более чем в двух состояниях, можно было бы использовать даже меньше

атомов, но один на бит — вполне достаточно!) Итак, ради интеллектуального развлечения рассмотрим, можно ли построить компьютер, в котором записываются биты атомного размера, а бит, например, означает следующее: если спин атома направлен вверх, то это соответствует единице, а вниз — нулю. И тогда наш «транзистор», в котором в различных местах меняются биты, будет соответствовать некоторому взаимодействию между атомами, которые меняют свои состояния. Простейший пример — если что-то вроде 3-атомного взаимодействия будет фундаментальным элементом или схемой в таком компьютере. Очевидно, прибор не будет работать правильно, если мы сконструируем его в соответствии с законами, свойственными большим объектам. Мы должны использовать новые законы физики, квантово-механические законы, законы, присущие атомному движению (Рис. 8).

ТЕПЕРЬ СЛЕДУЕТ ПРИМЕНИТЬ НОВЫЕ ЗАКОНЫ ФИЗИКИ

ОБРАТИМАЯ СХЕМА
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

НИКАКИХ ДАЛЬНЕЙШИХ
ОГРАНИЧЕНИЙ, КРОМЕ

НЕ МОЖЕТ БЫТЬ МЕНЬШЕ АТОМА
ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ (БЕННЕТ)
СКОРОСТЬ СВЕТА

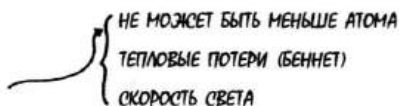


Рис. 8

Поэтому нам следует задать вопрос, позволяют ли принципы квантовой механики расположить атомы в таком малом количестве, которое соответствует нескольким схемам в компьютере и которые будут работать в качестве компьютера? В принципе эти во-

просы изучались, и такое расположение было найдено. Так как законы квантовой механики обратимы, нам нужно воспользоваться изобретением Беннета и Фредкина об обратимых логических схемах. При изучении квантово-механической ситуации было обнаружено, что квантовая механика не накладывает дополнительных ограничений на те условия, которые мистер Беннет получил из термодинамических соображений. Безусловно, существует ограничение, практическое ограничение — биты должны соответствовать размеру атома, а транзистор — 3-4 атомам. Используемая мной квантово-механическая схема содержит 3 атома. (Я не пытался записать биты на ядрах. Прежде чем говорить о чем-то другом, я подожду, пока технологические разработки доберутся до атомов!) Мы накладываем следующие ограничивающие условия: (а) ограничения размеров размерами атома; (б) условия на энергию, зависящие от времени, как получено Беннетом; и (с) особенности, которые я не упоминал, связанные со скоростью света, — нельзя послать сигналы со скоростью, превышающей скорость света. Вот, собственно, и все физические ограничения на компьютеры, о которых мне известно.

$10^{-3} - 10^{-4}$ В ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРАХ	} УМЕНЬШЕНИЯ, ВОЗМОЖНЫЕ НА ОДНУ СХЕМУ
10^{-11} В ОБЪЕМЕ	
10^{-11} ПО ЭНЕРГИИ	
$10^{-4.5}$ ПО ВРЕМЕНИ	

ТЕОРЕТИЧЕСКИ ВОЗМОЖНО!

Рис. 9

Если мы каким-либо образом ухитримся построить компьютер атомного размера, это будет означать (Рис. 9), что его размер, линейный размер, в тысячу — десять тысяч раз меньше самого тонкого чипа, которым мы сейчас располагаем! Это соответствует тому, что объем компьютера составит одну сто-миллиардную (10^{-11}) от объема нынешних компьютеров, поскольку объем «транзистора» будет меньше в 10^{11} раз транзисторов сегодняшнего дня. Энергия, необходимая для одного включения, тоже будет приблизительно на одиннадцать порядков меньше энергии, требуемой для включения транзистора сегодня, а время, затрачиваемое на переходы, будет по крайней мере в десять тысяч раз меньше на каждый шаг вычислений. Таким образом, существует масса возможностей для усовершенствования компьютера, и я полагаюсь здесь на вас, практикующих специалистов, работа которых непосредственно связана с компьютерами.

Я, видимо, недооценил, насколько много времени занял у мистера Езава перевод моего доклада. На сегодняшний день я рассказал все, что заранее подготовил. Большое спасибо! Если у вас есть вопросы, я готов ответить на них.

Вопросы и ответы

Вопрос: Вы упомянули, что один бит информации можно сохранить в атоме. Интересно, можно ли сохранить тот же объем информации в одном кварке?

Ответ: Да. Но мы не можем контролировать кварки, и потому иметь с ними дело совершенно

нереально. Вы могли бы подумать, что вещи, о которых я рассказывал, не имеют практического значения, но я так не думаю. Когда я говорю об атомах, я верю, что когда-нибудь мы будем способны контролировать их индивидуально. Но во взаимодействие кварков вовлечена слишком большая энергия — ими очень опасно манипулировать из-за радиоактивности и прочих вещей. А атомные энергии, о которых я говорил, вполне привычны для нас с точки зрения и химических, и электрических энергий, и их неисчислимое множество в реальной сфере; полагаю, что абсурдным это кажется только в данный момент.

Вопрос: Вы сказали, что чем меньше элементы компьютера, тем лучше. Но я думаю, оборудование должно быть крупнее, потому что...

Ответ: Вы полагаете, что ваш палец слишком велик, чтобы нажать на кнопку?

Вопрос: Да, именно так.

Ответ: Конечно, вы правы. Я говорю о внутренних компьютерах, возможно, для роботов или других приборов. Вход и выход — это то, что я не обсуждал: является ли вход результатом взгляда на картинки, голосовым восприятием или нажатием на кнопки. Я обсуждаю, как вычисления выполняются в принципе, а не какую следует иметь форму выхода. В самом деле верно, что вход и выход нельзя в большинстве случаев эффективно уменьшать до размеров, лежащих за пределами человеческого восприятия. Уже сейчас слишком трудно нажимать на кнопки некоторых компьютеров нашими слишком большими пальцами. Но с детально разработанными пробле-

мами счета, отнимающего часы и часы, счет надо выполнять быстро и на очень маленьких машинах, с низкоэнергетическими затратами. Как раз над машинами такого рода я и размышляю. Это не просто применение дополнительных двух чисел, а принципиальная тщательная разработка вычислений.

Вопрос: Я бы хотел узнать о вашем методе преобразования информации от одного элемента атомного уровня к другому аналогичному элементу. Если вы используете квантовую механику или естественное взаимодействие между двумя элементами, то принцип работы такого прибора приблизится к самой Природе. Например, если вы делаете компьютерное моделирование магнита по методу Монте-Карло для изучения критических явлений, ваш компьютер атомного уровня будет очень близок самому магниту. Что вы об этом думаете?

Ответ: Да. Все, что мы делаем, — это Природа. Мы приспособливаем ее под себя, например для выполнения вычислений. В магните существует некоторый тип соотношений; если хотите, там существует продолжающийся в каком-то смысле вычислительный процесс, весьма похожий на происходящее в Солнечной системе — требующий определенного осмысления. Но это могут быть не те вычисления, которые мы хотим произвести в данный момент. То, что мы хотим сделать, — это устройство, для которого можно менять программы и проводить все необходимые вычисления, а не только для проблемы магнита, которую само устройство с удовольствием готово решать. Я не могу использовать для компьютера Солнечную систему до тех пор, пока у меня не

появится задача — отследить движение планет; все, что я должен буду делать в этом случае, — это наблюдать. Была забавная статья, написанная в качестве шутки. В далеком будущем появляется «статья», в которой обсуждается новый метод выполнения аэродинамических вычислений: вместо применения компьютеров сегодняшнего дня автор изобретает простой прибор для продувания воздуха за крылом. (Он заново изобрел аэродинамическую трубу!)

Вопрос: Я недавно прочитал в газете статью о том, что работа нервной системы в человеческом мозге гораздо медленнее компьютеров настоящего времени, а элемент нервной системы гораздо меньше. Не думаете ли вы, что компьютеры, о которых вы рассказывали сегодня, имеют что-то общее с работой нервной системы мозга?

Ответ: Существует аналогия между мозгом и компьютером в том отношении, что, несомненно, существуют элементы, которые можно включить под контролем других. Нервные импульсы контролируют или возбуждают другие нервы; в известном смысле это часто зависит от того, сколько было получено импульсов — что-то вроде *AND* или его обобщения. Сколько энергии затрачивает клетка мозга на один такой переход? Я не знаю числа. Время, требуемое для включения в мозге, намного больше аналогичного времени даже в современных компьютерах, не говоря уже о воображаемом атомном компьютере будущего, но система внутренних связей в мозге разработана значительно детальнее. Каждый нерв соединен с тысячами других, а транзистор мы соединяем только с двумя-тремя.

Некоторые смотрят на деятельность мозга, как на работу механизма, и видят, что во многих отношениях он превосходит современные компьютеры, а во многих отношениях компьютер превосходит мозг. Эту тему инспирируют конструкторы машин, стремящиеся заложить в них все больше возможностей. Нередко случается, что у инженера возникает мысль, как работает мозг (по его мнению), и он конструирует машину, которая ведет себя подобным образом. Такая новая машина действительно может работать очень хорошо. Но я должен предупредить, что ничего не рассказывал о том, как работает мозг, и так ли важно знать об этом, чтобы создать работоспособный компьютер. Для создания летательного аппарата не обязательно понимать, каким образом птицы машут крыльями и как учесть в конструкции эти особенности. Не нужно понимать устройство двигательной системы лап гепарда — животного, бегающего очень быстро, — чтобы сконструировать автомобиль с колесами, которые вертятся очень быстро. Поэтому для создания устройства, на много порядков превышающего возможности Природы, нет необходимости имитировать ее детальное поведение. Это интересная тема, и я хотел бы поговорить об этом.

Ваш мозг очень слаб по сравнению с компьютером. Я задам серию чисел: один, три, семь... Или, лучше: *ichi, san, ni, go, ichi, hachi, ichi, ni, ku, san, go*¹. А теперь я хотел бы, чтобы вы повторили их в об-

¹ Японские цифры: один, три, два, пять, один, восемь, один, два, девять, три, пять.

ратном порядке. Компьютер может вместить десятки тысяч чисел и выдать их мне в обратном порядке или взять их сумму, или выполнить массу других вещей, которые мы сами сделать не можем. С другой стороны, если я рассматриваю лицо, глаза человека, я могу сказать, кто это, если знаю этого человека, или сказать, что не знаю его. Мы пока еще не понимаем, как создать такую компьютерную систему, которая выдавала бы нам подобную информацию при задании черт лица даже при условии, что вы ее учили и она видела множество лиц.

Другой интересный пример — машины, играющие в шахматы. Просто удивительно, что мы можем создавать машины, которые играют в шахматы лучше, чем почти все присутствующие здесь. Но они делают это, перебирая множество вариантов. Компьютер двигает фигуру, я могу передвинуть фигуру, потом опять он и так далее. Компьютеры просматривают каждую альтернативу и выбирают лучший вариант. Они пересматривают миллионы альтернатив, однако человек, владеющий шахматной игрой, делает это иначе. Он распознает рисунок, структуру. Перед тем как сделать ход, он просматривает только тридцать или сорок позиций. Поэтому, хотя правила при игре в го проще, машины играют в го довольно плохо, поскольку в каждой позиции существует слишком много возможностей сделать ход и слишком много вещей, которые надо проверить, — машины не могут смотреть так глубоко. Проблема распознавания рисунка, структуры и что делать в данных обстоятельствах — это то, что пока инженерам (они любят называть себя учеными-компьютерщи-

ками) дается с трудом. Это, безусловно, одна из важнейших задач компьютеров будущего — возможно, более важная, чем то, о чем я говорил. Заставим машины эффективно играть в Го!

Вопрос: Думаю, что всякий метод вычислений не будет плодотворным, пока он не начнет сам составлять такие устройства или программы. Я размышлял над статьей Фредкина по консервативной логике, она очень интригующая, но как только я подумал о составлении простой программы, используя такие устройства, я запутался, так как подобная программа значительно сложнее обычной программы. Думаю, мы легко получим некоторую бесконечную регрессию, поскольку процесс создания определенной программы будет более сложным, чем сама программа, и при попытке автоматизировать программу автоматизированная программа будет намного сложнее и так далее, особенно если программа физически вшита в компьютер, а не отделяется от него, как обычные программы. Полагаю, это основной вопрос — понять методику построения.

Ответ: У нас несколько иной опыт. Нет никакой бесконечной регрессии: она останавливается при некотором уровне сложности. Машина, о которой так ясно говорит Фредкин, и та, о которой рассказывал я в случае квантовой механики, представляют универсальные компьютеры в том смысле, что они могут быть запрограммированы и выполнять различную работу. Это не вшитая программа. Они являются не более вшитыми, чем обычный компьютер, в который можно записать информацию — программа представляет часть входных данных, — и маши-

на решает поставленные задачи. В ней есть вшитая программа, но она и универсальна, как обычный компьютер. Такие вещи очень неопределенны, но я нашел алгоритм. Если у вас есть программа, написанная для необратимой машины — обычная программа, — тогда я могу преобразовать ее в обратимую машинную программу с помощью схемы прямого преобразования, которая очень неэффективна и использует много больше пошаговых операций. В реальных ситуациях число шагов может оказаться гораздо меньше. Но я по крайней мере знаю, что могу взять программу с $2n$ шагами, которая необратима, и преобразовать ее в обратимую программу с $3n$ шагами. Появилось гораздо больше шагов. Я сделал очень неэффективную программу, поскольку не пытался найти минимум — единственный разумный способ для создания более эффективной программы. Я в самом деле не думаю, что вы нашли регрессию, о которой упомянули, — может быть, вы правы, но я не уверен.

Вопрос: Разве мы не жертвуем многими достоинствами таких устройств — ведь обратимые машины работают достаточно медленно? Я весьма пессимистически настроен на этот счет.

Ответ: Они работают медленнее, но они значительно меньше. Я не делаю их обратимыми, пока мне это не понадобится. Нет смысла делать эти машины обратимыми, если только вы не пытаетесь снизить энергию грандиозно, почти абсурдно, так как необратимые машины хорошо функционируют только при энергиях, в 80 раз превышающих kT . Но 80 — это много меньше современных энергий 10^9

или $10^{10} kT$, и я по крайней мере произведу улучшение по энергии в 10^7 раз, причем смогу это сделать еще с необратимыми машинами! И это факт. Для настоящего момента это верный путь продвигаться вперед. Ради интеллектуального развлечения я задал вопрос, насколько далеко мы можем продвигаться принципиально, не практически, — и тогда я открыл, что можно продвигаться по энергии до долей kT , сделать машины микроскопическими, микроскопическими в смысле атомных размеров. Но для этого я должен использовать обратимые физические законы. Необратимость возникает, если тепло распространяется по большому количеству атомов, и его нельзя собрать обратно. Когда я делаю машину очень маленькой, если только в ней не будет охлаждающего элемента, который будет состоять из множества атомов, — я должен работать обратимо. Практически, возможно, никогда и не наступит время, когда вам захочется привязать маленький компьютер к большому куску свинца, который содержит 10^{10} атомов (это все еще очень мало), сделав его эффективно необратимым. Поэтому я соглашусь с вами, что на практике в течение долгого времени или, возможно, всегда мы будем пользоваться необратимыми схемами. С другой стороны, почему бы не позволить себе небольшое приключение в науке — попытаться найти ограничения на размеры во всех направлениях — и расширить границы человеческого воображения? Хотя на каждом этапе эта деятельность выглядит абсурдной и бесполезной, часто оказывается, что по меньшей мере она не лишена пользы.

Вопрос: Существуют ли какие-нибудь ограничения, связанные с принципом неопределенности? Есть ли фундаментальные ограничения на энергию и шкалу времени в вашей схеме обратимой машины?

Ответ: Моя точка зрения такова. Нет никаких других квантово-механических ограничений. Надо тщательно различать понятия необратимых потерь или расхода энергии, тепловой энергии, генерируемой при работе машины, и энергии движущихся частей, которые можно извлекать из машины. Существует соотношение между временем и энергией, которую можно извлекать. Но именно эта энергия не имеет значения и не важна для рассмотрения. Лучше задать вопрос, добавляем ли мы mc^2 , энергию покоя всех атомов, которые есть в устройстве? Я скажу только о потере энергии, умноженной на время, — на эту величину нет ограничений. Однако верно и то, что если вам надо выполнить вычисления с некоторой экстремально высокой скоростью, то вы должны снабдить машину быстро движущимися частями, обладающими энергией, но эта энергия не связана с потерями на каждом этапе вычислений; она проходит через прибор благодаря инерции.

Ответ (обращаясь ко всем, а не только к автору вопроса): Коль скоро я затронул вопрос о бесполезности идей, мне хотелось бы кое-что добавить. Я ждал, спросите ли вы меня, но вы не задали этот вопрос. И все-таки я отвечу на него. Как построить машину с такими малыми размерами, чтобы нам пришлось разместить атомы на специальных местах? Сегодня у нас нет аппаратуры с движущимися деталями, размеры которых экстремально малы, в мас-

штабах атомов или сотен атомов, но не существует никаких физических ограничений в каждом направлении. Когда мы укладываем кремний даже в сегодняшних условиях, нет причин, почему бы его маленькие кусочки нельзя было разложить в виде маленьких островков, так чтобы они были подвижными. Мы могли бы также разместить маленькие струйки так, чтобы можно было выдавливать различные химикалии в определенных местах. Мы можем сконструировать аппаратуру, которая исключительно мала, такую аппаратуру легко контролировать нашими компьютерными схемами. Разумеется, ради шутки и интеллектуального удовольствия вообразим машины в несколько микрон в поперечнике с колесиками и кабелями, соединенными внутри проводками, кремниевыми соединениями, так что все это вместе — очень большое устройство, движущееся не как неуклюжие тугоподвижные машины, а плавно, как лебединая шея. И вдобавок это устройство представляет целый набор маленьких машин, все кластеры которых взаимно соединены и все мягко контролируются. Почему бы нам самим не сделать этого?

ЛОС-АЛАМОС — ВЗГЛЯД СНИЗУ

А теперь поговорим немного о другом — окунемся в россыпи воспоминаний шутника Фейнмана (даже не упоминая о взломе сейфов), о его приключениях и злоключениях в Лос-Аламосе: о получении отдельной комнаты с помощью нарушения непреложного правила: «Никаких женщин на мужской половине общежития»; о его хитроумных проделках с местными цензорами; о его общении с великими учеными — Робертом Оппенгеймером, Нильсом Бором и Гансом Бете; и о необычайной популярности единственного человека, непосредственно наблюдавшего взрыв первой атомной бомбы без защитных очков; о приобретенном неоднозначном опыте, который навсегда изменил Фейнмана.

Лестное введение профессора Хирчфелдера совершенно не соответствует моему рассказу «Лос-Аламос — взгляд снизу». «Взгляд снизу» означает именно то, что означает — хотя в настоящее время я относительно известен, в те годы никто и не помышлял о моем существовании. Когда я начал работать над Манхэттенским проектом¹, я даже не закон-

¹ Название, данное колоссальному проекту по созданию атомной бомбы, который начался в 1942 году и достиг кульминации при бомбежке Хиросимы и Нагасаки

чил свою докторскую диссертацию. Многие из тех, кто рассказывает вам о Лос-Аламосе, были знакомы с кем-нибудь из высших эшелонов власти или знали что-то о людях, принимающих судьбоносные решения. Меня не волновали великие решения. Я всегда барахтался где-то внизу. Правда, я не был на абсолютном дне. Как оказалось, я даже отчасти продвинул несколько исследовательских этапов, но я не был большим человеком. Итак, я хочу рассказать вам о нескольких иных обстоятельствах — не тех, о которых говорилось во введении; представьте себе юного аспиранта, который еще не получил степени и работает над диссертацией. Сначала я расскажу, как я попал в проект, а потом — что со мной происходило, — только то, что происходило со мной во время работы в проекте.

Как-то раз работаю я в своей комнате¹, и вдруг ко мне вбегает Боб Уилсон². Я работал как черт, но при этом был известный шутник — над чем вы смеетесь? — так вот, Боб Уилсон заглянул и сказал, что ему предложили участвовать в некоторой работе, которая, кстати, хорошо финансировалась, что это секрет, но он думает, что я никому не проговорюсь,

соответственно 6 и 9 августа 1945 года. Проект охватывал все Соединенные Штаты, с отделениями, например, в университетах Чикаго, Хэнфорда, Вашингтона; в Ок-Ридже, Теннесси. Лос-Аламос в штате Нью-Мексико, где бомба была изготовлена, являлся, по существу, штаб-квартирой всего проекта. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

¹ В Принстонском университете. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

² Роберт Уилсон (1914–2000), первый директор Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми, 1967–1978. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

а рассказывает мне об этом потому, что уверен, что как только я узнаю, чем он собирается заниматься, то непременно захочу к нему присоединиться. И он обрисовал мне задачу разделения различных изотопов урана. В конечном счете, как я понял, он должен был заниматься бомбой. Он собирался разработать процесс разделения изотопов урана. Правда, как оказалось в процессе дальнейшей работы, для разделения изотопов использовали другую методику. Все это он мне объяснил и сказал, что встреча состоится... Но я ответил, что не хочу этим заниматься. Он сказал, ладно, но встреча назначена на три часа, и там мы увидимся. Я тоже сказал, ладно, и он растолковал мне, почему я никому не должен проболтаться о секрете — но я и не собирался болтать. Итак, я вернулся к своей работе над диссертацией, высидел над ней примерно три минуты. И начал вышагивать из угла в угол и размышлять над этой задачей. У Германии был Гитлер и очевидная вероятность разработать атомную бомбу, разработать ее раньше нас — такая перспектива устрашала. Короче говоря, я решил сходить в три часа на встречу. А к четырем часам я уже обзавелся рабочим столом в кабинете и пытался вычислить, ограничен ли данный конкретный метод полным током, который можно получить в ионном пучке и прочими вещами. Не буду вдаваться в детали. У меня был рабочий стол, бумаги, я работал так энергично и быстро, как только мог. Справа от меня парни собирали аппаратуру, планируя соответствующие эксперименты. Все это напоминало кинофильм, в котором вы видите куски оборудования, изрыгающие бру-у-уп,

бру-у-уп... Ежеминутно их чудо-установка становилась все больше и больше. Кончилось тем, что все ребята решили поработать на ней и приостановили свою исследовательскую работу. Во время войны вся наука остановилась, за исключением небольшой ее части в Лос-Аламосе. Там было тоже не так много науки, скорее много инженерии. Они беззастенчиво крали оборудование у ученых-исследователей, и все оборудование из различных исследовательских групп было свезено вместе для конструирования новой аппаратуры, необходимой для основного эксперимента, — попытаться разделить изотопы урана. Я приостановил свою работу по той же причине. Через некоторое время мне пришлось взять шестимесячный отпуск и закончить диссертацию. Итак, я получил степень перед самым отъездом в Лос-Аламос и уже пребывал не на самой низкой ступени, как уверял вас до этого.

Здесь, работая в проекте еще в Принстоне, я получил свой первый опыт общения с великими учеными. Я никогда раньше не видел так много великих людей. Там существовал координационный совет, который был призван направлять нас, оказывать нам всяческое содействие и, разумеется, помочь нам найти способ разделения изотопов урана. В совет входили знаменитые ученые — Толмен и Смит, Юри, Раби и Оппенгеймер, и многие другие. Входил в совет, например, Комптон. Меня повергала в жуткий шок та неразбериха, которая царила на заседаниях совета. Я с удовольствием там присутствовал, поскольку понимал теорию процесса, который мы разрабатывали. Поэтому они задавали мне вопро-

сы, и затем мы вместе все это обсуждали. Кто-нибудь высказывал свою точку зрения, и после этого, например Комптон, высказывал другую точку зрения, казалось бы, он был совершенно прав, и идея выглядела разумно — в заключение он заявлял, что мы должны двигаться в таком-то направлении. Другой ученый непременно очень толково возражал, что, может быть, есть другая возможность, которую нам следует рассмотреть. Другая возможность, которую нужно рассмотреть, — я просто подскакиваю! Ему, Комптону, приходится отстаивать свою точку зрения заново! Итак, все противоречили друг другу, и вся картина за столом полностью повторялась! Наконец Толмен, который председательствует на этот раз, подводит итог: хорошо, мы слышали все аргументы, мне кажется, что аргументация Комптона наиболее убедительна, а теперь нам надо двигаться вперед. Я был совершенно потрясен — совет состоял из ученых, которые могли бы вместе высказать целый ворох блестящих идей, а вместо этого каждый по отдельности рассуждал о новоиспеченном аспекте задачи, вспоминал, что говорили другие, сосредотачивался на этом. И под конец совет принимал решение, чья идея лучше, суммировал ее со всеми остальными без должного троекратного обсуждения. Вы понимаете, что я хочу сказать? Для меня это казалось невероятным — ведь они были в самом деле великими людьми!

На проекте было окончательно решено отказаться от того способа разделения урана, который предполагался первоначально. Нам было приказано остановиться и начать работу в Лос-Аламосе,

Нью-Мексико, уже над проектом, в котором действительно будут делать бомбу. Все должны перебраться туда. Там будут проводиться необходимые эксперименты, будет и теоретическая работа. Я должен был заниматься теоретической работой, остальные ребята — экспериментальной. Мы теряли время, так как образовался вынужденный простой — нам было велено переезжать, а Лос-Аламос еще не был готов нас принять. Боб Уилсон не стал терять времени даром и послал меня в Чикаго выудить в университете все, что смогу, о бомбе и сопутствующих задачах, так что мы смогли начать собирать оборудование еще в нашей лаборатории — всяческие счетчики и прочие штуковины. Это оказалось полезным, когда мы перебрались в Лос-Аламос. Итак, нельзя было терять времени. Меня послали в Чикаго с инструкцией побывать в каждой группе, говорить, что я хотел бы устроиться к ним на работу, заставить их рассказывать о своей задаче в таком объеме, в котором я смогу понять детали. Так я действительно мог сесть и начать работать над задачей — постепенно перебираясь от одной группы к другой, я задавал свои вопросы по поводу задачи — и таким образом мог понять подробности целого. Идея была отличная, хотя меня немного мучила совесть. Но случайно так получилось (просто повезло!), что, когда один малый излагал мне задачу, я спросил, почему он думает решать ее таким-то способом, и за полчаса получил ее решение, а они бились над ней три месяца. Итак, я все-таки что-то сделал! По возвращении из Чикаго я описал ситуацию своим коллегам — сколько энергии высвобо-

ждается, на что должна быть похожа бомба и прочие детали. Помню, как мой друг, Поль Олум, математик, работающий со мной, потом подошел ко мне и сказал: «Когда об этом сделают кинофильм, они покажут парня, возвратившегося из Чикаго и рассказавшего Принстону все о бомбе, а он вырядится в костюм, будет носить портфель и прочие атрибуты — а тут ты, без пиджака, с грязными рукавами — и рассказываешь нам обо всем этом». Так или иначе, дело было серьезное — и он прекрасно понимал разницу между кино и реальностью.

Мы все еще задерживались, и Уилсон поехал в Лос-Аламос выяснять, почему мы застряли и есть ли какие-нибудь продвижения. Он обнаружил там, что строительная компания работает очень здорово и уже закончила строительство театра и нескольких других зданий. Но они не получили четких инструкций по поводу того, как возводить лаборатории — сколько труб необходимо для газа, сколько для воды, так что Уилсон просто ходил вокруг, прикидывал, какой будет объем воды, газа и тому подобное, и рассказывал им, как строить лаборатории. Он возвратился к нам — а мы уже были готовы к переезду, — но, видите ли, у Оппенгеймера возникли некоторые затруднения при обсуждении ряда проблем с Гровсом. Мы уже изнывали от нетерпения. Насколько я понимал положение, Уилсон позвонил в Чикаго Манли, они посоветовались и решили, что мы все-таки отправимся туда, даже если там не все готово. Итак, все мы приехали в Лос-Аламос, когда строительство еще не было завершено. Между прочим, Оппенгеймер был очень терпе-

лив со всеми, очень внимателен к проблемам каждого. Он беспокоился о моей жене, у которой был туберкулез, выяснял, есть ли здесь где-нибудь больница и многое другое — я впервые познакомился с ним лично — и он оказался удивительным человеком. Среди прочего нам рассказывали и о других вещах, например о том, что следует быть осмотрительными. Не покупать билеты на поезд в Принстоне. Потому что Принстон был очень маленькой железнодорожной станцией. И если все купят билеты до Альбукерке, Нью-Мексико, возникнут подозрения, что здесь что-то не так. И поэтому все купили билеты где-то еще, все, кроме меня — я же посчитал, что если все купили билеты где-то еще... Короче говоря, когда я пришел на станцию и сказал, что мне нужен билет до Альбукерке, Нью-Мексико, железнодорожник воскликнул: «О! Наконец-то! Значит, весь этот груз ваш!» Мы неделями отправляли ящики со счетчиками и думали, что никто не заметит адреса — Альбукерке. Хорошо хоть, что по крайней мере я объяснил ему, почему мы отправляли туда ящики — я собираюсь перебраться на жительство в Альбукерке.

И все-таки приехали мы туда раньше времени, дома для общежитий и прочих нужд еще не были готовы. Лаборатории тоже были не совсем готовы. Мы давили на строителей, подгоняли, ругали, что теряем время. Они арендовали для нас все ранчо в округе. Мы разместились на этих ранчо и ездили по утрам на работу. В первое же утро поездки произвела на меня грандиозное впечатление — красота пейзажа для жителя восточных штатов, который

почти никогда не путешествовал, была завораживающей. Огромные утесы, которые вы, вероятно, видели на картинках, я не буду вдаваться в детали. Они очень высоки на фоне плоских холмов, вы подходите к ним снизу и видите величественные утесы — поразительное зрелище. А наиболее впечатляющим для меня было то, что когда я поднимался, то говорил себе, что, может быть, здесь живут индейцы; шофер внезапно притормаживал, машина останавливалась, и я шел за угол, а там громоздились индейские пещеры, которые вы можете исследовать. Это в самом деле производило огромное впечатление во всех отношениях.

Когда я впервые прибыл на место, я очутился у ворот — понимаете, это была специальная техническая территория, которую в конце концов должны были обнести забором, но поскольку здания не были достроены, она была пока открыта. Потом здесь предполагалось создать город и окружить его *большим* забором — мой друг и ассистент Поль Олум стоял с планшетом, проверяя въезжающие и выезжающие грузовики, и разъяснял им, каким путем надо ехать, чтобы доставлять материалы в разные места. Когда я пришел в лабораторию, то познакомился с людьми, о которых слышал, читая их статьи в *Physical Review* и других журналах, но никогда не был знаком с ними раньше. Мне сказали — это Джон Уильямс. Парень стоял у письменного стола, заваленного светокопиями чертежей, рукава его рубашки были закатаны, он стоял у окон лицом к одному из зданий и отдавал распоряжения грузовикам и другому транспорту двигаться в разных направле-

ниях. Иначе говоря, он принял на себя руководство строительной компанией и заканчивал ее работу. Физикам, особенно экспериментаторам, поначалу делать было совершенно нечего, пока не было достроено их здание и не готова аппаратура, поэтому они сами строили или ассистировали строителям. Теоретики же решили, что не будут жить на ранчо, а останутся на рабочих местах, чтобы немедленно приступить к работе. Поэтому мы приступили к работе сразу же, каждому предназначалась черная роликовая доска на колесиках, которая могла поворачиваться, — мы тут же начали ее крутить. Сербер нам разъяснил все вопросы, связанные с атомной бомбой, ядерной физикой и прочими деталями, которые они продумали в Беркли, — я не слишком много знал об этом. Я занимался другими задачами. Мне предстояло проделать ужасно много работы. Каждый день я должен был что-то изучать и читать и снова читать и изучать — это было лихорадочное время. Мне немного повезло. У всех важные догадки возникали в некотором смысле случайно, и только Ганс Бете, бывало, смаковал их в течение некоторого времени. Так, Вайскопф возвращался мысленно назад, чтобы зафиксировать какую-нибудь идею, Теллер внезапно, в какой-то момент, погружался в свои мысли, а Бете необходим был возражающий ему собеседник. Он приходил в нашу комнату к молодому нахалу, то есть ко мне, и начинал спорить, объясняя свою идею. Я говорил: «Нет-нет, вы с ума сошли, это должно быть так». А он отвечал: «Одну минуту!» — и объяснял, что он не сошел с ума, а это я сошел с ума, и мы продолжали в том же духе. Дело в том,

что, когда я говорю о физике, я думаю только о физике, и мне не важно, с кем я разговариваю, я выкладываю все, как есть, вроде: нет, вы не правы или вы сошли с ума — но именно это ему и было нужно! Итак, это была моя маленькая победа, очко в мою пользу — я вышел в лидеры группы из четырех парней, которые были в подчинении у Бете.

У меня было множество интересных впечатлений от общения с Бете. В первый раз, когда он пришел, у нас стояла счетная машинка «Маршан», на которой надо было работать вручную. А он и говорит: «Давайте посмотрим, давление...» Формула, которую он получал, содержала квадрат давления. «Давление равно 48, квадрат 48...» Я бросился к машинке, а он заявляет, что это около 23 сотен. Я включаю машинку, чтобы провести вычисления. Он говорит: «Вы хотите знать точно? Это 2304». Так и получилось — 2304. Я спрашиваю: «Как вы это получили?» А он отвечает: «Разве вы не знаете, как вычислять квадраты чисел вблизи 50? Если число близко к 50, например, 47, говоришь 3 ($50 - 47 = 3$), далее 3 дает число ниже 25 ($25 - 3 = 22$), например 47 в квадрате 22... То, сколько остается добавить к 22... — это квадрат вашего остатка ($25 - 22 = 3$). Например с числом 3 в квадрате вы получаете 9, значит, результат для 47 в квадрате — 2209. Правда, замечательно?» Он был очень силен в арифметике! Мы тут же продолжили вычисления и через несколько минут извлекали корень кубический из $21\frac{1}{2}$. Тогда для вычисления кубических корней существовала маленькая таблица для пользователя, которая содержала выборочные числа, которые вы

запускали на счетные машинки, предоставленные нам компанией «Маршан». Итак (я подумал, что это займет у него немного больше времени), я открыл выдвижной ящик стола, вытащил таблицу, и он сказал «1,35». Я вычислил несколькими способами корни кубические из чисел вблизи $21/2$, но ответ оказался неправильным. Я спросил: «Как вы это делаете?» Он отвечает: «Ну, вы же видите, что логарифм от 2,5 есть столько-то. Вы делите на 3, чтобы получить кубический корень от этого столько-то. Теперь логарифм от 1,3 равен... логарифм от 1,4 равен... я провожу интерполяцию между этими числами». Да, у него существовал запас арифметических трюков, и он здорово ими пользовался — для меня это был вызов. Я продолжал практиковаться. Обычно между нами возникала небольшая конкуренция. Каждый раз, когда нам нужно было что-нибудь вычислить, мы бросались за ответом, и он, и я, — и я мог даже выиграть. Через несколько лет я здорово научился проделывать расчеты. Я научился наносить удар одним махом, может быть, единственный из нас четверых. Безусловно, в игре с числами кроется много забавного — например перемножить числа 174 на 140. Вы замечаете, что числа 173 и 141 похожи на квадратный корень из 3 и квадратный корень из 2, а их произведение — на квадратный корень из 6, на число 245. Но обратите внимание на числа, каждый заметит разницу — и все мы веселимся!

Когда мы впервые приехали туда, как я уже говорил, общежития не были готовы, и теоретики решили оставаться на месте. Первым нашим жильем

было старое школьное здание, оставшееся от помещавшейся здесь прежде мужской школы. Сначала я жил в кабинете механики в страшной тесноте, мы едва втискивались на двухъярусные кровати; оказалось, что там все организовано кое-как — ни к черту! — и Боб Кристи с женой должны были каждое утро проходить в ванную через нашу спальню. Все было крайне неудобно.

Следующим местом, куда нас переселили, было здание, называемое Большим домом. Там с внешней стороны второго этажа вокруг здания тянулось патио, на котором вдоль стены одна за другой стояли койки. Внизу висела большая схема, где было указано, какая кровать ваша и в какой ванной комнате вы можете переодеться. Под моей фамилией стояло «ванная комната С» и никакого номера кровати! В результате я был весьма раздражен. Наконец построили общежитие. Я иду в общежитие получать отведенные нам комнаты, и мне говорят: «Да, теперь комнату можно занимать». И вот что я сделал — огляделся, увидел женское общежитие и занял одну из комнат напротив. Позже я обнаружил, что прямо перед ней растет огромное дерево. Так или иначе, я занял эту комнату. Мне сказали, что в комнате будут жить по два человека, но это только временно. На две комнаты предназначалась одна ванная. Там стояли двухъярусные кровати, откидные койки, но я не хотел жить с кем-то в комнате. Когда я впервые там оказался, никто в первый вечер ко мне не вселился. Моя жена была больна, у нее был туберкулез, и она лежала в больнице в Альбукерке, а у меня было несколько сумок

с ее мелочами. Я открыл одну сумку и беспорядочно разбросал немного ее белья. Потом снял покрывало и небрежно бросил ее халатик на постель. Затем вытащил тапочки, просыпал немного пудры на пол в ванной — сделал все так, словно здесь живет кто-то еще. Если другая кровать занята, никто сюда не сунется, понимаете? Как вы думаете, что же произошло? Ведь это было мужское общежитие. Когда я вернулся вечером, моя пижама была аккуратно сложена и лежала под подушкой, тапочки аккуратно поставлены под кровать. Пижама дамы тоже была аккуратно сложена и положена под подушку, кровать заправлена, тапочки аккуратно задвинуты. Пудра из ванной исчезла, и никто не спал на другой кровати. Все-таки я занял свою собственную комнату! Следующим вечером — то же самое. Когда я просыпался, я оставлял постель в беспорядке, бросал на нее халатик, рассыпал пудру в ванной, и так продолжалось четыре дня, пока все не устроилось. Все устроилось, и больше не нужно было опасаться, что к тебе в комнату поделят другого человека. Каждый вечер все было опрятно, аккуратно и хорошо, несмотря на то что это было мужское общежитие. Но вот что случилось дальше.

Я некоторым образом был вовлечен в политику, так как у нас существовал Муниципальный совет. Это было нечто вроде военного органа, где военные решают, каким образом будет функционировать город, с помощью какого управления, — я никогда ничего об этом не знал. В любой организации, связанной с политикой, существуют такого рода стимулы. В частности, существуют фракции: фракция

домохозяйек, фракция машиностроителей, фракция технического персонала и сколько угодно еще. Холостяки и одинокие девушки — те, что жили в общежитии, — уже чувствовали необходимость создания фракций, поскольку было провозглашено новое правило, например никаких женщин в мужском общежитии. Это абсолютно смехотворно. Наконец здесь все взрослые люди (ха-ха-ха!). Что за чушь? Конечно, мы должны были провести политическую акцию. Мы решали и обсуждали эту чепуху — как пить дать! И меня выбрали представителем от общежития в Муниципальный совет. Отработав в совете в течение года-полтора, я как-то обсуждал некоторые проблемы с Гансом Бете. Все это время он состоял в Административном совете. И я рассказал ему историю, как проделал эту хитрость с вещами жены, и он рассмеялся. Он сказал: «Ба! Вот как вы преуспели в Муниципальном совете!» А когда все выяснилось, произошло следующее. Оказывается, был сигнал, очень серьезный сигнал. Работница, которая убирала комнату в общежитии, просто задрожала, когда открыла дверь, и все внезапно обнаружилось — какая-то женщина спит с одним из парней! Потрясенная, она не знала, что делать. Она обо всем сообщила — уборщица сообщила главной уборщице, а та сообщила лейтенанту, лейтенант сообщил майору, это должно было дальше дойти до генералов в административном правлении — но что им следует предпринять? — и они продолжали над этим думать! Между тем инструкции опускались все ниже и ниже — от командира до майора, до лейтенанта, до старшей уборщицы и наконец до моей

уборщицы. «Пусть все идет своим чередом, убирайте комнату, посмотрим, что будет. Ясно?» На следующий день рапорт — все то же самое, трам, та-ра-рам! Тем временем прошло четыре дня, и они забеспокоились, что же там творится. И в конце концов провозгласили правило: «Никаких женщин в мужском общежитии!» Это привело к жуткому скандалу и шумихе — они хотели проталкивать все управленческие махинации и выбирать людей для представительства...

Теперь я хотел бы рассказать вам о введенной у нас цензуре. Они решили сделать нечто совершенно противозаконное — подвергать цензуре почту внутри страны, внутри континентальной части Соединенных Штатов, на что они не имели права. Как всякое умышленное действие, оно должно было проводиться деликатно. Мы все должны были добровольно-принудительно не запечатывать конверты с посылаемыми письмами. Кроме того, нам приходилось соглашаться, что вскрывались все письма, которые мы получали, — на то с нас брали тоже добровольно-принудительное согласие. Мы оставляли отправляемые письма открытыми, цензоры их запечатывали, если в них все было в порядке. Если же, по их мнению, не все было в порядке, то есть они обнаруживали что-то, о чем мы не должны писать, письмо отдавали обратно с пометками, что нарушен такой-то и такой-то параграф нашего «соглашения» и тому подобные «аргументы». В конечном счете мы все оказались в западне у цензуры — все мы, либерально мыслящие ученые парни, согласив-

шиеся на их весьма вежливое предложение. Существовало множество правил, в соответствии с которыми нам разрешалось при желании высказываться о характере управления делами. Мы могли бы написать нашему сенатору и рассказать ему, что нам не нравится такое положение дел. Но все устроилось, и нам сказали, что каждого будут уведомлять, если возникнут сложности.

Итак, начался день, первый день цензуры. Телефон! Дзинь! «Что?» — «Пожалуйста, спуститесь вниз». Я спустился. «В чем дело?» Это письмо от моего отца. «Что там?» Линованная бумага, линии переходят в точки — четыре точки внизу, одна наверху, две внизу, одна наверху, точка под точкой. «Что это?» Я отвечаю: «Это шифр». Они говорят: «Да, это шифр. Но что он означает?» Я им сообщаю: «Не знаю, что он означает». А они допытываются: «Как же так, где ключ к этому шифру, как вы его дешифруете?» Я отвечаю: «Да я не знаю!» Они вцепляются снова: «А это что?» — «Это письмо от моей жены». — «Там написано TJXYWZ TWIX3. Что это?» Я говорю: «Это другой шифр». — «Где ключ к нему?» — «Понятия не имею!» Они говорят: «Вы рассылаете шифры и не знаете к ним ключей?» «Точно», — отвечаю я. «Это просто игра. Я прошу их посылать мне шифровку, которую я не мог бы расшифровать, понимаете? Поэтому они со своей стороны выдумывают коды и не собираются мне рассказывать о ключе — так и посылают письма». Одно из правил цензуры состояло в том, чтобы не влезать в то, с чем вы сталкиваетесь в почте повседневно. Они и говорят: «Пожалуйста, скажите

им, чтобы вместе с шифром они присылали ключ». Я притворяюсь серьезным: «Да не хочу я знать ключ!» Их осеняет: «Ладно, так и быть, мы сами будем выбрасывать ключ». Итак, мы заключили соглашение. Пойдет? Пойдет! На следующий день я получаю письмо от жены, в котором говорится: «Очень трудно писать, так как некто невидимый заглядывает тебе через плечо». И на видном месте красовалось большое неровное пятно, очень мило замазанное средством для выведения чернильных пятен. Я спустился в бюро и сказал: «Вы говорили, что не будете трогать входящие письма; если они вам не нравятся, вы могли бы мне сказать и ничего с ним не делать. Только посмотрите на него — это называется, вы ничего не собирались с ним делать!» «Это смехотворно! Неужели вы думаете, цензоры работают так топорно со средством для выведения чернил? Они просто вырезают подозрительные куски ножницами». Ладно! Я написал жене письмо и спросил: «Пользовалась ли ты в письмах средством для выведения чернил?» Она мне отвечает: «Нет, я никогда таким средством не пользовалась, это должно быть — — — —», и в письме вырезана дыра. Я снова спускаюсь к парням из цензуры, иду к главному, ответственному за все это, и жалуюсь. Так продолжается несколько дней. Я чувствовал, что все образуется. Главный пытался объяснить мне, что цензоров учили, как и что делать, но они не могли осилить этого нового способа, так что мы должны быть очень деликатными. У меня, с моим большим опытом надувательства, хватило нахальства писать жене письма каждый день. А главный

говорил: «В чем, собственно, дело, вы что, не верите в мою честность и в добрые намерения?» Я отвечаю: «Да, у вас очень хорошие намерения, но я не думаю, что у вас достаточно полномочий». «Дело» тянулось еще три-четыре дня. Потом он сказал: «Увидим, что будет!» Он схватил телефон... и все уладилось. И больше не было писем с прорезанными дырами.

Однако количество сложностей возрастало. Например, однажды я получил письмо от жены и пометку от цензора, в которой говорилось, что шифр раскрыт без ключа и что они сменили его. Когда я пришел навестить жену в больницу в Альбукерке, она спрашивает: «Где весь этот хлам?» Я настораживаюсь: «Какой хлам?» Она отвечает: «Окись свинца, глицерин, хот-доги, белье из стирки». Я сказал: «Подожди минутку, это был список?» Она говорит, да. «Это был шифр». Они думали, что это был шифр — окись свинца, глицерин и тому подобное. Тогда однажды я и сам подкинул шифр — это продолжалось первых несколько недель перед тем, как все уладилось, — я забавлялся с вычислительной машинкой и обратил внимание на одно забавное обстоятельство. Каждый день мне приходилось записывать массу необходимых вещей, и я заметил, что цифры выглядят очень своеобразно. Если вы делите единицу на 243, то получается 0,004115226337. Здесь видна забавная закономерность, но она слегка скособочивается, когда вы берете подряд три цифры; можно проследить закономерность между числом 101 013 и 114 или снова 115; так, перебирая числа, я объяснил, как здорово они повторяются по-

сле пары циклов. Я подумал, что это был способ сбить цензоров с толку. Я взял да и положил это в почтовый конверт. И конверт вернулся ко мне, письмо не пропустили и снабдили маленькой пометкой «Смотрите параграф 17В». Я посмотрел параграф 17В. Он гласил: «Письма должны быть написаны только по-английски, по-русски, по-испански, по-португальски, на латыни, по-немецки и тому подобное. Для использования другого языка требуется письменное разрешение». И в конце приписка: «Никаких шифров». Я возвратил цензору свое письмо с пометкой, что это не может быть шифром, поскольку если вы делите 1 на 243, то получаете то-то, и я записал все это и сообщил, что числа 1—1—1—1—0—0—0 не несут никакой другой информации, а число 243 вряд ли содержит какую-либо информацию, кроме значения самого числа. И прочее и прочее. И потому я прошу разрешения написать мое письмо арабскими цифрами. Мне нравится использовать в письмах арабские цифры. И письмо пропустили!

Всегда существовали некоторые трудности с отправкой и получением писем. Моя жена испытывала дискомфорт, оттого что за спиной у нее маячил цензор. Как правило, мы не упоминали о цензуре — но как ей можно сообщить об этом? Они присылали мне пометки: «Ваша жена упомянула о цензуре». Естественно, моя жена упоминала о цензуре, и в конце концов они прислали мне замечание: «Пожалуйста, проинформируйте свою жену, чтобы она не упоминала в своих письмах о цензуре». Я так и начал очередное письмо: «Меня проинструктиро-

вали уведомить тебя не упоминать о цензуре в своих письмах». Бум — и письмо возвращается обратно ко мне! Я опять пишу: «Меня проинструктировали, чтобы она не упоминала в своих письмах о цензуре. Каким образом, черт возьми, я должен сделать это? Кроме того, почему ей нельзя упоминать о цензуре? Вы что-то имеете против меня?» Очень интересно, что, выходит, сам цензор должен был сказать мне, чтобы я сказал своей жене не говорить мне, что она... У них, и правда, был ответ. Оказывается, они беспокоились, что почту могут перехватить по пути из Альбукерке. Если бы кто-то вскрыл письмо и обнаружил, что существует цензура, у них могли возникнуть неприятности. Когда в следующий раз я поехал в Альбукерке, я рассказал жене всю эту историю: «Теперь смотри, не упоминай про цензуру», — но у нас было столько совместных волнений и тревог, что мы наконец выработали шифр. Если я ставил точку в конце моей росписи, это означало, что у меня опять неприятности, а она использовала другие уловки, которые сама и сочиняла. Она могла сидеть целыми днями, поскольку была больна, и думать о подобных вещах. В последнем изобретении, которое она мне послала и которое находила совершенно законным, содержались инструкции: «Пошли своему другу письмо по составлению картинок-загадок. Здесь есть бланки. Мы продадим тебе бланк. Ты напишешь на нем письмо, разорвешь его на части, сложишь обрывки в маленькую сумочку и отошлешь по почте». Я получил это письмо с пометкой цензора: «У нас нет времени играть в игры. Пожалуйста, проинструктируйте жену, что-

бы она писала стандартные письма!» Ну ладно, мы готовы были на еще одну точку. Письмо начиналось словами: «Надеюсь, ты помнишь, что это письмо надо открывать осторожно, так как я послала пепто-бисмол для желудка, как ты просил». В письме было полно пудры. Мы ожидали, что они быстро вскроют его в своем офисе, пудра рассыплется по полу, они расстроятся — хотя трудно представить, чтобы их могло что-то расстроить — и станут собирать весь этот пепто-бисмол... Но нам не пришлось воспользоваться этим шансом. В результате всех этих опытов с цензорами я точно знал, что они могут пропустить, а что — нет. Никто не знал этого лучше меня. Я даже заработал на этом немного денег, заключая пари.

Однажды я обнаружил, что рабочим, которые жили довольно далеко и хотели пройти на территорию, лень было обходить территорию и входить в ворота, и они проделали в стороне от входа дырку в заборе. Я тут же обошел забор, пролез в дырку и вошел, снова вышел, пролез в дырку — и так несколько раз, пока сержант у ворот не начал удивляться, почему этот малый всегда выходит из ворот и никогда не входит? И конечно, его естественной реакцией было позвать лейтенанта и упечь меня в тюрьму. Я объяснил, что там была дырка. Понимаете, я всегда старался разобраться в путанице, указав, где была дырка. Итак, я заключил с кем-то пари, что я могу рассказать в письме, где в заборе дырка, а письмо отослать. И действительно, я это сделал. А сделал я это следующим образом. Я написал: «Вы должны видеть то место, откуда они управ-

ляют нами». Так писать позволялось. «В заборе есть дыра на расстоянии 71 фута от такого-то места, таких-то размеров, и вы можете проникнуть сквозь нее». Что они могли сделать? Они не могли мне сказать, что такой дыры не существует. Так я прорвался с этим письмом. Я также прорвался с письмом, в котором рассказал, как одного парня из моей группы разбудили посреди ночи какие-то идиоты из военных, которые ослепили его лампами и начали допрашивать; они, видите ли, выкопали какую-то информацию о его отце или что-то в этом роде. Я точно не знаю, что именно, но они думали, что он коммунист. Его фамилия Кейман. Сейчас он очень известный человек.

Что ж, были и другие вещи. В любом деле я стремился найти слабые места, это относится и к дырке в заборе, но я всегда стремился указать на них в индизнавательной манере. Так, был еще один момент, на котором мне хотелось заострить внимание, — с самого начала все работы были полностью засекречены. Мы владели важнейшими секретами — разрабатывали массу всяких материалов об уране, его свойствах, и все эти материалы были задокументированы и хранились в специальных деревянных шкафчиках для документов, их запирали на маленькие стандартные замки, каких полно в магазинах. В шкафчиках хранилось все, вплоть до стержней, изготовленных в наших мастерских, и даже они были заперты на ключ — все было под замком. Самое забавное, что любой мог получить материалы из шкафчиков, даже не открывая замка, — стоило только наклонить его. Выдвижное днище опи-

ралось на маленький брусок, который, как считалось, его поддерживает, но в дне существовало отверстие, и достаточно было потянуть бумаги вниз, чтобы вытянуть их из шкафчика. Я обычно снимал замки и всем рассказывал, как это просто. Мы регулярно проводили собрания группы, и каждый раз я вставал и говорил, что мы совершенно не умеем хранить свои секреты. Замки слишком примитивны. В один прекрасный день Теллер устроил собрание и спросил меня: «Самые важные секретные документы я храню не в шкафах, а в ящике письменного стола. Как вы думаете, это лучше?» Я ответил: «Не знаю, я не видел ящика вашего стола». Он сидел перед собравшимися, а я далеко в конце. Собрание продолжалось, а я незаметно ретировался и пошел посмотреть ящик его стола. Оказалось, что, если просунуть руку под заднюю часть ящика, можно вытянуть документ, как из рулона туалетной бумаги; вытаскиваете один, еще один и еще... Я выпотрошил весь этот чертов ящик, собрал все бумаги и отложил их в сторону, потом поднялся на этаж и вернулся на собрание. Собрание заканчивалось, все выходили из аудитории, я присоединился к уходящим, смешался с толпой, прошагал немного, потом бросился искать Теллера и смиренно сказал ему: «А кстати, можно мне взглянуть на ваш ящик письменного стола?» Он, естественно, ответил: «Ну конечно!» И мы пошли в его комнату, он указал мне на стол, я взглянул на него и промямлил, что выглядит он просто замечательно, и попросил: «Давайте посмотрим, что в нем хранится». «Пожалуйста, — проговорил он, засунул ключ в за-

мок и открыл ящик, — если только вы уже не просмотрели его содержимое». Такой исключительно умный человек, как мистер Теллер, в одну секунду вычислил, что над ним подшутили — он увидел, что что-то не так, и отчетливо понял, что произошло. Проклятие — недолго я наслаждался своей проделкой!

Я получил массу удовольствия, вскрывая сейфы, но их еще не было в Лос-Аламосе, и сейчас я хотел бы поговорить о другом. Я хочу рассказать о некоторых специфических проблемах, с которыми я близко столкнулся. Одна из них связана с безопасностью завода в Ок-Ридже. В Лос-Аламосе продолжали работу над бомбой, а в Ок-Ридже пытались разделить изотопы урана, урана-238, —236 и —235, именно последний использовался в качестве взрывчатки. В Ок-Ридже тогда только начали получать крошечное количество экспериментального материала, урана-235, и в то же время занимались практической работой. На большом заводе хранились целые цистерны материалов и химикатов, там материалы очищали, очищали еще раз и получали вещества, необходимые для следующего этапа. Очистка проводилась в несколько этапов. С одной стороны, на практике они применяли химические вещества, а с другой стороны, получали некоторое количество требуемого продукта в экспериментальной установке. И они пытались понять, как оценивать и анализировать его присутствие и определять, сколько в нем содержится урана-235. Мы посылали им инструкции, но, видимо, они неправильно ими пользовались. В конце кон-

цов Сегре¹ сказал, что должен поехать туда и разобраться, что они там делают и почему их оценка неверна, — это единственная возможность понять, как они работают. Военные сказали: нет, это наша политика — хранить всю информацию о Лос-Аламосе в одном месте, и никто в Ок-Ридже не должен знать, для чего используются их результаты. Подозреваю, что даже их руководство знало лишь то, что они занимаются разделением урана, но при этом не имело ни малейшего представления о мощности бомбы, о том, как она работает, и других принципиальных вещах. А люди внизу не ведали, чем занимаются. И военные хотели сохранить все, как есть; никакой информации не просачивалось ни туда, ни обратно, но Сегре все-таки настоял на своем и добился разрешения приехать туда, поскольку это было очень важно. Они совершенно не умели оценивать объем полученного вещества, и весь завод мог взлететь на воздух.

Итак, Сегре поехал разбираться, что там творится. Он прошелся по цехам и увидел, как люди катают оплетенную цистерну с водой, зеленой водой; зеленая вода — это нитрат урана. Он спрашивает: «Вы собираетесь так делать даже когда там все очистят?» Они отвечают: «Да, почему бы нет? Она что, взорвется?» Он выдохнул: «О Боже! Взорвется?!» И тогда военные отчеканили: «Ничего не знаем, нам запрещено разглашать любую инфор-

¹ Эмилио Сегре (1905–1989), лауреат Нобелевской премии 1959 года за открытие антипротона (совместно с Оуэном Чемберленом).

мацию!» Да оказывается, военные вообразили, что знают, сколько вещества нам необходимо для бомбы — 20 килограммов или сколько там, и как бы много материалов ни очищалось на заводе, сколько бы их там ни было — не возникнет никакой опасности. Но они не понимали, что нейтроны в избытке более эффективны, когда они замедляются в воде. И если в воде их наберется меньше десятой доли, даже сотой... да что там — куда меньшее количество материала приводит к реакции, создающей радиоактивность. Взрыв был бы небольшой, но радиация убила бы всех находившихся поблизости людей и вызвала другие осложнения. Таким образом, все было очень опасно, а люди на заводе даже не подозревали об этом.

Оппенгеймер посылает Сегре телеграмму: «Пройдитесь по всему заводу, определите участки, на которых накапливается концентрация вещества согласно проектируемому процессу. Мы между тем вычислим, какое количество материала должно накопиться, чтобы произошел взрыв». И у нас начали работу две группы. Группа Кристи работала над решением вопроса с водой, а я со своей группой — с сухими порошкообразными веществами в коробках. И мы вычислили количество материала. Кристи собирался поехать в Ок-Ридж и рассказать там всем, какова ситуация. Я с радостью отдал ему все свои результаты расчетов, сказав, что он прекрасно знает дело и пусть едет. Но Кристи подхватил воспаление легких, и пришлось ехать мне. Я до того ни разу не летал на самолетах, а тут полетел. Секретные документы были закреплены ремнем у меня на

спине! Самолет в то время очень походил на автобус. Он делал много остановок в пути, разве что расстояние между остановками было больше. На остановках он подолгу стоял. Парень, который стоял за мной в очереди и теребил цепочку для ключей, сообщил мне: «Сейчас, должно быть, очень трудно летать без предписания». Я не возражал: «Да, я знаю, но у меня есть предписание». Немного погодя на борт поднялись несколько генералов, они собирались прогнать пассажира с места 3s. Все в порядке — у меня место 2. Пассажир с места 3s, возможно, написал возмущенное письмо своему конгрессмену с вопросом: откуда здесь столько молодых парней с кучей предписаний, в то время как война идет совсем в другом месте? Так или иначе, я прибыл на место. Первым делом я обошел весь завод — я ничего не говорил, а только озираясь по сторонам. Выяснилось, что ситуация еще хуже, чем ее обрисовал Сегре, — первое время на заводе он очень робел. Он обратил внимание на ряд ящиков, сложенных в большие штабели, но не обратил внимания на другие ящики, сложенные в другом месте, — это было то же помещение, но с другой стороны. И много всего в том же роде. Если вы будете хранить в одном месте слишком много вещества, оно взорвется. Я прошелся по всему заводу. У меня очень плохая память, но когда я работаю интенсивно, кратковременная память работает очень неплохо — поэтому я запомнил все сумасшедшие детали вроде того, дом номер такой-то, цистерна номер... и прочее. Вечером я вернулся к себе и мысленно представил всю картину, прикидывая, где кроется наибольшая опас-

ность и что надо сделать, чтобы ее предотвратить. Это довольно просто — нужно поместить в раствор кадмий, чтобы абсорбировать нейтроны в воде, разделить коробки, чтобы они не стояли так плотно — слишком много урана вместе, — и совершить еще кое-какие действия в соответствии с определенными правилами. Таким образом, я все проанализировал, составил систему мер и продумал работу процесса охлаждения. Я понимал, что нельзя обезопасить завод, не зная, как он работает. На следующий день состоялось грандиозное собрание.

Я забыл упомянуть, что перед отъездом Оппенгеймер сказал мне: «Теперь, когда вы едете, я перечислю вам технически компетентных людей в Ок-Ридже: это мистер Джулиан Вебб, мистер такой-то и мистер такой-то. Вы должны проследить, чтобы эти люди присутствовали на собрании. Вы расскажете им, какова истинная ситуация и о безопасности — они это действительно поймут, они в курсе дела». — «А если их не будет на собрании, что тогда?» И он ответил: «Тогда вы скажете: “Лос-Аламос не может взять на себя ответственность за безопасность завода Ок-Риджа — и это безоговорочно!!!”» Я заартачился: «Вы полагаете, какой-то там Ричард может приехать туда с таким заявлением?» Он гнул свое: «Да, какой-то там Ричард, вы поедете и сделаете это». Кажется, я действительно быстро вырос! Когда я приехал туда, можете не сомневаться, на следующий день состоялось собрание, и все руководство компании и компетентные технические специалисты были там: и генералы, и прочие, кто был заинтересован в проблемах организации.

Это было большое собрание, связанное с большой серьезной проблемой безопасности, — над ней завод никогда не работал. «Могу поклясться, что все взорвется, если никто так и не обратит должного внимания на проблему», — сказал я. Там был лейтенант, который сопровождал меня. Он передал мне требование полковника не рассказывать, как работают нейтроны и прочие детали. Я сказал, что людям необходимо знать, как все работает, — только тогда они все поймут и будут следовать определенному набору правил. Таково мое мнение — работу можно продолжить, если я скажу им, что *Лос-Аламос не может взять на себя ответственность за безопасность завода Ок-Риджа до тех пор, пока они полностью не проинформированы, как все работает!!!* Это было грандиозно. Я пошел к полковнику. «Дайте мне только пять минут», — сказал полковник. Он подошел к окну, остановился и задумался — да все у них будет хорошо! Они примут правильное решение. Я подумал, как поразительно, что проблема проинформировать людей или нет о том, как работает атомная бомба, должна решиться в Ок-Ридже за пять минут. Я проникся глубоким уважением к этим военным мужам, так как сам никогда не мог решить ничего важного за такой короткий срок — никогда.

Через пять минут он сказал: «Ладно, мистер Фейнман — вперед». Я сел и рассказал им все о нейтронах, о том, как они работают, да-да-да-та-та-та, про то, как опасно иметь слишком много нейтронов вместе, и про то, что материалы надо хранить отдельно, про абсорбцию кадмия, про то, что

медленные нейтроны более эффективны, чем быстрые, и постепенно на элементарном уровне про наши дела в Лос-Аламосе — они никогда не слышали ни о чем подобном, я казался им жутким гением. Я был богом, спустившимся с небес! Они не понимали этих явлений и никогда о них прежде не слышали. А я знал обо всем этом и мог предоставить им факты и цифры и многое другое. Итак, после почти незаметного возвращения в Лос-Аламос я стал ни больше ни меньше как супергением. В результате в Ок-Ридже решили создать небольшие группы, которые выполняют собственные вычисления и обдумают, как все сделать. Они начали перепланировку завода. Там были проектировщики завода, конструкторы, инженеры, инженеры-химики, которые собирались руководить разделением урана на модернизированном заводе.

Я вернулся на завод через несколько месяцев, а компания «Стоун энд Уэбстер» совместно с инженерами приблизительно месяц назад закончила план перестройки завода, и теперь мне надлежало осмотреть завод, понимаете? Но как я мог осмотреть завод, который еще не построен? Не знаю! Я пошел в кабинет к инженерам. Сопровождал меня приставленный ко мне лейтенант Зумвельт — я должен был всюду появляться с эскортом. Он привел меня в кабинет, в котором сидели два инженера и стоял длинный-предлинный стол, огромный стол, ну просто невероятных размеров, покрытый чертежами — не одним чертежом, а целой кипой. Я изучал механическое черчение только в школе и не слишком хорошо разбирался в чертежах. А они на-

перебой начали мне все объяснять, думая, что я гений. Они начинали: «Мистер Фейнман, мы хотели бы, чтобы вы поняли: завод пока проектируется. Видите — мы стараемся избежать скопления материалов». У меня возник вопрос: когда скапливаются вещества, работает испаритель, который аккумулирует вещества? А если клапан начнет заедать или что-то еще случится, тогда будет собираться слишком много вещества, и все взорвется. Они объяснили, что в проекте предусмотрен не один клапан, и если один клапан будет заедать, ничего не случится. Всюду необходимо по крайней мере по два клапана. Они рассказали, как работает аппарат. Туда поступает тетрахлорид углерода, нитрат урана поступает туда извне, он движется вверх и вниз, проходит по трубам на другой этаж, поднимается со второго этажа — бр-бр-бр, согласно чертежам, вверх-вниз, вверх-вниз — они говорили очень-очень быстро, объясняя мне очень-очень сложный химический процесс. Я полностью обалдел — и, что еще хуже, я не знал всех этих обозначений на чертежах! Там была такая штукавина, на которую я подумал, что это окно. Она выглядела как квадрат с крестиком в середине — чертово место, — шли линии с этим чертовым квадратом, и он опять повторяется! Я подумал, что это окно, нет, оно не может быть окном — оно не всегда было на границе. Я хотел спросить их, что это? Вы, наверное, бывали в подобной ситуации — вы не спросили об этом сразу же и упустили время. Но инженеры рассказывали слишком долго. А вы слишком долго колебались. Если спросить их сейчас, они скажут: на что мы по-

тратили впустую столько времени? Я не знал, что делать; про себя я подумал, что мне часто везло. Вы просто не поверите, но я клянусь, что это чистейшая правда — есть такое подсознательное везение. Я раздумывал, что бы я сделал, что бы *предпринял*??? И меня осенила идея. Может быть, это клапан? Что-бы выяснить, клапан это или нет, я тыкаю пальцем в середину одного чертежа на странице 3 и говорю: «Что случится, если этот клапан начнет заедать?» Вероятно, они сейчас скажут: «Это не клапан, сэр, это окно». Они переглянулись и говорят: «Если этот клапан начнет заедать...» — и снова запорхали карандашами вверх и вниз по чертежу, вверх и вниз, туда и обратно, обратно и туда, они переглядывались, кружились вокруг меня и бормотали: «Вы абсолютно правы, сэр!» Они сворачивали и разворачивали чертежи, они бегали, а мы выскользнули из кабинета. И лейтенант Зумвельт, который сопровождал меня все время, сказал: «Вы гений! Я понял, что вы гений, еще тогда, когда вы впервые осматривали завод и на следующее утро рассказали им об испарителе C-21 в здании 90—207, но хотел бы я знать, что вы сделали такого фантастического сейчас, как вы обо всем догадались?» И я ответил ему, что пытался понять, клапан это или нет.

Была у меня на работе проблема и другого рода. У нас было полно вычислений, и мы выполняли их на вычислительных машинках «Маршан». У нас было достаточно компьютеров «Маршан» — кстати, это дает представление о том, чем был Лос-Аламос. Знаете, как они выглядели — ручные калькуляторы с цифрами, вы нажимаете на кнопки, и они

умножают, делят, складывают и тому подобное. Не похожи на те, которые делаются сейчас, это были механические приспособления. И их приходилось отсылать обратно на фабрику для ремонта. У нас не было специального мастера для их обслуживания, и поэтому их чинили только на фабрике. Машинки очень быстро ломались. Я и еще несколько парней начали вскрывать крышки машинок. По правилам это не разрешалось: «Если вы снимете крышку, мы не несем ответственности...» Мы все-таки сняли крышки и сделали целый ряд полезных открытий. Когда мы впервые открыли крышку, там обнаружили вал с отверстием и пружина, которая, очевидно, входила в отверстие — все было просто. Так или иначе, мы научились закреплять их; мы стали все лучше и лучше в них разбираться и проводили все более сложный ремонт. Когда нам казалось что-то чересчур запутанным, мы отсылали машинку обратно на фабрику, но чаще справлялись сами, и машинки работали. Я также чинил пишущие машинки. Я освоил ремонт всех компьютеров, а другие ребята бросили это дело. Я починил несколько пишущих машинок. В машинной мастерской был парень, который делал это лучше меня, на нем лежала ответственность за ремонт пишущих машинок, а на мне — ответственность за счетные машинки. Между тем мы решили, что это слишком большая и серьезная задача — вычислить, что произойдет в процессе взрыва бомбы, когда взрывчатка в нее закладывается и как она разлетается во время взрыва — такую задачу следует вычислять точно. Понять, что произойдет, — это значит точно вычис-

лить, сколько высвобождается энергии и тому подобное — словом, необходим значительный объем вычислений, а мы не располагали такими вычислительными возможностями. И очень умный парень, Стэнли Френкель, сообразил, что это можно сделать на машинах IBM. Компания IBM выпускала машины для нужд бизнеса, счетные машины, которые назывались табуляторами для распечатки сумм, и мультипликаторы, большие коробки, в которые вы вкладываете перфокарты, а они считывают два числа с карты, перемножают их и печатают на карте ответ. Затем появились подборочные и сортировочные машины и ряд других. Стэнли решил, что напишет изящную программу. Если у нас в комнате будет достаточно таких машин, мы сможем прогонять перфокарты через цикл. Каждый, кто делает точные вычисления, знает, о чем я говорю, но тогда это было в новинку: поточная линия машин.

Мы уже проделывали подобные вещи со счетными машинками. Обычно вы полностью выполняете первый этап. Процесс вынуждает вас идти сначала к сумматору, потом к умножителю, опять к сумматору и так далее. Стэнли разработал и упорядочил процедуру, похожую на компьютеры компании IBM, — мы быстро поняли, что это был оптимальный путь решения наших задач. Мы раскопали, что кто-то в вооруженных силах имеет опыт работы с IBM. Нам нужен был человек для их ремонта, поддержания в рабочем состоянии и всего прочего. Военные собирались прислать нам этого парня, но, как всегда, вышла заминка. Надо сказать,

что мы вечно пребывали в ужасной спешке — все, что мы делали, мы старались сделать как можно быстрее. В каждом конкретном случае мы разрабатывали все численные этапы, которые следовало выполнить и которые предполагалось поручить машинам: перемножить то, сделать это и вычесть что-то из чего-то. Все вычисления выполнялись в одной комнате, где сидели девушки, у каждой был «Маршан». Одна выполняла умножение, другая — сложение, третья возводила в куб — у нас были «карточки», «учетные карточки» — девушка возводила число в куб и передавала результат другой... Одна имитировала умножитель, другая — сумматор, мы проходили весь цикл — так мы устраняли ошибки и отлаживали программу. Да, именно так мы и делали. Выходило, что мы были способны только на такую скорость — мы никогда раньше не делали поточных вычислений, и каждый, кто выполнял вычисления раньше, выполнял сам все этапы. У Форда возникла полезная идея — эта проклятая машина будет работать чертовски быстро другим способом — и мы получили скорость системы, которая прогнозировалась для машин IBM. Единственная разница состояла в том, что машины IBM не уставали и могли работать три смены, а наши девушки уставали после одной. Так или иначе, в ходе процесса мы отладили программу — а тут наконец доставили машины, но не мастера по их ремонту. Мы поспешили собрать их. На тот день это были одни из самых технологически сложных машин, большие компьютеры, они прибыли в разобранном виде с огромным количеством проводов и схем для сборки. Мы их собра-

ли — Стэн Френкель, я и еще один парень — и заволновались. Основным источником беспокойства были большие «шишки», которые постоянно к нам приходили и говорили, что вы что-нибудь нарушите, обязательно нарушите! Мы все-таки собрали эти компьютеры — и иногда они работали, а иногда не работали, поскольку некоторые из них мы собрали неправильно. Мы возились с ними, и они начинали работать. Заработали они не все, я копался с одним мультимпликатором, увидел погнутую деталь внутри и побоялся ее выпрямить, чтобы не сломать. Отовсюду приходили люди и говорили, что мы все безвозвратно ломаем. Наконец из компании IBM прибыл мастер, конечно, в соответствии со своим графиком, он наладил остальные машины, которые мы не могли отладить, и наша программа заработала. Но он никак не мог справиться с той машиной, с которой и мне не удалось справиться. Прошло три дня, а он все возился с этой последней. Я сказал ему: «Я заметил там погнутую деталь». Он посмотрел: «Ну конечно! Всего-то одна деталь!» (Щелк!) Вот и ладненько — готово.

Мистер Френкель начал разрабатывать свою программу, но заболел болезнью — компьютерной болезнью — все, кто работает с компьютерами, знают об этом. Это очень серьезная болезнь — и она полностью блокирует работу. Это очень серьезная проблема, которую мы постарались искоренить. Компьютерная болезнь — это *игра* с компьютерами. А они так привлекательны! Вы, например, имеете x — если это четное число, вы делаете одно, нечетное — другое, и если вы достаточно умны, очень

быстро можно научиться выполнять на одной машине все больше и больше операций. Через некоторое время выяснилось, что вся наша система рушится. Стэн ни на что не обращал внимания, никого не видел. Дела продвигались очень-очень медленно. Он сидел в компьютерной аудитории и размышлял, как заставить табулятор автоматически печатать арктангенсы x , и машина печатала колонки арктангенсов, и он получал таблицу арктангенсов одной операцией. Абсолютно бесполезное занятие. У нас *были* таблицы арктангенсов. Но если вы когда-либо работали с компьютером, вы поймете эту болезнь — наслаждение от того, что вы сделали. Но бедный малый, изобретатель многих полезных вещей, подхватил эту болезнь впервые.

Меня попросили остановить работу над темой, которой занималась наша группа, спуститься в компьютерную и принять руководство группой IBM. Я заметил признаки болезни и попытался избежать ее. И хотя за девять месяцев были сделаны только три задачи, моя группа была очень сильной. Первая проблема состояла в том, что им не разрешалось разговаривать с нашими ребятами — их отобрали по всей стране и назвали отдел — специальное инженерное подразделение. Там были умные мальчики с высшим образованием, с инженерными способностями. Военные прислали их в Лос-Аламос. Их разместили в казармах, так чтобы им никто ничего не мог рассказать. Они являлись на работу — их задачей была работа на машинах IBM — перфорируют дырки, цифры, но для чего это нужно, они не знали, *никто им об этом не сообщал*. Дела шли

очень медленно. Я сразу сказал, что технические специалисты должны знать, чем они занимаются. Оппенгеймер ходил разговаривать в отдел безопасности и получил специальное разрешение. Я прочитал подробную лекцию, в которой рассказал им, над чем мы работаем, в результате они очень разволновались. Мы боремся против войны. Мы понимаем, что это такое. Теперь они знали, что означают цифры, с которыми они работали. Если давление увеличится, значит, высвободится больше энергии и может случиться много-много непредвиденных ситуаций. Теперь они были в курсе дела — и произошло полное преображение! Они изобретали способы, как улучшить вычислительный процесс. Они усовершенствовали схему. Они работали по ночам. По ночам им не нужны были надзиратели. Они ничего не требовали и все понимали. Они изобрели несколько программ, которые мы использовали, и прочее, и прочее. Мои ребята действительно вписались в работу — им только приходилось говорить, для чего это делается, — вот и все. Только не говорите им: пожалуйста, пробейте дырки в перфокартах. В результате если раньше мы делали три задачи за девять месяцев, то теперь девять задач за три месяца, почти в десять раз быстрее. При решении задач мы пользовались одним из секретных методов: следует создавать циклы для задач, состоящих из кучи перфокарт. Сначала складывай, потом умножай — и вы проходите через цикл машин в компьютерной, правда, достаточно медленно, так как постоянно движетесь по кругу. Мы разработали способ, используя различные наборы окрашенных перфо-

карт, пропускали их тоже через цикл, но не в фазе. У нас одновременно решались две или три задачи — и мы придумали новые хитрости: пока одна машина складывала, другая производила умножение для другой задачи. Такие схемы управления позволяли решать гораздо больше задач.

В заключение в конце войны, как раз перед испытанием бомбы в Аламогордо, возник вопрос, сколько энергии будет высвобождаться? Мы вычисляли объем высвобождаемой энергии для различных конструкций, но для конкретной конструкции, выбранной для испытаний, мы расчетов не делали. Пришел к нам в компьютерную Боб Кристи и говорит, что нам нужен результат через месяц или раньше, а может быть, через три недели. Я отвечаю: «Это невозможно!» А он продолжает: «Смотри, вы решаете за неделю столько-то задач. Эта задача займет две, максимум три недели». Я возразил: «Я понимаю, что задача займет куда больше времени, но мы будем ее считать *параллельно*. Другого пути ускорить работу нет — обычный путь тут не пойдет». Он ретировался. А я начал думать, есть ли способ выполнить счет быстрее? Я продолжал думать, подошел к доске и написал на ней обращенный к ребятам вопрос: **МОЖЕМ ЛИ МЫ СДЕЛАТЬ ЭТО?** Они все ответили — да! Мы будем работать в две смены, сверхурочно, и все такое. Мы будем стараться! Мы попытаемся!!! Все другие задачи были отложены. Только одна задача — мы сконцентрировались на ней и начали работать.

Моя жена умерла в Альбукерке, и я вынужден был уехать. Я позаимствовал автомобиль Фукса. Он

был моим товарищем по общежитию. У него был автомобиль. Он им пользовался для перевозки секретных материалов и переправлял их в Санта-Фе, он был шпионом; но я ничего об этом не знал. По дороге спустили сразу три шины. Как только я вернулся, сразу отправился в компьютерную аудиторию, мне полагалось за всем следить. Но в течение трех дней я не мог работать. У нас царил неразбериха, грандиозная суeta перед первыми испытаниями бомбы в пустыне. Я шагнул в комнату и обнаружил там перфокарты различного цвета — белые, синие, желтые. Я начал было говорить: «Мы не договаривались делать несколько задач — только одну!» Они наперебой заорали: «Уходите, выйдите отсюда! Мы вам позже все объясним!» Я ждал, а произошло вот что. Когда прогоняли программу, машина иногда делала ошибку или в нее вкладывали случайно перфокарту с неправильным числом. Обычно при этом мы возвращались назад и проделывали всю процедуру заново. Но ребята заметили, что колода перфокарт фиксировала положение и глубину ошибки в машине, в пространстве или где-либо еще. Ошибка, сделанная в одном цикле, влияет только на соседние числа, следующий цикл влияет тоже только на соседние числа и так далее. Машина работает с колодой перфокарт. Если вы сделали ошибку в перфокарте 39, она влияет на 37, 38 и 39. Далее она влияет на 36, 37, 38, 39 и 40. Дальше ошибка распространялась, как бацилла. Они обнаружили ошибку, просмотрели все в обратном направлении, и у них появилась идея. Они могут обрабатывать заново только маленькую колоду, например десять перфокарт, в окрестности

ошибки. И поскольку десять перфокарт машина обрабатывает гораздо быстрее, чем пятьдесят, они будут проходить программу быстро, пока бацилла не распространилась на все перфокарты. Они изолировали ошибку и исправляли ее — и вычисления шли быстрее. Остроумно! Ребята работали очень напряженно, очень умно — и получали выигрыш в скорости. Другого способа не существовало. Если бы они останавливались и фиксировали ошибку, мы теряли бы кучу времени. Мы не могли себе этого позволить. Вы, конечно, поняли, что произошло во время прогона программы. Они нашли ошибку в синей колоде. И они взяли желтую колоду с меньшим числом перфокарт, ясно, что она обрабатывалась быстрее, чем синяя. Но после того как они исправили одну ошибку, они обнаружили и вынуждены были зафиксировать ошибку в белой колоде. Они вынули перфокарты с ошибкой, заменив их другими, — они были в отчаянии. Дальше программа обрабатывалась правильно, это всегда сбивает с толку: вы знаете, как все должно работать, и все-таки допускаете ошибки. И именно тогда, когда они запускали в машину эти три колоды перфокарт, устранив ошибки, появился босс. Они взмолились: «Вы нам мешаете». Я ушел. И все у них заработало. Задача была решена вовремя. Такие вот дела.

Я хотел бы рассказать вам о некоторых людях, с которыми встретился в Манхэттенском проекте. Я был начинающим, мелкая сошка, правда, потом вырос до руководителя группы. Мне посчастливилось познакомиться с некоторыми ве-

ликими людьми. — кроме представителей координационного совета, я встретил в Лос-Аламосе великих ученых. Их было так много — это одно из самых ярких впечатлений в моей жизни, моя необыкновенная удача — встретить сразу всех этих удивительных физиков. Люди, о которых я слышал в большей или меньшей степени — они были самыми знаменитыми учеными. Это в первую очередь Ферми¹.

Он приезжал к нам однажды. Впервые он приехал из Чикаго отчасти проконсультировать нас и отчасти помочь по ряду проблем. У нас состоялась с ним встреча, и я сделал тогда некоторые вычисления и получил определенные результаты. Вычисления были хитроумными и весьма сложными. Сейчас, когда я стал экспертом, я всегда могу сказать, каким примерно будет ответ или, если я его получил, то объяснить почему. Но та задача была очень сложной, и я не мог объяснить, почему так получается. Я сказал Ферми, что работаю над одной задачей и начал вычислять, он же попросил: подождите, перед тем как расспросить меня о результате, дайте подумать. Все происходило таким-то образом (и он оказался прав), все будет происходить так-то и потому-то. И последовало совершенно очевидное объяснение... Он сделал то, в чем я был довольно си-

¹ Ферми (1901–1954) — лауреат Нобелевской премии по физике 1938 года за демонстрацию существования новых радиоактивных материалов, созданных нейтронным излучением, и связанные с ними работы. Ферми также отвечал за контролируемый ядерный взрыв в университете Чикаго в 1942 году. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

лен, — лучше и за десять минут. Он преподнес мне хороший урок.

Потом — фон Нейман, он был великим математиком. Он сделал, не буду вдаваться в подробности, очень дельные замечания технического характера. У нас возникли очень интересные явления с числами при компьютерном счете. Проблема выглядела нестабильной, и он объяснил что и почему. Это был очень дельный технический совет. Мы часто прогуливались с ним в свободное время, по воскресеньям или когда удавалось. Мы гуляли в соседних каньонах часто в компании с Бете, фон Нейманом и Бачером. Удовольствие я получал необыкновенное! И еще фон Нейман высказал мне идею, которую считал любопытной. Вы не несете ответственности за то, что происходит в мире, в котором вы живете. Благодаря совету фон Неймана я развил в себе очень мощное чувство социальной безответственности. С тех пор я считаю себя очень счастливым человеком. Именно фон Нейман заронил семена, выросшие в мою *активную безответственность!*

Я также познакомился с Нильсом Бором¹. Интересно, что он приехал к нам под именем Николаса Бейкера вместе с Джимом Бейкером, своим сыном, чье настоящее имя было Оге².

¹ Нильс Бор (1885–1962) — лауреат Нобелевской премии по физике 1922 года за работы по структуре атомов и испускаемого ими излучения. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

² Оге Бор (1922) — лауреат Нобелевской премии по физике 1975 года (вместе с Беном Моттельсоном и Джеймсом Рейнвотером) за теорию структуры атомного ядра. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

Они были очень знаменитыми физиками, как вы все знаете, и приехали из Дании с визитом. Все наши «шишки» сопровождали их; он был великим богом, его слушали с трепетом. А он рассказывал о задачах. Мы пришли на встречу с ним — все хотели увидеть великого Бора. Было множество людей, я сидел сзади где-то в углу, и мы обсуждали проблемы бомбы. Это был его первый приезд. Он приехал и уехал, и видел-то я его из своего угла да через чьи-то головы. В следующий раз его визит был запланирован; утром, в тот день, когда он должен был приехать, мне позвонили. «Алло, Фейнман?» — «Да». — «Это Джим Бейкер». Это был его сын. «Мы с отцом хотели бы побеседовать с вами». — «Со мной? Я Фейнман, я просто...» — «Все верно. Договорились?» Было восемь утра, еще никто не проснулся, а я уже спускался вниз в назначенное место. Мы прошли в офис в технической зоне, и Бор пояснил: «Мы обдумывали, как можно сделать бомбу более эффективной, и у нас возникла следующая идея». Я сказал: «Нет, это не сработает, эффективность не увеличится, и та-та-та...» Он возразил: «А как насчет того-то и того-то?» Я ответил: «Это звучит немного лучше, но все равно это паршивая идея». Обсуждаем идею со всех сторон, туда и обратно, туда и обратно. У меня есть одна черта — я совершенно забываю, с кем я говорю — меня волнует только физика; если идея выглядит паршиво, я так и говорю — паршиво. Если хорошо, я говорю хорошо. Простая жизненная позиция — я всегда так жил. Это разумно, это наконец приятно, если вы можете так поступать. Мне везет. Мне просто повезло тогда на заводе с черте-

жами, и мне повезло в жизни, что я могу так поступать. Наш разговор продолжался около двух часов, возвращался к одному, другому, мы обсудили массу идей, неслись галопом туда и обратно, спорили. Великий Бор, как всегда, беспрерывно раскуривал трубку. Он изъяснялся каким-то непонятным образом. Он, например, говорил: «Мамбл-мамбл». Понять было трудно, зато я лучше понимал его сына. В заключение он сказал, раскуривая трубку: «Полагаю, теперь мы можем пригласить важных шишек». Они пригласили остальных и стали беседовать с ними. А потом его сын рассказал мне, что произошло. Когда он был у нас в последний раз, он спросил сына: «Ты не помнишь фамилию того молодого парня в задних рядах? Он единственный меня не боялся и возражал, когда я высказывал глупые идеи. Когда в следующий раз нам нужно будет обсуждать какие-то вопросы, нет смысла говорить с теми, кто на все отвечает: «Да, доктор Бор, да, доктор Бор». Пригласи того парня, сначала поговорим с ним».

Следующий случай произошел, когда мы закончили вычисления для испытания бомбы. Мы должны были проводить испытания. В тот момент я был дома, мне дали короткий отпуск, думаю, потому, что скончалась моя жена. И тут я получаю сообщение из Лос-Аламоса: «Дитя должно родиться, по-видимому, в такой-то день». Я лечу обратно, только добираюсь до места, автобусы уже отправляются. Я не успеваю даже забежать в свою комнату. В Аламогордо мы ждали на достаточном расстоянии от места взрыва, в 20 милях. У нас была радиосвязь, и нам должны были сообщить, когда произойдет взрыв и так далее.

Но радио не работало, и мы так и не поняли, что случилось. Только за несколько минут до взрыва радио заработало, и нам объявили, что осталось 20 секунд до взрыва. Людям, которые находились достаточно далеко, как мы, — некоторые были ближе, на расстоянии шести миль, — выдали затемненные очки, чтобы наблюдать картину взрыва. Затемненные очки!!! В двадцати милях от взрыва невозможно наблюдать этот чертов взрыв через затемненные очки. Тогда я прикинул только одно, насколько можно повредить глаза — яркая вспышка не может повредить глаза — это делает ультрафиолет. Я встал за ветровым стеклом грузовика — ультрафиолет не проходит через стекло, оно будет служить защитой, и я наблюдал этот дьявольский взрыв. Остальные никогда этого не увидят. Мгновения — и образовалась грандиозная вспышка, настолько яркая, что я сразу увидел пурпурный сполох на полу грузовика. Я пробормотал: «Это не то. Это послесвечение». Я повернулся и увидел, как белый свет сменился желтым, а затем оранжевым. Образовались облака и снова исчезли, сжатие и расширение образовали облака и заставили их рассеяться. В заключение огромный оранжевый шар, очень яркий в центре, стал целиком оранжевым, начал подниматься вверх и чуть-чуть колыхаться, стал немного чернеть по краям, а потом превратился в огромный шар дыма с огненными вспышками внутри и выделяющимся теплом. Я видел все это; все, что я описываю, произошло мгновенно, приблизительно за минуту. Это была последовательность яркого и темного — и все это я наблюдал. Я был почти единственным, кто действительно ви-

дел весь этот ужас, первое испытание Тринити. Все остальные были в темных очках. Люди, находящиеся в шести милях, ничего не могли видеть — им было приказано лежать на дне укрытия с завязанными глазами, так что никто этого не видел. А все находящиеся наверху, как я, надевали затемненные очки. Человеческими глазами наблюдал картину только я. Через минуту-полторы внезапно раздался чудовищный грохот, УДАР, а затем громыхание, как раскаты грома — то, что дошло до моего сознания. Минуту никто не мог произнести ни слова, мы наблюдали за происходящим молча, но этот звук как будто вывел присутствующих из оцепенения, особенно меня, так как мощность звука на этом расстоянии означала, что все действительно сработало. Человек, стоящий рядом со мной, Уильям Лоуренс, корреспондент «Нью-Йорк таймс», спросил, когда звук совсем ослабел: «Что это?» Я ответил: «Это была бомба». Он собирался написать статью, описав всю ситуацию. Я, видимо, был единственным, кто заговорил с ним. Объяснения для него оказались бы технически слишком сложными.

Позже приехал из Принстона мистер Смит, и я показал ему Лос-Аламос. Например, мы зашли в комнату, а там на верхушке пьедестала был помещен маленький шар, немного меньше, чем настоящий, с серебряным напылением — при прикосновении к нему вы ощущаете тепло. Это был плутоний, радиоактивный плутоний. Мы стояли у двери и разговаривали о нем. Плутоний — новый элемент, искусственно созданный человеком, которого никогда не было раньше на земле, кроме, возможно, очень

короткого периода, в начале ее образования. У него особые свойства — он был полностью изолирован и радиоактивен. И мы его создали. Его ценность была сверхъестественной. Вы знаете, как обычно люди ведут себя во время разговора — они раскачиваются, жестикулируют, переминаются с ноги на ногу. Он пнул ногой упор двери. Я сказал, что упор более подходящее место, чем дверь. Упор был полусферической формы, из желтого металла, по существу, золотой. Золотая полусфера, довольно большая. Мы проводили эксперимент, сколько нейтронов отражается от разных материалов, чтобы сохранить нейтроны — у нас было мало плутония. Мы протестировали много различных материалов, тестировали платину, цинк, латунь, золото. После экспериментов с золотом кому-то пришла в голову остроумная идея использовать золотой шарик для дверного упора той двери, за которой лежал плутоний, — весьма кстати.

После первого успешного испытания бомбы в Лос-Аламосе началось жуткое возбуждение. Кругом устраивались вечеринки, все носились с одной вечеринки на другую. Я сидел на крыле какого-то джипа и что есть мочи колотил по барабанам. В эйфории были все, кроме одного человека, Боба Уилсона, который и втянул меня в эту историю с бомбой. Он сидел как в воду опущенный. Я спросил: «Почему ты хандришь? Ты начал все это и втянул нас». Что касается меня и всех нас, мы начали работу из благих побуждений, очень напряженно работали и сделали кое-что; завершение такой работы — это действует возбуждающе. Мы перестали за-

думываться, после начального этапа мы перестали думать о последствиях. Он был единственным человеком, думающим о будущем, даже в этот особенный момент. Вскоре я возвратился в цивилизацию, уехал преподавать в Корнелл, и мои первые ощущения были очень странными, сейчас я их уже не смогу точно описать, но тогда я чувствовал это очень остро. Например, я сидел в Нью-Йорке, в ресторане, смотрел на дома, и в голове проносилось, каков радиус поражения бомбы, сброшенной на Хиросиму. И каков он будет, если ее сбросить в районе Тридцать четвертой улицы? Все эти здания — они погибнут. Я испытывал совершенно незнакомые ощущения. Я шел, смотрел на людей, строящих мост или новую дорогу, и думал — они сошли с ума, что ли, они просто не понимают, ничего не понимают. Зачем строить что-то новое, если это совершенно бессмысленно? Будет большой удачей, если эта бессмыслица продлится 30 лет, может быть, мы продержимся 30 лет. Я ошибся относительно 30 лет, и я рад, что нашлись люди, умеющие смотреть вперед. Но моя первая реакция после работы над бомбой была своеобразной — *бессмысленно создавать что бы то ни было.*

Я закончил, спасибо за внимание.

Вопрос: Не могли бы вы рассказать историю с сейфами?

Фейнман: У меня много историй с сейфами. Если вы дадите мне десять минут, я расскажу вам три истории с сейфами. Ладно? Мотивацией для вскрытия шкафов с документами и замков стало мое желание сохранять в безопасности наши материалы. Кто-то рассказал мне, как вскрывать замки. Тогда

появились шкафчики для документов с сейфовыми комбинациями. Попытаться открыть что-нибудь секретное — одно из моих хобби. Итак, эти сейфовые замки компании «Mosler Lock» на шкафчиках, куда мы складывали все документы, притягивали меня как магнит. Как, черт возьми, они открываются? — эта мысль не давала мне покоя. Существуют разного рода истории, как можно нащупать цифры и вслушиваться в звуки замка. Это правда — я очень хорошо понимаю старомодные сейфы. Теперь они имеют новую конструкцию, так что не надо нажимать на колесики, когда пытаешься их открыть. Не буду вдаваться в технические детали, но ни один из старых методов здесь не работал. Я читал книги по конструкции замков. В этих книжках всегда вначале говорится, как они открыли сейф, сочиняли захватывающие истории — женщина уходит под воду, сейф вместе с ней уходит под воду, они тонут, а взломщик ныряет и все-таки вскрывает под водой сейфовый замок — глупейшая история. А в конце они рассказывали, как это сделали, но ничего сногсшибательного не рассказывали, непонятно, как на самом деле они открывают сейфы. Как угадать комбинацию, основываясь на психологии человека, которому принадлежит сейф? Я всегда считал, что они держат это в секрете. Так или иначе, я продолжал работать. Это как зараза, я продолжал работать, пока не обнаружил несколько особенностей. Первое — насколько велика цепочка цифр в комбинации, открывающих сейф, насколько вы к ней близки. И потом я изобрел систему, с помощью которой можно испытать все комбинации, которые хочешь. Как выяснилось,

число комбинаций равно восьми тысячам, так как вы можете использовать дважды каждое число. Тогда выходит, что каждое пятое число из ста двадцати восьми тысяч комбинаций и так далее. Я разработал схему, с помощью которой мог испытывать числа, не меняя того числа, которое я уже установил, правильно передвигая лимбы — я мог сделать это за восемь часов. А дальше я понял — это заняло у меня около двух лет, — что ничего не надо упорядочивать, я попусту трачу время, и в конце концов я нашел способ, как просто вычислить два последних числа комбинации, если сейф открыт. Если выдвинуть ящик, можно нажать на цифру и увидеть, как поднимается болт, найти, что он держит, и какая цифра снова возвращается на место и так далее. Используя некоторые хитрости, можно получить всю комбинацию. Понимаете, я практиковался целыми днями, как карточный шулер практикуется с картами. Все быстрее и бесцеремоннее я заходил к кому-нибудь поговорить, окидывая голодным взглядом его шкафчик с документами — как сейчас я легко поигрываю с часами, но вы этого даже не замечаете — я ничего не делаю. Я просто играю с часами — и все. Но тем временем я успевал установить две цифры! Я возвращаюсь к себе в комнату и записываю эти цифры. Последние две цифры из трех. Теперь, когда вам известны последние две цифры, у вас уйдет минута на перебор первой цифры, только двадцать вариантов — и сейф открыт.

Итак, я снискал замечательную репутацию взломщика сейфов. Мне говорили: «Мистер Шмультц уехал в город. Нам нужен документ из его сейфа.

Можете его открыть?» Я отвечал: «Могу, конечно! Только захвачу свои инструменты». (Никаких инструментов у меня не было.) Я приходил в комнату и присматривался к числу на сейфе. У меня были две последние цифры. У меня были эти цифры для всех сейфов, стоящих в разных комнатах. Я клал отвертку в задний карман, учитывая, что сам же и говорил о необходимости иметь инструменты. Возвращался обратно в комнату, закрывал дверь. Я делал вид, что взлом сейфов — очень опасное дело, и никто не должен об этом знать, иначе все сейфы будут открыты. Я закрывал дверь, садился и читал журнал или чем-нибудь занимался. В среднем двадцать минут уходило у меня на ничегонеделание, затем я тотчас же вскрывал его, убеждался, что все в порядке, и сидел еще двадцать минут, чтобы доказать свою репутацию — не слишком-то просто вскрыть сейф без всякого обмана. Потом я выходил, слегка вспотевший, и говорил: «Пожалуйста, он открыт!» — или что-то в этом роде.

Как-то раз я открыл сейф по чистой случайности, что помогло поддержать мою репутацию. Это была сенсация, чистое везение, вроде везения с чертежами. Я рассказываю вам эти истории, поскольку после войны я вернулся в Лос-Аламос, чтобы закончить кое-какие статьи, и там мне пришлось открывать сейф — я мог бы написать книгу по вскрытию сейфов лучше любого пособия по этой теме. Вначале я объясню, как я открыл сейф абсолютно без подготовки, не зная комбинации. Этот сейф содержал больше секретных документов, чем любой другой, который когда-либо вскрывали. Я открыл сейф,

в котором хранились секреты атомной бомбы, все ее секреты — формулы, скорости, при которых нейтроны высвобождаются из урана, сколько урана необходимо для создания бомбы, все теории, все вычисления — ЦЕЛОЕ ЖУТКОЕ ДЕЛО!

Там была вся проделанная работа. Я пытался написать доклад. Мне нужен был этот доклад. Была суббота, я думал, что все работают. Я думал, что там сохранились прежние порядки. Я пошел в библиотеку получить необходимые документы. В библиотеке Лос-Аламоса хранились все документы. Это было огромное хранилище с кучей разного рода ручек — я ничего о них не знал. Там и тут прохаживались вооруженные охранники. Не можете его открыть? Подождите, дайте подумать! Старый Фредди Дехоффман в отделе рассекречивания отвечал за рассекречивание документов. Какие документы теперь можно рассекретить? Он часто спускался в библиотеку и поднимался назад, и очень уставал от этого. И ему пришла в голову блестящая идея. Он может получать копии любого документа, сделанные в библиотеке Лос-Аламоса. Он запихивал их в свой файл, у него было девять шкафчиков для документов, установленных в ряд в двух комнатах, полный комплект документов Лос-Аламоса. Я поднимусь к Дехоффману и попрошу забрать на время документы — его копии. Я поднялся в его офис. Дверь офиса была открыта. Все выглядело так, как будто он вышел на несколько минут и сейчас вернется, и свет горел. Я ждал. Как всегда, когда я жду, я кручу ручки. Я попытался поставить числа 10—20—30 — не сработало. Я попытался поставить 20—40—60 — не

сработало. Перепробовал все. Жду — делать нечего. Тогда я начал обдумывать, вы ведь знаете этот народ — взломщиков, я никогда не понимал, как открыть сейфы по-умному. Может быть, они не такие, может быть, все дело в психологии. Я начал открывать первый с помощью психологии. Первое, о чем говорилось в книге: «Секретарша очень разнервничалась, потому что забыла комбинацию». Ей называли комбинацию. Но она могла забыть ее, и босс мог забыть — она хочет вспомнить цифры. Она боязливо записала где-то код. Где именно? Список мест, где секретарша могла записать комбинацию? Начнем с наиболее разумной вещи — вы открываете ящик стола и сбоку, с внешней стороны ящика, небрежно записано число, похожее на номер накладной. Это и есть число комбинации. Итак, это сбоку ящика. Я вспомнил этот эпизод из книги. Но ящик стола заперт, я легко вскрываю замок, вытаскиваю ящик, смотрю на деревянную поверхность — ничего. Все правильно, все так и есть. В ящике куча бумаг. Я рыскаю среди бумаг и наконец нахожу его, симпатичный клочок бумаги с греческим алфавитом. Альфа, бета, гамма, дельта и так далее — аккуратно напечатанные. Секретари должны знать, как писать такие буквы и как с ними обращаться, чтобы они о чем-то говорили. Таким образом, они имели копии комбинаций. Но — небрежно нацарапанное сверху число π , равное 3,14159. Зачем ей понадобилось численное значение π , она его никогда не вычисляла. Я бросился к сейфу. Честное слово, правильно! Это прямо как в книжке. Я шагнул к сейфу. 31—41—59. Не открывается. 13—14—95. Не открывается. 95—14—13.

Не открывается. 14—13 — двадцать минут я гонял число π туда-сюда. Ничего не получилось. Я уже выходил из офиса, когда вспомнил, что говорилось в книжке о психологии, — я считал, что это верно. Психологически я прав. Дехоффман — это как раз тот тип человека, который использует математические константы для своих сейфовых комбинаций. Есть еще константа e ! Я вернулся к сейфу, 27—18—28, клик-клок, он открылся. Между тем я проверил, что все остальные комбинации те же самые. У меня есть масса других историй об этом, но уже поздно, довольно и одного рассказа, давайте поговорим об этом когда-нибудь в другой раз.

В ЧЕМ СОСТОИТ И В ЧЕМ ДОЛЖНА СОСТОЯТЬ РОЛЬ НАУЧНОЙ КУЛЬТУРЫ В ЖИЗНИ ОБЩЕСТВА

Это лекция, которую Фейнман прочитал ученым на Галилеевском симпозиуме в Италии в 1964 году. Фейнман говорит о влиянии науки на религию, на общество и на философию, часто подтверждая свои слова ссылками на титаническую работу Галилея и его глубокие терзания, а также предупреждает, что положение ученого обязывает сомневаться в том, что определяет будущее цивилизации.

Пусть вас не смущает мой костюм, это действительно я — профессор Фейнман. Я обычно читаю лекции без пиджака, но когда сегодня утром выходил из гостиницы, жена сказала: «Ты должен надеть костюм». Я ответил, что обычно читаю лекции без пиджака. На что она возразила: «Да, но сейчас ты будешь говорить невесте о чем, поэтому нужно произвести хорошее впечатление...» Итак, я надел костюм.

Я собираюсь говорить о предмете, подсказанном мне профессором Бернандини¹. В самом начале я хотел бы сказать, что, по-моему, определить место научной культуры в современном обще-

¹ Председатель конференции.

стве — не значит решить проблемы современного общества. Существует множество проблем, с которыми нельзя справиться исходя из положения науки в обществе. Только в сновидениях можно предположить, что ответ на вопрос, насколько идеально наука и общество подходят друг другу, так или иначе является решением всех проблем. Пожалуй-ста, поймите меня правильно, что хотя я и предлагаю некоторую модификацию взаимоотношений науки и общества, я не жду от нее решения общественных проблем.

Мне кажется, современному обществу угрожает целый ряд серьезных опасностей, на одной из них я хотел бы сконцентрировать внимание, она будет фактически центральной темой моего обсуждения, хотя существуют многочисленные небольшие дополнительные проблемы. Главная тема моей лекции — а я полагаю, что это одна из величайших опасностей современного общества, — это возрождение и распространение идей контроля над человеческой мыслью; так делали Гитлер или Сталин во время их пребывания у власти, или католическая религия во времена Средневековья, или современный Китай. Думаю, что основная угроза кроется в расширении контроля, в том, что он может охватить весь мир.

В дискуссии об отношении науки к научной культуре общества самым очевидным аспектом — первое, что сразу приходит в голову, — оказывается применение науки. Применение — это тоже культура. Однако я не собираюсь говорить о применениях — не по каким-то особым причинам. Я ценю, что все популярные дискуссии по вопросам отношения

науки и общества почти полностью сосредоточены на применениях науки и, более того, на моральных вопросах, которые ученые в какой-то мере затрагивают в работе, когда они рассматривают ее применения. И все-таки я не буду говорить о них, поскольку существует много других проблем, которые пока не обсуждались в обществе, и чтобы немного взбодрить вас, я хотел бы обсудить эти проблемы, взглянув на них с несколько иной точки зрения.

Я буду, однако, затрагивать некоторые аспекты применения науки, которые, как вы понимаете, наука создает силой своего знания, силой, порождающей осязаемые предметы: вы можете создавать предметы только после того, как почерпнули научные знания о них. Но наука со всей своей мощью не дает рекомендаций, как противопоставить добро и зло. Давайте рассмотрим простую жизненную схему: кроме очевидной силы науки, не существует никаких инструкций, отвечающих на вопрос о ее применении, — это исключительно проблема организации ее применений, проблема получения максимальной пользы, а не вреда. Правда, иногда люди науки пытаются говорить, что не несут ответственности за применение науки, так как ее применение — это только право сделать что-либо, не зависящее от того, что вы делаете в науке. В некотором смысле это верно — человечество должно осуществлять контроль за мощью науки, за ее разумным применением независимо от возможных трудностей, связанных с желанием разгадать, как контролировать силу, чтобы она приносила добро, а не зло.

Думаю, что большинство здесь присутствующих — физики и, следовательно, оценивают проблемы общества с точки зрения физики. Однако я считаю, что самой уязвимой наукой, связанной с моральными сложностями ее приложений, является, несомненно, биология. И если проблемы физики с ее приложениями кажутся сложными, то проблемы развития биологической науки выглядят фантастическими. Об этих возможностях дает понять, например, книга Хаксли «О дивный новый мир», однако вы можете поразмыслить и о многом другом. Так, если энергию в далеком будущем можно будет получать легко и свободно с помощью физики, дело останется за чистой химией — расположить атомы таким образом, чтобы производить еду из энергии, которую сохранили атомы, — можно будет производить еды столько, сколько будет отходов жизнедеятельности. Таким образом, будут сохраняться материалы, и не возникнет проблем с едой. Мы сталкиваемся с очень серьезной социальной проблемой — проблемой контроля наследственности — как использовать контроль в нравственных или безнравственных целях. Предположим, что нам надо разработать физиологический базис счастья или каких-либо других чувств, например честолюбия. Предположим, что мы умеем контролировать чувство честолюбия — есть оно у человека или нет. Или, наконец, возьмите смерть.

Одна из наиболее поразительных вещей — во всей биологической науке нет объяснения необходимости смерти. Если мы хотим создать вечное движение, то знаем, что это абсолютно невозмож-

но, — на этот счёт мы открыли достаточно много законов физики; в противном случае законы работали бы неправильно. Но ничего подобного не обнаружено в биологии, ничего, что свидетельствовало бы о неизбежности смерти. Мне кажется, что такой неизбежности просто не существует и что это только вопрос времени, когда биологи откроют, что именно вызывает наши беды, и сумеют победить и ужасные глобальные болезни, и брэнность человеческого тела. Как бы то ни было, вы увидите, что биология принесет нам проблемы фантастической значимости.

Теперь я буду говорить о другом.

Кроме вопроса о применении науки, существуют и другие идеи — идеи двух видов. Одна из них — это продукт науки как таковой, то есть вопрос мировоззренческий — что порождает наука. В каком-то смысле это наиболее привлекательная часть целого. Некоторые считают, что методы науки не являются чем-то вещественным. Это зависит от того, что для вас важнее: цель или средства — средства должны приводить к замечательным целям, но я не буду утомлять вас деталями (я не наскучу вам, если буду делать это деликатно). Я здесь беседую с подготовленной публикой — поэтому все вы знаете об удивительных фактах в науке, так что не буду заставлять вас восторгаться общеизвестными фактами: тем, что все мы состоим из атомов, что существует огромная протяженность времени и пространства, в которых обусловлено наше историческое положение в результате сложного эволюционного процесса. И положение всех нас в этом эволюционном по-

рядке, и, кроме того, наиболее замечательная сторона нашего научного мировоззрения состоит в его универсальности в том смысле, что, хотя мы говорим о различных видах, приспособившихся к данной среде, никаких реальных различий нет. Одна из наиболее многообещающих гипотез в биологии — все, что делают животные или живые существа, можно понять на атомном уровне, то есть через физические законы. В конечном счете неугасающее внимание к такой возможности — до сих пор никаких исключений не было продемонстрировано — снова и снова показывает, какие механизмы встречаются в действительности. Еще не полностью осмыслен тот факт, что наше знание универсально, позиция теорий сформирована, мы ищем исключения и видим, что найти их очень трудно — по крайней мере в физике. Огромные затраты на все эти машины, например, ускорители и многое другое — это все поиск исключений из того, что уже известно. Существует и другая сторона этого факта — мир в каком-то смысле так удивителен и гармоничен, что звезды состоят из тех же атомов, что и коровы, и камни, и все мы.

Время от времени мы пытаемся поделиться своими знаниями о мире с друзьями, не занимающимися наукой, и очень часто сталкиваемся с непониманием. Очень трудно объяснить человеку смысл сохранения СР-четности¹, когда он не знает основных теоретических положений.

¹ Сохранение зарядовой и пространственной четности — один из фундаментальных законов сохранения в физике,

В течение четырехсот лет, начиная с Галилея, мы собирали информацию о мире, которого не знаем. Теперь мы разрабатываем путь в пределах нашего научного знания. Факты, появляющиеся в статьях и будоражащие воображение зрелого человека, всегда связаны с невозможностью их постичь, поскольку он не изучал множества интереснейших вещей, хорошо знакомых ученым. Слава Богу, этого не случается с детьми, по крайней мере пока они не станут взрослыми.

Думаю, все вы знаете по опыту, что люди — я имею в виду среднестатистического человека, — даже большинство людей, чудовищное их число, абсолютно игнорируют мировую науку и могут остаться навсегда на этой позиции — это прискорбно и достойно сожаления. Я не собираюсь предавать их анафеме; я полагаю, что они придерживаются своей позиции, ни о чем не беспокоясь, — скорее снисходительно — время от времени, когда в газетах упоминают о СР, они спрашивают, что это. Интересный вопрос взаимоотношения науки и современного общества: почему людям можно оставаться так прискорбно равнодушными и все-таки вполне счастливыми в современном обществе, когда колоссальный объем знаний проходит мимо них?

Как-то мистер Бернандини высказал мне свое мнение о знании и удивительном в науке: мы должны учить не удивительному, а только знанию.

который утверждает, что полная зарядовая и пространственная четность, внутреннее свойство симметрии субатомных частиц, заложенное во взаимодействие, вытекает также из этого взаимодействия.

Существует несомненная разница между этими двумя подходами. Я думаю, мы должны учить удивляться и что задача знания — даже в большей мере — уметь оценить чудо. Знание — это просто заключенное в четкие рамки удивление перед Природой. Возможно, я подменяю некоторые понятия, но, во всяком случае, я хочу ответить на вопрос, почему люди проявляют такое ужасающее равнодушие и не интересуются проблемами современного общества. Ответ заключается в том, что наука не имеет отношения к обществу. Через минуту я объясню, что под этим имею в виду. Так не должно быть, но таково существующее положение вещей. Я еще вернусь к этому тезису.

Другие важные стороны науки, имеющие отношение к обществу, кроме ее приложений и актуальных открытых фактов, — это идеи и методики научного исследования: ее средства, если хотите. Думаю, трудно понять, почему эти средства, которые кажутся такими очевидными, не были открыты раньше. Казалось бы, многие идеи достаточно просто испытать на деле, но почему-то этого не произошло. Возможно, человеческий мозг находится в стадии эволюции от мозга животного, и, как всякое новое средство, имеет свои недостатки. У него свои проблемы: он развращается собственными суевериями, запутывает сам себя, и открытие делается в конечном счете в соответствии с его уровнем развития, так что ученые добиваются лишь небольшого прогресса в определенном направлении, не кидаясь в разные стороны и не загоняя себя в жесткие рамки. Думаю, сейчас как раз подходящее время обсудить этот вопрос,

поскольку начало новым открытиям было положено во времена Галилея. Вы все, безусловно, знакомы с этими идеями и методиками. Я ограничусь небольшим обзором; если бы я обращался к непрофессиональной аудитории, мне пришлось бы вдаваться в подробности; но вы наверняка хорошо разбираетесь в том, о чем я собираюсь говорить.

Первый вопрос очевиден — перед началом исследования вы не знаете ответа. Итак, вы начинаете с незнания ответа. Очень-очень важно, настолько важно, что я хотел бы задержаться на этом аспекте и еще упомянуть об этом в процессе выступления, — всегда начинать с сомнений и колебаний; если вы уже знаете ответ, не нужно собирать никаких доказательств. Когда ответ неясен, следующим шагом является сбор фактов. Научный подход начинается с испытаний. Другая, очень значимая и плодотворная часть работы, которой не стоит пренебрегать, — это попытка установить логическое соответствие между различными предпосылками, которые у вас есть. Очень полезно попытаться связать между собой известные вам вещи и понять их соответствие. Еще более плодотворно попытаться сопоставить идеи разных направлений — это самое лучшее.

После поиска фактов вы должны привести доказательства. Существуют общие правила сбора доказательств; неправильно собирать только то, что вам нравится, надо учитывать все факты, пытаться сохранить объективный взгляд на вещи и рассматривать факты полностью, независимо от влияния любого авторитетного мнения. Авторитетное мнение

может служить намеком на истину, но не является источником информации. Пока это возможно, вы не должны обращать внимания на любое авторитетное мнение, если даже ваши наблюдения с ним не согласуются. И наконец, записи результатов следует вести в беспристрастной форме. Есть очень забавная фраза, которая всегда меня беспокоит, смысл ее таков: после того как ученый получил ответ, ему уже плевать на результаты. Это неправильная точка зрения. Незаинтересованность здесь означает, что ему не сообщили, как заставить рецензента вникнуть в идею.

И каждый из вас может оценить все возможные стороны проблемы.

Все, что мы делаем, все идеи и все методики соответствуют духу и позиции Галилея. Человек, чей день рождения мы отмечаем, сделал исключительно много, разработал, сообщил всему научному сообществу и, что более важно, продемонстрировал силу научных методов рассмотрения положения вещей. И через столетие, и через четыре сотни лет мы всегда, рано или поздно, испытываем чувство восхищения перед этим человеком, как будто он здесь, с нами, и мы показываем ему мир, о котором он нам рассказал. Конечно, вы можете меня упрекнуть, что это старомодно и не стоит говорить об этом в своей речи, но я все-таки повторяю. Представьте, что Галилей присутствует здесь, и мы должны показать ему современный мир и доставить ему удовольствие. И мы будем рассказывать ему о доказательствах, о тех методах суждения о предмете, который он разработал. И мы обратим его внимание на то, что в точности придерживаемся тех же традиций, полностью сле-

дуем им — даже в деталях, при выполнении численных измерений и используем их как одно из лучших средств, по крайней мере в физике. И что все направления науки разработаны с помощью очень разумных методик, прямо и неизменно следующих из его первоначальных идей, в том же духе, с тех же позиций. И в результате — не существует больше ведьм и привидений.

Действительно, количественный метод работает в науке очень хорошо — это почти определение сегодняшнего научного подхода; были, конечно, разработаны науки, которые волновали Галилея, — физика, механика и подобные им вещи, но те же самые методики работают в биологии, истории, геологии, антропологии и других науках. Благодаря очень схожим методикам мы очень многое узнали о прошлом человека, прошлом животных и о Земле. Не совсем завершена из-за ряда трудностей эта система в экономике, но она все-таки работает с некоторым успехом. Но есть области, где методы поддерживаются только на словах — многие так поступают для проформы. Я бы постыдился рассказывать мистеру Галилею например об общественных науках — там научные методы действительно плохо работают. Например, мой собственный опыт, как вы понимаете, предполагает изучение ужасающего количества методов образования, особенно обучения арифметике — но если вы попытаетесь выяснить, что реально известно об оптимальном способе обучения арифметике, вы обнаружите, что существует несметное множество научных работ и статистики, но все они не связаны одна с другой, смешиваются в анекдоти-

чески неконтролируемые эксперименты или очень плохо контролируемые эксперименты, а в результате нет почти никакой информации.

А теперь наконец я хотел бы показать Галилею наш мир, я должен показать ему нечто с большой долей стыда. Если отвлечься от науки и посмотреть на мир вокруг нас, мы обнаружим весьма печальное зрелище: среда, в которой мы живем, активно ненаучна. Галилео мог бы сказать: «Я обнаружил, что Юпитер представляет шар с несколькими лунами и что нет Бога на небесах. Скажите, что случилось с астрологами?» А они по-прежнему процветают — публикуют свои прогнозы в ежедневных газетах, по крайней мере в Соединенных Штатах. Почему у нас еще есть астрологи? Почему кто-то может написать книгу вроде *Worlds in Collision* («Миры в столкновении»), фамилия автора начинается на «В», это, кажется, русская фамилия — Вининковский¹? И почему она стала популярной? Что это за чушь о Мэри Броди или что-то в этом роде? Не понимаю — это просто дурацкая чушь. Некоторая доля чуши всегда существует. Есть бесконечное количество глупости, потому что мы идем по другому пути — общество активно и интенсивно ненаучно. Можно поговорить о телепатии — но она сегодня вымирает. Повсюду существует лечение внушением. Продолжается чудо исцеления у Лурдес. Может ли оказаться истинной наукой астрология? Может ли оказать-

¹ Это Иммануил Великовский: «*Worlds in Collision*», Macmillan Publishers, New York, 1950. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

ся правдой, что вам лучше пойти к дантисту в тот день, когда Марс находится под прямым углом к Венере, а не в какой-то другой? Может ли оказаться правдой, что вас исцелит чудо Лурдес? Но если это правда, она подлежит исследованию. Почему? Для совершенствования. Если это правда и звезды действительно влияют на жизнь человека, то можно создать более мощную систему путем статистического исследования, путем научной, более тщательной оценки объективных фактов. Если процесс исцеления работает у Лурдес, то возникает вопрос, как далеко от места, где совершается чудо, может находиться больной человек? Или чудо срабатывает так хорошо, когда люди располагаются в соседней комнате, вблизи того места, где совершается чудо? Или это связано со святыми, которых недавно сотворили в Соединенных Штатах: один святой лечил лейкемию практически опосредованно — с помощью ленты, которой он касался простыни больного (лентой перед этим дотрагивались до реликвий святого) — эти ленты усиливали способ лечения лейкемии. Возникает вопрос: действительно ли симптомы болезни постепенно уменьшаются? Вы можете смеяться, но если вы верите в реальность исцеления, вы несете ответственность за исследование этого явления, за улучшение его эффективности и за удовлетворительный результат вместо мошенничества. Например, может оказаться, что после ста прикосновений больше ничего не происходит. Возможно также, что результаты этого исследования приведут к иным следствиям, а именно — к полному отсутствию чего бы то ни было.

Я уже упоминал, что наряду с другими меня волнует вопрос: что, не стыдясь, могут обсуждать теологи в наши времена? В своих дискуссиях они касаются многих проблем, о которых не стыдно говорить, но некоторые вопросы, которые поднимаются на конференциях по религии, и принимаемые по ним решения представляются нелепыми в современном мире. Я хотел бы объяснить, что одна из причин, почему этим надо заниматься, — невозможно даже вообразить, насколько глубокие изменения последуют в нашем мировоззрении, если только один пример, одно из этих положений будет реально работать. Дело в том, что, если вам удастся установить истинность пусть не всей концепции астрологии, а хотя бы одного из небольших ее аспектов, это может оказать фантастическое воздействие на наше понимание мира. И причины, по которым мы подсмеиваемся над этим, состоят в том, что мы слишком самонадеянны в нашем взгляде на мир, пребывая в убеждении, что идеи астрологов не вносят никакого вклада. С другой стороны, почему бы нам не освободиться от этого? Прихожу к мысли, что лучше покончить с этими вопросами сейчас же, поскольку наука, как я уже говорил, не совместима с астрологией.

Теперь мне хотелось бы упомянуть другой аспект, несколько более сомнительный, но я все-таки верю, что в оценке доказательств, информации о фактах и прочем существует определенная ответственность ученых, которую они чувствуют по отношению друг к другу и которую можно рассматривать как разновидность морали. В чем разница между верным и неверным способами сообщения результатов? В объ-

ективности и беспристрастности — чтобы другой человек был способен точно понять, о чем вы говорите, и по возможности не подгонять факты под желанный результат. Очень важно, чтобы вопросы, которые помогают нам понять друг друга, разрабатывались не в угоду своим собственным интересам, а служили бы общему развитию идей. И это, если хотите, есть некая форма научной морали. Я отчаянно верю, что эта мораль будет распространяться все шире; идея научной морали очень похожа на пропаганду, а «пропаганда» — нехорошее слово. Описание страны, сделанное жителями другой страны, должно быть сделано в беспристрастной форме. Это будет чудесно — более сильно, чем чудо у Лурдес! Возьмите рекламу — это пример аморального с точки зрения науки описания продукта. Аморальная сторона так широко распространена, что человек пользуется ею в обычной жизни, даже не задумываясь, что это плохо. Думаю, что одна из важнейших задач ученых — объяснять и побуждать людей к постоянным умственным усилиям. Привычка получать информацию только в той форме, которая кажется интересной и занимательной, весьма опасна.

Существуют и другие области жизни, в которых научные методы достаточно ценны; они очевидны, но их все труднее обсуждать — я имею в виду принятие решений. Я не утверждаю, что это надо делать только научными методами; в Соединенных Штатах например компания «Rand» занимается арифметическими вычислениями. Это напоминает мне время студенчества в колледже, когда мы решили обсуждать женщин, используя электрическую терми-

нологию — импеданс, магнитное сопротивление, электрическое сопротивление, нам казалось, что так мы глубже вникнем в науку привлечения внимания женского пола. И другая ситуация, повергающая современного ученого в ужас — это технология выборов лидера в каждой стране. Сегодня например в Соединенных Штатах обе политические партии решили нанимать агентов по связям с общественностью, то есть агентов по рекламе, которые обучены дозировать правду и ложь для раскручивания продукта. Идея не нова. Возможно, они просто обсуждают обстановку и не выдвигают лозунгов. (Я уверен, что каждая партия сейчас имеет миллионные банковские счета и оперирует весьма хитроумными лозунгами.) Но я не могу обобщать всю их деятельность.

Я стараюсь лишний раз подчеркнуть, что наука тут неприменима. Это странно звучит, и я хотел бы снова вернуться к этому вопросу. Конечно, наука применима даже для объяснения астрологии; если осмысливать мир, исходя из результатов наших исследований, мы не сможем понять, как сюда вписываются астрологические явления. И следовательно, наука не является лишней, ненужной. Однако для людей, которые верят в астрологию, это не имеет значения, поскольку ученые не снисходят до разумной аргументации и споров с ними. А людей, верящих в возможность исцеления, в свою очередь, не беспокоит наука, поскольку никто им не приводит контраргументов. Вы не будете изучать науку, если не чувствуете в ней надобности. Можно пренебречь такими делами, если они требуют столь сильного умственного напряжения. Почему можно пренебречь

наукой? Потому что мы позволяем это. Нам следует набрасываться, критиковать те вещи, которые вызывают недоверие ученых. Не набрасываться методом «отсечения голов», а критиковать в форме дискуссии. Мы должны добиваться, чтобы в головах людей сформировалась более согласованная картина мира, чтобы они не позволяли себе роскоши расчленить свой ум на четыре или даже на две части — так что, с одной стороны, они верят в это, а с другой — верят в то, но не могут сопоставить обе точки зрения. Потому что мы изучали, что при попытке сопоставить точки зрения, существующие в наших головах, и сравнить одну с другой мы достигаем некоторого прогресса в осмыслении и оценке, где мы есть и что мы есть. И я полагаю, что наука так и будет невосребованной, если мы будем сидеть и ждать, не зададут ли нам вопросы или не пригласят ли сделать доклад по теории Эйнштейна тем, кто не понимает даже механику Ньютона. Правда, нас никогда не приглашают критиковать чудо исцеления или астрологию с точки зрения современной науки.

Думаю, мы должны главным образом писать статьи. К чему это приведет? Человек, верящий в астрологию, узнает немного об астрономии. Человек, верящий в чудесное исцеление, немного узнает о медицине, о биологии благодаря аргументации, появившейся там и здесь. Иначе говоря, обращение к науке станет для него необходимостью. Я где-то прочитал высказывание, что наука истинна до тех пор, пока не затрагивает религию, и это ключ к пониманию проблемы. Пока она не затрагивает религию — тогда к науке не следует прислушиваться,

и никто не должен ничего изучать. То есть ее можно исключить из современного общества, за исключением, возможно, ее приложений, и, следовательно, изолировать. Поэтому мы так жестко боремся за попытки объяснить суть вещей людям, у которых нет особых причин знать об этом. Но если они хотят защищать свою точку зрения, они должны видеть слабые стороны вашей точки зрения. Поэтому я полагаю — может быть, не совсем корректно, а возможно, и неправильно — мы чересчур вежливы. В прошлом веке шли споры по этим вопросам. Церковь понимала, что взгляды Галилея идут с ней вразрез. Церковь сегодня не чувствует, что научные взгляды ей противоречат. Никто об этом не беспокоится. Никто не критикует. Думаю, никто сейчас не пишет статей, вскрывающих несоответствия теологического и научного взглядов, к которым прислушивались бы различные люди.

Теперь о другом вопросе, последнем из тех, что я хотел бы затронуть, — я считаю его наиболее важным и наиболее серьезным. Я имею в виду вопрос неопределенности и сомнений в науке. Ученый никогда не бывает уверен. Мы все это знаем. Мы знаем, что все наши утверждения приблизительны с различной степенью определенности; что, когда сделано утверждение, вопрос не в том, правильно оно или ложно, а скорее в том, с какой вероятностью оно должно быть правильным или ложным. «Существует ли Бог?» «Когда вводить вопросительную форму, насколько она вероятна?» Это приводит к пугающей трансформации религиозной точки зрения, поэтому-то религиозная точка зрения ненаучна. Мы долж-

ны обсудить каждый вопрос в рамках позволенных нам неопределенностей. По мере увеличения доказательств растет вероятность того, что, возможно, идея правильна или наоборот. Но никогда нет абсолютной определенности, каким путем идти. Теперь мы поняли, что сомнения играют первостепенную роль в движении вперед. Если у нас абсолютно не осталось сомнений — значит, мы не продвинулись вперед и ничему не научились. Не сформулировав вопроса, мы ничему не научились. А вопрос предполагает сомнения. Человек ищет достоверный факт. Но достоверности не существует. Люди приходят в ужас: как можно *жить, не зная?* Здесь нет ничего странного. В сущности, вы только думаете, что знаете. Большинство ваших действий основано на неполном знании — вы действительно не знаете, что все это значит и какова конечная цель мироздания. Значит, можно жить и не знать.

Свобода сомнения, абсолютно необходимая для развития наук, и родилась в борьбе с законной властью, которая в свое время решала все проблемы, — а именно с церковью. Галилей есть символ этой борьбы — один из наиболее выдающихся борцов. И хотя самого Галилея заставили отречься, никто не воспринял его покаяние всерьез. Не думаю, что все мы, следуя Галилею, должны отречься. По сути, мы считаем отречение некоторым безрассудством — церковь настаивает на этом, и мы станем свидетелями отречения снова и снова; мы сочувствуем Галилею, мы сочувствуем музыкантам и художникам из Советского Союза, вынужденным отречься — к счастью, в последнее время их ста-

ло меньше. Отречение — бессмысленная процедура, даже если она разумно организована. Людям со стороны совершенно ясно, что это ничего не значит и что отречение Галилео не говорит ни о чем, кроме того, что он, возможно, был стар, а церковь очень сильна. Для данной дискуссии несущественно, что он был прав, несомненно одно: его пытались принудить к отречению.

Нам становится грустно, когда мы смотрим на мир и видим, что в сравнении с потенциальными возможностями человечества мы добились весьма скромных успехов. Людям из прошлого только в страшном сне могло присниться их будущее. Сегодня, когда это будущее материализовалось, оно во многих случаях превзошло все сны, но во многих направлениях наши сегодняшние мечты очень близки к мечтам людей из прошлого. В прошлом существовал энтузиазм в связи с тем или иным методом решения проблемы. Одни хотели сделать образование универсальным и чтобы все мужчины могли стать Вольтерами, и тогда бы мы смогли во всем разобраться. Универсальное образование, возможно, хорошая вещь, но учить можно в равной степени и хорошо, и плохо — можно учить как ложным вещам, так и истинным. Взаимодействие между народами, когда оно развивается благодаря техническим открытиям в науке, безусловно, улучшает отношения между ними. Правда, все зависит от характера общения. Можно общаться честно и доброжелательно, а можно лгать, обманывать и угрожать. Большие надежды связывают с прикладными науками, они должны освободить человека от физической борьбы

за выживание, особенно в медицине, где дела обстоят довольно хорошо. Пока мы с вами разговариваем, ученые работают в своих лабораториях, пытаются разработать противоядие от неизлечимых болезней. Возможно, сегодня экономическое насыщение является решением проблемы. Я имею в виду, что у всех будет достаточно дел. Это не означает, конечно, что мы не будем пытаться что-то предпринимать. Из того, что я сказал, не следует, что мы не должны получать образование, не должны взаимодействовать или не должны создавать экономического насыщения. Решение как самой этой проблемы, так и всех проблем кроется в *сомнении*. Поскольку в тех местах, где мы имеем определенную степень экономической удовлетворенности, мы обрастаем целой кучей новых проблем или, возможно, старых, но уже под другим углом.

Итак, сегодня мы не слишком далеко ушли вперед, неясно даже, что из того, что мы сделали за годы развития, хорошо и разумно. Философы во все времена пытались найти секрет бытия. Если бы они нашли реальный смысл жизни, то все человеческие усилия, все эти поразительные потенциальные возможности человечества можно было бы направить в правильное русло, и мы с большим успехом шагали бы вперед. На вопрос о смысле и значении целого мира, бытия, человеческой жизни, всего человечества и прочем в том же роде отвечали много раз и многие люди. К сожалению, все эти ответы очень разные; люди, отвечающие на вопрос определенным образом, смотрят на тех, кто дает резко отличающийся ответ, с опасением и страхом. Со страхом,

поскольку они видят, сколько ужасных вещей происходит вокруг. Это действительно так — существует фантастический страх перед огромными потенциальными возможностями человечества, — но именно наши опасения вселяют надежду, что, если мы сможем двигаться в правильном направлении, дела наши пойдут куда лучше.

Каково же значение мира в целом? Мы не знаем, в чем заключается смысл бытия. Мы говорим на основании изучения совокупности предшествующих взглядов, что не знаем смысла бытия; но утверждая это, мы, возможно, только нащупали путь — если мы оставим только то, что ведет к прогрессу, мы, таким образом, оставим открытые возможности для альтернативных вариантов. Мы не испытываем энтузиазма перед фактом, знанием, абсолютной истиной, мы всегда не уверены — мы рискуем, делаем ставки. Англичане называют наработки своего правительства в этом направлении «неизвестно, как довести дело до конца», и хотя это звучит довольно глупо, такой путь является самым научным способом движения к прогрессу. Выбор правильного ответа не затрагивает научных методов. Для движения к прогрессу надо только приоткрыть дверь неизвестному — только приоткрыть. Мы находимся лишь в начале развития человечества; для развития человеческого ума, интеллектуальной жизни у нас есть в запасе годы и годы. Наша ответственность — не принимать поспешных решений, касающихся глобальных проблем, не делать категоричных заявлений. Иначе мы будем ограничены пределами нашего воображения, ограниченного, в свою очередь, науч-

ным знанием на данный момент времени. Мы только можем делать то, что считаем необходимым делать сегодня. То есть всегда нужно оставлять место сомнениям, дискуссиям и продолжать движение по пути, сходному с научным. Поэтому я верю — и нам надо надеяться, хотя это и не вопрос сегодняшнего дня, — что придет время, когда люди полностью осознают, что сила власти ограничена, что правительства не уполномочены решать вопрос, ценна научная теория или нет, просто нелепо с их стороны даже пытаться делать это. Они не должны присваивать себе право делать выбор между различными версиями описания истории, экономической теории или философии. Только на этом пути можно создать реальные возможности в будущем для наивысшего развития человеческого рода.

КАК МНОГО МЕСТА В ГЛУБИНЕ

В своей знаменитой речи, адресованной Американскому физическому обществу и прочитанной Фейнманом 29 декабря 1959 года в Калтехе, «отец нанотехнологий» говорит о будущем миниатюризации, на десятилетия опередив свое время: как записать всю Британскую энциклопедию на булавочной головке; как радикально уменьшить размеры биологических объектов и объектов неживой природы; как решить проблемы уменьшения размеров смазочных машин, сделав их меньше точки в конце этого предложения. Фейнман заключает свое знаменитое пари, побуждая молодых ученых сконструировать работающий мотор размером не больше 1/64 дюйма.

Приглашение в новую область физики

Думаю, физики-экспериментаторы должны чаще с завистью вспоминать о таких людях, как Камерлинг-Оннес¹. Этот человек открыл целую область физики — физику низких температур, бездонную область, в которую ученый может погружаться все глуб-

¹Хейке Камерлинг-Оннес (1853–1926) — лауреат Нобелевской премии по физике 1913 года за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к получению жидкого гелия. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

же и глубже. Такой ученый — настоящий лидер, обладающий на определенный срок монополией в рискованных научных изысканиях. Перси Бриджмен¹, открывший способ получения высоких давлений, открыл другую новую область и сделал в ней ряд важных работ, предложив круг исследований в этом направлении. Создание наиболее глубокого вакуума — уже продолжение подобных исследований.

Я хотел бы рассказать еще об одной области физики — физике малых масштабов, в которой в принципе можно создать несметное количество вещей. Эта область не совсем похожа на другие, в ней мы не будем много говорить о фундаментальной физике (в том смысле, что мы не задаем вопроса: «Что такое странная частица?»), она больше похожа на физику твердого тела и расскажет нам много интересного о своеобразных явлениях, которые происходят в сложных системах. Более того, ее важнейшей особенностью является гигантское количество технических приложений.

То, о чем я собираюсь говорить, — это проблема манипулирования и контроля системами малого масштаба.

Стоит мне упомянуть об этом, как все заговаривают о миниатюризации — насколько далеко в этом направлении можно продвинуться в настоящий момент. Мне рассказывают об электро-

¹ Перси Бриджмен (1882–1961) — лауреат Нобелевской премии по физике 1946 года за изобретение аппарата для создания экстремально высоких давлений и за последующие работы в физике высоких давлений. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

моторах, имеющих размеры наперстка на мизинце. Мне рассказывают, что на рынке существуют приборы, с помощью которых можно записать «Отче наш» на булавочной головке. Ничего подобного нет, это самый примитивный, искаженный шаг в направлении, о котором я намерен рассказать. Загляните в глубину материи — и вам откроется ошеломляюще малый мир. В 2000-м, когда люди оглянутся назад, они будут удивлены, почему до 1960 года никто не начал всерьез заниматься этим направлением.

Почему нельзя записать все 24 тома Британской энциклопедии на булавочной головке?

Давайте посмотрим, как глубоко мы можем продвинуться. Диаметр булавочной головки примерно 1,6 мм. Если увеличить ее до 25 000 диаметров, область булавочной головки будет равна области всех страниц энциклопедии. Поэтому все, что нужно сделать, — уменьшить размер написанного в энциклопедии в 25 000 раз. Можно ли это сделать? Разрешающая способность глаза составляет около 0,21 мм — это грубая оценка диаметра одной маленькой точки на мелкой полутоновой репродукции в энциклопедии. Когда вы уменьшите ее до микроскопического размера в 25 000 раз, она еще будет составлять в диаметре 80 ангстрем ($1 \text{ ангстрем} = 10^{-8} \text{ см}$) — 32 атома в обычном металле. Иначе говоря, каждая из таких точек будет содержать область из 1000 атомов. То есть каждую точку мож-

но подогнать под размер, требуемый фототипией, и даже вопроса не возникает, достаточно ли места на булавочной головке, чтобы разместить всю Британскую энциклопедию.

Более того, ее можно прочесть, если она записана. Представьте, что она записана рельефными металлическими буквами; иными словами, черную краску в энциклопедии мы обозначаем рельефными металлическими буквами, размер которых составляет $1/25\,000$ от обычного размера. Как же мы ее прочитаем?

Если что-то записать таким способом, можно прочитать текст, используя общепринятые сегодня методики. (Несомненно, можно найти для чтения способы и получше, но я придерживаюсь консервативной точки зрения и буду использовать только известные сегодня методики.) Мы запрессуем металл в пластичный материал и поместим его в форму, затем аккуратно снимем пластик, выпарим кремнезем в пластике, чтобы получилась очень тонкая пленка, отделим ее, рассеивая золото, так что все маленькие буквы отчетливо проявятся, затем удалим пластик из кремниевой пленки и посмотрим сквозь пленку с помощью электронного микроскопа!

Если все уменьшится в 25 000 раз в форме рельефных букв на булавке, нам будет легко это прочитать. Более того, мы легко сделаем копии образца — для этого нужно снова запрессовать такую же металлическую пластину в пластик, и мы получим другую копию.

Как записать малое?

Следующий вопрос: как же мы это запишем? Для этого на сегодняшний день не существует стандартной методики. Давайте поспорим, что это не так трудно, как кажется на первый взгляд. Мы можем перевернуть линзы электронного микроскопа в обратном направлении, чтобы получить уменьшение, равно как в прямом направлении получаем увеличение. Ионный источник, направленный через перевернутые линзы микроскопа, может фокусироваться в очень маленькое пятнышко. Мы можем записывать с помощью этого пятнышка так же, как записываем в телевизионном электронно-лучевом осциллографе, двигаясь от края и до края строки и с настройкой, определяющей количество материала, которое должно осаждаться, когда сканируешь строки.

Этот очень медленный метод из-за ограничений пространственного заряда. Существуют более быстрые методы. Можно было бы, вероятно, организовать фотопроцесс с экраном, в котором прорезаны отверстия в виде букв. Затем мы могли бы высекать электрическую дугу за отверстиями и направлять ионы металла через отверстия; а потом мы снова использовали бы нашу систему линз и получили маленькое изображение, образованное ионами, которые будут осаждать металл на булавке.

Может быть, проще другой метод (хотя я не уверен, что он сработает): пропускаем свет через оптический микроскоп в обратном направлении, фокусируем его на очень маленьком фотоэлектрическом

экране. Электроны выбиваются с экрана в тех местах, которые были освещены. Эти электроны фокусируются по размеру линзами электронного микроскопа, сталкиваясь непосредственно с поверхностью металла. Будет ли такой пучок вытравливать металл, если у него достаточный пробег? Я не знаю. Если метод не сработает для поверхности металла, должно быть, можно найти какую-нибудь поверхность, с помощью которой удалось бы накрыть булавку таким образом, чтобы в местах бомбардировки электронами произошли изменения, которые мы могли бы позже опознать.

Проблемы интенсивности в этих устройствах не существует — когда вы прибегаете к увеличению, вы должны взять несколько электронов и распространить их по большей поверхности экрана, а наша задача прямо противоположная. Полученный свет концентрируется в очень малой области, и поэтому его интенсивность велика. Несколько электронов, которые выбиваются с фотоэлектрического экрана, фокусируются до размера крошечной области, и потому пучок становится очень интенсивным. Я не понимаю, почему этого пока нельзя сделать!

Речь шла о Британской энциклопедии на булавочной головке, но давайте рассмотрим все книги мира. Библиотека Конгресса насчитывает приблизительно 9 миллионов томов; библиотека Британского музея — 5 миллионов томов, столько же в Национальной библиотеке Франции. Очевидно, есть дубликаты; давайте условимся, что в мире существует 24 миллиона интересующих нас томов.

Что произойдет, если напечатать их все в том масштабе, о котором я говорю? Сколько места они займут? Они, безусловно, займут площадь около миллиона булабочных головок, поскольку вместо 24 томов энциклопедии теперь мы имеем 24 миллиона томов. Миллион булабочных головок можно разложить в виде квадрата, по тысяче с каждой стороны, их площадь составит около 2,5 квадратных метров. Кстати, кремниевая копия с тонкой, как бумага, обратной стороной пластика, с помощью которой мы делали копии, со всей информацией, уместится на площади приблизительно в 35 страниц энциклопедии. Это около половины страниц журнала, который я держу в руках. Всю информацию, которую человечество записало в книгах, можно перенести в руках в виде брошюры, причем не в зашифрованном виде, а в виде простого воспроизведения текстов с картинками, гравюрами и всем прочим — и все это на малом масштабе без потери разрешения!

Что скажет наша библиотекарь в Калтехе, бегающая из одного здания в другое, если я сообщу ей, что через десять лет вся информация, которую она с таким трудом стремится сохранить, — все 120 000 томов, занимающих место от пола до потолка, с ящиками картотеки, хранилищами, заполненными старыми книгами, — все это можно будет уместить на одной библиотечной карточке! Если бы, например, в университете Бразилии сгорела библиотека, мы сняли бы копию каждой книги из нашей библиотеки, сделав их за несколько часов с помощью контрольной печатной формы, и послали бы им в кон-

верте, не больше и не тяжелее, чем письмо обычной авиапочты.

Теперь о названии лекции «Как много места в глубине» (или более развернуто: «Как много возможностей в глубинах материи») — заметьте, это не просто «возможность погрузиться в глубины». Пока я продемонстрировал только, что принципиальная возможность существует — вы на практике можете уменьшить размер вещей. Теперь я хочу показать, что существует много возможностей. Я не буду обсуждать, как мы собираемся это сделать — только то, что в принципе можно сделать; иначе говоря, что возможно в соответствии с законами физики. Я не изобретаю антигравитацию, которая, может быть, допустима, если законы физики не такие, какими мы их представляем. Я рассказываю о том, что допустимо, если законы физики такие, какими мы их представляем. Мы не переделываем их просто потому, что не собираемся действовать в обход них.

Информация на носителях малого масштаба

Предположим, что вместо попыток воспроизвести картинку и всю информацию непосредственно в существующей форме мы записываем только информационное содержимое, представляя различные буквы в коде точек и тире или еще как-нибудь в том же роде. Каждая буква представляется шестью или семью битами информации; то есть вам нужно только около шести или семи точек или тире для каждой

буквы. Теперь, вместо того чтобы записывать все, как я делал раньше, на поверхности булавочной головки, я собираюсь использовать также внутреннюю часть материала.

Давайте представим точку маленьким пятнышком одного металла, а следующее тире — соседним пятнышком другого металла и так далее. Предположим, оставаясь консерваторами, что для бита информации требуется маленький кубик из атомов $5 \times 5 \times 5$ — всего 125 атомов. Возможно, нам нужна сотня или некоторое нечетное число атомов, чтобы убедиться, что информация не потеряется из-за диффузии или некоторого другого процесса.

Я оценил, сколько букв в энциклопедии, и предположил, что каждая из 24 миллионов книг такая же толстая, как энциклопедия, и вычислил, сколько в них содержится битов информации (10^{15}). Для каждого бита я выделил 100 атомов. И оказалось, что всю информацию, которую человек тщательно накапливал во всех книгах мира, можно записать в такой форме в кубике материала с ребром 0,127 мм — это крошечная пылинка, попавшая в глаз, от которой мы стараемся избавиться. Итак, существует *множество* возможностей в глубине материи! Только не рассказывайте мне о микрофильмах!

Тот факт, что гигантский объем информации можно хранить в чрезвычайно малом пространстве, хорошо известен биологам; так решилась старая головоломка — мы отчетливо поняли, как в крошечной клетке хранится информация об организме сложнейшего создания — человека. Вся эта информация — почему у вас карие глаза, почему вы вообще

мыслите, почему у эмбриона сначала развивается челюстная кость с маленьким отверстием сбоку, через которое позже прорастают нервы, — вся эта информация содержится в очень маленькой части клетки в форме длинной цепочки молекул ДНК, в которой приблизительно 50 атомов используются для одного бита информации о клетке.

Электронные микроскопы с лучшим разрешением

Если я все записал в закодированной форме, с битом, составляющим $5 \times 5 \times 5$ атомов, то возникает вопрос: как это можно сегодня прочитать? Электронный микроскоп недостаточно хорош — при тщательном обращении с огромными усилиями он может разрешить только длину в 10 ангстрем. Я хотел бы в ходе своего рассказа об этих вещичках малого масштаба убедить вас, как важно улучшить разрешающую способность электронного микроскопа в сотню раз. Это не так уж невозможно, это не противоречит законам дифракции электронов. Длина волны электрона в таком микроскопе составляет всего $1/20$ ангстрема. Поэтому он позволяет видеть отдельные атомы. Что произойдет, если мы четко увидим каждый отдельный атом?

У нас есть друзья в других областях — в биологии, например. Мы, физики, часто спрашиваем у них: «Знаете, коллеги, по какой причине вы достигли весьма скромных успехов?» (В действительности я не знаю другой области, кроме биологии, где

прогресс был бы более ощутим.) «Вы должны брать с нас пример и чаще пользоваться математикой». Они могли бы возразить, но тактично и вежливо отмахиваются, поэтому за них отвечаю я: «Чтобы добиться быстрого прогресса, вы должны сделать для нас электронный микроскоп с разрешением в 100 раз лучше».

Каковы наиболее важные и фундаментальные проблемы биологии на сегодняшний день? Я приблизительно перечислю первоочередные вопросы. Какова последовательность оснований в молекуле ДНК? Что происходит при мутации? Как последовательность оснований в молекуле ДНК связана с последовательностью аминокислот в протеине? Какова структура РНК — она одонитевая или двухнитевая и как она связана с последовательностью оснований ДНК? Какова структура микросом? Как синтезируются протеины? Откуда берется молекула РНК? Как она расположена? Где расположены протеины? Куда входят аминокислоты? При фотосинтезе — где находится хлорофилл; как он располагается; где находятся каротиноиды, связанные с этим процессом? Что представляет система преобразования света в химическую энергию?

Очень легко ответить на многие из этих фундаментальных биологических вопросов; стоит только взглянуть на предмет исследования! И вы увидите порядок чередования оснований в цепочке; вы увидите структуру микросомы. К сожалению, современные микроскопы видят слишком грубые, ограниченные масштабы. Сделайте микроскоп в сто раз более мощным, и многие проблемы биологов уйдут сами

собой. Я, конечно, преувеличиваю, но биологи будут очень благодарны — и они предпочтут вместо критики использовать больше математики.

Сегодня теория химических процессов основывается на теоретической физике. В том смысле, что физика создает фундамент химии. Но химия также проводит свой анализ. Если у вас в руках странная субстанция и вы хотите знать, что это, вы проводите длинный и сложный процесс химического анализа. Сегодня можно анализировать почти все, моя идея немного запоздала. Но если физики захотят, они могут также подкопаться под химиков в вопросах химического анализа. Очень легко провести анализ любого химического вещества; надо только посмотреть на него и увидеть, где находятся атомы. Единственную неприятность доставит электронный микроскоп — он в сто раз хуже, чем надо. (Потом я хотел бы задать вопрос: могут ли физики сделать что-нибудь с третьей проблемой химии — а именно с синтезом? Есть ли физический метод синтеза любой химической субстанции?)

Причина того, что электронный микроскоп так плох, заключается в том, что фокусное расстояние линз составляет только $1/1000$ часть и у вас нет апертуры достаточного размера. Я знаю теоремы, в которых доказывается, что это невозможно при использовании линз в стационарных полях с аксиальной симметрией, которые дают фокусное расстояние больше того-то и того-то; и поэтому в настоящий момент разрешающая способность микроскопа достигает теоретического максимума. Однако в каждой

теореме есть допущения. Почему поле должно быть симметричным? Я бросаю вызов: нет ли способа сделать электронный микроскоп более мощным?

Удивительная биологическая система

Биологический пример записи информации на малых масштабах заставил меня поразмыслить об открывающихся возможностях. Биология не просто записывает информацию; она производит с ней действия. Биологическая система может быть невероятно малой. Большинство клеток крошечные, но очень активные; они образуют различные субстанции, они повсюду, они ерзают, и извиваются, и проделывают всякие удивительные вещи — и все в очень малом пространстве. Кроме этого, они сохраняют информацию. Рассмотрим вероятность того, что мы способны сделать вещь настолько малой, насколько хотим — мы можем изготовить объект, который на этом уровне маневрирует!

Создание объектов очень малого размера может быть обусловлено даже экономическими причинами. Позвольте напомнить вам о некоторых проблемах компьютеров. В компьютерах мы храним гигантский объем информации. Я упоминал раньше о долговременной форме записи, где я записывал все с помощью распределения металла по поверхности. Для компьютеров значительно более интересен способ записи, стирания и новой записи чего-нибудь еще. (Обычно мы не хотим тратить попусту материал, на котором уже была произведена запись. Но если мы запишем все это в очень малом простран-

стве, не будет никакой разницы — после прочтения запись можно выбросить. Ваши затраты на материал ничтожно малы.)

Миниатюризация компьютера

Не знаю, как практически сделать это в малом масштабе, но я знаю, что компьютеры слишком велики — они занимают целые комнаты. Почему бы нам не сделать их очень маленькими, сделать маленькие провода, маленькие элементы — все в миниатюре? Например, проводки должны состоять из 10 или 100 атомов в диаметре, схемы — несколько тысяч ангстрем в поперечнике. Все, кто анализировал логическую теорию компьютеров, доходили до очень интересных возможностей компьютеров — насколько они усложнятся при изменении на несколько порядков их размеров. Если бы они имели в миллион раз больше элементов, они могли бы принимать решения. У них было бы время рассчитать оптимальный способ выполнения предлагаемой задачи. Они могли бы исходя из собственного опыта выбрать лучшую методику анализа, а не ту, которую мы им задаем. И во многих других отношениях они обладали бы качественно новыми свойствами.

Когда я вижу лицо знакомого человека, я сразу понимаю, что видел его раньше. (Правда, мои друзья скажут, что я выбрал неудачный пример для иллюстрации. Во всяком случае, я способен отличить человека от яблока.) Пока не существует машины, которая с той же скоростью по фотографии

лица сможет распознать, что это именно человек; и еще в меньшей степени — что это тот самый человек, которого вы уже показывали, если только это не та же картинка. Если изменилось лицо или я ближе или дальше от него, если изменилось освещение — я в любом случае его различу. Маленький компьютер, который я ношу в голове, с легкостью способен это сделать. Число элементов в моей черепной коробке огромно по сравнению с числом элементов в наших «удивительных» компьютерах. А наши механические компьютеры такие большие, а элементы в них микроскопические. Я хочу сделать нечто субмикроскопическое.

Если мы хотим сделать компьютер, который обладает всеми этими удивительными качественными сверхвозможностями, то его размер, возможно, будет равен Пентагону. В этом кроется ряд неудобств. Во-первых, он потребует слишком много материала; мировых запасов германия может не хватить для всех транзисторов системы гигантских размеров. Могут возникнуть проблемы и с образованием тепла, и потребляемой мощностью, а администрация долины Теннесси, например, будет нуждаться в запуске такого компьютера. Возникнут трудности и более практического свойства — компьютер будет ограничен некоторой скоростью. Из-за его больших размеров для перемещения информации из одного места в другое потребуется конечное время. Информация не может перемещаться со скоростью, превышающей скорость света, поэтому, если мы хотим увеличить быстродействие компьютера, сделать его более совершенным, мы будем вынуждены уменьшать его размеры.

Но существует масса возможностей сделать его меньше. Я не вижу в физических законах ничего такого, что запрещало бы резко уменьшить элементы компьютера. Фактически это приведет к ряду преимуществ.

Миниатюризация путем выпаривания

Как можно сделать такое устройство? Какой процесс изготовления использовать? Одной из возможностей записи с помощью определенного выпаривания атомов могло бы стать выпаривание материала и следующего за ним изоляционного слоя. В следующем пласте выпариваем другое место провода, другой изоляционный слой и так далее. То есть вы просто выпариваете до тех пор, пока не останется блок материала, который имеет элементы — катушки, конденсаторы и прочее, причем исключительно тонких размеров.

Но я хотел бы развлечь вас и обсудить, что существуют и другие возможности. Почему бы не делать маленькие компьютеры подобно тому, как делают большие? Почему бы не сверлить отверстия, разрезать, паять, штамповать, формовать различные детали — все на исключительно малом уровне? Каковы ограничения на малый размер детали, когда вы не сможете ее больше формовать? Сколько раз, пытаясь починить что-нибудь безнадежно миниатюрное вроде наручных часиков вашей жены, вы говорили себе: «Проще натаскать блоху для этой работы!» Предлагаю для такой работы натаскать блоху, чтобы она натаскала малютку-клеща.

Существует ли возможность сделать маленькие, но подвижные машины? Они могут быть полезными или бесполезными, но их изготовление, безусловно, выглядит забавно.

Рассмотрим любую машину, например автомобиль, и зададимся вопросом о проблеме изготовления аналогичной крошечной машинки. Предположим, что в конкретном дизайне автомобиля нам нужна определенная точность деталей, скажем, нам нужна точность 0,01 мм. Если детали не требуют большой точности, например для цилиндра и тому подобных простых форм, работать с ними одно удовольствие. Но если я делаю слишком маленькую вещь, меня должны заботить атомные размеры; я не могу составить круг из «мячиков», если круг слишком мал. Если я допущу ошибку, соответствующую 0,01 мм, что соответствует ошибке в 10 атомов, выходит, я смогу уменьшить размеры автомобиля в 4000 раз, приблизительно до 1 мм в поперечнике. Очевидно, что если вы переконструируете автомобиль так, чтобы он работал со значительно большими допусками — что не так уж невозможно, — то сможете сделать устройство гораздо меньшего размера.

Интересно понять, какие особенности связаны с такими маленькими машинками. Во-первых, детали испытывают примерно одинаковые напряжения, силы эффективно проходят в области, которые вы уменьшаете, так что вес и силы инерции относительно не важны. Иначе говоря, сопротивление материала становится гораздо больше, пропорционально уменьшению масштаба. Например,

напряжение и растяжение махового колеса от центробежной силы будут одинаково пропорциональны уменьшению размера, если только скорость вращения возрастает в той же пропорции. С другой стороны, металлы, которые мы используем, имеют зернистую структуру; это особенно усложняет ситуацию на малых расстояниях из-за неоднородности материала. Пластик, стекло и другие материалы, имеющие аморфную природу, значительно более однородны, так что следует строить наши машинки из этих материалов.

Существуют проблемы, связанные с электрической частью системы, — с медными проводами и магнитными деталями. Магнитные свойства на очень малых масштабах не такие, как на больших: на малых размерах затрагивается образование доменов. Большой магнит состоит из миллионов доменов, на малых масштабах магнит может включать только один домен. Электрическое оборудование не просто уменьшается до определенного масштаба; его необходимо переконструировать. Я не вижу никаких препятствий к тому, чтобы его переконструировать и заставить работать.

Проблемы со смазкой

Смазка обладает некоторыми интересными особенностями. Эффективная вязкость масел будет повышаться пропорционально уменьшению размера (если увеличить скорость до максимально возможного значения). Если мы не слишком сильно увеличим скорость и заменим масло керо-

сином или некоторой другой жидкостью, проблема перестанет быть безнадежной. На самом деле мы можем и вовсе отказаться от смазки! У нас много дополнительных сил. Пусть подшипники работают сухими; они не нагреваются в процессе работы, поскольку из такого маленького устройства тепло уходит очень-очень быстро. Такая быстрая потеря тепла будет препятствовать взрыву бензина, поэтому невозможно внутреннее возгорание машины. При охлаждении можно использовать другие химические реакции, идущие с высвобождением энергии. Внешняя подача электроэнергии будет, вероятно, более удобной для таких маленьких машинок.

В чем состоит практическая польза таких машин? Кто знает? Конечно, маленький автомобильчик был бы полезен для миниатюрных существ, например клещей, — но я полагаю, что наше христианское милосердие не простирается столь далеко. Однако можно отметить возможность изготовления миниатюрных элементов для компьютеров на полностью автоматизированных фабриках с токарными станками и другими приборами, предназначенными для изготовления малых форм. Маленький токарный станок не может точно соответствовать такому же большому. Апеллирую к вашему воображению — найдите усовершенствования в дизайне, позволяющие получить преимущества для создания вещей малого масштаба, причем полностью автоматизированный процесс лучше всего отвечает управлению производством такого уровня.

Мой друг Альберт Р. Хиббс¹ предлагает очень интересную возможность применения приборов относительно малого масштаба. Он утверждает, что, хотя это и дикая идея, интересно было бы попробовать аппараты малых размеров в хирургии, если вы готовы проглотить хирурга. Вы помещаете механического хирурга в кровеносный сосуд, он проходит прямо в сердце и «осматривается» вокруг. (Информация должна отслеживаться.) Он обнаруживает, какой клапан поврежден, берет маленький нож и надрезает его. Другие маленькие машинки можно перманентно встраивать в тело человека, чтобы помочь правильно функционирующему органу.

Возникает интересный вопрос: как сделать такой крошечный механизм? Я оставляю его вам для размышлений. Тем не менее позвольте предложить одну фантастическую возможность. Материалами и механизмами на атомных энергетических установках нельзя управлять непосредственно, поскольку они радиоактивны. Чтобы откручивать гайки, вставлять болты и выполнять другие действия, там используется система ведущих и ведомых управляемых механических «рук-манипуляторов». Оперируя набором рычагов в безопасном месте, вы управляете «руками» в радиоактивной зоне, можете поворачивать их в нужном направлении и, таким образом, весьма точно контролировать операции.

Большая часть этих механизмов устроена достаточно просто — отдельный кабель, как веревоч-

¹ Студент, а позже коллега Фейнмана. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

ка для марионеток, проходит прямо от управляющего пульта к «рукам». Там используются также дистанционно управляемые следящие электромоторы, поэтому соединение между обеими зонами не механическое, а электрическое. При повороте рычагов вращается мотор, он меняет электрические токи в проводах, на другом конце «рука» меняет позицию.

Допустим, я хочу построить очень похожее устройство — ведущую-ведомую систему, работающую на электричестве. Я хочу, чтобы ведомые устройства были выполнены особенно тщательно современными конструкторами крупномасштабных устройств; и пусть ведомая система составляет одну четвертую масштаба «рук», которыми обычно маневрируют. У вас есть проект, с помощью которого можно делать устройства в масштабе один к четырем — маленькие дистанционные электромоторы с маленькими «руками», оперирующими маленькими гайками и болтами; они сверлят маленькие отверстия — и они в четыре раза меньше! Ага! Я построил токарный станок в четыре раза меньше, я построил всякие дополнительные средства в четыре раза меньше, и я сделал в том же уменьшенном масштабе набор «рук»! С моей точки зрения — это 1/16 размера. А потом я провел провода прямо от моей крупномасштабной системы, наверное, через трансформатор, к электромоторчикам с размером 1/16. То есть теперь я могу манипулировать «руками» с размером, уменьшенным в 16 раз.

В принципе мы добились некоторых успехов. Это весьма трудная программа — но это возможно.

Вы можете возразить, что мы продвинулись бы значительно дальше одним махом, а не уменьшая масштаб от одного до четырех. Конечно, все должно быть сконструировано очень тщательно, не нужно делать эти устройства похожими на «руки». Если вы тщательно продумали устройство, возможно, вы сумеете построить значительно лучшую систему манипулирования.

Если вы работаете через пантограф, можно получить фактор гораздо больше четырех даже за один этап. Из-за неточности отверстий и нерегулярностей конструкции нельзя работать прямо через пантограф, создавая пантографы все меньшего размера. Конец пантографа покачивается с относительно большей нерегулярностью, чем нерегулярность, с которой вы передвигаете «руки». Уменьшая масштаб, я бы обнаружил, что конец пантографа так сильно дрожит, что уже не может выполнять свои функции.

На каждой стадии необходимо улучшать точность аппаратуры. Если, например, сделать маленький токарный станок с пантографом, то его подающий винт будет двигаться нерегулярно. Мы могли бы завинтить подающий винт разрывными гайками, чтобы можно было обычным образом поворачивать винт вперед и назад в своем масштабе так же точно, как в случае обычного масштаба.

Можно изготовить плоские поверхности, шлифуя совместно три неплоские поверхности — по три пары, — и поверхности станут более плоскими, чем вначале. Таким образом, не так уж невозможно улучшить точность на малых масштабах.

Когда мы создадим подобное устройство, необходимо на каждом этапе улучшать точность временно работающего оборудования, получая точные подающие винты, проверочные плиты и все прочие материалы, которые используются для правильной работы машин на высоком уровне. Следует останавливаться на каждом уровне и проверять точность работы всей аппаратуры, прежде чем перейти к следующему уровню — очень длинная и очень сложная программа. Возможно, вы найдете более оптимальный и быстрый способ перехода к малым масштабам.

В заключение вы получите крошечный токарный станок-малютку в четыре тысячи раз меньше обычного. Но мы задумали создать огромный компьютер, а сверлим на крошечном токарном станке отверстия, чтобы создать для этого компьютера маленькие шайбы. Прикиньте, сколько таких шайб можно создать на одном крошечном станке?

Сто крошечных рук

Когда я создавал первый набор ведомых «рук» в масштабе один к четырем, я собирался сделать десять наборов. Я сделал десять наборов и соединил их проводами с первоначальными рычагами, и каждая из «рук» будет теперь выполнять параллельно точно такие же действия за одинаковое время. Теперь, когда я строю новые устройства в малом масштабе один к четырем, я изготавливаю каждую деталь в десяти копиях, то есть у меня будет в наличии сто «рук» с размером $1/16$.

Где мне размéстить миллион токарных станков? При этом мой объем много меньше, чем требуется даже для одного полномасштабного станка. Например, если я сделаю миллиард маленьких станков, каждый в масштабе $1/4000$ от масштаба обычного станка, на который уйдет масса материалов и пространства, то на миллиард маленьких станков уйдет менее 2% от материалов, требуемых для одного большого станка. Видите, затраты уменьшаются многократно. Теперь я хочу построить миллиард похожих крошечных фабрик, которые работают одновременно, сверлят отверстия, штампуют детали и прочее.

По мере уменьшения размера возникает ряд интересных проблем. Все детали не просто уменьшаются в размере пропорционально. Существует вероятность того, что материалы будут прилипать друг к другу благодаря молекулярному притяжению (Ван-дер-Ваальс¹). На практике это выглядит следующим образом: после того как вы сделали маленькую деталь и вывинтили гайку из болта, она не падает вниз, поскольку здесь несущественна гравитация; деталь трудно отделить от болта. Это напоминает движения человека с руками, испачканными патокой, пытающегося избавиться от стакана воды. Возникнут определенные проблемы такого характера, к которым следует быть готовыми при конструировании.

¹ Силы Ван-дер-Ваальса — слабые силы притяжения между атомами или молекулами. Иоханнес Дидерик Ван-дер-Ваальс (1837–1923) получил Нобелевскую премию по физике в 1910 году за работу над уравнением состояния газов и жидкостей. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

Перегруппировка атомов

Теперь я отважусь рассмотреть заключительный вопрос, самый важный для будущего — можем ли мы располагать атомы по своему усмотрению — именно *атомы* — всеми допустимыми способами? Что произойдет, если мы расположим атомы один за другим каким угодно способом (в пределах разумного, конечно; нельзя расположить их так, чтобы они были химически нестабильными)?

До сих пор мы удовлетворялись тем, что копали землю в поисках минералов. Мы их нагревали, производили всякие крупномасштабные операции, мы надеялись получить чистую субстанцию методами очистки и тому подобными действиями. Но мы всегда принимали то расположение атомов, которое нам дала природа. Мы не получали, скажем, расположения в виде «шахматной доски», с примесными атомами, расположенными точно на расстоянии 1000 ангстрем, или какого-либо другого рисунка.

Что нам делать со слоистыми структурами с правильно расположенными слоями? Каковы будут свойства материалов, если расположить атомы в том порядке, который нам нужен? Это исключительно интересно исследовать теоретически. Я не смогу увидеть точно, что произойдет, но я почти не сомневаюсь, что, научившись *контролировать* расположение предметов в малых масштабах, мы получаем огромное количество возможных свойств материи и огромное разнообразие вариантов конструирования.

Рассмотрим, например, кусок материала, в котором мы построили схемы размером 1000 или 10 000 ангстрем с маленькими индуктивными катушками и конденсаторами (или их твердотельными аналогами), расположили схемы одну за другой в большой области, поместив маленькие антенны у другого конца — целая серия схем. Например, пусть набор антенн излучает свет, как излучаются радиоволны от упорядоченной системы антенн, транслирующих радиопрограммы на Европу. То же будет происходить, если направить свет с очень высокой интенсивностью в определенном направлении. (Возможно, такой пучок не имеет особенной технической или экономической пользы.)

Я думал о некоторых проблемах создания электрических схем в малых масштабах — в них достаточно серьезной выглядит проблема сопротивления. Если построить соответствующую схему в малых масштабах, присущая ей частота увеличивается, так как с уменьшением масштаба уменьшится длина волны, однако глубина поверхностного слоя (скин-слоя) уменьшится только как корень квадратный из отношения масштабов, поэтому проблемы с сопротивлением резко возрастут. Возможно, мы сможем бороться с сопротивлением, используя сверхпроводимость, если частота не слишком велика, или найдем другие хитроумные способы.

Атомы в мире малого

Когда мы вторгаемся в мир очень-очень малого — пусть это будет цепочка из семи атомов, —

у нас возникает масса новых явлений, которые предоставляют совершенно новые возможности для дизайна. Поведение атомов на малых масштабах не имеет ничего общего с их поведением на больших размерах, поскольку они подчиняются законам квантовой механики. Когда мы «спускаемся вниз» и «заигрываем» с атомами, мы работаем с другими законами и ждем иного поведения. Мы можем создавать вещи различными способами. Можно использовать не просто электрические контуры, но и системы, содержащие квантованные уровни энергии или взаимодействие квантово-механических спинов и тому подобное. Если мы продвинемся в уменьшении размеров достаточно далеко, обнаружим, что при серийном производстве все наши устройства становятся абсолютными копиями друг друга. Нельзя построить две совершенно одинаковые большие машины. Но если высота вашей машины составляет только 100 атомов, вам нужно построить ее лишь с точностью до 0,5%, чтобы убедиться, что другие машины точно того же размера — то есть 100 атомов в высоту!

На атомном уровне мы имеем дело с новыми видами сил, возможностей и эффектов. Проблемы создания и воспроизводства новых материалов будут совершенно другими. Как я уже говорил, меня воодушевляют биологические явления, в которых химические силы используются в повторяющейся форме для создания всех видов фантастических и непонятных эффектов, например человека (один из которых — автор этих строк). Принципы физи-

ки, насколько я их вижу, не противоречат возможности маневрирования положением — атом за атомом. Мы не пытаемся здесь нарушить какой-нибудь закон; такое расположение атомов принципиально возможно, но практически не осуществлено — мы, люди, слишком большие создания!

В конце концов, можно провести химический синтез. Химик приходит к нам и говорит: «Слушайте, я хочу создать молекулу, в которой атомы расположены так-то. Сделайте мне такую молекулу». Химик делает непостижимые вещи, когда хочет сделать такую-то молекулу. Он знает, что она должна иметь форму кольца, он начинает смешивать то и это, он ее встряхивает и совершает всякие манипуляции. И в конце трудоемкого процесса он обычно добивается успеха — синтезирует то, что нужно. Между тем я получаю работающие устройства — мы создали их физическими методами, а химик будет придумывать, как синтезировать абсолютно все, что угодно — фактически бесполезные вещи.

Однако интересно, что для физика принципиально возможно синтезировать любую химическую субстанцию, которую описывает химик (по крайней мере я так думаю). Задайте очередность — и физик синтезирует ее. Как? Разложите атомы там, где говорит химик, и вы получите субстанцию. Теперь вы могли бы спросить: «Кто это должен делать и зачем?» Да, указав несколько экономических приложений, я понимаю, что у вас может возникнуть причина для веселья. Так повеселитесь немного! Давайте устроим соревнование между лабораториями. Пусть одна лаборатория сделает крошечный мотор,

который она передаст другой лаборатории, а та возвратит ее обратно с приспособлениями внутри вала первого мотора.

Конкурс высших школ

Отчасти для развлечения, а отчасти чтобы получить интересные устройства-малютки, пусть кто-нибудь, у кого есть контакт с высшими учебными заведениями, подумает о своего рода конкурсе между высшими школами. Мы даже не начали ничего предпринимать в этой области — крохотные вещи можно записывать еще более мелко, чем говорилось в этой лекции. Можно устроить конкурс между высшими школами. Высшие учебные заведения Лос-Анджелеса перешлют булавку в высшее учебное заведение Венеции, на которой написано: «Как это сделать?» Потом булавка возвратится назад и в точке над «i» будет написано: «Не так уж и трудно».

Возможно, это не побуждает вас к действию, и это сделать вас заставит только экономика. Я хотел бы предпринять что-либо в этом направлении, но не могу ничего сделать в настоящий момент, потому что почва не подготовлена. Предлагаю премию в 1000 долларов первому, кто информацию со страницы книги сможет перенести в область, уменьшенную в 25 000 раз в линейном масштабе, так чтобы ее можно было прочитать с помощью электронного микроскопа.

Хочу также предложить другую премию — если я смогу понять, как выразить все словами, так чтобы

не произошло путаницы в аргументации относительно определений — еще 1000 долларов первому, кто сделает работающий электрический мотор — вращающийся электрический мотор, которым можно управлять извне, размером в 0,25 кубического сантиметра, не считая проводов на вводе.

Не думаю, что эти премии будут очень долго ждать своих претендентов.

(В конце концов Фейнману пришлось выплатить обе премии. Это следует из обзора «Фейнман и вычислительные методики» под редакцией Энтони Хей (Perseus, Reading, MA, 1998), перепечатано с разрешения. — Примеч. ред.)

Он выплатил обе премии — первую премию менее чем через год Биллу Маклеллану, бывшему питомцу Калтеха, за миниатюрный мотор, который удовлетворял заданным спецификациям, но который вызвал разочарование Фейнмана — его конструкция не требовала новых технических достижений. Фейнман сделал обновленную версию своего доклада в 1983 году в Лаборатории реактивного движения. Он предсказал, «что с технологиями сегодняшнего дня мы сможем легко... конструировать моторы в одну сороковую размера в каждом направлении, то есть в 64 000 раз меньше, чем... Мы можем сделать за раз мотор Маклеллана и тысячи таких же».

И только почти через 26 лет он выплатил вторую премию аспиранту Стэнфорда Тому Нейману. Предлагаемый масштаб в задаче Фейнмана — записать

24 тома Британской энциклопедии на булавочной головке. Нейман вычислил, что каждая отдельная буква будет составлять по ширине около пятидесяти атомов. Когда его руководителя не было в городе, он использовал литографию электронным пучком и смог записать первую страницу книги Чарльза Диккенса «Повесть о двух городах» в уменьшенном масштабе 1:25 000. Статья Фейнмана часто считается началом эры нанотехнологий, и теперь существуют регулярные конкурсы, называемые «Премией Фейнмана по нанотехнологии».

ЦЕННОСТЬ НАУКИ

Из всех ее ценностей наивысшей должна быть привилегия сомневаться

Фейнман получил урок простоты и мудрости на Гаваях, во время посещения буддистского храма: «Каждому дан ключ от врат рая; тот же ключ открывает и врата ада». Это одно из наиболее ярких и убедительных высказываний, взаимовлияющих на научную ценность и человеческий опыт. Он также преподнес урок молодым ученым, пытаясь убедить их, что они несут ответственность за будущее цивилизации.

Время от времени мне напоминают о том, что ученые должны чаще обращаться к социальным вопросам — именно на них лежит основная ответственность за воздействие науки на общество. Люди полагают, что ученые разных направлений должны обратить внимание на сложные социальные проблемы. Это привело бы общество к значительному прогрессу.

Мне кажется, что действительно нам следует время от времени обдумывать эти проблемы, однако мы не должны полностью сосредотачиваться на них по той простой причине, что не существует ма-

гической формулы для их решения. Мы отчетливо понимаем: социальные проблемы значительно труднее научных, и поэтому даже серьезное их исследование обычно не приводит к убедительному результату.

Думаю, что ученый, занимающийся ненаучными проблемами, выглядит довольно глупо; так выглядит защитник, не являющийся законным представителем данного лица, — и когда он говорит о ненаучных проблемах, он выглядит наивно, как неподготовленный школьник. Поскольку вопрос ценности, значимости науки не является предметом самой науки, настоящая дискуссия посвящена доказательству моей точки зрения с использованием поучительных примеров.

Основная ценность науки знакома и понятна всем. Научное знание позволяет нам создавать важные, нужные вещи. Очевидно, что, если мы делаем хорошие вещи, это не только создает репутацию науке, но и является основой доверия к ее моральному выбору, к предпосылкам для плодотворной работы. Научное знание — сила, но она позволяет делать и хорошее, и плохое и не дает указаний, как ею распорядиться. Мощь науки обладает очевидной ценностью — даже несмотря на то что может сводить на нет деятельность какого-нибудь отдельного человека.

На пути в Гонолулу я понял, как выразить суть этой общей проблемы. Там, в буддистском храме, священник рассказал туристам немного о буддистской религии и закончил беседу словами, которые, по его мнению, мы никогда не должны за-

бывать — и я никогда их не забуду. Это изречение гласит:

«Каждому человеку дан ключ от врат рая; тот же ключ открывает и врата ада».

В чем же ценность ключа от рая? Несомненно, если у вас нет точных инструкций, как определить, какие врата ведут в рай, а какие в ад, ключ может стать опасным, но очень ценным предметом. Как попасть в рай без него?

Инструкции также не имеют ценности без ключа. Очевидно, что, несмотря на то что наука может привести к огромным опасностям и беспокойству в мире, она ценна уже тем, что *может что-либо* производить.

Другая ценность науки состоит в так называемом интеллектуальном удовольствии, которое одни ученые получают от чтения, изучения или обдумывания, работая в науке, а другие — используя ее прикладные области. Это совершенно бесспорный и важный пункт, который недостаточно учитывается теми, кто говорит о социальной ответственности, отражающей влияние науки на общество.

Получаем ли мы чисто человеческое удовольствие от ценности общества в целом? Конечно, нет! Но существует также ответственность за ценность общества как такового. Должна ли она при соответствующем анализе организовывать общество так, чтобы люди получали удовольствие от жизни? Если так, то удовольствие от науки важно не меньше всего другого.

Но я не могу недооценить и значимость мировоззрения, сложившегося в результате влияния

науки. Нам свойственно восприятие многих более удивительных вещей, чем грезы поэтов и мечтателей прошлого. Наше восприятие природы развито значительно сильнее, чем восприятие обычного человека. Например, концепция загадочного тяготения привлекает нас с незапамятных времен (где половина из нас стоит вверх ногами по отношению к другой половине), а вращающийся шар поворачивается в пространстве миллиарды лет; совсем неинтересно верить, что слон перевозит нас на спине, поддерживаемый черепахой, плывущей по бездонному морю.

Я много думал в одиночестве о некоторых фактах — простите, если я напому вам о мыслях, которые и вам, конечно, приходили в голову, — никто и никогда не мог перенестись в прошлое, потому что люди тогда не имели информации, которой мы владеем о сегодняшнем мире.

Например, я стою в полном одиночестве на морском берегу и думаю. Плеск волн... горы из молекул, каждая упрямо занимается своим делом... триллионы отдельно... в гармонии образуя белый прибой.

Эпохи, эпохи... перед тем, как глаза смогут увидеть... год за годом... разрушительные удары о берег, как сейчас. Для кого? Для чего?.. На мертвой планете, без надежды на жизнь.

Отсутствие покоя... истерзанная энергия... непомерно растраченная впустую солнцем... излученная в пространство. Скромная лепта — грохот прибоя.

Глубоко в море все молекулы повторяют структуру друг друга, пока не образуются новые сложные формы.

Они создают другие, подобные себе... и начинается новый танец.

Их размер и сложность возрастают... живые существа, массы атомов, молекулы ДНК, протеин... танец узоров становится все более замысловатым.

Из колыбели на сухую землю... здесь он стоит... атомы с разумом... материя со странностью.

Стоишь у моря... удивляешься удивительному... я... мироздание атомов... атом в мироздании.

Великое приключение

Тот же трепет, то же благоговение и тайну ощущаешь снова и снова, когда достаточно глубоко всматриваешься в проблему. С накоплением знания приходит относительное понимание, становится более удивительной загадка, манящая, заставляющая проникнуть еще глубже. Никогда не думайте, что ответ может вас разочаровать, а с удовольствием и уверенностью ворочайте каждый камень, чтобы обнаружить невообразимые странности, ведущие к еще более поразительным вопросам и загадкам — вот поистине великое приключение!

Некоторые далекие от науки люди имеют, наверное, подобный опыт в религии. Поэты не пишут об этом, художники не пытаются запечатлеть эту изумительную картину. Не знаю почему. Вдохновила ли кого-нибудь картина нынешней Вселенной? Ценность науки остается невоспетой певцами — и вы понижаете порог слышимости — не песня, не поэма, а только вечерняя лекция об этом. Это пока еще не век науки.

Возможно, одной из причин является то, что вам следует знать, как читается музыка. К примеру, в научной статье сказано: «Содержание радиоактивного фосфора в головном мозге крысы уменьшилось за две недели наполовину». Что это означает?

Это означает, что фосфор, который находится в мозге крысы (или в моем, или в вашем), — это уже не тот фосфор, который находился там две недели назад. Произошла замена атомов в мозге, причем некоторые из них улетучились.

Так что это за разум, что это за атомы с умственными способностями? Картошка недельной давности! Что же теперь можно вспомнить — что происходило с моим разумом год назад, с разумом, который давно заменили. Что же означает открытие того факта, что атомы не задерживаются в мозге надолго, они заменяются другими атомами. Заметьте — то, что я называл своей индивидуальностью, есть только структура, узор или танец. Атомы приходят в мозг, отплясывают причудливый танец и уходят; всегда новые атомы и всегда все тот же танец — помня, что тот же танец был и вчера.

Замечательная идея

Мы читаем в газете: «Ученый утверждает, что это открытие особенно важно при лечении рака». Статья интересна с точки зрения использования идеи, а не с точки зрения самой идеи. Едва ли кто-то может понять важность идеи, но она такая замечательная. Возможно, за нее ухватятся некото-

рые дети. И когда ребенок хватается за подобную идею, рождается ученый. Эти идеи отфильтровываются (несмотря на телевидение, заменяющее человеческое мышление), и множество ребятишек воодушевляются — а когда чувствуется личность и ум, появляется ученый. В университетах воодушевляться слишком поздно, мы должны попытаться объяснить это детям.

Я хотел бы теперь вернуться к третьему пункту в системе ценности науки. Он имеет не совсем прямой смысл, не слишком прямой. У ученого большой опыт по части незнания, сомнений и колебаний, и этот опыт, по-моему, имеет огромное значение. Когда ученый не знает ответа задачи, он находится в неведении. Когда он интуитивно предчувствует результат, он колеблется. А когда он достаточно уверен в этом проклятом результате, приходят сомнения. Вопрос первостепенной важности — для движения вперед необходимо ощутить неведение и оставить место сомнениям? Основа научного знания — это утверждения различной степени определенности: некоторые выдвигаются с долей сомнения, другие почти уверенно, но нет утверждений, выдвинутых с *абсолютной* уверенностью.

Для нас, ученых, это норма — мы считаем очевидным, что решение задачи прекрасно согласуется с неуверенностью, что можно жить и *не* знать. Однако я не знаю, представляет ли кто-нибудь, насколько это верно. На ранней стадии развития науки наша свобода сомневаться родилась в борьбе с властями. Это было глубокое и сильное противостояние.

Позвольте вопрос: сомневаться — значит не быть уверенным? Полагаю, это существенно. Мы не забываем важности этой борьбы и, возможно, теряем в ней что-то приобретенное. В этом заключается ответственность перед обществом. Нам грустно, когда мы видим, как контрастируют поразительные возможности людей с их скромными достижениями. Люди всегда думали, что могли бы сделать значительно больше. В прошлом, в кошмаре своего времени, они мечтали о будущем. Мы, их будущее, видим, что в ряде случаев их мечты превзошли ожидания, а во многом так и остались мечтами. Надежды на будущее сегодня связаны с разумной долей вчерашних ожиданий.

Образование во имя добра и зла

Есть мнение, что возможности многих людей не раскрыты, потому что они не получили должного образования. При наличии универсального всеобщего образования станут ли люди Вольтерами? Плохому можно научиться по крайней мере так же эффективно, как и хорошему. Образование — это мощная сила, но либо во имя добра, либо во имя зла.

Общение между нациями должно способствовать пониманию: так создается еще одна мечта. Средства коммуникации могут направляться в общее русло или «перекрывать кислород». Какие средства общения правильны, а какие ложны? Общение — это тоже мощная сила, но либо во имя добра, либо во имя зла.

Прикладные науки освобождают человека по крайней мере от материальных проблем. Медицина контролирует болезни. И факты здесь, казалось бы, направлены на добро. Тем не менее существуют люди, тихо работающие над созданием эпидемий и ядов. Они могут использоваться в ходе завтрашних войн.

Почти все ненавидят войну. Сегодня мы мечтаем о мире. В мирное время у человека раскрываются лучшие из отпущенных ему возможностей. Но может быть, люди будущего обнаружат, что мир бывает хорошим и плохим. Возможно, мирные люди будут выпивать от скуки. Возможно, пьянство станет огромной проблемой, лишаящей человека способности думать и развиваться.

Ясно, что мир — это великая сила, когда есть трезвость, материальные ресурсы, коммуникации, образование, честность и другие идеалы многих мечтателей.

У нас сегодня больше сил для контроля, чем в древности. И может быть, мы делаем немного лучше и больше, чем большинство людей того времени. Но мы обязаны делать гигантские вещи по сравнению с их скромными успехами.

Почему? Почему мы не можем одерживать побед?

Потому что мы видим, что даже огромные силы и способности не сопровождаются отчетливыми инструкциями, как ими пользоваться. В качестве примера рассмотрим огромные накопленные знания о поведении физического мира; у кого-то такое поведение создает впечатление лишь своего ро-

да бессмыслицы. Наука не учит напрямую хорошему или плохому.

Во все века люди пытались постичь смысл жизни. Они понимали, что, если нашим действиям придать определенное направление или смысл, могут высвободиться огромные человеческие ресурсы. Очень много ответов получено на эти интригующие вопросы. Но все они различны, и поборники одного ответа с ужасом смотрят на действия сторонников другого. С ужасом — так как из-за несогласованности точек зрения все огромные потенциальные возможности человечества принимают неверное направление или вовсе блуждают в потемках.

В чем же тогда состоит смысл? Что нужно сказать, чтобы рассеять тайну бытия?

Если мы учтем все факты — не только те, которые знали люди в древности, но и те, которые мы знаем сегодня и которых не знали они, мы будем вынуждены публично признаться — *мы не знаем*.

Но признав это, мы, возможно, обнаружим открытый канал.

Эта идея не нова; эта идея здравомыслия прорастила в течение веков. Это философия, которая руководит человеком, создавшим демократию, в которой мы живем. Идея состоит в том, что никто реально не знает, как заставить правительство осуществить идею об организации системы, с помощью которой смогут разрабатываться новые идеи, испытываться, отбрасываться и вводиться другие; это будет система проб и ошибок. Этот метод родился в результате того, что наука уже зарекомен-

довала себя как успешное предприятие в конце XVIII века. Уже тогда социально мыслящим людям стало ясно, что открытие возможностей оказалось благоприятным фактором и что сомнения и обсуждения очень существенны для проникновения в мир неизведанного. Если мы хотим решить проблему, с которой никогда не сталкивались раньше, нам следует оставить приоткрытой дверь для неизвестного.

Наша ответственность как ученых

Мы находимся в самом начале пути развития человечества. То, что мы ухватились за эти проблемы, не кажется безрассудством. У нас десятки тысяч лет будущего. Наша ответственность — делать, что умеем, учиться, чему можем, накапливать знания и передавать их будущим поколениям. Это наша ответственность — предоставить людям будущего свободу действий. В стремительной юности человечества мы можем наделать страшных ошибок, которые затормозят наш рост на долгое время. Что мы, молодые и несведущие, будем делать, если скажем, что теперь у нас есть все ответы; если мы остановим все дискуссии, всю критику, заявив: «Так, ребята, человек спасен!» — и бросим человека на долгое время в оковы власти, ограничившись пределами нашего нынешнего восприятия. Это уже делалось много раз прежде.

Наша ответственность как ученых, понимающих огромную ценность философии незнания и огром-

ный прогресс, который является плодом свободы мысли, состоит в том, чтобы провозглашать ценность этой свободы, учить не бояться сомневаться, приглашать к дискуссии и требовать этой свободы — это наше обязательство перед всеми грядущими поколениями.

ОСОБОЕ МНЕНИЕ РИЧАРДА ФЕЙНМАНА, КАСАЮЩЕЕСЯ СЛЕДСТВИЯ ПО ДЕЛУ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ-ЧЕЛНОКА «ЧЕЛЛЕНДЖЕР»

Когда космический корабль «Челленджер» взорвался вскоре после запуска 28 января 1986 года, трагически погибли шесть профессиональных астронавтов и один преподаватель. Нация была потрясена, и NASA (государственная организация США, занимающаяся исследованием космоса — National Aeronautic and Space Administration) встряхнули от благодушия, вызванного годами успешных космических полетов, — или по крайней мере полетов без смертельных исходов. Была создана комиссия, возглавляемая государственным секретарем Уильямом Роджерсом, в состав которой вошли политики, астронавты, военные и один ученый — они должны были проанализировать случившееся и рекомендовать меры по предотвращению в будущем подобных происшествий. Тот факт, что Ричард Фейнман оказался тем единственным ученым, привело к достаточно резкому различию в ответах на вопрос, почему «Челленджер» потерпел крушение — и, может быть, именно он приоткрыл завесу вечной тайны гибели корабля. Фейнман был человеком бесстрашным и не побоялся озвучить свою точку зрения на всю страну, донести ее до инженеров, которые понимали, что, по сути, подготовкой и безопасностью программы космических челноков руководила пропаганда. Его доклад поставил NASA в неудобное положение и всячески замалчивался комиссией, но Фейнман боролся за его включение

в выводы комиссии; и в результате он был опубликован в приложении. Когда комиссия устроила пресс-конференцию для ответов на вопросы журналистов, Фейнман проделал свой ныне знаменитый настольный эксперимент с одним из уплотнителей корабля — уплотнительным кольцом — и чашкой с ледяной водой. Этот опыт с очевидностью доказывал, что ключевые уплотнители ломались, а предупреждения инженеров о том, что снаружи слишком холодно для ухода корабля со старта, не были приняты во внимание менеджерами, во что бы то ни стало желающими пунктуально соблюдать расписание полетов в угоду своим боссам. Перед вами этот исторический доклад.

Введение

Существует, как я понимаю, колоссальное несоответствие мнений членов комиссии, по-разному трактующих потерю космического корабля и трагическую гибель людей. Грубая оценка диапазона вероятности крушения колеблется от 1/100 до 1/100 000. Более высокие цифры получены работающими в проекте инженерами, а самые низкие — руководством. Что же произошло, и каковы следствия несогласованности мнений? 1 случай из 100 000 означает, что можно запускать челнок каждый день в течение 300 лет с предполагаемой потерей одного корабля за все время запусков. Собственно, напрашивается вопрос: «В чем причина фантастической веры руководства в двигатели ракеты?»

Другой обнаруженный факт свидетельствует, что критерий сертификации, используемый в «Руководствах по подготовке полетов», часто разрабатывается с постепенным понижением его точности. Аргумент, что подобные риски имели место и раньше и не при-

водили к авариям, принимается как свидетельство в пользу допустимой безопасности. По этой причине критерий сертификации снова и снова ослабляется — нередко без достаточно серьезных попыток уменьшить риски или отложить полет из-за их постоянного присутствия.

Существует несколько источников информации. Публикуются критерии сертификации, включающие историю их изменений в форме отказа от требований и стандартизированных отклонений. Кроме того, в «Руководстве по подготовке полетов» для каждого документа по полетам приведены аргументы для установления полетных рисков. Информация была получена мною из прямых свидетельских показаний и докладов офицера службы безопасности полигона, Льюиса Уллиана, относящихся к успешному запуску ракет на твердом топливе. Существуют и более поздние его исследования (как главы группы экспертов по безопасному прерыванию запусков по определению рисков, в том числе в случае несчастий, ведущих к радиоактивному заражению при использовании плутониевого топлива для будущих межпланетных полетов. Доступно также исследование NASA по этому вопросу. Для получения информации об основных двигателях космического челнока я побеседовал с руководством и инженерами из центра космических полетов имени Маршалла и, кроме того, пообщался с инженерами из Rocketdyne¹. Я имел неофициальную беседу с независимым ин-

¹ Компания в США, которая разрабатывает и производит жидкостные ракетные двигатели.

женером-механиком из Калтеха, который консультирует в NASA производство и сборку двигателей. Визит к Джонсону был обусловлен сбором информации о надежности авиационной радиоэлектроники (компьютеров, датчиков и эффекторов). И наконец, существует доклад «Обзор сертификационной деятельности, потенциально применимой к ракетным двигателям многократного использования, пригодным для полетов человека», подготовленный в Лаборатории реактивного движения Н. Муром с сотрудниками в феврале 1986 года для руководства по управлению космическими полетами NASA. В докладе рассматриваются методы, применяемые Федеральным авиационным агентством и военными для сертификации газовых турбин и ракетных двигателей. С авторами доклада также состоялся неформальный разговор.

Ракеты на твердом топливе (SRB)

Оценка надежности ракет на твердом топливе была выполнена офицером службы безопасности полигона, изучившим опыт всех предыдущих полетов ракет. Из полного числа порядка 2900 полетов 121 оказался неудачным (1 к 25). Сюда, однако, включены так называемые ранние ошибки, когда ракета запускалась по нескольку раз, при этом определялись и фиксировались конструкторские ошибки. Более разумные цифры для ракет с продуманным дизайном — 1 к 50. При особой тщательности в выборе деталей и надежном обследовании эти цифры могут стать ниже и достигнуть значения

1 к 100, правда, цифра 1 к 1000 вряд ли достижима при современной технологии. (На космическом челноке две такие ракеты, поэтому скорость его крушения из-за отказа ракет-носителей на твердом топливе должна удваиваться.)

Официальные представители NASA приводят доводы в пользу гораздо меньших цифр. Они утверждают, что эти цифры справедливы для ракет, не укомплектованных людьми, но так как челнок является средством, управляемым людьми, «вероятность успешного полета очень близка к 1,0». Не очень ясно, что означает эта фраза. Означает ли это, что цифра близка к 1 или должна быть близка к 1? Они продолжают объяснять: «Исторически эта чрезвычайно высокая степень успешного полета объясняется разницей философий между программами космического полета с экипажем и без экипажа; то есть употребление численной вероятности против выводов инженеров». Ясно, что, если бы вероятность крушения составляла 1 к 100 000, необходимо было бы провести чрезмерно большое число тестов для ее определения (вы ничего не получите, кроме цепочки успешных полетов, из которых не вытекает никакая правильная цифра, а только то, что вероятность вряд ли меньше числа таких полетов в цепочке). Но если фактическая вероятность не так мала, полеты должны вызывать тревогу, обоснованные оценки должны вызывать опасение реального крушения. Весь предыдущий опыт NASA указывает на возможность случайных трудностей, почти несчастных случаев и самих несчастных случаев — все это служит предупреждением, что ве-

роятность крушения полетов не так мала. Непоследовательность аргументации не определяет надежности на основе истории полетов и испытания двигателей, как это делает офицер службы безопасности и к чему апеллирует NASA: «Исторически такая высокая степень успешных полетов...» В конце концов, если мы сравним стандартную численную вероятность и заключения инженеров, откуда такое огромное расхождение между оценкой руководства и выводами инженеров? Может оказаться, что для любой цели, для внутреннего и внешнего потребления, руководство NASA преувеличивает надежность своего продукта до фантастических цифр.

Не буду здесь заново излагать историю сертификации и «Руководство по подготовке к полетам». (Смотрите соответствующие разделы докладов комиссии.) Совершенно очевидно допустить в предыдущих полетах такие явления, как газопропуск (просачивание газа) и эрозию. Полет «Челленджера» — тому поучительный пример. Имеется несколько ссылок на предыдущие полеты. Одобрение и успех предыдущих полетов рассматриваются как доказательство безопасности. В конструкции не предполагалось ни эрозии, ни газопропуска — следовательно, если они есть, значит, конструкция «предупреждает»: что-то работает не так. Агрегаты работают не так, как ожидалось, и потому существует опасность, что они могут работать даже с большими отклонениями, причем неожиданным и не вполне понятным образом. Тот факт, что эта опасность не приводила раньше к катастрофе, не является гаран-

тием, что ничего не случится в дальнейшем, если только все полностью не понять и не проанализировать. При игре в русскую рулетку, если в первой попытке вы избежали опасности, это дает небольшую надежду избежать ее в следующей. Причина и следствие возникновения газопропуска и эрозии не понятны. Они не проявляются одинаково во всех полетах и всех узлах; иногда больше, иногда меньше. Почему когда-нибудь в будущем, когда условия станут более подходящими, это не может привести к катастрофе?

Несмотря на происходящие от случая к случаю отклонения, официальные лица ведут себя так, словно им все понятно, обмениваясь, по их мнению, логичными доводами, часто зависящими от «успеха» предыдущих полетов. Например, если полет 51-L был безопасен — они бравируют тем, что эрозии уплотнительного кольца не произошло — а в полете 51-C отмечалось, что глубина эрозии составляла только одну треть радиуса. В эксперименте с разрезанием кольца было замечено, что перед поломкой кольца его надо разрезать на глубину одного радиуса. Вместо того чтобы принять во внимание, что изменения плохо изученных условий могут внезапно привести к сильной эрозии, они объявляют эрозию «фактором безопасности три». Странное использование инженерного термина «фактор безопасности». Если мост строится с расчетом на определенную нагрузку, соответствующую отсутствию постоянной деформации балок, трещин или разрушений, его следует конструировать из материалов, которые устоят при утроенной нагрузке. «Фактор безопасности» не должен со-

ответствовать точно определенному превышению нагрузки, или неизвестной дополнительной нагрузке, или слабым местам материала, в котором могут появляться неожиданные дефекты и тому подобное. Если в результате ожидаемой нагрузки на новый мост появится трещина в балке, здесь налицо неудачная конструкция. Не существует никаких факторов безопасности; даже несмотря на то что мост реально не разрушается, потому что трещина составляет только одну треть величины балки. Уплотнительные кольца ракеты-носителя на твердом топливе не должны конструироваться из материала, подвергающегося эрозии. Эрозия — это «звонок» о том, что в конструкции что-то неправильно, и никак не фактор, из которого можно сделать заключение о безопасности.

Нет другого пути, кроме полного понимания проблемы — следует быть абсолютно уверенным, что условия в следующий момент не приведут к эрозии, в три раза более сильной, чем раньше. Тем не менее официальные лица обманывают себя, полагая, что они во всем разобрались и во всем убеждены, несмотря на специфические отклонения, происходящие от случая к случаю. Для расчета эрозии мы создали математическую модель. Эта модель основана не на физическом понимании, а на подгонке эмпирических кривых. Более подробно — предполагалось, что поток горячего газа сталкивается с материалом уплотнительного кольца, определялось тепло в точке застоя (в соответствии с действующими физическими термодинамическими законами). При определении того, насколько покрывку кольца разъела эрозия, исходим из того, что все зависит только от этого теп-

ла, расчет проводился по формулам с данными для подобного материала. График в логарифмическом масштабе представлял прямую линию, поэтому считалось, что эрозия меняется как степень 0,58 от тепла; число 0,58 определяется по ближайшей подгоночной кривой. В любом случае при подгонке некоторых других чисел определяется, что модель согласуется с величиной эрозии (с глубиной, составляющей одну треть радиуса уплотнительного кольца). Нет ничего более вредного, чем доверять ответам! Везде возникают неопределенности. Нельзя предсказать, насколько сильный поток газа обтекает уплотнитель, он зависит от отверстий, образованных в замазочном слое. Просачивание газа показало, что кольцо может сломаться при частичной эрозии или даже при ее отсутствии. Хорошо известно, что эмпирическая формула будет неопределенной, если она не применяется именно к тем экспериментальным точкам, с помощью которых была определена. Есть скопления точек, некоторые встречаются дважды: над и под подгоночной кривой; так что двойное предсказание эрозии достаточно надежно, даже исходя из одного этого случая. Подобные неопределенности встречаются и в других константах в формулах и т.д. При использовании математической модели особое внимание следует обращать на ее неопределенности.

Двигатель на жидком топливе

В ходе полета 51-L все три основных двигателя космического корабля работали превосходно, даже в последний момент, при отключении двигате-

лей, когда подача топлива начала прекращаться. Тем не менее возникает вопрос, должна ли она прекращаться? Нам необходимо исследовать эту ситуацию максимально подробно, как мы сделали это для ракет-носителей на твердом топливе. Мы и здесь обнаружим недостаточное внимание к возможным ошибкам и уменьшению надежности. Иначе говоря, приводят ли слабые места организации полетов к несчастным случаям в сфере, ограниченной сектором ракет-носителей на твердом топливе, или они являются общей характеристикой НАСА? Нам надо проанализировать работу основных двигателей космического челнока, а также функционирование радиоэлектроники. Подобных исследований для орбитальных ступеней или внешних отсеков не существует.

Двигатель является значительно более сложной структурой, чем ракета-носитель на твердом топливе, в нем гораздо больше инженерии. Как правило, инженерные разработки здесь очень высокого качества, и значительное внимание следует уделить недостаткам и ошибкам их работы. Эти двигатели проектируются для военных или гражданских самолетов с помощью так называемой компонентной системы или проектирования снизу вверх. Во-первых, надо в совершенстве понимать свойства и ограничения используемых материалов (например, для лопастей турбин). Исследование материалов следует начинать с тестов на экспериментальных испытательных стендах. На основании результатов испытаний проектируются большие компонентные детали (такие, как опоры), они тестируются отдельно. Когда

недостатки и ошибки конструирования учтены, детали корректируются и проверяются при повторном тестировании. Поскольку детали тестируются за раз, такое тестирование и их модификация оказываются не слишком затратными. В заключение разрабатывается окончательный проект всего двигателя с необходимыми спецификациями. Этот этап наиболее удобен для проверки работы двигателя и выявления недостатков; на этом этапе легко зафиксировать нарушения, проанализировать их причины и определить предельные свойства материалов. Это наиболее благоприятный момент для модификации двигателя, возможность справиться с окончательными трудностями, устранить и более серьезные, уже обнаруженные проблемы — все это делается гораздо проще и дешевле на этом этапе конструирования.

Основной двигатель космического корабля контролируется различными способами, можно сказать, сверху вниз, по нисходящей. Двигатель проектируется одновременно с относительно небольшим предварительным изучением материалов и компонентов. Затем, когда дело доходит до опор, турбинных лопастей, труб для смазочно-охлаждающих смесей и разного более сложного оборудования — в этих случаях гораздо дороже и сложнее выявлять ошибки и проводить модификацию. Например, трещины в турбинных лопастях определяются с помощью кислородных турбонасосов под высоким давлением. Вызваны ли они дефектами материала, влиянием атмосферного кислорода на свойства материала, тепловыми нагрузками при старте и посадке, вибрацией и напряжениями установившегося режи-

ма или, возможно, некоторой резонансной скоростью или неизвестными нам эффектами? Как долго можно работать от начала образования трещины до полного ее разрушения и как это зависит от уровня мощности? Использование уже законченного двигателя для тестирования его неполадок на испытательном стенде является чрезвычайно дорогостоящей процедурой. Никто не хочет потерять целый двигатель, чтобы обнаружить, как и где происходит разрушение. И все-таки важно точно знать эту информацию. Не представляя себе ситуацию во всех подробностях, нельзя говорить о доверии к сконструированным элементам двигателя.

Еще одним неудобством метода проектирования «по нисходящей» является тот факт, что при любой ошибке, например при необходимости замены формы корпуса турбины, простым ремонтом не обойтись — нужно заново проектировать весь двигатель.

Основной двигатель космического челнока — совершенно уникальная машина. У него отношение осевой нагрузки к весу гораздо выше, чем у предыдущего двигателя. Он построен на пике инженерного опыта, даже не на основании предыдущих разработок. Поэтому-то в нем и обнаружились разнообразные дефекты и трудности. К сожалению, он был построен способом нисходящего проектирования, при котором трудно обнаруживать и фиксировать недостатки. Замысел проектирования, рассчитанный на сгорание после 55 эквивалентных полетов (27 000 секунд работы в каждом полете или 500 секунд на испытательном стенде), не был достигнут.

Двигатель сейчас очень часто требует ремонта и замены важнейших деталей, таких как турбонасосы, опоры, корпус с металлической обшивкой и так далее. Топливный турбонасос высокого давления следует менять каждые три-четыре полета (хотя сейчас их можно чинить), а кислородный турбонасос высокого давления — каждые пять-шесть полетов. Это при спецификации с исходными допусками более чем десять процентов.

Далее основное внимание будет сконцентрировано на определении надежности.

За время полного рабочего ресурса, составляющего около 250 000 секунд, двигатели отказывают примерно 16 раз. Инженерный состав очень внимательно изучает эти поломки и старается их устранить как можно быстрее. Изучаются результаты тестов на специальных установках, экспериментально спроектированных для поиска дефектов, двигатель тщательно обследуется на предмет раскрытия предполагаемых недостатков (например, дефектов), которые тщательно анализируются и устраняются. Таким образом, несмотря на сложности нисходящего проектирования, путем упорного труда многие проблемы удалось полностью устранить.

Здесь приведен список некоторых проблем. Предположительно решенные проблемы с 1 по 11:

1. Трещины турбинных лопастей в топливных турбонасосах высокого давления (ТТНВД). (Возможно, проблема решена.)

2. Трещины в кислородных турбонасосах высокого давления (КТНВД).

3. Разрыв линии форсажного искрового воспламенителя.

4. Поломка проверочного очистного клапана.

5. Эрозия камеры форсажного искрового воспламенителя.

6. Растрескивание металлических листов топливных турбонасосов высокого давления.

7. Поломка смазочно-охлаждающей прокладки топливных турбонасосов высокого давления.

8. Поломка колена выпуска основной камеры сгорания.

9. Поломка колена впуска основной камеры. Сдвиг сварного колена впуска основной камеры сгорания.

10. Квазисинхронное вихревое движение в кислородном турбонасосе высокого давления.

11. Защитная система отключения ускорения в полете (частичный отказ в резервной системе).

12. Растрескивание опор (частично решена).

13. Вибрация, составляющая 4000 Герц, приводящая некоторые двигатели в нерабочее состояние.

Многие из этих решенных проблем на начальном этапе проектирования оказались очень сложными, 13 из них происходят в первые 12 500 секунд, и только 3 — в следующие 12 500 секунд. Естественно, никогда нельзя быть уверенным, что все ошибки устранены. Поэтому бессмысленно гадать, случился ли сюрприз в следующие 25 000 секунд с вероятностью $1/500$ на один двигатель в одном полете. В полете задействованы три двигателя, но на некоторые несчастные случаи может повлиять и один дви-

гатель. Система может аварийно прекратить работу и при двух двигателях. Давайте предположим, что неизвестных сюрпризов не существует, тогда вероятность нарушения полета из-за основного двигателя челнока менее $1/500$. К этому следует добавить вероятность крушения от известных, но пока не решенных проблем (без звездочки в приведенном выше списке). Их мы обсудим ниже. (Инженеры и производители из «Рокет дайн» оценили полную вероятность как $1/1000$. Инженеры в Маршалл — как $1/300$, в то время как руководство NASA, которому эти инженеры сообщают свои соображения, называет цифру $1/10\,000$. Независимый инженер, консультирующий НАСА, оценивает эту цифру с 1-2-процентной вероятностью.)

История принципов сертификации для этих двигателей весьма запутанна и труднообъяснима. Первоначально правило для двух работающих машин гласило, что каждая должна работать без сбоев за сертификационное время работы («правило двух»). По крайней мере это правило исходит из Федерального авиационного агентства, и NASA усвоила его, предлагая исходное сертификационное время, равное 10 полетам (то есть 20 полетов для каждой машины). Очевидно, что самыми лучшими используемыми двигателями окажутся при сравнении те, у которых наибольшее время работы (полет плюс испытания) — так называемые эксплуатационные лидеры. Но что, если третий образец и несколько других разрушатся за короткое время? Безусловно, мы не можем находиться в безопасности только благодаря двум необычно долго прожившим двигате-

лям. Короткое время больше отвечает реальным возможностям, и, несмотря на фактор безопасности 2, мы должны работать только половину времени короткоживущих образцов.

Медленный крен к снижению фактора безопасности доказывается многими примерами. Возьмем лопасти топливной турбины. От первой идеи тестирования всего двигателя отказались. Каждый номер двигателя содержит много важных деталей (такие, как все турбонасосы), заменяемые через повторяющийся интервал, так что правило должно меняться от двигателей к их компонентам. Мы принимаем топливный насос за сертификационное время, если два образца по отдельности дважды проработали успешно за это время (и конечно, на практике никто не настаивает, чтобы это время соответствовало 10 полетам). Но что значит «успешно»? Федеральное авиационное агентство называет трещину турбинной лопасти поломкой, что на практике обеспечивает фактор безопасности больше 2. Проходит некоторый период, пока двигатель работает между временем начала образования трещины и временем, пока она не станет достаточно большой для полного разрыва. (Федеральное авиационное агентство размышляет над новыми правилами, которые учитывают это дополнительное время, но только при условии, что его тщательно проанализируют с помощью известных моделей в рамках известных экспериментов и с полностью протестированными материалами. Ни одно из этих условий не годится для основного двигателя космического челнока.)

Трещины обнаруживаются в турбинных лопастях через много секунд. В одном случае были обнаружены три трещины через 1900 секунд, а в другом случае не обнаружили ни одной через 4200 секунд, хотя при более длительной работе вероятность возникновения трещин выше. Чтобы проследить за ситуацией, представим, что напряжение зависит от уровня мощности. Полет «Челленджера», как и предыдущий полет, происходил на уровне 104% от проектной мощности — двигатели большую часть времени работали на этой мощности. На основании некоторых данных о материалах можно предположить, что при уровне в 104% от проектного уровня время образования трещины окажется вдвое больше, чем при 109% или полном уровне мощности. Будущие полеты должны проходить на этом уровне из-за более высоких грузоподъемностей, и многие тесты выполняются на этом же уровне. Поэтому, разделив время при уровне мощности 104% на 2, мы получим единицы, эквивалентные полному уровню мощности. (Очевидно, тут вводится некоторая неопределенность, но мы не приняли ее во внимание.) Самые ранние трещины, упомянутые выше, появлялись при цифре 1,375 от полного уровня мощности.

Теперь правило сертификации выглядит так: «предел работы лопастей стремится к максимуму, равному 1375 секунд, при эквивалентном полном уровне мощности». Если кто-то возразит, что здесь потерян фактор безопасности 2, можно указать, что одна турбина работала без трещин в течение 3800 секунд, эквивалентных полному уровню мощности, а половина от этого — 1900 секунд; здесь мы предусмотритель-

но консервативны. Мы одурачили себя в трех случаях. Во-первых, у нас был только один образец, и это не эксплуатационный лидер, два других образца работали 3800 или более секунд, имели 17 растрескавшихся лопастей. (В двигателе 59 лопастей.) Кроме того, мы отказались от «правила двух» и заменили равное время. И наконец, мы утверждали, что через 1375 секунд видели трещину. Можно сказать, что не было обнаружено трещины спустя меньшее время, но в последний раз мы не видели трещины при 1100 секундах. Мы не знаем, когда образовалась трещина в этом промежутке; например трещина могла образоваться при 1150 секундах. (Приблизительно 2/3 от набора тестируемых лопастей имели трещины по истечении 1375 секунд. Ряд последних экспериментов действительно показал, что самые ранние трещины соответствуют 1150 секундам.) Важно сохранять при расчетах высокие числа, так как двигатели «Челленджера» во время окончания полета работают в режиме, близком к предельному.

Однако было заявлено, что критерии не были нарушены и система находилась в безопасности — вопреки требованиям Федерального авиационного агентства, гласящим, что трещин быть не должно. При этом принимались во внимание только полностью вышедшие из строя изломанные лопасти. Идея NASA была простой: так как для роста и разрыва трещины необходимо довольно много времени, можно гарантировать, что безопасность обеспечивается благодаря предварительному обследованию трещин во всех лопастях. Если трещины обнаружатся, мы заменим такие лопасти, а если нет — у нас

в запасе остается достаточно времени для полета. Такой подход переводит проблему трещин из разряда влияющих на безопасность полета просто в проблему технического обслуживания.

Доводы NASA могут оказаться практически верными. Но можем ли мы быть полностью уверены, что трещины растут достаточно медленно всегда и что ни одного разрыва не произойдет в полете? Три двигателя работают в течение долгого времени с несколькими надтреснутыми, но не разрушенными лопастями (около 3000 секунд, эквивалентных полному уровню мощности).

Однако можно исправить ситуацию с растрескиванием. Лопасты не будут подвергаться растрескиванию, если изменить их форму, предусмотреть дробеструйное упрочение поверхности и покрытие изоляцией, чтобы исключить тепловой удар.

Очень похожая ситуация возникает с сертификацией кислородных насосов высокого давления, но об этом мы не будем говорить подробно.

Резюмируя сказанное, очевидно, что «Руководство по подготовке полетов» и «Правила сертификации» предъявляют заниженные требования по ряду проблем основного двигателя космического челнока, которые очень напоминают ту ситуацию, которую мы наблюдали в правилах для ракет-носителей на твердом топливе.

Бортовая радиоэлектроника

Под «бортовой радиоэлектроникой» понимается компьютерная система на орбитальной ступени,

а также датчики ввода и силовые механизмы вывода. Сначала мы ограничимся свойствами компьютера, не касаясь надежности входной информации с датчиков температуры, давления и так далее, или того, точно ли следует компьютерный выход за исполнительными механизмами вывода при работе ракеты, за механическими средствами управления, за дисплеями астронавтов.

Компьютерная система детально разработана и насчитывает 250 000 строк программы. Кроме многих других функций, она ответственна за автоматическое управление подъемом на орбиту и за снижение до входа в слои атмосферы (ниже первой границы Маха), когда нажатием кнопки и принимается решение о приземлении. Можно было бы сделать всю процедуру приземления автоматической (кроме переключения сигнала спуска, который не управляется компьютером, а должен обеспечиваться пилотом в целях безопасности), но автоматическое приземление все-таки не так безопасно, как пилотируемое. В ходе орбитального полета компьютер используется для управления полезной нагрузкой, информация отражается на дисплее астронавта, где происходит обмен информацией с землей. Очевидно, что безопасность полета требует гарантированной точности всей сложной системы компьютерного аппаратного и программного обеспечения.

Опишем вкратце структуру системы. Надежность аппаратных средств обеспечивается четырьмя совершенно независимыми одинаковыми компьютерными системами, где, возможно, каждый датчик тоже

имеет несколько копий — обычно четыре, причем каждая копия питает все четыре компьютерные линии связи. Если ввод от датчиков не согласуется, что зависит от обстоятельств, то в качестве эффективно-го ввода используются некоторые усредненные данные или набор основных данных. Алгоритм, используемый для каждого из четырех компьютеров, совершенно одинаковый, поэтому их вводы (как только каждый видит все копии датчиков) тоже одинаковые. Поэтому на каждом этапе результаты в каждом компьютере должны совпадать. Время от времени они сравниваются, и поскольку они могут работать при слегка различных скоростях, система останавливается и ждет установленное время, пока все показания сравниваются. Если показания одного из компьютеров не совпадают или ответ получен слишком поздно, три других, чьи показания оцениваются как правильные, остаются, а ошибочный полностью выводится из системы. Если дает сбой еще один компьютер, его показания не соответствуют двум другим, он тоже выводится из системы — оставшаяся часть полета прерывается, поступает команда на снижение, управляемая двумя последними компьютерами. Ясно, что это система с резервированием, так как отказ одного компьютера не влияет на полет. В конце концов в качестве дополнительного фактора безопасности можно поставить пятый независимый компьютер, память которого загружается только программами подъема и спуска и который способен контролировать спуск, если происходит нарушение работы более двух из четырех компьютеров основной линии.

В памяти основной линии компьютеров недостаточно места для всех программ подъема, спуска и контроля полезной нагрузки в полете, так что память загружается около четырех раз с кассетной ленты самими астронавтами.

В аппаратных средствах за много лет не произошло никаких изменений — используется аппаратура пятнадцатилетней давности — это сопряжено с колоссальными усилиями по замене и отладке нового программного обеспечения в такой сложной системе. Аппаратные средства устарели; например установлена память старого типа с ферритовым сердечником. Становится все трудней найти производителей для поставки таких устаревших компьютеров высокого качества и высокой надежности. Современные компьютеры значительно более надежны, работают гораздо быстрее, имеют упрощенную схематику, позволяя выполнять больший объем работы, и не требуют дозагрузки памяти, поскольку их память значительно больше.

Программное обеспечение проверяется очень тщательно методом снизу вверх, «по восходящей». Во-первых, проверяется каждая новая строка программы, затем с помощью специальной функции контролируются разделы программы или модули. Границы раздвигаются шаг за шагом, пока новые изменения не будут вставлены в законченную систему и полностью проверены. Окончательный выход считается вновь выпущенным конечным продуктом. В заключение полностью независимая группа проверки, представляющая критикующую сторону по отношению к группе разработчиков

программного обеспечения, тестирует и проверяет программное обеспечение, как будто эта группа является покупателем поставленного продукта. Существует дополнительная проверка с применением новых программ в имитирующем устройстве и так далее. Обнаружение ошибки в ходе проверочного тестирования считается очень серьезным промахом, причина ошибки тщательно изучается, чтобы избежать подобных ошибок в будущем. Такие неожиданные ошибки были обнаружены только шесть раз за все время программирования, программа изменена (для новых или модифицированных нагрузок). Принцип, которому следовали, состоял в том, что проверка — это не аспект программной безопасности, это просто тестирование безопасности, а не контроль катастрофы. О безопасности полета нужно судить исключительно по тому, насколько хорошо программа работает в проверочных тестах. Нарушения здесь приводят к серьезному беспокойству. Из всего вышесказанного ясно, что система проверки компьютерного программного обеспечения должна быть высочайшего качества. Казалось бы, что здесь мы не имеем элементов оглупления и снижения уровня стандартов безопасности, как в ракетах-носителях на твердом топливе или в основном двигателе космического корабля. Но... обратимся к последним предложениям руководства — предлагается сократить сложные и дорогостоящие тесты как необязательные. С этим никак нельзя согласиться, поскольку здесь не принимается во внимание едва уловимое взаимное влияние — источники ошибки, обусловленные даже незначительной

заменой одной части программы на другую. Пользователи постоянно нуждаются в изменениях — новые нагрузки, новые требования и модификации. Изменения обходятся дорого, поскольку они требуют всестороннего тестирования. Правильный путь сберечь деньги — сократить количество самих изменений, но никак не качество тестирования для их осуществления.

Можно добавить, что сложную систему можно значительно улучшить с помощью более современного аппаратного обеспечения и методик программирования. Любое соперничество извне будет приносить свои плоды — следует внимательно изучить, хороша ли эта идея для НАСА.

В заключение вернемся к датчикам и силовым механизмам электронной системы — они не связаны так глубоко, как компьютерная система, с авариями и надежностью космического корабля. Например, иногда фиксировались отказы датчиков температуры. Но 18 месяцев спустя на борту использовались все те же датчики, которые по-прежнему ломались, пока запуск не пришлось наконец отложить, так как два из них отказали одновременно. И уже в следующем успешном полете снова использовался все тот же ненадежный датчик. Кроме того, системы контроля реактивного движения, реактивных двигателей, применяемые для переориентации и контроля в полете, представляются пока не совсем надежными. Существует длинная череда поломок, ни одна из которых пока серьезно не повлияла на полет. Работа реактивного двигателя проверялась датчиками, и, если не происходило возгорания, компьютеры вы-

бирали другой двигатель. Но в их конструкции не предполагается поломок — и эту проблему можно решить.

Заключение

Если соблюдать стандартный график запусков, техника не сможет достаточно быстро следовать первоначальным консервативным критериям, гарантирующим полную безопасность челнока. И в этой ситуации формулировки требований безопасности меняются зачастую с сомнительной логической аргументацией — только бы вовремя сертифицировать полет. В результате полеты осуществляются в относительно небезопасных условиях, с вероятностью крушения, составляющей порядка одного процента (трудно быть более точным).

С другой стороны, официальное руководство настаивает на цифре в тысячу раз меньшей. Одна из причин кроется в попытке НАСА заверить правительство в своей безупречности и успешности — с очевидной целью обеспечить финансовые поступления. А может быть, они искренне верят, что их цифры верны, демонстрируя почти необъяснимое отсутствие взаимосвязи между ними и работающими в проекте инженерами.

Так или иначе, следствия такого положения малоутешительны — попробуйте убедить обычного гражданина летать на такой опасной машине — стандартном самолете, если его уровень безопасности соответствует уровню безопасности челнока. Астронавты, как и летчики-испытатели, должны

знать о своих рисках — а нам оказана честь вселить в них мужество. Без сомнения, Маколифф была человеком огромного мужества и осознавала истинный риск лучше, чем уверяет нас руководство НАСА.

Позвольте порекомендовать официальным лицам НАСА реально оценивать технологические слабости и дефекты, чтобы активно их устранять. Они должны видеть реальные обстоятельства, сопоставляя затраты и практическую полезность кораблей с другими способами проникновения в космос. Они должны быть реалистичными при заключении контрактов, оценке затрат и сложности проектов. Они должны предлагать только реалистический график полетов, который обладает разумными возможностями и отвечает всем предъявляемым требованиям. Если в такой форме правительство не поддержит их, пусть так и будет. НАСА имеет обязательства перед гражданами, от которых просит поддержки, обещая быть открытой и честной организацией, так что граждане могут принять мудрое решение относительно использования своих ограниченных средств.

Чтобы технология была успешной, реальные обстоятельства должны ставиться выше пиара — ведь природу нельзя одурачить.

ЧТО ТАКОЕ НАУКА?

Что такое наука? Это прежде всего здравый смысл! Или нет? В апреле 1966 года великий Мастер обратился к Национальной ассоциации преподавателей научных дисциплин, где дал урок молодым преподавателям, как привить своим ученикам научное мышление, научить их смотреть на мир с любопытством и непредвзятостью, но прежде всего научиться сомневаться. Эта лекция была во многом данью памяти отцу Фейнмана — продавцу форменной одежды, — оказавшему на сына колоссальное влияние, научившему его особому, фейнмановскому взгляду на мир.

Я благодарен мистеру Де Роузу за счастливую возможность присоединиться к вам, преподавателям научных дисциплин. Я тоже преподаю научную дисциплину. У меня достаточно большой опыт — правда, в обучении аспирантов физике, — и в результате я знаю, что совсем не знаю, как надо учить.

Я уверен, что все вы тоже признаете, что не знаете, как это делать; в противном случае вас не беспокоило бы вступление в конвенцию.

Тема «Что такое наука?» не мой выбор. Это выбор мистера Де Роуза. Но я хотел бы сказать, что мое понимание вопроса «Что такое наука?» не рав-

нозначно вопросу «Как учить науке?». И я хотел бы обратить ваше внимание на две эти формулировки. Я готовился к этой лекции о науке, но если кто-то думает, что я хочу рассказать, как учить науке, то должен вас заверить, что вовсе не собираюсь этого делать, поскольку ничего не знаю о маленьких детях. Я знаю лишь то, что ничего не знаю. Другой вопрос состоит в том, что большинство из вас (ведь так много докладов, статей и экспертов в этой области) не обладают достаточной уверенностью в себе. Есть немало людей, которые прочитают вам лекции на тему, почему дела не так хороши и как научиться преподавать лучше. Я не собираюсь ругать вас за плохую работу и указывать, как ее можно улучшить; таких намерений у меня нет.

Собственно говоря, к нам в Калтех поступают только хорошие студенты, и за годы обучения они становятся все лучше и лучше. Как это получается, я не знаю. Удивлюсь, если вы это знаете. Я не хочу вмешиваться в систему образования — но ее результаты очень плодотворны.

Только два дня назад у нас была конференция, на которой мы решили, что впредь не должны обучать аспирантов курсу элементарной квантовой механики. Когда я был студентом, мы не изучали даже курса квантовой механики для аспирантов — он считался слишком сложным предметом. Когда я впервые начал преподавать, мы ввели его. Теперь мы преподаем его студентам. Мы просто поняли, что не должны читать элементарную квантовую механику аспирантам из разных высших учебных заве-

дений. Почему мы убрали этот курс? Потому, что мы способны лучше преподавать в университете, и потому, что к нам приходят лучше подготовленные студенты.

Что такое наука? Безусловно, все вы должны это знать, если учили ее. Это здравый смысл! Что я могу сказать? Знаете ли вы, что в каждом издании учебников для преподавателей содержится полное обсуждение этого предмета. Это в некотором роде искаженные, разбавленные и перемешанные слова Френсиса Бэкона, сказанные им несколько столетий назад, слова, которые впоследствии считались выражающими глубокую философию науки. Но один из величайших ученых-экспериментаторов своего времени, кто действительно сделал в науке кое-что важное, Уильям Харви¹, сказал, что слова Бэкона о науке — суть то, что блестяще умеет делать председатель Верховного суда — наблюдать и не делать выводов. Бэкон говорил о необходимости наблюдений, но пренебрегал самым существенным фактором — как делать выводы из наблюдений и на что обращать внимание.

Итак, наука — это не то, о чем говорят философы, и уж точно не то, о чем говорят пособия для преподавателей. Найти определение науки — задача, которую я поставил себе в результате обдумывания этой лекции.

В связи с этим мне вспомнилось маленькое стихотворение:

¹ Уильям Харви (1578—1657) открыл систему кровообращения человека. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

Жила-была счастливая сороконожка,
И надо ж лягушонку весело спросить:
«Мой свет, после какой идет какая ножка?»
Засомневалась бедная сороконожка,
Расстроилась, забыла, как ходить¹.

Всю свою жизнь я занимаюсь наукой и знаю, что это такое, но я хотел бы открыть вам маленький секрет — я не могу сообразить, какая нога идет после какой — более того, меня беспокоит аналогия со стихом. И когда я уйду домой, я больше не способен ни к какой научной работе.

Репортеры множество раз обращались к этой теме; я подготовил доклад совсем недавно, и они еще не могли им воспользоваться, но я уже вижу, как они бросаются писать заголовок: «Профессор назвал президента Национальной ассоциации преподавателей научных дисциплин лягушонком».

Понимая сложность предмета и свою нелюбовь к философским высказываниям, я представил тему в очень необычной форме. Я хочу рассказать вам, как я изучал, что такое наука. Это немного по-детски. Я изучал ее, когда был ребенком. Она бродила у меня в крови с детства. Я расскажу вам, как это было. Я собираюсь рассказать вам, на что похожа наука и как я понял, на что она похожа.

Рассказал мне об этом мой отец. Когда мать носила меня — и я не осознавал смысла разговоров, — отец сказал, что «если это мальчик, он будет ученым». Как он это понял? Он никогда не гово-

¹ Перевод Т. Ломоносовой.

рил мне, что я должен быть ученым. Он сам не был ученым; он был бизнесменом, но он читал о науке и любил ее.

Когда я был очень мал — самая первая история, которую я помню, — я еще ел, сидя на высоком стульчике, и отец играл со мной после обеда в различные игры. Он купил где-то в Лонг-Айленд-Сити целую кучу прямоугольных плиток для ванной. Мы составляли их снизу вверх, одну за другой, и мне позволяли надавить на один конец и наблюдать, как рушится вся картинка. Чем сильнее, тем лучше.

Позже игру усовершенствовали. Плитки были разных цветов. Я должен был положить одну белую, две синие, одну белую, две синие, и еще белую, и опять две синие — я мог бы положить другую синюю, но должна была быть белая. Вы уже поняли обычный коварный замысел: сначала создать удовольствие от игры, а затем медленно добавлять материал образовательного характера!

Моя мать, женщина значительно более чувствительная, начинала осознавать его коварство и говорила: «Мел, позволь бедному ребенку поставить синюю плитку, если ему так хочется». И отец отвечал: «Нет, я хочу, чтобы он обращал внимание на чередование цвета в узоре. Это единственное, что я могу сделать, — это математика на раннем уровне». И я тут же начинал ныть: «Что такое математика?» Я уже вам ответил. Математика распознает узоры. (Очевидно, что обучение оказывает некоторое влияние. Когда я ходил в детский сад,

мы провели прямой экспериментальный тест. В те дни мы занимались плетением. Поделки мы брали с собой домой — это слишком трудное занятие для ребятишек. Обычно мы сплетали цветные листы бумаги, используя вертикальные полосы, и получали узор. Воспитательница детского сада так удивилась моим поделкам, что написала специальное письмо мне домой, сообщив, что этот ребенок совершенно необычен, поскольку он, кажется, заранее вычисляет, какой рисунок получит, и делает на редкость сложные узоры. Игра с плитками принесла свои плоды.)

Я хотел бы привести и другие доказательства, что математика — это всего лишь узоры. Во время своего пребывания в Корнелле я был заморожен студенческим сообществом. Мне казалось, что оно состоит из горстки здравомыслящих людей и огромной массы туповатых студентов, изучающих домоводство и другую подобную ерунду, а также большого количества девушек. Я часто сидел со студентами в кафетерии и прислушивался к разговорам, пытаясь уловить хоть одно умное слово. Можете вообразить мое удивление, когда я открыл, как мне казалось, потрясающую вещь.

Я услышал разговор двух девушек, одна объясняла другой, как провести прямую линию — вы откладываете справа некоторое число для каждого ряда и двигаетесь по восходящей, когда вы откладываете одно и то же значение, вы получаете прямую линию. Глубокий принцип аналитической геометрии! Разговор продолжался. Я был изумлен. Я не представ-

лял, что женский ум способен вместить аналитическую геометрию.

Девушка продолжала: «Предположим, у тебя есть другая линия, идущая с другой стороны, и ты хочешь вычислить, где они пересекаются. Допустим, на одной линии ты отложишь направо два в каждом ряду по восходящей, а на другой линии отложишь направо три в каждом ряду по восходящей — и они продвинутся на двадцать шагов в сторону, и так далее». Я был поражен. Она вычислила, где линии пересекаются! Правда, выяснилось, что эта девушка объясняла другой, как вязать носок с узором.

Поэтому я усвоил урок: женский ум способен воспринимать аналитическую геометрию. Те, кто годами настаивает (перед лицом очевидных доказательств обратного характера), что мужчина и женщина равноправны и способны к рациональному мышлению, могут здесь кое-что почерпнуть. Трудность может заключаться в том, что мы пока не открыли пути взаимодействия с женским умом. Если это правильно сделать, может быть, мы извлечем что-нибудь стоящее.

Теперь я продолжу обсуждать мой ранний опыт общения с математикой.

Отец рассказал мне и о другом — я не могу этого четко объяснить, поскольку здесь скорее уровень эмоций, а не разговора, — он сказал, что отношение длины окружности к диаметру круга всегда одинаковое, независимо от размера. Мне не показалось это слишком уж невероятным, но такое отношение обладало чудесным свойством. Это было удивитель-

ное число, таинственное число Π ¹. С этим числом связана тайна, которую я не совсем понимал в раннем возрасте, но это было великое число, в результате я сталкивался с ним повсюду.

Позже, в школе, нас учили превращать простые дроби в десятичные. Однажды, когда я преобразовывал $3\frac{1}{8}$ в 3,125, я увидел, как мой товарищ пишет, что это равно числу π — отношению длины окружности к диаметру. Учитель поправил, что π равно 3,1416.

Я привел эти примеры, чтобы продемонстрировать влияние обучения. Идея в том, что это мистика — удивительно то, что это число так важно для меня, а не что это за число. Гораздо позже, когда я проводил эксперимент в лаборатории — я имею в виду свою домашнюю лабораторию, в которой я возился, — понимаете, я не проводил экспериментов, не делал их никогда — я просто возился. Я сделал пенетрометр и разные приспособления. Я возился... Наконец с помощью книг и руководств я начал понимать, что есть формулы, применимые к электричеству, касающиеся тока, сопротивления и тому подобного. Однажды, глядя на формулы в какой-то книжке, я обнаружил формулу для частоты в резонансной цепи — $2\pi\sqrt{LC}$, где L — индуктивность, а C — емкость цепи. И там было число π , но где же круг? Вы смеетесь, но мне тогда было не до смеха: π было связано с кругом, а тут π возникло из электрической цепи, что было за пре-

¹ Обозначается греческой буквой π . — *Примеч. ред. иностр. издания.*

делами понятия круга. Вы смеетесь, но знаете ли вы, откуда там π ?

Я люблю разбираться в разных вещах. Я их выискиваю. Я их обдумываю. Конечно, я понимал, что катушки индуктивности сделаны из кругов. Примерно через полгода я нашел другую книжку, в которой присутствовала индуктивность из круглых катушек и квадратных, и в этих формулах тоже были разные π . Я начал снова это обдумывать и догадался, что π происходит не от круглых катушек. Теперь я это лучше понимаю, но в глубине души мне все-таки не совсем понятно, где же здесь круг и откуда взялось π ...

Я бы хотел прервать мою историю и сделать несколько замечаний о словах и определениях, так как для науки необходимо выучить слова. Это не наука. Мы сейчас не говорим о том, что учить, мы разговариваем о том, что такое наука. Это не наука — знать, как перевести градусы по Цельсию в градусы по Фаренгейту. Это необходимо знать — но это не совсем наука. Точно так же, обсуждая живопись, мы не говорим, что живопись — это знание того, что карандаш 3-В мягче карандаша 2-Н. И в этом единственная разница. Конечно, учитель рисования должен этому учить, и художнику необходимо это знать. (Вы и сами обнаружите разницу за одну минуту, испытывая карандаши; но это научный подход, и учитель рисования может не додуматься до такого объяснения.)

Чтобы разговаривать друг с другом, мы должны знать слова, и это правильно. Разумная идея — по-

пытаться различать и понимать, когда мы обучаем таким средствам науки, как слова, а когда учим саму науку.

Чтобы выразить мысль яснее, я возьму в качестве примера научную книгу и раскритикую ее, что в принципе несправедливо, поскольку, проявив некоторую изобретательность, я смогу найти недостатки в любой книге.

Существует научная книга для первого этапа обучения, которая на первом же уроке первого раздела дает неправильное представление о том, что такое наука. Там есть картинка собаки, игрушечной заводной собаки, и рука тянется к заводному ключу, после чего собака может двигаться. Под картинкой напечатан вопрос: «Что заставляет собаку двигаться?» Далее изображена картинка настоящей собаки и вопрос: «Что заставляет эту собаку двигаться?» — и тому подобное.

Я сначала думал, что они готовы рассказать, что об этом говорит наука: физика, биология, химия. Ответ содержался в издании для учителей и гласил примерно следующее: «Собаку двигаться заставляет энергия».

Энергия — очень хитрое понятие. Очень трудно получить правильный ответ. Я имею в виду, что не так просто хорошо разобраться в энергии, чтобы правильно ее использовать, — можно прийти к правильному заключению, используя идею энергии. Это за пределами первого этапа. Это все равно что сказать: «Собаку заставил двигаться Бог», или «Собаку заставил двигаться Дух», или «Собаку заставила двигаться способность к движению». (В конце кон-

цов, так же правильно сказать, что «энергия заставила ее остановиться».)

Посмотрите на это под другим углом зрения: это всего лишь определение энергии. Его нужно изменить. Мы говорим: если тело движется, оно обладает энергией, но мы не говорим, что то, что заставляет его двигаться, и есть энергия. Тут очень тонкое различие. То же с проблемой инерции. Возможно, я смогу выразить разницу яснее таким образом:

Задавая ребенку вопрос, что заставляет игрушечную собачку двигаться, и задавая этот же вопрос обычному человеку, вы должны будить мысль. Ответ — вы заводите пружину, она раскручивается и надавливает на привод. И это будет прекрасное начало курса лекций о науке. Теперь разберем игрушку на части, посмотрим, как она работает. Посмотрим на умный привод, на храповички. Изучим игрушку, как она соединяется, удивимся мастерству людей, разработавших детали, продумавших систему храповичков. Здорово! Так что вопрос в книге был в самую точку, а вот ответ неудачный. Авторы книги дали определение энергии, но чему же они научили?!

Предположим, студент говорит: «Я не думаю, что энергия заставляет ее двигаться». Как дальше развернется дискуссия?

Я наконец понял способ выяснить — удалось ли студенту ухватить саму идею или он всего лишь выучил определение. Тест следующий. Вы говорите: «Не используя нового термина, который вы только что выучили, попытайтесь пересказать своими словами, что вы выучили». Не используя слова «энергия», рас-

скажите, что вы знаете теперь о движении собаки. «Вы не можете. Следовательно, вы ничего не выучили, кроме определения. Вы ничего не изучили в науке. Может быть, это правильно. Нельзя сразу постигнуть науку. Сначала вы должны выучить определения. Но для самого первого урока не слишком ли это деструктивно?

Я думаю, это неправильно — давать на первом уроке мистическую формулу для ответов на вопросы. В книге есть и другие ответы — «гравитация заставляет падать»; «подошвы вашей обуви стираются благодаря трению». Кожа ботинок изнашивается потому, что трется о тротуар, и маленькие зазубринки и неровности тротуара захватывают кусочки кожи и успешно довершают дело. Попросту говоря, роль трения ничтожна — и потому это не наука.

Мой отец немного затрагивал вопросы энергии, воспользовавшись для этой цели моими каникулами, после чего я получал несколько новых идей. Я знаю, что он делал, поскольку он делал всегда, по существу, одно и то же — хотя и не на том самом примере с игрушечной собачкой. Например, он говорил: «Она движется, потому что солнце светит». Я отвечал: «Нет. При чем здесь солнечный свет? Она движется, потому что я завел пружины». — «А почему, друг мой, ты способен двигаться, чтобы завести пружину?» — «Я ем». — «Что же ты ешь?» — «Я ем овощи». — «А как они вырастают?» «Они вырастают, потому что светит солнце».

А ведь с собакой все то же самое! А что тогда можно сказать о бензине? Энергия солнца аккумулируется растениями и сохраняется в земле. Все дру-

гие примеры тоже упирались в солнце. И ту же идею о строении мира в весьма эмоциональной форме выражал наш учебник. Все, что мы видим, движется — а движется потому, что светит солнце. Так объяснялась даже взаимосвязь одного источника энергии с другим. Ребенок отказывался в это верить. Он говорил: «Я не понимаю, почему все происходит из-за солнечного света». И мы начинали обсуждать. Но существовала разница. (Позже я мог озадачить его вопросом о приливах и отливах, и почему Земля крутится, и загадка ли это или нет.)

Вот пример различия между определениями (которые необходимы) и наукой. Главным недостатком в данном конкретном случае служило то, что это был первый урок. Безусловно, позже вам должны рассказать, что такое энергия, но не в связи с таким простым вопросом, как «что заставляет собаку двигаться?» Ребенок должен был получить детский ответ: «Открой ее и посмотри, что внутри».

Разговаривая с отцом в лесу, я выучил великую вещь. Когда мы видели птиц, отец, вместо того чтобы называть их, говорил: «Взгляни, ты заметил, что эта птица всегда щиплет свои перья? Она все время роется в перьях. Почему, как ты думаешь?» Я предположил — потому что перья у нее торчат дыбом, и птица пытается их выпрямить. Он одобрил меня: «Хорошо! Где ее перья вздыбились или как?» — «Когда она летает. Когда ходит по земле — все в порядке. Но когда она летит, ее перья стоят торчком».

Затем он говорил: «Тогда ты делаешь вывод: когда птица приземляется, она должна больше щипать

свои перья, чем когда она их выпрямляет и ходит по земле. Ну-ка, давай посмотрим».

Мы высматривали, мы наблюдали — и выяснилось, что птица постоянно щипала перья независимо от того, приземлялась она или просто ходила.

Итак, моя догадка была неправильной, я не понял истинной причины. Отец раскрыл мне ее. Птицу кусают крошечные насекомые (вши). Маленькие пушинки вылетают из перьев; отец рассказал, что это съедобное вещество, и вши едят его. В сочленении ног вшей скапливается вязкая жидкость, напоминающая воск, и там живут клещи, которые поедают ее. У клещей так много пищи, что они не в состоянии полностью переварить ее и, в свою очередь, тоже выделяют жидкость, в которой очень много сахара, и в этом сиропе живут какие-то другие мелкие букашки.

Возможно, за давностью лет я искажил какие-то факты, но суть вы поняли. Во-первых, я изучил паразитизм, одно существо паразитирует на другом — один использует другого.

Во-вторых, отец сказал, что в мире, где бы ты ни был, любой источник чего-либо можно съесть, чтобы продолжить жизнь; некоторые формы жизни находят способ воспользоваться этим источником, и каждый крошечный кусочек оставшегося вещества кем-то проглатывается.

Постичь закономерность в результате наблюдений, даже если я не был способен сделать окончательного заключения, — это удивительный золотой кусочек знания с замечательным результатом. Да, это нечто чудесное!

Предположим, мне велели вести наблюдения, составить перечень результатов, записать их, выполнить и просмотреть — я записал свой перечень свойств и сделал файл из 130 таких перечней в своем компьютере. Я изучил полученные данные и понял, что результат наблюдений был сравнительно скуден, что ничего из него не следует.

Я думаю, это очень важно — по крайней мере для меня, — что если вы собираетесь учить людей делать наблюдения, вы должны показать, что из них можно сделать замечательные выводы. Я понял, что в науке так и есть. Наберитесь терпения. Если вы всматриваетесь, наблюдаете, концентрируете внимание, вас ждет великое вознаграждение (хотя, возможно, не каждый раз). В результате, став более зрелым человеком, я более кропотливо, час за часом, годами решал какие-то задачи — иногда много лет, иногда недолго, — часто ошибался, масса всякой чепухи была отправлена в мусорную корзину. Но каждый раз проблескивала золотая грань нового осмысления — результаты наблюдений. Потому что еще в детстве меня научили, что наблюдения — стоящая вещь.

Между прочим, гуляя в лесу, мы изучали и другие вещи. Мы рассматривали встречающиеся там в изобилии деревья и кустарники и разговаривали о многом: о растущих побегах; о деревьях, которые в борьбе за свет рвутся ввысь; о растениях выше 35-40 футов, решающих проблему воды; о маленьких кустиках у земли, к которым редко пробивается свет, — и как все растет и развивается.

Однажды после возвращения домой отец снова повел меня в лес и заявил: «Все это время мы смотрели на лес и видели всего половину происходящего, точно — половину».

Я спросил: «Что ты имеешь в виду?»

Он ответил: «Мы смотрели на то, как тут все растет; но чтобы каждая малая малость росла, необходим такой же объем обветшания и гниения, иначе материалы будут вечно изнашиваться. Мертвые деревья будут лежать на земле, израсходовав все ресурсы из воздуха, а пустая земля — она не превратится в нашу землю и воздух — ничего больше не сможет на ней расти, потому что для этого не будет материала. Чтобы маленький кусочек произрастал, необходим точно такой же объем распада».

Потом мы не раз гуляли в лесу, разбивали старые пни, видели растущие там плесневые грибы и смешных жуков — он не мог показать мне бактерии, но мы видели разрыхление грунта и прочее. Я видел лес как процесс постоянного круговорота материалов.

Таким необычным образом мы рассмотрели много разных явлений, нашли их описание. Он часто начинал рассказ о чем-то таким образом: «Представь, что человек с Марса должен прилететь и посмотреть на наш мир». Это прекрасный способ посмотреть на мир. Например, когда я играл с игрушечными электрическими поездами, он рассказал мне, что существует большое колесо, которое вращает вода, все соединяется медными нитями, которые тянутся во всех направлениях. А еще там есть маленькие колесики, и все они поворачиваются, когда поворачива-

ется большое колесо. Связь между колесами только в том, что большое — медное, а маленькие — железные, и никаких движущихся деталей. Вы поворачиваете одно колесо здесь, и все маленькие колесики в другом месте начинают вращаться, и твой поезд — один из них. Отец рассказывал мне об удивительном мире...

Что такое наука? Думаю, она сродни следующему примеру. На нашей планете на данной стадии развития существует оценка жизни развитых животных, обладающих разумом. Я не имею в виду человека, а животных, которые могут играть и научиться некоторым навыкам (как кошки). Но на каждой стадии животное должно учиться на собственном опыте. Они постепенно развиваются, пока некоторые из них не смогут усваивать опыт быстрее и даже научиться другим навыкам — они наблюдают, или им показывают, или они видят, как делают другие. Отсюда возникает вероятность того, что все они смогут приобрести определенные навыки; однако такая передача опыта неэффективна — животные будут умирать, и, может быть, самый обученный умрет раньше, чем передаст опыт другим.

Возникает вопрос, можно ли выучить то, что кто-то выучил, исходя из некоторых обстоятельств, передать знание гораздо быстрее, чем скорость, с которой вещь забывается из-за плохой памяти или из-за смерти ученика или изобретателя?

Возможно, пришло время, когда для некоторых видов животных скорость, с которой возрастает знание, достигнет такого уровня, что внезапно возник-

нет совершенно новое свойство — навыки, приобретенные одним животным, передаются другим особям и следующим поколениям настолько быстро, что это свойство не теряется популяцией. Так становится возможным накопление знания у некоторого вида животных.

Это называется временным связыванием. Не знаю, кто первым так назвал это свойство. Мы полагаем фактами, что у некоторых видов животных существует передача опыта — одни особи передают свой опыт другим, и все они учатся друг у друга.

Накопление знания в памяти расы, передающееся от одного поколения к другому, было совершенно новым явлением в мире. Однако оно приводило к болезням расы. Можно передавать ошибочные идеи. Можно передавать идеи, которые не способствуют процветанию расы. Раса обрела идеи, но они неблагоприятны для нее.

Сегодня идеи, хотя их накопление происходит достаточно медленно, содержат не только практические и полезные вещи — они аккумулируют все типы предрассудков, странных и эксцентричных верований.

Допустим, открыт способ избавления от болезней. Сомнительно, что знания передавались из прошлого, невозможно проследить момент их возникновения — в любом случае надо проанализировать ситуацию, а не доверять опыту прошлого в той форме, в которой он передавался из поколения в поколение. Настоящий ученый отбирает что-то стоящее, на его взгляд, из опыта предков и подвергает провер-

ке. Нельзя слепо доверяться опыту прошлого. Я вижу только такой путь.

Чтобы вселить в вас немного энтузиазма, я хотел бы напомнить о тех вещах, с которыми вы хорошо знакомы. Религия учит нас нравственности, но не за раз, а постепенно, снова и снова напоминая о добродетелях; думаю, так и нужно — внушать снова и снова научные истины, помнить ценность науки для детей, подростков и всех остальных. Я вижу несколько аспектов.

Научное мировоззрение — великая ценность. Можно бесконечно восхищаться красотой мироздания. Я постоянно испытываю удивление перед сущностью мира, о котором я вам напоминал, — все вокруг движется потому, что солнце светит — очень глубокая идея, очень странная и удивительная. (Тем не менее не все движется благодаря солнечному свету. Земля вращается независимо от солнечного света, получены новые источники на земле — ядерные реакции. Возможно, вулканы представляют источники энергии, отличные от солнечного света.)

Изучая науку, видишь, какой разный наш мир. Деревья, например, созданы в первую очередь из воздуха. Сгорая, они превращаются в воздух, и в их жарком тепле реализуется огненное тепло солнца, которое связано с превращением воздуха в деревья, а в пепле содержится небольшой остаток, который рождается не из воздуха, а из твердой земли.

Существуют красивейшие явления, в науке их невероятное множество. Они действуют ошеломляюще — их можно использовать, чтобы привлечь к науке других людей.

Еще одно качество науки — она учит ценить рациональное мышление, а наряду с ним и свободу мысли. Сомнение в правильности полученных уроков приводит к очевидному позитивному результату. Вы должны отличать — особенно при обучении — науку, следующую из формальных форм или процедур, которые иногда используются в научных разработках. Легко сказать: «Мы описываем эксперимент, наблюдаем и делаем то и это». Вы точно можете скопировать форму. Но великие святые рассыпались благодаря формам, не наполненным прямым содержанием учений ведущих лидеров. То же произойдет, если следовать формальным формам в науке и называть ее наукой — нет, это псевдонаука. Поэтому сегодня мы страдаем от определенного вида тирании многих общественных институтов, находящихся под влиянием псевдонаучных консультантов.

Многие занимаются приобретением знаний — например люди проводят наблюдения, регистрируют результаты и набирают статистику, но не становятся тем не менее общепризнанными учеными, не получают заслуживающих внимания фактов. Они просто имитируют формальную сторону науки — подобно тому, как на островах Южных морей есть аэродромы, радиовышки, расположенные в безлесной местности, они ожидают приземления больших самолетов. Там даже строят деревянные аэропланы той же формы, которую жители видели у иностранцев, но, как ни странно, они не летают. Результатом такой псевдонаучной имитации является огромное количество экспертов; я думаю, среди вас тоже найдут-

ся эксперты. Может быть, у вас, учителей, которые реально учат детей младшей ступени, будут время от времени появляться сомнения относительно качества экспертов. Учись науке, чтобы сомневаться в компетенции экспертов. Я могу определить науку и другим способом: наука — это вера в невежество экспертов.

Когда кто-то говорит, что наука учит так-то и так-то, он использует неправильные слова. Если вам говорят, что наука утверждает то или это, вы должны спросить: «Откуда наука это знает — как ученые это обнаружили — как, что, где?» Не наука утверждает, а данный эксперимент, данный эффект. И вы будете более чем правы, заслушав результаты экспериментов (но необходимо выслушать все доказательства), чтобы убедиться, откуда следует многократно используемое заключение.

В области, где сложно доказать правильность научных доводов, мы должны опираться на старомодную мудрость и честность. Я пытаюсь вселить в учителей младшей ступени надежду, призвать к некоторой самоуверенности в пределах здравого смысла и апеллирую к вашему природному уму. Эксперты, руководящие вами, могут оказаться не правы.

Возможно, я разрушил систему, и студенты, которые приходят в Калтех, уже не будут так хороши. Думаю, мы живем в век, далекий от науки, когда все средства передачи информации — телевидение, книги и прочее — носят ненаучный характер. Это не значит, что они плохи — они ненаучны. В результате научные изыскания подменяются значительным объемом интеллектуальной тирании.

Человек не бессмертен. Каждое поколение открывает что-то, переходящее из его опыта к другим поколениям, но это что-то должно переходить на основании тонкого баланса между уважением и неуважением. Человеческая раса (мы знаем о болезнях, которым подвержены) не должна совершать тяжелых ошибок в пору своей юности, а должна передавать накопленную мудрость плюс мудрость, которая может оказаться вовсе и не мудростью.

Необходимо учить принимать и отбрасывать прошлое в той степени, в которой оно оставляет замечательные умения. Только наука со всеми ее ответвлениями содержит внутри себя уроки — насколько опасно верить в непогрешимость великих учителей предыдущих поколений.

Итак, продолжайте работать! Спасибо за внимание.

САМЫЙ БОЛЬШОЙ УМНИК НА СВЕТЕ

*Это удивительное интервью 1979 года, которое Фейнман дал журналу *Omni magazine*. Фейнман говорит о том, что он знает и любит больше всего физику и что любит меньше всего философию. («Философы должны научиться смеяться над собой».) Фейнман обсуждает работу, которая принесла ему Нобелевскую премию, квантовую электродинамику (КЭД); далее он останавливается на космологии, кварках и тех «ужасных» бесконечностях, которые портят физические уравнения.*

«Я думаю, что создать теорию — это просто замести трудности под ковер, — говорил Ричард Фейнман. — Но я, конечно, в этом не уверен». Это звучит как несколько смягченная критика, высказанная присутствующими в аудитории после спорной работы, представленной на научной конференции. Но Фейнман стоял на трибуне, за эту теорию ему была присуждена Нобелевская премия. Ему задавали вопросы именно по квантовой электродинамике (КЭД), о которой недавно говорили как «о наиболее точной из всех когда-либо разработанных теорий»; почти все расчеты были выверены с точностью до одной миллионной. Когда Ричард Фейнман, Джулиан Швингер и Син-Итиро Томонага независи-

мо разработали КЭД в конце 1940 годов, их коллеги провозгласили ее «величайшей зачисткой»: КЭД разрешила давно существующие проблемы, строго объединила две великие идеи в физике столетия — теорию относительности и квантовую механику.

Фейнман сочетает в себе блестящий ум теоретика и непочтительный скептицизм, который он пронес через всю свою научную деятельность. В 1942 году, после поступления в докторантуру Принстона под руководством Джона Уилера, он был привлечен к участию в Манхэттенском проекте. В период работы в Лос-Аламосе он был молодым талантом и не испытывал благоговейного страха ни перед окружающими его титанами-физиками (Нильсом Бором, Энрико Ферми, Гансом Бете), ни перед засекреченными руководителями проекта. Отдел безопасности оказался бессилен перед его проделками со вскрытием сейфов — иногда он вслушивался в малейшие движения механизма замка, иногда угадывал, какая физическая константа выбрана владельцем сейфа в качестве комбинации. (С тех пор Фейнман ничуть не изменился; многие его студенты в Калтехе наряду с физикой приобретают навыки вскрытия сейфов.)

После войны Фейнман работал в Корнелле. Там, как он рассказывал в своих интервью, катализатором его идей по разрешению проблемы бесконечностей был Бете. Точные уровни энергии атома водорода и силы между электронами (движущимися так быстро, что должны приниматься во внимание релятивистские изменения) — это передний край науки уже в течение трех десятилетий. Теория утверждает, что каждый электрон окружен отдельными коротко-

живущими виртуальными частицами, которые черпают свою массу и энергию из вакуума; эти частицы, в свою очередь, порождают другие — и в результате образуется математический «каскад», который предсказывает бесконечный заряд электрона. Томонага предложил путь решения проблемы в 1943 году, и его идеи стали известны, когда Фейнман в Корнелле и Швингер в Гарварде сделали такой же решающий шаг. Все трое разделили Нобелевскую премию по физике 1965 года. К тому времени фейнмановские математические средства, «интегралы Фейнмана» и диаграммы, которые он разработал, чтобы описывать взаимодействие между частицами, стали частью «боевого оснащения» каждого физика-теоретика. Математик Станислав Улам, еще один ветеран Лос-Аламоса, упоминает фейнмановские диаграммы как «обозначения, подталкивающие мысль в тех направлениях, которые могут оказаться полезными или даже новыми и решающими». Например, идея, что частица путешествует назад по времени, естественным образом следует из этих обозначений.

В 1950 году Фейнман переезжает в Калтех, в Пасадену. Его акцент еще безошибочно выдает в нем жителя Нью-Йорка, но Южная Калифорния оказывается для него самой подходящей средой обитания: среди «фейнмановских историй» его коллеги рассказывают о его любви к Лас-Вегасу и ночной жизни, где ему хотелось выглядеть значительной персоной. «Моя жена не могла поверить, что я действительно принимал приглашения на мероприятия, где требовался смокинг; правда, пару раз я отказался». В предисловии к «Фейнмановским лекциям по

физике» его коллеги, которые составили и опубликовали текст в 1963 году, упоминают, как он появлялся с саркастической ухмылкой, отбивая дробь на конголезском барабане. (Одни говорят, что на бонго он отбивал за раз десять барабанных ударов одной рукой, другие — что одиннадцать, но двумя. Попробуйте сами — и квантовая электродинамика покажется вам намного проще.)

Среди других достижений Фейнмана — его вклад в понимание фазовых изменений суперхолодного гелия и его работа с коллегой по Калтеху М. Гелл-Манном¹ по теории бета-распада атомных ядер. Он указал, что обе задачи все еще далеки до завершения. Ведь он без колебаний назвал саму квантовую электродинамику «надувательством», там оставались без ответа важные логические вопросы. Что за человек может решить задачу такого масштаба и продолжать терзаться сомнениями? Читайте интервью и, возможно, поймете.

Журналист: Для тех, кто смотрит на физику высоких энергий со стороны, ее целью представляется поиск окончательных составляющих материи. Казалось бы, в своих поисках мы возвращаемся к следу атомов, открытых греками, к бесконечно малым неделимым частицам. С помощью больших ускорителей вы получаете фрагменты, которые более мас-

¹ Мюррей Гелл-Манн (1929–2019) — лауреат Нобелевской премии по физике 1969 года за общий вклад и открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействиями. В 1964 году Гелл-Манн и Цвейг ввели концепцию кварков. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

сивны, чем первоначальные частицы, может быть, это кварки, которых никогда нельзя выделить. Что дает такой поиск?

Фейнман: Я не думаю, что это был всего лишь поиск. Физики пытаются выяснить, *как ведет себя Природа*; они легкомысленно говорят о некоторых «первичных элементарных» частицах, поскольку это способ взглянуть на Природу в данный момент, но... Представьте, что люди исследуют новый континент. Они видят воду, бегущую по земле, они видели такое и раньше и называли «рекой». Они говорят, что исследуют истоки, поднимаются по реке и уверены, что поднялись достаточно высоко и сейчас все увидят. Подумать только! Как только они продвинулись достаточно далеко, то поняли, что вся система другая: существуют большое озеро или пруды, или река делает круг. Вы могли бы сказать: «Ага! Они потерпели неудачу!» Но вовсе нет. Они исследовали другую реальную цель — исследовали землю. Если выяснилось, что нет верхних вод, истоков, они будут слегка озадачены своей опрометчивостью, но не более того. Это похоже на то, как вы рассматриваете систему встраиваемых друг в друга колесиков и ищите самое маленькое внутри — но его могло там и не быть, и тогда вы ищите черт знает что!

Журналист: Но ведь вы должны иметь некоторые догадки о том, что вы ищите; это должен быть горный хребет или долина, или что-то еще?

Фейнман: Да-а! Но что, если то, что вы получаете, — сплошная химера? Вы ожидаете некоторых явлений, вы вывели теоремы о топологии водоразделов, а обнаружили густой туман, может быть,

и повсюду сгустился туман, и нет возможности рассмотреть землю с воздуха? Идея, с которой вы стартовали, запущена! Тот, кто говорит, что собирается найти первичную элементарную частицу или законы единой теории поля, или еще что-нибудь совершенно определенное, излишне самонадеян. Конечно, если он откроет нечто неожиданное, он будет доволен, доволен еще больше. Вы думаете, он скажет: «Это не то, чего я ожидал, это не первичная частица, да я и не хотел ее исследовать»? Нет, он скажет: «Что за черт! Что же я все-таки открыл?»

Журналист: Вы действительно думаете, такое может случиться?

Фейнман: Да какая разница — я получил то, что получил. Нельзя сказать, что эксперимент всегда преподносит сюрприз, например несколько лет назад я был весьма скептически настроен по отношению к калибровочным теориям¹, частично потому, что полагал, что сильные ядерные взаимодействия будут значительно больше отличаться от электродинамики, чем это выглядит сегодня. Я ждал тумана, но сейчас это похоже на хребты и долины.

Журналист: Физические теории по-прежнему будут абстрактными и математическими? Смог бы сегодня работать такой теоретик начала девятнадцатого века, как Фарадей, не обладающий высокой математической подготовкой, но с мощной физической интуицией?

¹ Теории в физике частиц, которые описывают различные взаимодействия между субатомными частицами. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

Фейнман: Я бы сказал, что его шансы невелики. Во-первых, вам необходима математика просто для понимания того, что на настоящий момент сделано. Сегодня поведение субъядерных систем выглядит настолько странно по сравнению с системами, с которыми имели дело прежде и анализ которых казался абстрактным: чтобы понять лед, надо понять вещи, очень не похожие на лед. Модели Фарадея были механическими — пружинки, провода и напряженные модули в пространстве, — его образы были взяты из стандартной геометрии. Думаю, этот подход себя не исчерпал; однако все, что мы обнаружили в этом веке, резко отличается от знакомой нам физики, все еще очень неопределенно — и дальнейший прогресс возможен только в тандеме с математикой.

Журналист: Ограничит ли это число людей, которые могут внести вклад в науку, или хотя бы понять, что было сделано?

Фейнман: Или кто-нибудь разработает способ подачи материала, чтобы его было проще усваивать. Может быть, эти вопросы будут изучаться в более раннем возрасте. Это неверно, что современную математику считают слишком серьезной, трудной для понимания. Возьмите, например, компьютерное программирование; тщательно разработанная для этой цели логика — это один из способов думать, а мамы и папы говорят детям, что она доступна только профессорам. Теперь это часть повседневной работы, это способ жить. У детей есть компьютер, и он им интересен, они делают на нем удивительные, сумасшедшие вещи!

Журналист: С помощью курсов программирования, которые сейчас на каждом шагу!

Фейнман: Я не верю в то, что только избранные способны понять математику. В конце концов, математику придумали люди. У меня как-то был учебник по дифференциальному и интегральному исчислению, в котором говорилось: «Что может сделать один дурак, то может сделать и любой другой человек». Все, что мы успели узнать о природе, может казаться абстрактным и недоступным для понимания тому, кто этого не изучал, однако нашлись дураки, которые это изучили, — а в следующем поколении уже все дураки станут понимать эти вопросы.

Во всем этом угадывается тенденция к помпезности — представить все излишне глубоким и основательным. Мой сын выбрал курс философии, и вчера вечером мы смотрели работы Спинозы — там оказалось много незрелых доводов! Все эти атрибуты и субстанции, постоянная лишенная смысла «жвачка» — мы начали смеяться. Но почему? Это великий фламандский философ — а мы над ним смеемся. А все потому, что ему нет прощения! В тот же период жил Ньютон, Харви изучал кровеносную систему, были люди, обладающие методиками анализа, благодаря которым мы двигались вперед. Возьмите любое утверждение Спинозы и оглянитесь вокруг — вы не сможете сказать, что он был прав. Действительно, люди испытывали благоговейный трепет оттого, что он имел смелость задать эти великие вопросы, но хороша ли такая смелость, если вы ничего не получите в ответ на эти вопросы?

Журналист: В ваших лекциях комментарии философов относительно науки получили по заслугам...

Фейнман: Меня злят не сами философы, а их высокомерие. Если бы они умели посмеяться над собой! Если бы они просто сказали: «Я думаю, что это должно быть так, но фон Лейпциг считает, что это должно быть не так, и это тоже хорошая гипотеза». Если бы они объяснили, что это всего лишь догадка... Но лишь немногие признаются в этом — вместо научного исследования они хватаются за возможность, что нет никакой первичной фундаментальной частицы, и настаивают, чтобы вы остановили работу и взвесили еще раз все «за» и «против». «Вы недостаточно глубоко все продумали, давайте я дам вам определение нашего мира». Ну уж нет — я продолжу исследования *без* всякого определения!

Журналист: Как вы определяете, какая проблема стоит того, чтобы ею заняться?

Фейнман: Когда я учился в средней школе, у меня было представление, что нужно взвесить важность проблемы и умножить ее на ваши шансы решить ее. Знаете, ребенок с техническим складом ума любит оптимизировать все и вся; если вы хорошенько взвесите все «за» и «против», впоследствии вам не придется жалеть, что вы потратили свою жизнь на очень сложную проблему, так ничего и не добившись, или решили целый ряд маленьких проблем, с которыми другие справились бы не хуже.

Журналист: Давайте возьмем проблему, за которую вы, Швингер и Томонага получили Нобелевскую премию. Три различных подхода: правда ли то, что в тот момент эта проблема созрела для решения?

Фейнман: Квантовая электродинамика была разработана в конце 1920-х годов Дираком и другими учеными, сразу же после самой квантовой механики. Они сделали ее фундаментально правильной, но если вы начинаете решать их сложные уравнения, уравнения оказываются очень трудными для решения. Можно получить хорошее приближение первого порядка, но когда вы пытаетесь усовершенствовать его, учитывая поправки, неожиданно начинают возникать бесконечности. Все это знали в течение двадцати лет — это указано в конце всех книг по квантовой теории.

Тогда мы получили результаты экспериментов Лэмба¹ и Резерфорда² по сдвигам энергии электрона в атоме водорода. До тех пор грубые предсказания были достаточно хороши, но теперь появилось совершенно точное число: 1060 мегагерц и ничего, кроме этого. И все сказали: проклятие, эта проблема должна быть решена! Известна теория, известны проблемы, но теперь появилась очень точная цифра.

Ганс Бете взял эту цифру и выполнил некоторые оценки, как избежать бесконечностей, вычитая

¹ Уиллис Юджин Лэмб (1913–2008) — лауреат Нобелевской премии по физике 1955 года за открытие, связанное с тонкой структурой спектра водорода. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

² Роберт Резерфорд — американский ученый, чьи эксперименты 1947 года совместно с Уильямом Лэмбом продемонстрировали расщепление энергетических уровней в атоме водорода (Лэмбовский сдвиг) и внесли вклад в развитие квантовой электродинамики. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

эффект Лэмба из того эффекта с бесконечностями, и тут величины, которые имели тенденцию стремиться к бесконечности, вдруг перестали расти; возможно, они остановились в этом порядке по величине сдвига — он получил что-то около 1000 мегагерц.

Я вспоминаю, как он пригласил кучу людей к себе на вечеринку в Корнелле, но его вызвали на какую-то консультацию. Он позвонил мне во время вечеринки и сообщил, что продолжит вычисления в поезде. Когда он вернулся, он прочитал лекцию по этой проблеме и показал, как процедура обрезания интегралов позволяет избежать бесконечностей, но слишком уж все было подогнано для этой цели и запутано. Бете сказал: «Хорошо бы кто-нибудь показал, как все это можно привести в порядок». Я подошел к нему после лекции и заявил: «О, это легко. Я могу это сделать». Я начал интересоваться этими идеями еще на последнем курсе Массачусетского технологического института. Я даже состряпал тогда ответ — неверный, конечно. Именно тогда Швингер, Томонага и я принялись за разработку способа, как технически включить эту процедуру в последовательный анализ, сохранив на всех этапах релятивистскую инвариантность. Томонага уже предложил, как это сделать, и тогда же Швингер разработал свой собственный путь.

А я пришел к Бете со своим способом. Было смешно — я не знал, как выполнять простейшие практические задачи в этой области — я об этом когда-то читал, но был занят своей собственной теорией, так что я не мог проверить правильность своих

идей. Мы вместе проделали выкладки на доске — все оказалось неправильным. Даже хуже, чем раньше. Я вернулся домой, думал-думал и решил, что должен научиться решать примеры. И научился. После этого я вернулся к Бете, и мы попытались еще раз — и мой способ заработал! Мы так никогда и не поняли, что было неправильным в первый раз... какая-то проклятая ошибка.

Журналист: Насколько это вас задержало?

Фейнман: Ненадолго, может быть, на месяц. Это пошло мне на пользу, поскольку я просмотрел, что сделал, и согласовал сам с собой, что следует сделать, и убедился, что диаграммы, которые я придумал для правильного объяснения процессов, действительно работают.

Журналист: Понимали ли вы тогда, что их назовут «фейнмановскими диаграммами», что они войдут в учебники?

Фейнман: Конечно, нет. Мне вспоминается один момент. Я был в пижаме, работал, сидя на полу, вокруг меня были разбросаны бумаги — смешные диаграммы с шариками-кляксами и торчащими линиями. Я сказал сам себе: «Будет забавно, если эти диаграммы окажутся полезными и все начнут ими пользоваться, а *Physical Review* напечатает эти глупые рисунки. Конечно, я не мог предвидеть — во-первых, я не представлял себе, как много этих рисунков будет появляться в *Physical Review*, и, во-вторых, что, когда ими будут пользоваться, они не будут выглядеть смешно.

(На этом месте интервью было перенесено в офис профессора Фейнмана, где магнитофон отказался воз-

обновить работу.' Шнур, переключатель мощности, кнопка записи были в порядке; тогда Фейнман предложил вынуть кассету и вставить ее снова.)

Фейнман: Ну вот! Видите, вы должны знать жизнь. Физики об этом знают.

Журналист: Разобрать на части, а потом собрать все обратно?

Фейнман: Правильно. Всегда есть какая-то грязь, или бесконечность, или еще что-нибудь.

Журналист: Давайте продолжим интервью. В своих лекциях вы рассказываете, что физические теории хорошо работают при объединении различных классов явлений, можно демонстрировать рентгеновские лучи, мезоны или что-то еще. «Всегда существует много нитей, подвешенных во всех направлениях». Какие утерянные нити вы видите в физике сегодня?

Фейнман: У частиц существуют массы; калибровочные теории дают прекрасные образцы взаимодействия, но не для частиц с массами; необходимо понять эти нестандартные наборы массовых чисел. В сильных, ядерных взаимодействиях мы имеем теорию цветных¹ кварков и глюонов, очень точную и полностью определенную, но с очень малым количеством трудных для понимания предсказаний. Технически очень непросто получить четкую проверку теории — это сложная проблема. Я должен с сожалением констатировать, что здесь потеряна нить. По-

¹ «Цвет» — так называли физики определенное свойство кварков и глюонов не потому, что они действительно цветные, а просто за неимением лучшего названия нового свойства элементарных частиц. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

ка нет доказательств противоречивости теории, но нет и значительного прогресса, пока мы не проверим все предсказания с жесткими количественными результатами.

Журналист: Что вы скажете по поводу космологии? Как вы относитесь к предположению Дирака, что фундаментальные константы меняются со временем? Или что физические законы были именно в момент Большого взрыва?

Фейнман: Тут масса открытых вопросов. До сих пор физика пыталась найти законы и константы, не заботясь об их происхождении, но здесь нам навязывается подход, когда мы вынуждены рассматривать историю вопроса.

Журналист: Есть ли у вас какие-нибудь догадки?

Фейнман: Нет.

Журналист: Совсем нет? Вы не склоняетесь к какой-либо гипотезе?

Фейнман: Действительно нет. Раньше вы не спрашивали меня, думал ли я, что существуют элементарные частицы, или это все туман, застилающий глаза. Я бы сказал, что у меня нет простейшей идеи. Сейчас, чтобы усиленно работать над чем-то, вы должны быть уверены, что ответ где-то недалеко, поэтому вы так глубоко копаете, правда? Некоторое время вы сомневаетесь или к чему-то склоняетесь — но все время в глубине души вы смеетесь. Забудьте, что вы слышали о науке без предубеждения, без постоянных сомнений. Здесь, в данном интервью, говоря о Большом взрыве, у меня нет ни предубеждений, ни сомнений — но, когда я работаю, у меня их полно.

Журналист: Сомнения и предубеждения в пользу... чего? Симметрии, простоты?

Фейнман: В пользу моего сегодняшнего настроения. Сегодня я убежден, что существует некоторый тип симметрии, и убеждаю в этом других, а завтра я попытаюсь просчитать вариант, в котором гипотеза с симметрией не работает; и все, кроме меня, «сойдут с ума». Настоящий ученый всегда живет с постоянным сомнением. Он думает: «Может быть, это так», но действует, не забывая о том, что это только «может быть». Многие находят, что так жить трудно, считают, что это означает равнодушие. Это не равнодушие! Это гораздо более глубокое и горячее осмысление, это значит, что вы будете копать там, где, как вы убеждены, находится ответ; и кто-нибудь подойдет и скажет: «А вы слышали, что они там придумали?» И вы почтительно ответите: «Черт побери! Я на неправильном пути!» Такое случается сплошь и рядом.

Журналист: Есть и другое, что, по-видимому, часто случается в современной физике: открытие применений для разного вида математики, которая раньше считалась «чистой», например для матричной алгебры или теории групп. Физики сегодня больше привлекают такие разделы математики, чем раньше? Задержка во времени невелика?

Фейнман: Никогда не бывает задержки во времени. Возьмите кватернионы Гамильтона¹: физики

¹ Сэр Уильям Гамильтон (1805–1865) — ирландский математик, разработавший теорию кватернионов, конструкцию, ставшую основой векторного и тензорного анализа. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

отбросили большую часть этой мощной математической системы, и осталась только часть — математически почти тривиальная часть, — которая стала векторным анализом. Но когда для квантовой механики понадобилась вся мощь кватернионов, Паули¹ вновь представил систему в новой форме. Теперь можете оглянуться назад и убедиться, что спиновые матрицы Паули есть не что иное, как кватернионы Гамильтона... но даже если бы физики сохраняли в голове систему на протяжении девяноста лет, разница во времени составляла бы не более нескольких недель.

Допустим, вы заболели гранулематозом Вернера или чем-нибудь еще и просматриваете медицинский справочник. Вы можете вообразить теперь, что знаете о болезни больше, чем ваш доктор, хотя он и провел все это время в медицинских заведениях... понимаете? Гораздо легче изучить специальную ограниченную тему, чем всю область. Математики работают во всех направлениях, и физику легче ухватиться за то, что ему необходимо, чем пытаться охватить все, что потенциально может оказаться полезным. Проблема, о которой я уже упоминал — трудности с уравнениями в теории кварков, — это физическая проблема, и мы собираемся ее решить, и, может быть, когда мы ее решим, мы получим новую математику. Это удивительный факт, один из тех, которые я не могу понять, ведь математики изо-

¹ Вольфганг Паули (1900—1958) — лауреат Нобелевской премии по физике 1945 года за открытие принципа исключения. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

брели группы и прочее до того, как они понадобились в физике, — но что касается скорости прогресса в физике, я не думаю, что это так существенно.

Журналист: Еще один вопрос по вашим лекциям: вы говорите, что «следующая великая эра пробуждения человеческого интеллекта может создать методику понимания качественного содержания уравнений». Что вы под этим подразумеваете?

Фейнман: В этом месте я говорил об уравнении Шредингера¹. Из этого уравнения можно получить соединение атомов в молекулы, химические валентности — но когда вы смотрите на него, вы не видите богатства явлений, о которых знают химики; вы не знаете, что кварки находятся только в связанном состоянии и не существует свободного кварка — вы увидите, а может быть, и не увидите всего этого, но вопрос в том, что, когда вы смотрите на уравнения, которые предположительно описывают поведение кварков, вы не видите, почему это так. Посмотрите на уравнения для атомных и молекулярных сил в воде, и вы не сможете увидеть характер поведения воды; вы не увидите турбулентности.

Журналист: Это оставляет людям вопросы о турбулентности — метеорологам, океанографам, геологам и конструкторам самолетов, — ставит их в затруднительное положение, не так ли?

Фейнман: Абсолютно точно. И может быть, один из этих людей в затруднительном положении

¹ Эрвин Шредингер (1887–1961) — лауреат Нобелевской премии по физике 1933 года (вместе с Полем Дираком) за открытие новых эффективных форм атомной теории. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

будет особенно разочарован и прояснит проблему, и в этом случае станет физиком. Турбулентность — не такой уж простой случай физической теории, она может справляться только с простыми случаями — любой сложный случай мы не сможем описать. У нас нет пока подходящей фундаментальной теории.

Журналист: Возможно, есть смысл вписать это в учебники; ведь люди, далекие от науки, не имеют ни малейшего представления о том, как часто теория расходится с практикой.

Фейнман: Это результат очень плохого образования. Изучая физику, каждый со временем приходит к пониманию: мы знаем лишь малую толику того, что происходит в нашем мире. Наши теории действительно очень ограничены.

Журналист: Сильно ли меняется взгляд физиков на качественные следствия уравнений?

Фейнман: О да! Но мы в этом не слишком сильны. Дирак сказал, «*понять* физическую проблему — значит быть способным видеть ответ, не решая самих уравнений». Может быть, он преувеличивает, может быть, решение уравнений — это опыт, который необходим для более глубокого понимания, но пока вы не поняли, вы решаете уравнения.

Журналист: Как преподаватель, чем вы можете поддержать такую способность?

Фейнман: Я не знаю. У меня нет способа прояснить, до какой степени четко я излагаю мысли своим студентам.

Журналист: Проследят ли когда-нибудь историки науки за деятельностью ваших студентов, как

это было со студентами Резерфорда, Нильса Бора и Ферми?

Фейнман: Сомневаюсь. Я постоянно разочаровываюсь в своих студентах. Я не тот учитель, который знает, что делает.

Журналист: Но вы можете проследить за своим влиянием другим способом, скажем, влиянием на вас Ганса Бете или Джона Уилера?..

Фейнман: Конечно. Но я не знаю, каково мое влияние. Возможно, это мой характер — не знаю. Я не психолог и не социолог, я не понимаю людей, даже себя. Вы спросите, как этот парень учит, что его оправдывает, если он сам не знает, что делает? Так или иначе, я люблю учить. Мне нравится обдумывать новые способы взгляда на вещи — объяснять, делать их более понятными; правда, возможно, я не делаю их понятнее. Возможно, то, что я делаю, просто развлекает меня.

Я научился жить, не зная чего-то. Я не уверен, что добился успеха, но как я уже говорил раньше, что касается науки, я отдаю себе отчет в своем незнании. И меня восхищает необъятность мира!

Журналист: Когда вы вернулись в офис, вы приостановили обсуждение лекции по поводу цветного зрения. Это достаточно далеко от фундаментальной физики, не так ли? Не скажет ли вам физиолог, что вы «вторглись на чужую территорию»?

Фейнман: Физиология? Разве это физиология? Дайте мне немного времени, и я прочту лекцию о чем-нибудь из физиологии. Мне доставляет удовольствие ее изучать и узнавать в ней разные вещи — я вам могу *гарантировать*, что это будет интересно.

Я ничего не знаю, но я твердо знаю, как любое явление становится интересным, если начинаешь изучать его достаточно глубоко.

Мой сын думает так же, хотя круг его интересов гораздо шире моего в его возрасте. Он интересуется магией, компьютерным программированием, ранней историей церкви, топологией — о, ему потребуется жуткое количество времени — ведь существует столько интересных вещей. Мы любим сидеть и беседовать о том, насколько другими оказываются вещи и явления по сравнению с тем, что мы от них ожидаем; например мы сажаем космический корабль «Викинг» на Марс и пытаемся придумать, как найти жизнь на Марсе. Да, сын во многом похож на меня, по крайней мере я передал ему по наследству эту идею — все, что интересно одному человеку, будет интересно и другому.

Естественно, я не знаю, хороша эта мысль или нет... Вы поняли меня?

НАУКА ОСЛЕПЛЯЮЩЕЙ ДИКОСТИ: НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПОВОДУ НАУКИ, ПСЕВДОНАУКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ, КАК НЕ ДАТЬ СЕБЯ ОДУРАЧИТЬ

Выступление на церемонии вручения дипломов в Калтехе в 1974 году

***Вопрос:** Зачем Фейнману понадобилось рассказывать выпускникам университета о знахарях, экстрасенсах, племенах островов Южных морей, о волшебной силе рога носорога или масла «Вессон»?*

***Ответ:** Все это примеры, которые хитроумный Фейнман использует, чтобы убедить заканчивающих обучение выпускников, что честность в науке вознаграждает больше, чем слава и временные успехи в жизни. В своей речи, обращенной к выпускникам Калтеха 1974 года, Фейнман преподносит им урок научной честности вопреки нажиму высших слоев общества и сердитым взглядам банковских структур.*

Средневековые изобиловали суевериями и глупейшими идеями, например, что кусочек рога носорога повышает потенцию. (А вот и другая нелепая идея средних веков — следует носить обвислые свободные головные уборы.) В эти же времена был разработан метод отбора стоящих идей — нужно бы-

ло на практике убедиться, работает ли данное положение, и если не работает — отбросить. Этот метод, безусловно, оказался системообразующим в науке. Он разработан достаточно хорошо. Правда, трудно понять, как и в наши дни процветают колдуны и знахари, когда ничто из их предсказаний реально не работает или сбывается очень-очень редко.

Но даже сегодня я знаю немало людей, которые рано или поздно рассказывают о «летающих тарелках», астрологии или некоторых формах сознательно распространяемого мистицизма, о новых видах информации, экстрасенсах и тому подобном.

Большинство людей верят в разные странные вещи, которые я решил подвергнуть исследованию. Мое любопытство к изучению фактов привело к трудностям, когда я обнаружил, сколько всякого «хлама», о котором можно говорить, я не могу включить в свое выступление. Я был ошеломлен. Во-первых, я начал с изучения различных идей и опыта мистицизма. Сначала я забирался в изолированные резервуары (там было темно и тихо, и вы покачивались на воде, насыщенной английской солью) и провел много часов в галлюцинациях, так что теперь у меня имеется кое-какой опыт на этот счет. Потом я поехал в Эсален, где процветают мистические верования. (Это абсолютно своеобразное место — советую вам там побывать.) Я просто обалдел — никогда не предполагал, как много всякой всячины там намешано.

Я сидел, например, в теплом бассейне, там были еще парень с девушкой. И он заявляет девушке: «Я учусь массажу, и мне интересно попрактиковать-

ся на тебе». Девушка согласилась, забралась на стол, и он начал путешествие по ее ступне, поглаживая ее большой палец и постукивая ступню вокруг. Затем он повернулся к другой девушке, очевидно, инструктору, и произнес: «Я чувствую что-то вроде впадины. Это гипофиз?» Она ответила: «Нет, это не то». Я не выдержал: «Вы чертовски далеко от гипофиза, молодой человек». Они уставились на меня — я натянул свое покрывало, — и инструктор проговорила: «Это рефлексотерапия». Я закрыл глаза и погрузился в медитацию.

Этот эпизод выбил меня из колеи. Я познакомился также с экстрасенсорным восприятием и парапсихологическими явлениями; последним «сдвинутым» был Ури Геллер — человек, который, как считалось, умел сгибать ключи, потирая их пальцем. По его приглашению я зашел к нему в номер отеля — он должен был демонстрировать чтение мыслей и сгибание ключей. Он безуспешно пытался прочесть мои мысли; думаю, никто не сможет прочесть мои мысли. Мой сын держал ключ, Геллер потерял его, но ничего не произошло. Тогда он сказал, что работает лучше под водой; можете себе представить эту картину, когда все мы стояли в бассейне, ключи покрывала вода, и он потирал их пальцем. Ничего не произошло. Я так и не смог исследовать это явление.

Потом я начал думать, что бы еще такое проверить? (И тогда я подумал о колдунах и о том, как легко доказать, что их предсказания не работают.) Я нашел вещи, в которые верят многие люди, — например мы имеем некоторое представление об об-

разовании. Есть большие школы, которые учат методикам чтения или математике или еще чему-то, но если присмотреться повнимательнее, вы заметите неполадки с методами или все возрастающие трудности с чтением, несмотря на то что эти же самые люди участвуют в совершенствовании методик. Их методики не работают, подобно средствам знахарей и колдунов. Вглядитесь в их систему — почему они думают, что их методы должны работать? Другой пример — как быть с преступниками? Тут мы нисколько не продвинулись вперед: много теорий — и никакого прогресса — мы не можем уменьшить количество преступлений с помощью метода, которым пользуемся в борьбе с преступностью.

Эти вопросы выглядят вполне научными. Мы их изучаем. Я думаю, что на обычных людей, наделенных здравым смыслом, наводит страх псевдонаука. Это может быть учительница с разумными идеями относительно обучения учеников чтению, которая подвергается нападкам со стороны школьного начальства, предписывающего делать это по-другому. Возможно, они даже убедят ее и в том, что ее методика никуда не годится. Это могут быть родители нерадивых учеников, которые после бесплодных занятий с ними станут корить себя за то, что не послушались экспертов, рекомендовавших им «правильные вещи».

Итак, мы действительно должны вникнуть в теории, которые не работают, и в науку, которая наукой не является.

Я пытался найти принцип, проясняющий эти явления, и додумался до следующей системы. В любое

время вы можете оказаться на коктейльной вечеринке, где чувствуете себя вполне комфортно, беседуя с кем-то, как вдруг хозяйка вечеринки спрашивает вас: «О чем это вы тут разговариваете?» — или жена подойдет и скажет: «Почему ты опять флиртуешь?» Это значит, что они понимают, о чем вы говорите со своим собеседником.

Используя этот метод, я обнаружил еще несколько тем, о которых изрядно подзабыл, — среди них эффективность различных форм психотерапии. Я начал влезать в эту тему основательно, черпая информацию из библиотеки и других источников — я столько хотел бы рассказать вам, но не в состоянии этого сделать. И просто ограничусь несколькими примерами. Я сконцентрировал внимание на том, что касается большинства людей. Может быть, я прочитаю несколько лекций по этим вопросам в будущем году. Это займет много времени.

Я думаю, что новаторство в образовании и психологии, о котором я уже говорил, являет собой пример псевдонауки, или науки ослепляющей дикости. В Южных морях, на островах, у местных племен существует массовый культ. Во время войны они видели, как на островах приземлялись самолеты с различными полезными грузами, и сегодня хотят создать у себя подобные вещи. Они додумались создать нечто похожее на взлетно-посадочную полосу, разложили костры с обеих ее сторон, сделали деревянную будку для сидящего там человека с двумя деревянными брусочками на голове, напоминающими наушники, и прутиками из бамбука, торчащими в виде антенны, — этот человек должен нести функ-

ции диспетчера полетов — и они ждут приземления самолета. Они все сделали правильно. Форма превосходна. Все выглядит так, как они видели раньше. Но система не работает. Самолеты не приземляются. Я назвал это наукой ослепляющей дикости, поскольку они следуют всем рецептам и формам научного исследования, но пропускают нечто существенное — самолеты не приземляются.

Теперь мне следует рассказать, что же они пропустили. Очень трудно объяснить племенам Южных морей, как они должны организовать систему, чтобы вдохнуть в нее жизнь. Это вовсе не решение проблемы — рассказать им, как улучшить форму наушников. Но существует одна особенность, пропущенная наукой ослепляющей дикости. Мне хотелось бы высказаться на эту тему подробнее. Я имею в виду нечто вроде научной прямоты, принцип научного мышления, соответствующий абсолютной честности, форма обучения от «обратного». Например, если вы ставите эксперимент, вы должны сообщить обо всех неправильных или неполноценных случаях, а не только о случаях, которые вы считаете правильными. Вы должны сообщить и о других случаях, которые, возможно, объясняют ваши результаты, и о случаях, которые, как вам кажется, следует исключить на основании других экспериментов, понять, как они работают, удостовериться, что другие их тоже исключили или могут исключить.

Если какие-то детали в вашем исследовании вызывают сомнения, их необходимо представить для обсуждения. Если вы знаете о какой-то ошибке или искажении — лучшее, что вы можете сде-

лать, — объяснить их. Если, например, вы создаете теорию, заявляете о ней и представляете на суд коллег, вам следует снабдить ее всеми фактами, согласующимися и не согласующимися с ней. Существуют и более тонкие вопросы. Когда вы объединяете вместе множество идей, создавая законченную теорию, естественно убедиться, годятся или нет ваши объяснения для определенного круга явлений, послуживших толчком для создания теории. Однако завершенная теория должна объяснять дополнительно еще ряд фактов или явлений.

Короче говоря, идея должна содержать *всю* информацию, позволяющую остальным оценить ваш вклад; не просто информацию, которая приводит к выводам в одном или другом конкретном направлении.

Простейший путь объяснения своей идеи — сопоставить ее с уже имеющейся информацией. Накануне вечером я услышал в рекламе, что масло «Вессон» не впитывается пищей. Это действительно верно. Это не мошенничество; но я толкую сейчас не о мошенничестве — я говорю о честности, прямоте другого, научного уровня. К рекламе следует добавить следующий факт — при определенных температурах *никакое* масло не впитывается пищей. Если работать при другой температуре, все виды масел, включая «Вессон», впитываются пищей. Итак, следует привести не имеющийся факт, а этот довод — разница состоит в том, с чем мы должны иметь дело и при каких условиях.

Мы знаем из эксперимента, что истина может ускользнуть. Другие экспериментаторы будут повто-

рять ваш опыт и выяснят, были вы правы или нет. Явления природы будут согласовываться или не согласовываться с вашей теорией. И хотя вы испытаете временную славу и воодушевление, ваша репутация как ученого не улучшится, если вы не будете обращать внимания на *ту* работу, о которой я говорю. И вот этой научной честности как раз и не хватает в науке ослепляющей дикости. Огромное количество возникающих в такой науке трудностей связано, безусловно, со сложностью предмета и неприменимостью к нему научных методов. Тем не менее следует отметить, что это не единственное препятствие. Вот *почему* самолеты не приземляются — они и не могут приземлиться.

Из опыта мы знаем, как избежать самообмана. Вот один пример: Милликен экспериментально измерял заряд электрона, используя падающие капли масла, и получил, как мы теперь знаем, не слишком точный ответ. Это произошло отчасти потому, что он использовал неправильное значение вязкости воздуха. Интересно проследить за историей измерений заряда электрона после Милликена. Если вы построите график измерений как функцию времени, то окажется, что одно будет чуть больше значения Милликена, следующее чуть больше предыдущего и так далее пока в конце концов число не станет несколько выше.

Как экспериментаторы определили, что большее число более правильное? Это история, которой ученые стыдятся, — очевидно, люди представляли следующую картину: когда они получали число значительно больше числа Милликена, они думали, что

что-то неправильно — начинали искать и находили причину, в чем состоит неточность. Когда они получали число, близкое к значению Милликена, они не считали его надежным. По той же причине они исключали все числа, слишком далекие от значения Милликена. Сегодня мы знаем все эти подводные камни и не повторим подобных ошибок.

Но это длинная история — понять, как избежать самообмана, — это вопрос высшей научной честности, это то, что мы никогда не включаем в конкретный курс. Мы просто надеемся на то, что вы усвоите это сами.

Первый принцип, как не поддаться самообману, — понимать, что вы простейший объект для одурачивания. Будьте очень внимательны к этому доводу! Когда вы не обманываете самого себя, вы не обманываете и других ученых. В условном смысле после этого вы будете честны.

Я хотел бы добавить кое-что, возможно, не слишком существенное для ученого, но для меня важное — когда вы выступаете как ученый, вы не должны также обманывать неспециалистов, обычных людей. Я не собираюсь вам рассказывать, как обвести вокруг пальца свою жену, или надуть свою девушку, или что-нибудь в этом роде; я не говорю о ситуациях, когда вы выступаете не как ученый, а как обычный человек. Это проблемы ваши и вашего священника. Я говорю о специфическом дополнительном типе честности, когда вы не скрываете того, что можете в чем-то ошибаться — вы обязаны сделать это, когда действуете как ученый. Это наша ответственность, долг

ученых по отношению к другим ученым и простым людям.

Например, я был немного удивлен, когда разговаривал с приятелем, которому предстояло выступать на радио. Он работал в области космологии и астрономии и не знал, как рассказать радиослушателям о практическом применении своей науки. «Да ладно, — сказал я, — их вообще не существует». Он подумал и ответил: «Да, но тогда мы не сможем получить поддержку для своих исследований». Я подумал, что это в некотором роде нечестно. Если вы представляете себя как ученого, вы должны объяснить неспециалистам, что вы делаете. И тогда пусть они решают — поддержать вас или нет, учитывая обстоятельства.

Вот пример данного принципа в действии: если вы решили проверить некоторую теорию или хотите объяснить некоторую идею, вам следует опубликовать, каким способом она возникла. Если вы публикуете только результаты, можно ограничиться хорошей аргументацией. Вы должны опубликовать *исчерпывающие* результаты, *все*, что вам известно. Давайте снова вернемся к рекламе — предположим, некоторые конкретные сигареты обладают определенными свойствами, например низким уровнем никотина. Компания широко информирует, что такие сигареты более безопасны — но она между тем не сообщает, что смолы существуют в различных пропорциях, замалчивает и другие опасные стороны. Иначе говоря, правдоподобие публикуемого материала зависит от ответной реакции. Так не должно быть.

Думаю, это очень важный момент, когда ученый консультирует правительство. Предположим,

сенатор просит вашего совета, где бурить скважину в его штате, а вы склоняетесь к тому, что лучше бурить в другом штате. Если вы не опубликовали результаты, мне кажется, вы не сможете дать научной рекомендации. Вас просто использовали. Если ваш ответ случайно совпадет с мнением правительства или того или иного политика, они могут использовать его в своих целях, а в худшем случае они и вовсе его не опубликуют. Это не называется научной консультацией.

Существуют и другие виды ошибок, характерные для неудовлетворительной научной деятельности. Когда я работал в Корнелле, я часто разговаривал с сотрудниками факультета психологии. Одна из студенток рассказала мне, что хочет проделать эксперимент. Я не помню деталей, но одним из сотрудников было обнаружено, что при определенных обстоятельствах X крысы ведут себя определенным образом A . Ей было любопытно понять, будут ли крысы вести себя так же, если обстоятельства изменятся на Y . Она предлагала сделать эксперимент при обстоятельствах Y и посмотреть, получится ли тот же результат A .

Я объяснил ей, что сначала необходимо повторить в ее лаборатории эксперимент первого исследователя — выполнить его при условиях X и посмотреть, приведет ли это к результату A — и уж потом изменить условия на Y и понять, изменилось ли A . Она предполагала, что она сумеет проконтролировать фактическую разницу в результатах.

Ей понравилась эта новая идея, и она пошла к своему профессору. А он ответил, что нет, она не

может этого сделать, поскольку эксперимент уже закончен, и она просто попусту потратит время. Оказывается, где-то с 1935 года генеральная политика состояла в том, чтобы не повторять психологические эксперименты, а только менять условия и наблюдать, что произойдет.

Сегодня существует опасность подобных вещей даже в выдающихся областях физики. Я был шокирован экспериментом, выполненным на большом ускорителе в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми, где сотрудник работал с дейтерием. Чтобы сравнить результаты по тяжелому водороду с экспериментами с легким водородом, ему пришлось воспользоваться чьими-то данными по легкому водороду, выполненными на другой аппаратуре. На вопрос почему он ответил, что не получил времени на программу для эксперимента с легким водородом на той же аппаратуре (времени было слишком мало, а аппаратура очень дорогая), так как там не должно было появиться никаких новых результатов. Сотрудники, отвечающие за программы ускорителя, были заинтересованы не новыми результатами, а получением денег на саморекламу и прочие собственные нужды и разрушали тем самым весь смысл проводимых экспериментов. Экспериментаторам зачастую сложно закончить работу, соблюдая принципы научной честности.

Однако существуют эксперименты по психологии совсем иного рода. Например, много экспериментов проводят с крысами, бегущими через всевозможные лабиринты и прочее — с маловразумительными результатами. А вот в 1937 году некто Янг

выполнил очень интересный эксперимент. Он построил длинный коридор с дверцами по одну сторону коридора, куда сажали крыс, и дверцами по другую его сторону, куда клали еду. Он предполагал увидеть, что если он натренирует крыс бежать в третью дверцу, то они так и будут поступать в дальнейшем. Но нет! Крысы сразу же бежали к той дверце, где прежде лежала еда.

Вопрос состоял в том, как крысы определяли нужную дверцу, ведь коридор был таким однородным — почему же они бежали к той же дверце, что и прежде? Очевидно, что-то отличало данную дверцу от остальных. Янг очень тщательно покрасил каждую дверцу, добившись одинаковой текстуры внешней ее поверхности. Но крысы по-прежнему бежали туда же. Тогда он предположил, что крысы чувствуют запах пищи, и начал устранять все запахи после каждого пробега крыс. Крысы снова бежали туда же. Тогда он решил, что, возможно, крысы реагируют на свет и обстановку лаборатории, как разумные существа. Он закрыл коридор сверху, но крысы бежали к той же дверце.

Наконец он решил, что пол издает звуки, когда крысы бегут к дверце, и поставил свой коридор на песок. Он устранял одно за другим все слабые места и в конце концов столько раз «водил крыс за нос», что они выучили, что бежать надо к третьей дверце. Но стоило ослабить любое из условий, как крысы снова бежали к заветной дверце.

С научной точки зрения это эксперимент высшего класса. Это эксперимент, который чувствителен к пробегу крыс, поскольку он раскрывает все осо-

бенности, используемые крысами, — причем не все из них были известны вам. Этот эксперимент точно определяет, какие условия надо использовать, чтобы тщательно все контролировать в крысиных бегах.

Я ознакомился и с последующей историей этого эксперимента. В следующем эксперименте, выполненном после первого эксперимента мистера Янга, на него никогда не ссылались. В нем не использовались его критерии — например установка коридора на песок и его крайняя тщательность. В последующем эксперименте использовали бегающих крыс старым способом, не обращая внимания на замечательные открытия мистера Янга, не ссылаясь на его статьи, как будто он ничего и не открыл. В действительности он открыл все особенности поведения бегающих крыс. Науку ослепляющей дикости характеризует отсутствие внимания к экспериментам высокого класса.

Другой пример — это эксперименты по экстра-сенсорному восприятию мистера Райна и других парapsихологов. Многие подвергают их критике — да они и сами критикуют свои собственные эксперименты, — они совершенствуют методики, а влияние опытных данных становится все меньше и меньше и наконец совсем исчезает. Все парapsихологи ищут какой-либо эксперимент, который можно повторить, — который можно воспроизвести снова и снова и получить те же результаты, даже набрать статистику. У них бегают миллионы крыс — нет, извините, это люди — они делают массу вещей и получают некоторый статистический эффект. А в следующий раз они не получают ничего. Всегда найдется чело-

век из их рядов, который скажет, что ожидание воспроизводимого опыта является неуместным требованием. И это *наука*?

Райн заявляет о новой организации и что он уходит с поста директора Института парапсихологии. Поучая своих учеников, что и как им делать, он утверждает, что в опытах по парапсихологии следует использовать только специально обученных студентов, способных получать парапсихологические результаты в приемлемых пределах — а на остальных, которые имеют лишь случайные результаты, нечего и время зря тратить. Такая политика обучения исключительно опасна — обучать студентов, как получать желаемые результаты, а не проводить эксперименты с научной честностью.

У меня больше нет времени — мне просто хочется пожелать вам удачи везде, где вы будете соблюдать принцип научной честности и где никакие обстоятельства не заставят ее потерять — ни давление со стороны руководства вашей организации, ни получение финансовой поддержки. Желаю вам свободы. И наконец мой последний совет: никогда ничего не говорите, не зная точно, что вы хотите сказать и как это правильно сформулировать.

ЭТО ПРОСТО — КАК РАЗ, ДВА, ТРИ

Очень смешная история, рассказывающая о ранних студенческих экспериментах Фейнмана — с собой, своей пишущей машинкой и своими приятелями-студентами — для выяснения загадки счета и времени.

Когда я был ребенком и рос в Фар-Рокавей, у меня был друг Берни Уокер. У каждого из нас дома были «лаборатории», и мы в них проделывали различные «эксперименты». Однажды мы что-то обсуждали — в то время нам было лет одиннадцать-двенадцать, — и я сказал:

— Мысли ничего не означают, кроме внутреннего разговора самого с собой.

— Ну да? — сказал Берни. — Представляешь дурацкую форму коленчатого вала в машине?

— Да, а что?

— А то. Как ты его опишешь, если разговариваешь сам с собой?

Так я узнал от Берни, что мысли могут быть зримыми, равно как и словесными.

Позже, в колледже, я начал интересоваться природой снов. Я удивлялся, как можно видеть так реаль-

но, как будто свет попадал на сетчатку глаза, а глаза в это время закрыты: нервные клетки на сетчатке стимулируются каким-то другим способом — возможно, самим мозгом — или мозг обладает «отделом суждения», который активизируется во время сна? Меня никогда не удовлетворяли ответы на подобные вопросы в психологии, и я очень заинтересовался, как работает мозг. Вместо чего-то разумного рассказывали всяческие байки про интерпретацию снов.

Когда я учился в аспирантуре в Принстоне, вышла глупейшая статья по психологии, которая вызвала широкую дискуссию. Автор решил, что «ощущением времени» в мозге управляет химическая реакция, включающая железо. Я тогда подумал про себя: «Откуда, черт возьми, он это взял?»

А идея пришла к нему следующим образом. У его жены была хроническая лихорадка, которая то затухала, то возобновлялась. Как-то ему пришла в голову идея проверить ее ощущение времени. Он измерил «протяженность ее секунды» (не глядя на часы) и проверял, сколько времени у нее займет счет до 60. Он заставлял бедную женщину считать целый день и в конце концов обнаружил, что, когда лихорадка усиливалась, она считала быстрее, когда ослабевала — медленнее. Поэтому, подумал он, то, что управляет в мозге «ощущением времени», должно двигаться быстрее в лихорадочном состоянии и наоборот.

Будучи весьма «ученым» парнем, психолог знал, что скорость химической реакции меняется с окружающей температурой по некоторой формуле, зависящей от энергии реакции. Он измерил разницу

в скорости счета своей жены и определил, как температура меняется со скоростью. Затем попытался найти химическую реакцию, скорость которой меняется с температурой так же, как скорость счета его жены. Он нашел, что реакции, содержащие железо, подходят лучше всего. Отсюда он сделал заключение, что ощущение времени его жены управляется химической реакцией, происходящей в ее организме, которая включает железо. Мне все это показалось вздором — так много звеньев могли оказаться неправильными в его длинной причинной цепочке. Но напрашивался интересный вопрос: что действительно определяет «ощущение времени»? Когда вы пытаетесь считать равномерно, от чего зависит скорость счета? И что внутри вас может изменить эту скорость?

Я решил провести исследование. Я начал считать секунды, естественно, не глядя на часы, — до 60 в замедленном равномерном ритме: 1, 2, 3, 4, 5... Когда я досчитал до 60, прошло только 48 секунд, но это меня не беспокоило: проблема заключалась не в точном совпадении с минутой, а в счете с постоянной скоростью. В следующий раз я досчитал до 60 за 49 секунд. В следующий — за 48. Потом — за 47, 48, 49, 48, 49... Итак, я обнаружил, что считаю с почти постоянной скоростью.

Теперь я сидел, не считая, и ждал, пока, по моим ощущениям, пройдет минута; это оказалось очень неравномерно — результат все время менялся. Следовательно, я убедился, что оценивать минуту исключительно угадыванием плохо. А считая, результат получается весьма точным.

Теперь я знал, что могу считать с постоянной скоростью, и тут же возник следующий вопрос — что влияет на скорость?

Может быть, это связано со скоростью биения сердца. Тогда я стал бегать туда-сюда по лестнице, чтобы сердце забилося быстрее. Потом я вбежал в свою комнату, плюхнулся на кровать и досчитал до 60.

Я пытался также бегать вверх-вниз по лестнице и считать про себя.

Ребята видели, как я бегаю, и хохотали: «Что ты вытворяешь?»

Я не мог ответить — я же не мог говорить, считая про себя — выглядел я полным идиотом, продолжая бегать взад-вперед по лестнице.

(Ребята в аспирантском колледже уже привычно смотрели на меня, как на идиота. Как-то раз, например, один малый ввалился ко мне в комнату — я забыл запереть дверь во время «эксперимента» — и обнаружил меня в кресле — я надел тяжелый овчинный тулуп и высунулся в широко открытое окно в жуткую зимнюю стужу, в одной руке я держал кружку, а другой перемешивал в кружке жидкость. Я заорал: «Не мешай мне! Да не мешай же!» Я перемешивал желе «Джелло» и наблюдал: мне было любопытно узнать, как будет коагулировать желе на холоде, если оно все время движется при перемешивании.)

Так или иначе, после разных комбинаций бега по лестнице и погружения в постель — сюрприз! — скорость биения сердца не оказывает никакого влияния. После тяжелых пробежек я установил, что с температурой это тоже никак не связано

(хотя и знал, что температура не повышается во время эксперимента). В конце концов я не смог найти больше ничего, что влияло бы на скорость счета.

Бег по лестнице — весьма скучное занятие, и я начал считать во время выполнения разных действий. Например, когда я носил вещи в прачечную, нужно было заполнить квитанцию, указав, сколько сдаешь рубашек, трусов и тому подобное. Я мог написать 3 в графе «трусы», 4 в графе «рубашки», но никак не мог пересчитать свои носки. Их было так много: я уже пользовался своей «счетной машинкой» — 36, 37, 38 — все носки передо мной — 39, 40, 41... Как же пересчитать носки?

Нашел! Я могу рассортировать их по геометрическому узору — с квадратами, например: пара носков в одном углу, пара — в другом, пара — поверх этих, и пара — поверх тех — всего 8 носков.

Я продолжал игру с пересчитыванием узоров и пришел к заключению, что я могу считать строки в газетной статье, группируя строки в структуры 3, 3, 3 и 1 — получим 10; потом 3 одной структуры, 3 — другой, 3 — третьей и еще одна — будет 100. Я начал таким образом использовать газеты. После того как я досчитал до 60, я знал, в какой структуре я находился, и мог сказать: «Я дошел до 60, и это соответствует 113 строкам». Я обнаружил, что мог даже читать статьи, пока считал до 60, и это никак не влияло на скорость! Фактически я мог делать что угодно и одновременно считать про себя — только когда не разговаривал с кем-нибудь вслух.

А печатать на машинке — копировать слова из книги? Я и это мог делать, но это ограничивало мое

время. Я был воодушевлен: я все-таки найду что-нибудь, что влияет на скорость моего счета! Я начал новые исследования.

Я продвигался вперед, печатая достаточно быстро простые слова, и одновременно считал про себя 19, 20, 21, опять печатал и считал 27, 28, 29 — пока — что за черт, не могу подобрать слова? Нашел — и опять считаю 30, 31, 32 и так далее. Когда я досчитал до 60, я опаздывал.

После некоторого самоанализа и дальнейших наблюдений я представлял, что должно случиться: я прерву счет, когда у меня будут затруднения со словом, требующим «больше мозгов». Моя скорость счета не падала, правда, сам счет время от времени прерывался. Счет до 60 стал совершенно автоматическим, и впервые я не заметил, что он прервался.

На следующее утро за завтраком я сообщил результаты своих экспериментов двум ребятам за столом. Я рассказал им обо всем, что мог делать, пока считал про себя, а также о единственной вещи, которую не мог совместить со счетом — одновременно с кем-то разговаривать.

Один из ребят, Джон Таки, сказал: «Я не верю, что ты можешь читать, и не вижу причин, по которым ты не можешь разговаривать. Держу пари, что ты можешь разговаривать, когда считаешь про себя, и не можешь при этом читать».

Я продемонстрировал обратное: ребята дали мне книгу, и я читал ее какое-то время, пока считал про себя. Когда я дошел до 60, завопил: «Ну! 48 секунд — мое обычное время». И рассказал им, что успел прочитать.

Таки был изумлен. После того как мы проверили несколько раз его стандартное время счета до 60, он произнес: «У Мэри есть маленькая овечка; я могу сказать все, что хочу, это не имеет значения; не знаю, что тебя беспокоит», — тра-та-та, тра-та-та — и, в заключение — о'кей! Он отбивал ритм прямо на носу! Я не мог этому поверить!

Мы немного об этом поговорили и кое-что поняли. Выяснилось, что Таки считал другим способом: он мысленно видел ленту с проходящими по ней номерами. Он мог говорить: «У Мэри есть маленькая овечка» — и наблюдал за лентой. Теперь было ясно, он «смотрел» на свою проходящую мимо ленту, поэтому он не мог читать, а я говорил сам с собой, когда я считал, и поэтому не мог разговаривать.

После этого открытия я пытался найти способ, как читать вслух во время счета, но никто из нас этого сделать не смог. Я решил, что я должен использовать часть своих мозгов, которые не взаимодействуют с отделами зрения и речи, и мне пришло в голову использовать пальцы, так как они связаны с ощущением осязания.

Вскоре я преуспел в счете при помощи пальцев и одновременно читал вслух. Но я хотел, чтобы весь процесс был ментальным, а не опирался на физическую деятельность. То есть я пытался представить ощущения своих пальцев, движущихся, пока я читаю вслух.

В этом я так и не преуспел. Я подумал, что это потому, что я недостаточно тренировался; но это было попросту невозможно — я никогда не встречал никого, кто умел бы это делать.

Таки с его опытом открыл мне глаза: в головах разных людей происходят совершенно разные процессы, когда они думают, что делают одни и те же вещи, даже такие простые, как счет. Вы объективно, извне, можете проверить, как работает мозг: не нужно спрашивать человека, как он считает, и опираться на его наблюдения над самим собой; вместо этого наблюдайте за тем, что он может и чего не может, пока считает. Это абсолютная проверка. Нет проверки вернее и хитроумнее.

Естественно объяснить идею в терминах того, что уже есть у вас в голове. Концепции нагромождаются одна на другую. Эта идея выражается через ту идею, а та — через другую, которая рождается из эксперимента со счетом, а он может оказаться таким разным у различных людей!

Я часто думаю об этом, особенно когда учу понятные лишь немногим методики, как, например, интегрирование функций Бесселя. Когда я вижу уравнения, я вижу значки в цвете — сам не знаю почему. Когда я читаю лекции, я вижу странные картинки функций Бесселя из справочников Джанке и Эмде со светло-золотистыми j , фиолетово-синеватыми n и темно-коричневыми x , порхающими вокруг. И я удивляюсь, какого черта эти x должны походить на моих студентов.

РИЧАРД ФЕЙНМАН СТРОИТ ВСЕЛЕННУЮ

В ранее не опубликованном интервью, сделанном при содействии Американской ассоциации по перспективному развитию науки, Фейнман предается воспоминаниям о своей жизни в науке: о своей первой лекции перед аудиторией нобелевских лауреатов; о приглашении работать над первой атомной бомбой и его реакции на это приглашение; о науке, отягощенной культом (науке ослепляющей дикости); и о пророческом предутреннем звонке журналиста, сообщившего ему о присвоении Нобелевской премии. Фейнман ответил: «Не могли бы вы сообщить мне об этом утром?»

Диктор: Мел Фейнман служил продавцом в компании по продаже форменной одежды в Нью-Йорк-Сити. 11 мая 1918 года он радостно встретил рождение своего сына Ричарда. Сорок семь лет спустя Ричард Фейнман получил Нобелевскую премию по физике. Во многих отношениях Мел Фейнман приложил максимум усилий для становления Ричарда Фейнмана.

Фейнман: Да, перед тем как я родился, мой отец сказал матери, что «этот мальчик будет ученым». Он не мог сказать ничего подобного перед лигой в защиту прав женщин, представительницы лиги труби-

ли о равенстве в те дни. Но он никогда не говорил мне, что я стану ученым. Я научился хорошо разбираться в вещах, о которых знал. Никогда не было никакого давления... Позже, когда я стал старше, он брал меня на прогулки в лес и показывал животных, птиц и прочую живность, рассказывал о звездах, и атомах, и о многом другом. Он рассказывал о том, что было интересно ему самому. У него было определенное отношение к миру и способ его познания, который, я считаю, был глубоко научным для человека, не имеющего непосредственного научного образования.

Диктор: Сейчас Ричард Фейнман — профессор физики в Калифорнийском технологическом институте в Пасадене, где работает с 1950 года. Часть своего времени он тратит на преподавание, а другую часть посвящает теоретической работе, изучая мельчайшие фрагменты материи, из которой состоит наша Вселенная. На протяжении всей его карьеры поэтическое воображение иногда забрасывало его в экзотические области: одно время он изучал математику, в том числе связанную с созданием атомной бомбы, потом генетику простейших вирусов, свойства гелия при экстремально низких температурах... Его работы, удостоенные Нобелевской премии за разработку квантовой электродинамики, помогли решить множество физических проблем более эффективно, чем когда-либо. Но вернемся снова к тому долгому пути к успеху, который начался с прогулок в лесу с отцом.

Фейнман: Отец любил всматриваться в суть вещей. Обычно он говорил: «Представь, что мы мар-

сиане и, прилетев на Землю, увидели эти странные создания, которые делают какие-то вещи. Что мы о них подумаем? Вот тебе пример — предположим, что мы никогда не спим. Мы марсиане, и в нашем понимании работать надлежит все время. А мы видим, что все эти создания каждый день прекращают работу, закрывают глаза и восемь часов пребывают в инертном состоянии. У нас для них есть интересный вопрос. Мы их спросим: «Вот мы внезапно останавливаемся, или замедляемся-замедляемся и останавливаемся, а куда деваются наши мысли?» Позже я много думал об этом и проводил эксперименты в колледже, пытаюсь найти ответ — что происходит с нашими мыслями, когда мы спим.

Диктор: В свои ранние годы мистер Фейнман планировал стать инженером-электриком, приложить усилия к физике и сделать ее полезной для себя и окружающего мира. Он быстро понял, что наиболее интересной для него областью являются теоретические и математические принципы, управляющие Вселенной. Его ум стал его лабораторией.

Фейнман: В юном возрасте я называл лабораторией место, где можно с чем-то повозиться: сделать пенетромметр, какие-нибудь приборчики, фотоэлементы или всякую всячину. Я был просто поражен, когда увидел настоящие университетские лаборатории — там проводили весьма серьезные измерения. А мне в своей лаборатории всегда было наплевать на измерения. Я просто возился и делал разные вещи. Это была лаборатория моего отрочества, и я думал, что все делаю правильно. Я ду-

мал, что это единственный путь двигаться вперед. Понимаете, в своей «лабе» я должен был решать несколько проблем. Обычно я чинил пенетрометры. Мне нужно было, например, получить некоторое сопротивление, чтобы вставить его параллельно с вольтметрами, тогда система работала в другой шкале. Вот такие проблемы я решал. Я начал находить формулы, электрические формулы; у моего друга была книжка с электрическими формулами, причем в ней содержалось соотношение между сопротивлениями. Были в ней и такие формулы: мощность есть квадрат тока, умноженный на напряжение. Напряжение, деленное на ток, давало сопротивление; всего шесть или семь формул. Мне казалось, что все они связаны между собой, они действительно не были независимыми — одна следовала из другой. Я поболтался с ними какое-то время и понял из алгебры, которую учил в школе, как они связаны. Тогда я осознал, как важна в этом деле математика.

Так я стал все больше и больше интересоваться математикой, связанной с физикой. Кроме того, математика сама по себе всегда казалась для меня очень привлекательной. Я люблю ее всю свою жизнь.

Диктор: После окончания Массачусетского технологического института Ричард Фейнман переместился приблизительно на 400 миль южнее в Принстонский университет, где со временем получил докторскую степень. Именно там в 24 года он прочитал свою первую официальную лекцию. Как выяснилось, это была очень содержательная лекция.

Фейнман: Тогда я был неопытным новичком и работал с профессором Уилером¹ в качестве научного сотрудника; мы вместе разработали новую теорию, как ведет себя свет, когда в разных местах происходит взаимодействие между атомами; для того времени это была весьма интересная теория. Профессор Вигнер², который руководил семинаром, предложил, чтобы мы выступили на семинаре, а профессор Уилер сказал, что ввиду моей молодости и отсутствия опыта выступлений на семинарах это отличная возможность попрактиковаться. Это была моя первая лекция по специальности.

Я начал к ней готовиться. Позже ко мне зашел Вигнер и сказал: «Работа эта довольно важная, поэтому я пригласил на семинар профессора Паули — великого физика, который приедет из Цюриха, профессора фон Неймана — величайшего в мире математика, Генри Норриса Рассела — знаменитого астронома, и Альберта Эйнштейна, который живет поблизости». Я побелел как полотно, а он продолжал: «Не нервничайте и не беспокойтесь об этом. Во-первых, если профессор Рассел заснет, не расстраивайтесь — он всегда спит на лекциях. Когда профессор Паули кивает, продолжайте говорить, но не слишком радуйтесь — он всегда кивает, его обыч-

¹ Джон Арчибальд Уилер (1911–2008) — физик, больше известный широкой публике за введение термина «черная дыра». — *Примеч. ред. иностр. издания.*

² Юджин Вигнер (1902–1995) — лауреат Нобелевской премии по физике 1963 года за вклад в теорию атомных ядер и элементарных частиц, связанный с его работой по принципам симметрии. — *Примеч. ред. иностр. издания.*

но трясет» — и так далее. Он хотел меня немного подбодрить, но я еще больше разволновался. Профессор Уилер обещал отвечать на вопросы, а от меня требовалось всего ничего — прочитать лекцию.

Я вспоминаю свое выступление — представьте свой первый опыт — это как пройти сквозь огонь. Я заранее выписал все уравнения на доске, так что вся доска была ими испещрена. Никто не хотел смотреть на такое количество уравнений... Все хотели получше разобраться в идее. Помню, как я поднялся для выступления, сознавая, сколько там присутствует великих людей — и испугался. Еще помню, как выхватил бумаги со своими записями из конверта, и все они перемешались. Я тут же отложил бумаги в сторону и начал говорить. И тут со мной что-то произошло, и всегда с тех пор происходит — это удивительная штука. Если я говорю о физике, а я люблю эту науку — я думаю только о физике и перестаю беспокоиться, где я нахожусь; все остальное меня просто перестает волновать. И все пошло очень легко. Я как можно проще объяснил им все «дело». Я не думал о том, кто там находится. А думал только о задаче, которую объяснял. В конце, когда наступило время задавать вопросы, меня ничуть это не беспокоило, поскольку профессор Уилер собирался сам на них отвечать. Встал профессор Паули — он сидел рядом с профессором Эйнштейном — и сказал: «Я не понял, эта теория может оказаться правильной из-за этого, того или третьего и так далее... Вы согласны со мной, профессор Эйнштейн?» Эйнштейн произнес: «Не-е-ет». Это было самое чудесное «нет», которое я когда-либо слышал.

Диктор: Именно в Принстоне Ричард Фейнман понял, что, хотя он и живет всецело в мире математики и теоретической физики, существует другой, внешний мир, который настойчиво требует от него практических решений. В те годы мир был охвачен войной, и Соединенные Штаты начали работать над атомной бомбой.

Фейнман: Примерно в то время Боб Уилсон зашел ко мне в комнату и рассказал о проекте, к которому он подключился. Проект был связан с получением урана для атомной бомбы. Он сказал, что встреча назначена на 3.00, и все это страшный секрет, но он знал, что, когда я пойму, в чем состоит секрет, я тоже включусь в работу, поэтому никакого вреда в том, что он мне это рассказал, нет. Я ответил: «Ты ошибся, посвятив меня в секрет. Я не собираюсь там работать. Я должен вернуться к своей работе — к диссертации». Он выскользнул из комнаты, но напомнил: «Мы собираемся ровно в 3.00». Разговор произошел утром. Я вышагивал из угла в угол и думал, что будет, если бомба окажется в руках Германии, и решил, что эта работа очень важная и захватывающая. Ровно в 3.00 я был на встрече и приостановил работу над диссертацией.

Для создания бомбы нужно было разделить изотопы урана. Уран существовал в виде двух изотопов, U235 и U238, именно U235 был реактивным, и его следовало выделить. Уилсон разработал схему разделения — создавая и аккумулируя пучки ионов. Скорости обоих изотопов при одинаковой энергии слегка различны. Если вы создадите небольшие количества изотопов и пропустите их через длинную

трубку, реактивный изотоп будет впереди, и таким способом вы сможете разделить изотопы. Таков был его план. До этого момента я был теоретиком. Первоначально мне предстояло установить, окажется ли такая установка практически работоспособной, можно ли ее вообще сделать? Существовало много вопросов о пространственных ограничениях заряда и других свойствах. Но я показал, что ее можно сделать.

Диктор: Несмотря на то что Фейнман показал, что метод Уилсона разделения изотопов урана теоретически возможен, в конечном итоге для атомной бомбы был использован другой метод производства урана-235. Тем не менее на долю Ричарда Фейнмана с его высокой квалификацией физика-теоретика выпал огромный объем работы в главной лаборатории Лос-Аламоса, штат Нью-Мексико, связанной с разработкой бомбы. После войны он работал в Лаборатории ядерных исследований в Корнеллском университете. Сегодня он испытывает смешанные чувства относительно работы в атомном проекте. Прав ли он был, согласившись работать над бомбой?

Фейнман: Нет, я не думаю, что ошибся, я принял правильное решение, особенно учитывая то время. Я думал над этим — тогда была реальная опасность, что Германия получит бомбу. Но я был не прав в том, что продолжил работу уже после капитуляции Германии. Мы работали очень интенсивно, и я не останавливался, и даже не задумывался, что ситуация давно изменилась. И вот что я вам скажу: если у вас есть причины заниматься чем-то, очень

серьезные причины, и вы начинаете работать, вы должны время от времени останавливаться и пересматривать первоначальные мотивы. В свое время я принял решение, считая, что был прав, но продолжать, не обдумывая изменившуюся ситуацию, было бы неправильно. Я не знаю, как все сложилось бы, если бы я думал об этом. Может быть, я решил бы продолжать в любом случае — не знаю. Однако это ошибка — не учитывать того, что первоначальные условия, на основании которых вы принимали решение, изменились.

Диктор: После пяти лет в Корнелле доктор Фейнман, как и многие до и после него, влюбился в Калифорнию и перешел на работу в Калифорнийский технологический институт.

Фейнман: Прежде всего погода в Итаке прескверная. Во-вторых, я любитель ночных клубов и подобных заведений.

Боб Бачер пригласил меня сюда прочитать серию лекций о моей работе в Корнелле. Итак, я прочитал лекции, а он и спрашивает: «Хочешь, я одолжу тебе свой автомобиль?» И я каждый вечер наслаждался видами Голливуда, Сансет-стрит¹, и эта смесь великолепной погоды и широких горизонтов в сравнении с маленькими городками штата Нью-Йорк окончательно убедили меня, что надо перебраться сюда. Это было совсем нетрудно. И тут я не совершил ошибки. Это было еще одно правильное решение.

¹ Часть бульвара Сансет, центр ночной жизни Лос-Анджелеса.

Диктор: На факультете Калифорнийского технологического института доктор Фейнман превратился в Ричарда Чейса Толмена Фейнмана, профессора теоретической физики. В 1954 году он получил премию Альберта Эйнштейна, а в 1962 году Комиссия по атомной энергии присудила ему премию Е. О. Лоуренса за «заслуживающий особого поощрения вклад в разработку, использование и контроль над атомной энергией». И наконец, в 1965 году он получил Нобелевскую премию по физике. Он разделил ее с Син-Итиро Томонагой из Японии и Джулианом Швингером из Гарварда. Для доктора Фейнмана известие о Нобелевской премии связано с внезапным пробуждением.

Фейнман: Меня разбудил телефон, звонил журналист из одной радиовещательной компании. Меня раздосадовало это раннее пробуждение — естественная реакция. Человек полусонный, полураздраженный. Журналист говорит: «Мы рады сообщить, что вам присуждена Нобелевская премия». Я подумал про себя, все еще раздосадованный — это неофициальное заявление. И ответил ему: «Не могли бы вы перезвонить мне утром?» Но он продолжал: «Я думал, вы обрадуетесь». «Я сплю», — сказал я и положил трубку. Жена спросила: «Что это было?» Я промямлил: «Я получил Нобелевскую премию». Она не поверила: «Перестань, ты дурачишь меня!» Я часто подтрунивал над ней. Каждый раз, когда я пытался подшутить, она видела меня насквозь, но в тот раз она обманулась. Она решила, что это какой-нибудь надравшийся студент или что-то в этом роде. Словом, не поверила мне. Но когда спустя десять минут

раздался второй звонок, из другой газеты, я сказал: «Да, я уже слышал, оставьте меня в покое». Тогда я снял трубку с телефонного аппарата, чтобы отправиться поспать, а к 8.00 положить трубку обратно. Но больше не мог заснуть, и жена тоже. Я встал, прошелся, и все-таки положил трубку, и начал ждать телефонного звонка.

Через некоторое время я мчался куда-то в такси, мы с водителем беседовали, и я рассказал ему о своих проблемах, как эти парни говорили со мной, а я не знал, как на это реагировать. Он рассудительно сказал: «Я видел ваше интервью. Я смотрю телевизор. Один малый вам говорит, «Пожалуйста, расскажите в двух словах, за что вы получили Нобелевскую премию». И вы попытались что-то объяснить, но не смогли. А знаете, что бы я ему ответил? “Черт возьми, если бы это можно было объяснить в двух словах, мне бы не дали Нобелевскую премию”». Впоследствии я так и отвечал. Может, это и не самый удачный ответ, зато забавный.

Диктор: Как уже упоминалось, доктор Фейнман получил Нобелевскую премию за вклад в развитие теории, которая определяет поля, возникающие в квантовой электродинамике. Это, как доктор Фейнман представляет ее, есть «теория еще чего-нибудь». Она неприменима к ядерной физике или силам гравитации — она относится к взаимодействию электронов с частицами света, называемыми фотонами. В ее основе лежат электрические потоки, явление магнетизма, а также способ создания и взаимодействия рентгеновских лучей с другими формами материи. В слове «квантовая» в названии квантовой

электродинамики заложена дань уважения тем временам в середине двадцатых годов, когда было открыто, что состояния электрона в атоме ограничены определенными квантовыми состояниями или уровнями энергии. Электроны могут существовать только на этих уровнях и никогда между ними. Эти квантовые энергетические уровни определяются, кроме прочих факторов, интенсивностью света, который падает на атом.

Фейнман: Одним из крупнейших и наиболее важных средств теоретической физики является мусорная корзина. Но вы должны чувствовать момент, когда надлежит оставлять ее в покое. Пытаясь развить свою теорию, я попутно получил массу знаний об электричестве, магнетизме, квантовой механике и многом другом. И то, что я получил Нобелевскую премию за теорию, законченную в 1947 году, нормальную, обычную теорию, в которой я попытался устранить все нестыковки, меня привело в некоторое замешательство, так как я пытался всего лишь привести ее в порядок. Еще Бете обнаружил, что, если вы просто делаете правильные вещи, если вы в некотором смысле забыли некоторые вещи и не забыли другие, и делаете их достаточно правильно, вы можете получить правильные ответы, сопоставимые с экспериментом. И он сделал мне несколько предложений. К тому времени я так много знал об электродинамике, пытаюсь наладить эту разваливающуюся теорию, я написал ее в 655 различных формах, так что я знал, как сделать то, что он хотел, как проконтролировать и организовать вычисления очень удобным и разумным

образом, как получить для этого мощные методы. Иначе говоря, я использовал оснащение, аппарат, который разработал для раскручивания моей теории на базе старой — звучит, как очевидная вещь, но я долгое время не думал об этом, а потом вдруг обнаружил, что совершил прорыв — я мог делать в старой теории все гораздо быстрее, чем кто-либо до меня.

Диктор: И кроме того, теория доктора Фейнмана объяснила многое другое; квантовая электродинамика обеспечивает понимание сил, которые удерживают вместе материю. Она дополнительно объясняет свойства бесконечно малых, короткоживущих частиц, из которых состоит все во Вселенной. Когда физики пробиваются все глубже и глубже в структуру природы, они обнаруживают — то, что сначала казалось очень простым, оказывается сложным, а сложное может оказаться простым. Их средства — это высокоэнергичные сталкивающиеся атомные частицы, которые могут разбивать частицы на все более мелкие фрагменты.

Фейнман: Когда мы собираемся начать исследование, мы вглядываемся в материю и видим много различных явлений — ветер и волны, луну и многое другое. И мы пытаемся их упорядочить. Похоже ли движение ветра на движение волн? Постепенно мы понимаем, что многие явления схожи. Нет такого большого разнообразия, как мы думали. Мы получаем все явления и все принципы, лежащие в их основе. Кажется, один из самых полезных принципов — это мысль, что одни вещи делаются из других вещей. Мы обнаружили, например, что вся материя

состоит из атомов, и тогда поведение любого большого куска материи обусловлено свойствами атомов. Сначала атомы предполагались простыми, но потом выяснилось, что для того, чтобы объяснить все разнообразие явлений и свойств материи, атомы должны быть более сложными, и что всего их 92. На самом деле их гораздо больше, так как у них разные атомные веса. Следующая проблема — понять разнообразие свойств атомов. Если предположить, что сами атомы состоят из составляющих — из ядра, вокруг которого движутся электроны, — и что все различие атомов состоит в разном количестве электронов, получается очень красивая унифицированная система, которая работает.

Все различные атомы устроены одинаково, но обладают разным числом электронов. Однако ядра отличаются друг от друга. Итак, мы начинаем изучать ядра. Их найдено огромное разнообразие с тех пор, как начались эксперименты по столкновению ядер — опыты Резерфорда и многие другие. Во-первых, начиная с 1914 года, когда ядра были открыты, оказалось, что их природа очень сложна. Это можно понять, если представить, что ядра тоже состоят из составляющих — протонов и нейтронов. Они взаимодействуют с некоторой силой, которая удерживает их вместе. Чтобы понять ядра, нужно немного лучше познакомиться с силами. Кстати, в случае атомов тоже существуют силы; это электрические силы, которые мы уже поняли. Но кроме электронов, существуют также электрические силы, которые можно представить световыми фотонами. Свет и электрическая сила объединяются в одной частице — фото-

не. Электроны и фотоны существуют вне ядерного мира, то есть вне ядра. Теория поведения электронов — это квантовая электродинамика, за разработку этой теории я, собственно, и получил Нобелевскую премию.

Обратимся теперь к ядрам. Они состоят из протонов и нейтронов, их связывают между собой странные силы. Следующая проблема — попытка понять, что это за силы. На роль переносчиков этих сил предлагались различные частицы, например мезоны, предсказанные Юкавой. Мы провели эксперименты по столкновению нейтронов и протонов высоких энергий и получили новые явления — когда мы сталкиваем электроны высоких энергий, возникают фотоны. Мы увидели, что при столкновении нейтронов и протонов возникают новые частицы. Это были мезоны. Получалось, что Юкава был прав. Мы продолжали эксперимент. И тогда произошло следующее: мы получили невероятное разнообразие частиц; не просто типа фотона, мы столкнули вместе фотоны, нейтроны и другие частицы и получили свыше 400 частиц разного вида — лямбда-частицы и сигма-частицы — все они были различны. И π -мезоны, и K -мезоны, и много других частиц. Кстати, мы также получили мюоны, но они не имели ничего общего с нейтронами и протонами. По крайней мере не больше, чем электроны. Существовала странная дополнительная частица, и мы не понимали, каково ее место. Она похожа на электрон, только тяжелее. По крайней мере мы нашли электрон и мюон, которые не взаимодействуют сильно с другими частицами. Те, другие ча-

стицы мы назвали сильно взаимодействующими частицами, или адронами. К ним относятся нейтроны, протоны и все прочие частицы, образующиеся при их столкновениях. Следующая проблема — представить свойства всех этих частиц в некотором организованном порядке. Это великая игра, и все мы в нее вовлечены. Она называется физикой высоких энергий, или физикой фундаментальных частиц. Обычно ее называют физикой фундаментальных частиц, но никто не верит, что 400 различных составляющих фундаментальны. Другая возможность состоит в том, что они сами составлены из более глубоко спрятанных составляющих. И кажется, для этого есть разумное основание. Выяснилось, что и теорию их можно разработать — это теория кварков; эти частицы, как и протон, и нейтрон, состоят из объектов, названных кварками (нейтрон и протон построены из трех кварков).

Диктор: Никто и никогда еще не видел кварков — это плохо, поскольку они могут представлять фундаментальные строительные блоки для более сложных атомов и молекул, из которых состоит Вселенная. Имя «кварк» выбрал без каких-либо особенных причин коллега доктора Фейнмана, Мюррей Гелл-Манн, несколько лет назад. К удивлению доктора Гелл-Манна, ирландский писатель Джеймс Джойс уже предвидел это название в своей книге «Поминки по Финнегану». Ключевая фраза состояла из слов: «три кварка для новобранца Марка». Как объяснил доктор Фейнман, это было даже больше, чем совпадение, так как кварки, которые входили в частицы Вселенной, группировались в ряде извест-

ных частиц по три. Исследуя кварки, ученые сталкивали протоны и нейтроны при очень высоких энергиях, надеясь, что в процессе столкновения они распадутся на свои кварковые компоненты.

Фейнман: Все верно, но одно из положений, поддерживающих теорию кварков, явно нелепо, поскольку, если все построено из кварков, при столкновении двух протонов мы должны иногда наблюдать три кварка. Оказалось, что в модели кварков, о которой мы говорим, кварки переносят очень специфические электрические заряды. Все известные нам частицы обладают целым зарядом. Обычно существует электрический заряд плюс (позитрон, протон) или минус (электрон, мюон), и ничего другого. Но теория кварков требует, чтобы кварки переносили заряды минус одна треть или плюс две трети от электрического заряда протона. И если такие частицы существуют, очевидно, они образуют меньше пузырьков в пузырьковой камере. Смотрите, если ваш заряд равен одной трети, выходит, вдоль трека он может «захватить» одну девятую пузырьков (эффект пропорционален квадрату заряда) по сравнению с обычной частицей. Если вы увидите незначительно прорисованный трек — значит, тут что-то не в порядке. И вы ищете и ищете подобный след — и не находите его. Это одна из серьезнейших проблем. Это потрясает. Мы на правильном пути или блуждаем вокруг да около в потемках? Ответ где-то здесь, или мы чувствуем, что он совсем близко, и не можем ухватиться за него? Если мы получим ответ, то сразу поймем, почему эксперимент такой необычный.

Диктор: Что, если эти эксперименты при высоких энергиях со сталкивающимися атомами и пузырьковыми камерами покажут, что мир состоит из кварков? Мы как-то можем применить это на практике?

Фейнман: Понимаете, для проблемы понимания адронов, и мюонов, и прочего я не вижу в настоящий момент никакого практического применения, фактически никакого. Однако мы знаем примеры, когда открытия, казавшиеся бесперспективными, тоже приносили ощутимую практическую пользу. Конечно, глупо признаваться, что твои исследования бесполезны, подобные заявления не подстегивают к работе. Но я готов прослыть дураком и утверждаю, что эти чертовы кварки никогда не найдут практического применения. Я слишком тупой, чтобы увидеть его. Да? И вы тоже? Однако практическая польза — не единственная ценность в мире. В конце концов, это просто интересно: понять, из чего состоит мир. Это сродни интересу и любопытству человека, который построил телескоп. Какая польза в открытии возраста Вселенной? Или что собой представляют квазары, которые взрываются на больших расстояниях? Я имею в виду, какая польза от всей этой астрономии? Никакой. Однако это интересно. Вот и я тоже удовлетворяю свое любопытство. Если человека терзает любопытство, попытки удовлетворить его в известном смысле практичны. Вот так я это вижу в настоящий момент. И я не обещаю никакой практической пользы от своих исследований.

Диктор: Что касается самой науки и ее значения для всех нас, доктор Фейнман говорит, что не хотел

бы философствовать на эту тему. Тем не менее это не мешает ему рассуждать об интересных и провокационных идеях — например о том, что является наукой, а что — нет.

Фейнман: Я бы сказал, что научный поиск шел всегда, с начала наших дней. Это погоня за пониманием некоего предмета или неких вещей, основанных на определенном принципе. Все, что происходит в природе, — истина. И отсюда делается вывод о справедливости некоторой теории. Лысенко говорил, что, если отрезать хвосты крысам в 500 поколениях, новые поколения крыс будут рождаться без хвостов. (Не знаю наверняка, говорил он так или нет. Спросим об этом мистера Джонса.) Если попытаться сделать нечто и оно не заработает, стало быть, это неверно. В основе науки лежит принцип, который отделяет истину от лжи на основе эксперимента или человеческого опыта.

Кроме эксперимента, мы относим к науке огромное количество интеллектуальных попыток обобщения. Это не просто собрание всевозможных явлений, которые случайно оказались справедливыми в эксперименте. И это не только совокупность фактов, которые случайно оказались справедливыми, когда вы срезаете крысиные хвосты, потому что это намертво засело у вас в головах. Мы можем сделать далеко идущие обобщения. Например, если это справедливо относительно крыс и кошек, давайте утверждать, что это справедливо относительно всех млекопитающих. Затем мы перейдем к следующему выводу, что если концепция верна относительно других животных, то она справедлива и по отноше-

нию к растениям — и наконец это становится в известных пределах свойством жизни, которое мы не унаследовали как приобретенную характеристику. Но это не может быть истиной абсолютно и безоговорочно. Недавно были проведены эксперименты, показывающие, что клетки несут информацию через митохондриальный комплекс или что-то в этом роде, так что в перспективе мы сможем их модифицировать. Но так как принципы должны оставаться максимально широкими, и максимально общими, и полностью соответствовать эксперименту — вопрос остается открытым.

Понимаете, получение фактов из опыта — это звучит совсем-совсем просто. Казалось бы: нужно просто сделать что-то и посмотреть результат. Но человек — слабое существо, и на практике оказывается, что все гораздо сложнее, чем просто сделать что-то и посмотреть результат. Возьмем, к примеру, образование. Есть общепринятая методика преподавания математики. И вот один молодой учитель говорит: «У меня есть идея получше. Я сделаю вычислительную машину-игрушку и буду учить ребят на ней». Итак, он пытается сделать компьютер с группой ребят — у него их немного, — возможно, кто-то уступил ему для этой цели свой класс. Ему нравится, чем он занимается. Он воодушевлен. Он полностью понимает, что должен сделать. Ребята тоже понимают, что создают что-то новое и тоже возбуждены. Они очень стараются и достигают лучших результатов, чем другие дети. Попробуйте проверить — они действительно выучили арифметику. Это было зарегистрировано как безусловный факт. Но это нель-

зя считать новым научным фактом, поскольку эксперимент проводил человек, который изобрел этот метод обучения. Хотите знать почему? Этот метод должен годиться для обычных учителей (вы должны ориентироваться на среднего учителя; таких учителей в мире великое множество), чтобы любой учитель достал пособие, ознакомился с описанным методом и, применив его на практике, получил отличный результат. Иначе говоря, нам предъявляют как доказанный факт то, что не является доказанным фактом. Подобный подход процветает в социологии, даже психологии — я бы назвал это псевдонаукой. Нам предъявляют «неопровержимые» статистические данные, рассказывают об экспериментах, которые в действительности не являются контролируруемыми экспериментами, поскольку их результаты не подтверждаются в контролируемых экспериментах. И нам докладывают обо всей этой чепухе. Настоящая наука должна приносить плоды, а эти люди занимаются ерундой, но считают, что заслуживают уважения. Приведу пример.

Аборигены Соломоновых островов не понимали, что такое самолеты, когда те приземлялись там во время войны и привозили разные грузы для солдат. И сейчас они поклоняются самолетам. Они построили искусственные взлетные полосы и раскладывают костры вдоль полос, имитируя огни. Бедные аборигены сидят в построенных ими деревянных будках в деревянных наушниках с бамбуковыми палочками вместо антенн, крутят головой туда-сюда, у них есть даже деревянное подобие радара и все виды приспособлений, «привлекающих» самолеты, кото-

рые привезут им хорошие товары. Они имитируют действие. То же делает и тот молодой учитель. Его «эксперимент» то же самое, что самолеты у аборигенов. А где настоящая наука? Например методика преподавания — это вовсе не наука. Это огромная работа. Конечно, нужно изрядно потрудиться, чтобы сделать деревянный самолет. Но подобная имитация ничего не дает. Возьмите пенологию (науку о предотвращении преступлений), тюремную реформу — надо понять, почему люди совершают преступления. Взгляните на мир — мы «понимаем» его все глубже и глубже с нашими современными методами исследования. Мы лучше разбираемся в образовании, в преступности, рамки наших знаний расширяются, но молодые люди по-прежнему совершают преступления, тюрьмы переполнены, и мы не понимаем, отчего это происходит. Потому что нет научного подхода. Есть имитация, которую взяли на вооружение в области образования и в борьбе с преступностью. Я не знаю, будут ли работать научные методы в этих областях, если даже знать, как их там создать. Отсутствие научных методов — основная их уязвимость. Могут существовать некоторые другие методы. Например, неплохая идея — прислушаться к многолетнему опыту людей прошлого. Если же вы решили последовать за кем-то из новаторов, наверное, можно прошлым пренебречь. Только присмотритесь внимательнее к тем новаторам, которые игнорируют мудрость прошлых поколений. Люди из прошлого обладают не меньшими правами на правоту и в равной степени — на ненаучные заключения, чем вы в нашем современном мире.

Ну как? Неплохой из меня философ?

Диктор: В данном выпуске передачи «Будущее науки» — в серии записанных интервью с нобелевскими лауреатами — вы слушали интервью с доктором Ричардом Фейнманом из Калифорнийского технологического института. Серия подготовлена при содействии Американской ассоциации по перспективному развитию науки.

ВЗАИМОСВЯЗЬ НАУКИ И РЕЛИГИИ

В своеобразном мысленном эксперименте Фейнман высказывает разные точки зрения на воображаемом совете экспертов, который представляет точку зрения ученых и верующих. Он обсуждает точки соприкосновения и разногласия между наукой и религией, предугадав на два десятилетия вперед активные споры между этими двумя фундаментально различными способами познания истины. В частности, он задается вопросом, могут ли атеисты иметь мораль, основанную на научных воззрениях, а верующие — основанную на их вере в Бога. Эта философская тема необычна для прагматичного Фейнмана.

В нашу эпоху специализации люди, основательно знающие одну область, часто оказываются некомпетентными при обсуждении другой. Поэтому труднопреодолимые проблемы взаимоотношений между разными сторонами человеческой деятельности обсуждаются публично все меньше и меньше. Когда мы заглядываем в прошлое и видим жаркие дебаты по самым разным вопросам, мы завидуем тем временам, нас вдохновляет их аргументация. Старые как мир проблемы — взаимоотношения науки и религии — все еще волнуют нас, и я полагаю,

в настоящем они остаются такой же дилеммой, как и в прошлом. Но они не так часто обсуждаются публично из-за ограниченности нашей специализации.

Тем не менее я интересовался этой проблемой на протяжении многих лет и хотел бы ее обсудить. Имея в виду мой несомненный недостаток знаний и понимания религии (недостаток, который становится со временем все более очевидным), я хотел бы организовать дискуссию следующим образом. Я буду предполагать, что проблему обсуждает не один человек, а целая группа людей, эта группа состоит из специалистов в разных областях — ученых разных направлений, различных религиозных деятелей и так далее, — и мы собираемся обсудить проблему с разных сторон, как на экспертном совете. Каждый высказывает свою точку зрения, которая может формироваться или меняться при последующем обсуждении. Кроме того, кого-то выбирают первым представить свою точку зрения — пусть это буду я.

Я начинаю представлять экспертный совет с проблемы: молодой человек, воспитанный в религиозной семье, изучает науку и в результате начинает сомневаться — а возможно, позже перестает верить в своего духовного отца — Бога. Это не единичный пример, такое встречается время от времени. У меня нет статистики, но я полагаю, что многие ученые — думаю, что реально больше половины ученых — перестали верить в Бога, то есть верить в Бога в традиционном смысле.

Так как вера в Бога является ключевым свойством религии, проблема, на которой я остановился,

наиболее важна для взаимоотношений науки и религии. Почему этот молодой человек перестал верить?

Первый ответ напрашивается сам собой, и он очень прост: его учили (как я уже сказал) ученые, все они в душе атеисты, так что этот грех распространяется от одного к другому. Если вы сторонник этой точки зрения, думаю, вы меньше знаете о науке, чем я о религии.

Второй ответ может следовать из ограниченности знаний молодого человека: небольшой объем знаний опасен; этот молодой человек выучил немного и думает, что знает все. Но вскоре он перерастет опыт второкурсника и осознает, что мир более сложен, и снова поймет, что должен быть Бог.

Не думаю, что он почерпнет эту мысль обязательно отсюда. Есть много ученых — людей, которые называют себя сложившимися учеными, все-таки не верящих в Бога. Я хотел бы объяснить позже, что ответ молодого человека фактически следует не из того, что ему кажется, что он постиг все, а в точности из обратных соображений.

Третий ответ может вытекать из того, что молодой человек неправильно понимает науку. Я не верю, что наука может опровергнуть существование Бога — думаю, это невозможно. И если это невозможно, то являются ли согласованными категориями вера в науку и вера в Бога — обычного Бога, как его трактует религия?

Да, эти возможности совместимы. Несмотря на то что больше половины ученых не верят в Бога,

многие ученые верят и в науку, и в Бога в совершенно согласованной форме. Хотя подобной согласованности не так просто добиться; в связи с этим я хотел бы обсудить две вещи: почему не так просто ее добиться и стоит ли ее добиваться.

Когда я говорю «вера в Бога», всегда остается загадкой — что есть Бог? Какого персонального Бога, характерного для западной религии, я имею в виду — того Бога, которому вы молитесь и который создал Вселенную и руководит вашей моралью?

Для студента, который что-то выучил в науке, существуют два источника трудностей при попытке связать науку и религию. Первый источник: обязательное для науки сомнение; это абсолютно необходимое условие прогресса в науке — неопределенность как фундаментальная часть внутренней природы ученого. Для прогресса в понимании мы должны оставаться скромными и позволить себе чего-то не знать. Нет ничего полностью определенного или доказанного, сомнения превыше всего. Вы исследуете ради любопытства; потому, что это *неизвестно*, а не потому, что вам известен ответ. И когда вы получаете больше информации в науке, это не означает, что вы нашли истину, вы нашли то или другое с большей или меньшей вероятностью.

То есть если вы проводите дальнейшие исследования, вы обнаруживаете, что утверждения науки не то чтобы истинны и не то чтобы ложны. Однако известны различные степени неопределенности: «это гораздо более вероятно, чем то-то и то-то, а это скорее верно, чем неверно»; или «то-то и то-то из-

вестно почти наверняка, но вызывает некоторую долю сомнений»; или — впадая в другую крайность — «мы действительно ничего не знаем». Каждая концепция в науке градуирована по шкале где-то между крайностями: абсолютной ложью и абсолютной истиной.

Думаю, необходимо принять этот образ не только в науке, но и в других вещах — незнание чего-то представляет большую ценность. Несомненно, когда мы принимаем какое-то решение, мы точно не знаем, правильно ли мы поступаем; мы только думаем, что поступаем наилучшим образом — и так нам следует поступать.

Отношение к неопределенности

Зная, что мы действительно живем в неопределенности на ментальном уровне, мы должны с этим примириться; очень важно осознавать, что нам неизвестны ответы на все вопросы. Особенный склад ума — внутреннее отношение к неопределенности — это жизненно важное положение для думающего ученого, которое студент должен усвоить первым делом. Это привычка мыслить. Однажды усвоив, ученый уже не сможет отступить от нее.

Теперь молодой человек начинает во всем сомневаться, поскольку он не может знать абсолютной истины. И ключевой вопрос немного изменит свой смысл, вместо вопроса «Существует ли Бог?» мы спросим: «Насколько вы уверены, что Бог существует?» Это очень тонкое изменение является сильным приемом и представляет разделение спо-

собою мышления между наукой и религией. Полагаю, что подлинный ученый не может задаться первым вопросом. Хотя существуют ученые, которые верят в Бога, я не считаю, что они думают о Боге так же, как религиозные люди. Если они находятся в ладу со своей наукой, они скажут себе что-нибудь вроде: «Я почти уверен, что Бог существует. Доля сомнений очень мала». Это совершенно другая формулировка, отличная от утверждения: «Я знаю, что Бог существует». Не думаю, что ученый может быть истинно верующим, потому что религия предполагает абсолютную веру в то, что Бог существует; абсолютная определенность свойственна религиозным людям.

Конечно, процесс сомнений не всегда начинается с вопроса о существовании Бога. Обычно первыми исследуются догматы, такие как вопрос о загробной жизни или детали религиозных доктрин, например подробности жизни Христа. Более интересно, однако, открыто перейти к центральной проблеме и обсудить наиболее экстремальную точку зрения относительно сомнений в существовании Бога.

Раз вопрос перестал быть абсолютным и содержит долю неопределенности, его можно завершить с очень разных позиций. Во многих случаях он оказывается очень близок к определенному. Но с другой стороны, конечный результат правильности теории о применимости к прародителю понятия Бог может оказаться не совсем правильным тезисом.

Вера в Бога и научные факты

У нашего студента, пытавшегося совместить науку и религию, возникнет и вторая трудность: почему часто оказывается, что вера в Бога — по крайней мере Бога религиозного характера — выглядит иррациональной? Думаю, что ответ следует дать с научной точки зрения — используя систему фактов (пусть и не совсем полную), изученных человеком.

Например, размеры Вселенной производят глубокое, ошеломляющее впечатление. Мы вращаемся на крошечном фрагменте, Земле, вокруг нашего Солнца, среди сотен тысяч миллионов солнц нашей галактики и среди миллиардов других галактик. Существуют близкие биологические связи человека и животных, одной формы жизни с другой. Что такое человек — персонаж, появившийся к концу гигантского спектакля, который был лишь прелюдией к главному действию?

Больше того — существуют атомы, из которых, по-видимому, построена вся материя. Ничто не может избежать той же конструкции; звезды сделаны из одного и того же материала, и животные тоже, и сам человек, но сложность их возросла — появилась тайна жизни.

Это великое приключение — созерцать Вселенную за пределами существования человека, осознать, как она развивается без человека; в подавляющей части Вселенной с ее бесконечно длинной историей нет биологической жизни. Когда окончательно сформируется объективный взгляд на Все-

ленную, станут понятны тайны и величие материи, тогда можно будет вернуться к объективному взгляду на человека, как на материю, увидеть жизнь, как часть глобальной загадки, ощутить опыт случайного набора признаков. Обычно нам остается только улыбнуться после тщетных попыток понять мироздание. Научные взгляды упираются в благоговейный трепет и тайну, за которыми скрывается пик неопределенности, но они кажутся настолько глубокими и впечатляющими, что теория, которая все просто расставляет по местам, выстраивая сцену для Бога, наблюдающего за битвой добра и зла, кажется недостаточной.

Давайте предположим, что это случай нашего усердного студента, у которого растет сознание греховности — он верит, например, что отдельная молитва не может быть услышана. (Я не пытаюсь опровергать реальность Бога; я пытаюсь, сочувствуя, высказать некоторую идею о причинах, почему многие приходят к мнению, что молитва бесплодна.) Конечно, в результате этих сомнений сам их характер превращается в дальнейшем в этическую проблему, поскольку в религии, которую учил студент, мораль была связана со словом Бог, и если Бога не существует, то что это за слово? Как ни удивительно, я думаю, что моральные проблемы в конечном счете оказываются относительно нетронутыми. Сначала, возможно, студент может решить, что несколько незначительных постулатов несправедливы. Позже он может изменить свое мнение, но в конечном счете придет к пониманию, что в основе своей моральные постулаты справедливы.

В этих идеях должна существовать своего рода независимость. Ведь можно сомневаться в божественности Христа, не отрицая того, что следует помогать ближнему, когда он взывает к твоей помощи. Можно придерживаться обоих этих взглядов одновременно. Надеюсь, вы заметили, что мои атеистически настроенные коллеги в обществе ведут себя вполне прилично.

Коммунизм и научная точка зрения

Хотел бы заметить, что слово «атеизм» тесно связано со словом «коммунизм», что коммунистические взгляды представляют антитезу научным в том смысле, что коммунизм дает ответы на вопросы как политического, так и морального толка без обсуждений и сомнений. Научная точка зрения прямо противоположна; это значит, что все вопросы должны подвергаться сомнению и обсуждению; мы должны спорить обо всем — о наблюдаемых эффектах, их проверке и их возможном изменении. Демократическая власть гораздо ближе к этой идее, поскольку допускает обсуждение и не препятствует перспективе дальнейших изменений. Если вы живете в условиях тирании идей и точно знаете, где искать истину, — действуйте решительно, это всегда будет выглядеть разумно и достойно. Но когда судно начнет двигаться в неверном направлении, никто уже не сможет изменить его курс.

Хотя наука наносит удар по многим религиозным догматам, она не влияет на их моральное содержание. Религия имеет много аспектов; она отве-

чает на множество вопросов. Прежде всего она отвечает на вопросы о сути вещей, откуда они вытекают, что такое человек, что такое Бог — характеристики Бога и тому подобное. Позвольте мне обратиться к метафизическому аспекту религии. Он говорит нам о другой стороне — о нашем поведении. Оставим в стороне вопрос о том, как вести себя на некоторых церемониях, как исполнять религиозные обряды; я имею в виду наше поведение вообще, поведение в жизни, моральную сторону поведения. Этот аспект дает ответы на моральные вопросы; он определяет моральные и этические заповеди. Позвольте мне рассмотреть этический аспект религии.

Мы знаем, что изначально человек слаб, и ему нужно постоянно напоминать о моральных устоях, чтобы он мог поступать по совести. Это не просто вопрос совестливости человека; это также поддержка его духа для совершения правильных действий. Религия обязательно должна давать силу, утешение и вдохновение для соблюдения моральных заповедей. Это вдохновляющая сторона религии. Она не только воодушевляет для морального послушания — она служит вдохновляющим началом для искусства и живописи, она побуждает к высоким мыслям и действиям.

Взаимное пересечение

Эти три аспекта религии связаны друг с другом, это обычно чувствуется в близкой интеграции идей; нападать на одну особенность системы — значит нападать на всю структуру системы. Все три аспекта

в большей или меньшей степени связаны между собой. Моральный аспект, моральные заповеди — это мир Бога, который вовлекает нас в метафизические вопросы. Затем приходит вдохновение, ибо человек работает по велению Бога, для Бога, отчасти ощущая себя сопричастным Богу. Это великое вдохновение — оно позволяет действовать в контакте с огромной Вселенной, на ее просторах.

Все три аспекта тесно переплетены между собой. Трудности связаны с метафизическим аспектом — наука нередко ему противоречит. Например, в прошлом существовали аргументы в пользу того, что Земля является центром Вселенной независимо от того, движется ли она вокруг Солнца или стоит на месте. В результате возникали непримиримые споры и трудности, но они окончательно были разрешены наукой — в данном случае религии пришлось пойти на уступки. Не так давно возник конфликт, связанный с происхождением человека и животных.

В результате подобных конфликтов религии приходилось отступать от ряда метафизических доктрин; однако это не привело к крушению религии. По-видимому, в будущем не будут переоцениваться или радикально меняться и ее моральные аспекты.

Земля движется вокруг Солнца — разве это не лучший способ подставить другую щеку? Собственно, какая разница, Земля стоит или крутится вокруг Солнца? Мы ждем новых противоречий. Наука развивается, и обнаруживаются новые факты, противоречащие нынешней метафизической теории некото-

рых религий. По сути, даже несмотря на отступления религии в прошлом, у людей, изучающих науку и знающих основы религии, и сейчас остаются вопросы относительно некоторых положений. Ряд вещей не слишком хорошо интегрируется, но это не влияет на моральные категории.

На самом деле в области метафизики противоречия усложняются дважды. Во-первых, могут быть противоречивыми факты, но даже если факты согласуются, могут быть различными позиции. Дух неопределенности в науке — это позиция, направленная против метафизики; она полностью отличается от определенности и абсолютной истины религиозного мировоззрения. Явное противоречие между наукой и религией лежит именно в области метафизики — как в области фактов, так и в области духа.

Мне кажется, в религии невозможно найти набор метафизических идей, которые никогда не вступят в противоречие с вечно развивающейся и меняющейся наукой, вечно стремящейся к неизведанному. Мы не знаем, как ответить на все вопросы; невозможно найти ответы, которые когда-либо не станут ошибочными. Сложности все возрастают, поскольку и наука, и религия пытаются ответить на вопросы в одной и той же сфере.

Наука и вопросы морали

С другой стороны, я никогда не поверю, что реальное противоречие с наукой может возникнуть в духовной области, поскольку полагаю, что вопросы морали лежат вне сферы научных исследований.

Позвольте мне привести три-четыре аргумента, доказывающих, почему я верю в это. Во-первых, в прошлом существовали противоречия между научными и религиозными взглядами на метафизическую категорию, и тем не менее более старые взгляды на мораль не утратили своего смысла, не изменились.

Во-вторых, существуют добродетельные люди, на практике исповедующие христианскую этику и не верящие в божественность Христа. Они не находят в этом никакого несоответствия.

В-третьих, хотя я и верю, что время от времени обнаруживаются научные доказательства, которые можно отчасти интерпретировать как доказательства в пользу, например, некоторых сторон жизни Христа или других религиозных метафизических идей, мне кажется, что это не научные доказательства, и они не имеют отношения к Золотому правилу — основному поведенческому принципу христианства. Думаю, это что-то другое.

Теперь давайте посмотрим — я представлю небольшое философское объяснение их различия, — почему наука не может влиять на фундаментальный базис морали.

Типичная человеческая проблема, ответ на которую стремится получить религия: «Должен ли я это делать? Должны ли мы это делать? Должно ли правительство это делать?» Чтобы ответить на этот вопрос, мы разобьем его на две части — первую: «Если я сделаю это, что произойдет?» И вторую: «Хочу ли я это сделать? Как правильно оценить — хорошо это или нет?»

Теперь вопрос сформулирован заново: «Если я сделаю это, что произойдет?» Это строго научный вопрос. Вообще говоря, науку можно определить как метод получения некоторого объема информации для ответа на вопросы: «Если я сделаю это, что произойдет?» Методика по существу проста: попытайтесь — и увидите. Затем вы компилируете большой объем информации из различных надежных источников. Все ученые согласятся, что вопрос — любой вопрос, философского или другого характера, который нельзя представить в форме, проверяемой экспериментально (или просто нельзя облечь в форму: если я сделаю это, что произойдет?) — не является научным вопросом — он за пределами научной области.

Я утверждаю — хотите вы, чтобы что-нибудь произошло или нет — главное, какова ценность вашего результата и как вы сможете ее вывести (это конец вопроса: должен ли я это сделать?), и это лежит вне науки, поскольку это вопрос, ответ на который можно получить только зная, что произошло; но вы все-таки должны вывести, что произошло, из моральных соображений. Полагаю, в данном теоретическом примере существует полное соответствие между моральным взглядом, или этическим аспектом религии, и научной информацией.

Вернемся к третьему аспекту религии — аспекту вдохновения — перенесемся к главному вопросу, который я хотел бы представить воображаемому экспертному совету. Сегодня источник вдохновения — для укрепления духа и утешения — в любой религии очень близко связан с метафизическим

аспектом; то есть мы черпаем вдохновение в служении Богу, в послушании его воле, в чувстве единения с Богом. Эмоциональные связи с заповедями морали, основанные на этих понятиях, начинают резко ослабевать, когда сомнения, даже толика сомнений, касаются существования Бога; вера в Бога размывается, и данный источник вдохновения истощается.

Я не знаю ответа на главный вопрос — вопрос, как поддержать реальную значимость религии, ставшей утешением и поддержкой для большинства людей, и в то же время не требовать абсолютной истины в метафизических аспектах.

Наследие западной цивилизации

Мне кажется, что западная цивилизация опирается на два великих наследия. Одно — это дух научного приключения — захватывающего путешествия в непознанное, которое может открыться с помощью глубоких исследований; требование, чтобы незыблемые тайны Вселенной оставались незыблемыми; позиция, что все подлежит сомнению; и в итоге — смиренность интеллекта. Другое великое наследие — христианская этика — базис любви, братства людей, ценности отдельной личности; и в итоге — смиренность духа.

Эти два наследия логически полностью совместимы. Однако логика — это не все; чтобы следовать идее, надо иметь сердце. Если люди обращаются к религии, в какую обитель они возвращаются? Является ли современная церковь местом большего

утешения для человека, сомневающегося в Боге, чем для неверящего? Является ли современная церковь местом утешения и поддержки, учитывая сомнения человека? Как можно воспользоваться вдохновением для поддержки этих двух столпов западной цивилизации, чтобы они могли соседствовать рядом, вровень, в полную силу? Разве это не важнейшая проблема нашего времени?

Я передаю эти вопросы экспертному совету для обсуждения.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЙ НА ПРАВО ПЕРЕПЕЧАТЫВАНИЯ МАТЕРИАЛА

«Радость познания» — это отредактированная копия ряда интервью с Ричардом Фейнманом, которые транслировались на ВВС-2 в телевизионной программе «Горизонт — радость познания». Перепечатывается с разрешения продюсера Кристофера Сайкса, Карла Фейнмана и Мишель Фейнман.

Раздел «Компьютеры будущего» первоначально опубликован в 1985 году в качестве лекции, посвященной памяти Нишины. Перепечатывается здесь с любезного разрешения профессора К. Нишиджимы от имени Мемориального фонда Нишины.

Раздел «Лос-Аламос — взгляд снизу» был первоначально опубликован Калифорнийским технологическим институтом в журнале *Engineering and Science*.

Раздел «В чем состоит и в чем должна состоять роль научной культуры в современном обществе» перепечатывается с разрешения *Societa Italiana di Fisica*.

Раздел «Как много места в глубине» первоначально опубликован Калифорнийским технологическим институтом в журнале *Engineering and Science*.

Раздел «Ценность науки» из книги Ричарда Фейнмана в пересказе Ральфа Лейтона «Какое вам дело до того, что думают другие». Охраняется авторским правом ©1988, Гвинет Фейнман и Ральф Лейтон. Перепечатывается с разрешения *W. W. Norton & Company, Inc.*

Раздел «Что такое наука?» перепечатывается с разрешения из *The Physics Teacher*, том 9, стр. 313–320. Охраняется авторским правом © 1969 *American Association of Physics Teacher*.

Раздел «Самый большой умник на свете» перепечатывается с разрешения *OMNI*, © 1992 *Omni Publications International, Ltd.*

Раздел «Наука ослепляющей дикости: речь по случаю вручения дипломов выпускникам Калтеха 1974 года» был первоначально опубликован Калифорнийским технологическим институтом в журнале *Engineering and Science*.

Раздел «Это просто, как раз, два, три» из книги Ричарда Фейнмана в пересказе Ральфа Лейтона «Какое вам дело до того, что думают другие». Охраняется авторским правом © 1988, Гвенет Фейнман и Ральф Лейтон. Перепечатывается с разрешения *W. W. Norton & Company, Inc.*

Раздел «Взаимосвязь науки и религии» был первоначально опубликован Калифорнийским технологическим институтом в журнале *Engineering and Science*.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автомобили 54, 72, 118–119, 174, 176, 300
- Адроны 34–36, 307, 309
- Аламагордо испытания. См. Лос-Аламос
- Алгебра 20–21, 263, 295. См. также Математика
- Американская ассоциация по перспективному развитию науки 292, 314
- Арифметика 11, 20–21, 49, 89–90, 145, 149, 311. См. также Математика
- Астрология 146, 148, 150–151, 270
- Астрономия 151, 278, 296, 309
- Атомная бомба 24–25, 34, 79, 81, 88, 108, 132, 292–293, 298–299. См. также Лос-Аламос, Манхэттенский проект
- Атомы 33, 66, 77, 138, 167, 169, 182–183, 185, 193–194, 305, 321
- контролируемые индивидуально (по отдельности) 69
 - сгруппированные в транзисторы 67–68
 - и частицы в газе 65. См. также Электроны
- Атомные сталкивающиеся частицы (ускорители) 304
- Бачер Боб 122, 300
- Безопасность, вопросы 201–204, 206–208, 215–225, 250, 278
- Беннет С. 54, 61, 63, 67

Бесконечности 30, 258, 259
Бесселя функции 291
Бете Ганс 27, 79, 88, 93, 250, 258, 267
Библиотека Британского музея 163
Библиотека Конгресса 163
Биология 138–140, 145, 151, 158, 166–170, 180, 236,
321. См. также Химия
Бозе-эйнштейновский конденсат 10
Болезни (слабости) 115–116, 139, 147, 155, 197, 244,
248, 264
Большой взрыв 262
Бор Нильс 79, 122, 250, 267
Бор Оге 122
Бриджмен Перси 159, 159 (сноска)
Британская энциклопедия 17, 21, 158, 160, 163, 188
— записанная на булавочной головке 158
Броуновское движение 60, 64, 64 (рисунок)
Буддизм 189–190
Бэкон Френсис 229

Вайскопф Виктор 88
Вакуум 10–11, 159
Ван-дер-Ваальса силы 181 (сноска)
Вебб Джулиан 107
Вигнер Юджин 296, 296 (сноска)
Виртуальные частицы 251
Вирусы 293
Власть 153, 323
Военная форма 29
Воображение 7, 141, 293
Вооруженные силы (военные, армия) 113, 132
Вопросы морали 326

Временное связывание (навыки, сохраняющиеся в популяции) 244

Вселенная без человека 42, 293, 307

«Всяк в своем нраве» (Джонсон) 3

Газета «Нью-Йорк таймс» 22, 141

Газы 64–65, 85, 181, 206, 208–209

Галилей Галилео 11, 144, 183

Гамильтон сэр Уильям 263–264, 264 (сноска)

Гелл-Манн Мюррей 252 (сноска), 307

Геллер Ури 271

Гелий 158, 252, 293

Геометрия 232–233, 255

Глюоны 35, 261

Го (игра) 73

Горячие часы 56, 56 (рисунок)

Гровс 85

Дейтерий 280

Дети 18–19, 21, 195, 311

Дехоффман Фредди 132, 134

Джойс Джеймс 307

Джонсон Бен 3–9, 204

Динозавры 17

Дирак Поль 258, 262, 265 (сноска), 266

Доказательство 143–144, 148, 153, 190, 206, 232–233, 247, 262, 327

Доменов проблема 175

Женский ум 233

Жидкий гелий 158

Журнал «Annalen der Physik» (Эйнштейн) 60 (сноска)

Журнал «Nature» 10

Журнал «Omni magazine» 249, 332

Журнал «Physical Review» 7, 61, 87, 260

Журнал «Scientific American» 61

Завод в Ок-Ридже 103—103, 107—108

Законы физические 43, 66, 76, 139—140, 165, 262

— квантовой механики 67, 184

Звуковой барьер 59

Зеленая вода 104

Знахарь (колдун) 269—270, 272

Золото 127, 161

Зумвельт (лейтенант) 109, 111

Имена 22, 34, 203, 331

Индуктивность 54, 55 (рисунок), 234—235

Инерция 19, 54, 77, 174, 237

Институт парапсихологии 283

Институт перспективных исследований 9, 27

Информация 49—580, 63—64, 164—167, 172, 177, 203,
220

Ионы 162

Искусственный интеллект 47

Испытание Тринити. См. Лос-Аламос; Испытание
в Аламагордо

История 39, 43, 129, 215, 231, 276—277, 284

Кадмий 107

«Кайф от открытия» 11—12, 29

Калибровочные теории 261

Калифорнийский технологический институт (Калтех)
30, 50, 293, 300—301, 314, 331—333

Камерлинг-Оннес 158
 Каоны 34
 Католическая церковь 152-154
 Квантовая механика 66-67, 70, 74, 184, 228, 250, 264, 303
 Квантовая электродинамика 28, 33, 35, 249, 252, 258, 293, 302-304, 306
 Кварки 35-36, 68, 253, 265, 307-309
 — электрические заряды 308
 — сохраняемая информация 68
 Кватернионы 263-264
 Кейман 101
 Книги мира 166
 Коммунизм 323
 Коммуникации (связь) 196-197
 Комптон 82, 83
 Компьютеры 46-47, 49-52, 57, 60-61, 65-78, 111-116, 170-173, 176, 180, 204, 220-224, 241, 255, 311, 331
 — аналогия с мозгом 71
 — центральные процессоры 49-50
 — на орбитальной ступени «Челленджера» 219
 — чипы 48, 54, 68
 — время по часам и время цикла 57
 — отладка программ 47
 — потребление энергии 48
 — миниатюризация 171, 173. См. также Компьютеры, размер
 — параллельная обработка 48
 — языки программирования 47
 — обратимый/необратимый 63-64, 67, 75-77, 144

- размер 17, 46, 48, 58–59, 65–69, 76–77, 101, 109, 158, 160–161, 163, 165, 169–175, 177–181, 183–184, 187, 193, 233, 321
- программное обеспечение 222–223
- универсальный 74, 154
- векторные процессоры 50
- использование напряжения 60. См. также Транзисторы

Компьютер «Connection Machine» 51

Корнеллский университет 5, 27, 299

Космический корабль-челнок «Челленджер» 13, 201

- бортовая радиоэлектроника 219
- принципы сертификации 2115
- компьютерная система на орбитальной ступени 210, 219
- вероятность разрушения 212
- «Руководство по подготовке к полетам» 206, 219
- кислородные и топливные турбонасосы высокого давления 211, 213, 214
- график запусков 225–226
- руководство 199, 203, 212, 220–221
- проблемы. См. Проблемы; Конструирование снизу вверх/сверху вниз
- ракеты на твердом топливе, оценка надежности 20, 208
- основные (главные) двигатели челнока 203, 210, 212, 215–216, 219
- лопасти турбин 210–211, 213, 216–217

Космический куб Калтеха 50

Космические программы полета человека/без человека 201, 204–205

Космические лучи 60
 Космология 249, 262, 278
 Красота 15–16, 86
 Кристи Боб 91, 118

 Лаборатории 10, 80, 874–86, 186–187, 204, 234, 279–281, 284, 294, 299
 Лаборатория реактивного движения 187, 204
 Ландауэр Р. 61
 Летающие тарелки 270
 Лечение (исцеление) внушением 146
 Лидеры 89, 215
 Лоуренс Уильям 126, 301
 Лос-Аламос 25–26, 79–80, 82–85, 103–104, 107–109, 111, 116, 121, 124, 126–127, 131–132, 250–251, 299, 331
 – военные 104, 116
 Лурдес 146–147, 149
 Лэмб Уиллис 258, 258 (сноска), 259
 Любовь 33
 Лямбды (лямбда-частицы) 34, 306

 Магнитные свойства 175
 Маколифф (астронавт) 226
 Манли 85
 Манхэттенский проект 15, 46, 79, 120, 250. См. также
 Атомная бомба; Лос-Аламос
 Маршан, счетные машины 89–90, 111, 114
 Математика 21, 32–33, 35–36, 39, 49, 85, 168–169, 231–233, 251, 255–256, 263–264, 272, 293, 295–296, 298, 311
 – интегралы Фейнмана 251
 – необходимость 72, 93, 131, 138, 151, 212, 229

- и структуры (узоры, рисунки) 16, 34, 49–51, 73, 122, 168, 175, 182, 192, 194, 210, 220, 258, 269, 288, 304, 324
- качественное содержание уравнений 265–266
- обучение 39, 41, 145, 150, 227–228, 231, 234, 236, 246, 269, 272, 274, 283. См. также Алгебра; Арифметика; Квантификация; Физика; Квантовая электродинамика

Материалов свойства 182, 210–211

Маховик 54

Машины крошечные 174. См. также Атомы, контролируемые индивидуально; Компьютеры; Размер

Медицинские публикации. См. Болезни (слабости)

Мезоны 261, 306

Метод сгущения/выпаривания 173

Микроскопы. См. Электронный микроскоп; Оптический микроскоп; Милликен Роберт 161–163, 167–170, 186

Миниатюризация 171, 173. См. также Компьютеры; Машины крошечные

Мировоззрение. См. Наука

Моделирование 70

Мозг 71–72, 142, 194, 285, 289–291. См. также Компьютеры, аналоги мозга

Молекулы ДНК/РНК 167–168, 193

Моторы. См. Машины крошечные

Мысли контроль 25–26, 30, 57–58, 72, 129, 136–140, 148, 192, 201, 236–237, 246, 251, 266, 268, 271, 284, 294, 304, 317, 324

Наблюдения 144, 241, 246, 291

Нагасаки 46, (сноска)

Награждение (присуждение премии) 241 Нанотехнологии 157. См. также Атомы, контролируемые индивидуально; Машины крошечные

Наследственность 138

Наука 12, 41–42, 82, 136–137, 139, 142, 145, 148, 150–151, 154, 191, 198, 227, 229–230, 235–236, 238, 243, 246–248, 269, 272, 283, 312–313, 317, 323, 325–327, 332

– применения (приложения) 39, 136–137, 139, 278

– и красота 15

– наука ослепляющей дикости (наука, отягощенная культом) 269, 273–274, 276, 282, 292, 332

– и сомнения 42, 44, 143, 152–153, 155, 195, 199, 226, 246–247, 262–263, 274, 318–320, 322–323, 330. См. также Сомнения

– удовольствие (наслаждение) от науки 27, 191

– и правительство 198, 225–226, 278, 327

– невежество в 247

– псевдонаука 41, 246, 272

– и ответственность 12, 137, 189, 191, 199, 277

– научный метод 144–145, 149, 156, 276, 313

– и общество 136–137, 189, 191

– обучение 246

– в ходе II Мировой войны 81. См. также Физика Напряжение. См. также Компьютеры, использование напряжения

Национальная академия наук 30

Национальная библиотека, Франция 163

Невежество экспертов 247. См. также Неопределенность

Незаинтересованность 144

Нейтроны 105, 107–109, 127, 132, 306–308

Неопределенность (колебания, сомнения) 77, 152–153, 209, 217, 318–320, 322, 326

Нобелевская премия 11, 15, 27 (сноска), 29, 104 (сноска), 121 (сноска), 122 (сноска), 158 (сноска), 281 (сноска), 249, 251, 252 (сноска), 257, 258 (сноска), 292–293, 396 (сноска), 301–303, 306. См. также Фейнман Ричард

Обобщения 71, 310

Обучение 39, 41, 145, 150, 227–228, 231, 234, 236, 246, 269, 272, 274, 283, 312
– идеи и определения 38, 124, 139, 142–144, 148, 194–195, 198, 216, 244, 250–251, 262, 275. См. также Образование; Наука

Образование 154–155, 311, 313. См. также Обучение

Объективность 148–149

«О дивный новый мир» (Хаксли) 138

Одурачивание кого-либо 277

Олум Поль 85, 87

Оппенгеймер Роберт 25, 79, 82, 85, 105, 107, 117

Определения 205, 238, 257

Определенность. См. Неопределенность

Оптический микроскоп 162

Осциллоскоп электронно-лучевой 162. Ответственность. См. Наука

Относительность 250

Пантографы 179

Папа Римский 22

Парапсихология 282–283. См. также Экстрасенсорное восприятие

Паули Вольфганг 264, 296 (сноска), 297

Пенология 313

Пи (π) 133–134, 234–235, 306
 Пионы 34
 Пища 41
 Пластик 161, 164, 175
 Платина 127
 Плутоний 126–127
 «Поминки по Финнегану» (Джеймс Джойс) 307
 Преступления 313
 Принстонский университет 27, 80, 295
 Принцип неопределенности 77
 Проблемы 20, 22, 70, 93, 123, 136–138, 151, 153–155,
 158, 163, 168, 172, 175, 181, 183–184, 189–190, 199,
 208, 211, 213, 250–251, 257, 274, 277, 295, 309, 315–
 316, 322
 – в биологии/химии 168
 – бесконечности 250
 – сопротивление в малых схемах 183
 – социальные 138, 189–190
 – решения 136, 154, 213–215, 251, 274
 Программа Би-би-си «Горизонт», телевизионная 15,
 331
 Программа серии «Nova» 15
 Пропаганда 149, 201
 Протоны 34, 305–308

 Раби И. 82
 Радиоактивность 69, 105
 Рассел Генри 296
 Резерфорд Роберт 258, 258 (сноска), 267, 305
 Райн (парапсихолог) 282–283
 Реклама 149–150, 275, 278

- Религия 13, 44, 135–136, 148, 151, 190, 193, 245, 315–318, 320–329, 333
- Решений принятие 171
- Свет 10–11, 23, 42, 67, 125, 132, 162–163, 172, 183, 230, 238–239, 241, 245, 249, 285, 296, 302–303, 305
- скорость света 67, 172
 - ультрафиолет 125. См. также Фотоны
- Святые 147
- Сегре Эмилио 104–106
- Сейфы, рассказы 79, 103, 128–131, 133–134, 250
- Секреты 80–81, 101–102, 117, 119, 129, 131–132, 230, 298
- Сербер Роберт 88
- Сигма (сигма-частицы) 34, 306
- Слабости 226
- Слава (честь) 4, 12, 22, 141, 269, 276. См. также Нобелевская премия
- Смерть 138–139, 243
- Смит 82, 126
- Советский Союз 153
- Согласованность (соответствие) 318
- Сознание 322
- Соломоновы острова 312. См. также Наука ослепляющей дикости
- Сомнения 34, 44, 153, 195, 226, 247, 252, 274, 318, 329–330
- Сохранение заряда и четности (CP) 140–141
- «Стоун энд Уэбстер», компания 109
- Суеверие (идолопоклонничество) 269
- Суперкомпьютеры 51. См. также Компьютеры

Счетные машины. См. Табуляторы IBM; Маршан
счетные машины

Табуляторы IBM 113, 116

Таки Джон 289–291

Теллер Эдвард 88, 102–103

«Теория излучения Томонаги, Швингера и Фейнмана» (Дайсон) 7

Толмен 82–83, 301

Томонага Син-Итиро 249, 301

Транзисторы 54–55, 57–62, 66–68, 71, 172

– и Броуновское движение 60, 64

Турбулентность 265–266

Удача 5, 121, 128, 283

Узор 193–194, 231–233, 288

– распознавание структуры (узора, рисунка) 73

Уилер Джон 5, 250, 267, 296 (сноска), 297

Уилсон Боб 80, 84, 85, 127, 298

Уильямс Джон 87

Улам Станислав 251

Универсальность 33, 140

Уокер Берни 284

Уран 81–83, 101, 103–104, 107, 109–110, 132, 298–
299

– разделение изотопов 81–83

– нитрат урана 104, 110

Ускорители. См. Атомные сталкивающиеся частицы

Фарадей Майкл 254

Федеральное авиационное агентство (FAA) 204, 215–
216, 218

Фейнман Ричард 5–8, 11–15, 28, 30, 46, 79, 108, 110, 135, 158, 177, 187, 189, 201–202, 227, 249–267, 269, 284, 292–305, 307–310, 314–315, 331–332

– и уплотнительное кольцо «Челленджера». См. также Космический корабль-челнок «Челленджер»; изоляция уплотнительного кольца

Ферми Энрико 121, 250, 260, 280

Философия 198

Физика 5–6, 12–13, 22, 27–34, 36, 38–39, 43, 66, 88–89, 121–123, 138–140, 145, 158–159, 165, 167, 169, 181, 184–185, 227, 236, 249, 250–255, 258, 261–267, 280, 292–305

Физиология 40, 267

Фотоны 23–24, 35, 302, 305–306

Френкель Стэнли 112, 114

Фредкин 63, 67, 74

Фукус 118

«Фундаментальные физические ограничения компьютерного счета» (Беннет и Ландауер) 61

Хаксли А. 138

Харви Уильям 229, 229 (сноска), 256

Хау Лин 10

Хиббс Альберт 177

Хитрости (хитроумие) 54, 93, 118, 130

Хиросима 15, 25–26, 79, 128

Цинк 127

Частицы 23, 28, 32–37, 60, 64–65, 141, 159, 251–255, 257, 261–262, 296, 302, 304–308. См. также Кварки; Конечные частицы

Черные дыры 2962 (сноска)
Честность (прямота). См. Наука
Чикаго 80, 84–85, 121

Шахматы 30, 32, 73

– аналог шахматной игры 32

Швингер Джулиан 6–7, 249, 251, 257, 259, 301

Шекспир Уильям 3–5, 7–9

Шредингер Эрвин 265, 265 (сноска)

Эволюция (развитие) 142

Эксперименты 6, 10, 28, 36–37, 42, 82, 84, 127, 146,
202, 207, 216, 218, 234, 246–247, 254, 258, 274–
275, 279–284, 288–289, 291, 294, 303, 305–306,
308–313, 315

Экстрасенсорное восприятие (ESP) 271, 282

Эксперты 441–42, 121, 203, 246–247, 272, 315–
316

Электронный микроскоп 161–163, 167–169, 186

Электроны 23, 33, 35, 58, 163, 167, 250–251, 258, 276,
302–303, 305–306, 308

– в электронном микроскопе 161–163, 167–169,
186

Экономика 145, 186

Эйнштейн Альберт 11, 60, 151, 296–297, 301. См. так-
же Относительность

Энергия 27, 34, 36, 48, 53–58, 60, 65, 67–69, 71, 75–
77, 84, 113, 117–118, 138, 168, 176, 184, 192, 236–
239, 245, 250–252, 258, 285, 298, 301, 303, 306–309.

См. также Компьютеры

– потребление энергии 48

Эсален 270

Юкава Хидеки 34, 306 (сноска)

Юри Гарольд 82

Ядерные силы 28

Янг (экспериментатор по психологии) 280–282

Япония 46

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово Фримэна Дайсона. Люблю почти до преклонения.	3
Предисловие редактора иностранного издания	10
1. Радость познания сути вещей	15
2. Компьютеры будущего.	46
3. Лос-Аламос — взгляд снизу	79
4. В чем состоит и в чем должна состоять роль научной культуры в жизни общества	135
5. Как много места в глубине	158
6. Ценность науки.	189
7. Особое мнение Ричарда Фейнмана, касающееся следствия по делу космического корабля-челнока «Челленджер».	201
8. Что такое наука?	227
9. Самый большой умник на свете	249
10. Наука ослепляющей дикости: некоторые замечания по поводу науки, псевдонауки и рекомендации, как не дать себя одурачить.	269
11. Это просто — как раз, два, три.	284
12. Ричард Фейнман строит Вселенную	292
13. Взаимосвязь науки и религии.	315
Подтверждение разрешений на право перепечатывания материала	331
Предметный указатель	334

Исключительные права на публикацию книги
на русском языке принадлежат издательству AST Publishers.
Любое использование материала данной книги,
полностью или частично, без разрешения
правообладателя запрещается.

Научно-популярное издание

Фейнман Ричард
РАДОСТЬ ПОЗНАНИЯ

Ответственный редактор *Я. Унтилов*
Художественный редактор *Е. Фрей*
Технический редактор *Н. Духанина*
Компьютерная верстка *Е. Беликовой*
Корректор *Н. Мартынов*

Общероссийский классификатор продукции
ОК-034-2014 (КПЕС 2008); 58.11.1 — книги, брошюры печатные
Произведено в Российской Федерации
Изготовлено в 2023 г.
Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»

ООО «Издательство АСТ»
129085, г. Москва, Звездный бульвар, дом 21, строение 1, комната 705, пом. 1, 7 этаж.
Наш электронный адрес: www.ast.ru
E-mail: ast@ast.ru
ВКонтакте: vk.com/ast_neoclassic

«Бесла Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звездный бульвар, 21-үй, 1-сұрылым, 705-бөлме, 1 жай, 7-қабат
Біздің электрондық адресі: www.ast.ru
E-mail: ast@ast.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz
Интернет-древин: www.book24.kz
Импортёр в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасында импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибутор және өкілдері: қолдануға арналған өнімдерді Қазақстан Республикасында
ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасында дистрибутор
және өнім бойынша аралас-талаптарды қабылдаушы
өкіл «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Денисовский көш., 3-ж., пәтер 5, өкіл 1.
Тел.: 8(727) 251 59 89, 90, 91, 92, факс: 8(727) 251 58 12, ян. 107.
E-mail: RDC-Almaty@yandex.kz
Өніммен, жарнамасымен, меркезімен шектелген.

Өндіріс және өнім: Ресей
Сертификация қарастырылмаған

Подписано в печать 11.10.2023. Формат 76x100^{1/32}.
Гарнитура «Newton». Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,48.
Доп. тираж 3000 экз. Заказ 9335.

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в АО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»
432980, Россия, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

book 24.ru

Официальный
интернет-магазин
издательской группы
«АСТ»

ISBN 978-5-17-136084-9



9 785171 360849 >

16+

Ричард Фейнман — американский физик, лауреат Нобелевской премии, один из создателей атомной бомбы, первооткрыватель квантовой электродинамики и автор «Фейнмановского курса лекций», который давно стал для многих студентов настольной книгой и путеводителем в мир физики.

Р И Ч А Р Д

ФЕЙНМАН

$$E = mc^2 ?$$

Ричард Фейнман — безусловный гений науки. Хотя сам о себе он отзывался как о человеке «с весьма ограниченным и неразвитым интеллектом». Его скромность наряду с острым умом, прямолинейностью и оригинальной манерой изложения — составные части целого феномена, за которым интересно наблюдать в «Радости познания». В этой книге вы не найдете сложных формул и расчетов, но замечательно проведете время в компании известного ученого, дадите несколько лекций и интервью, успеете поработать над атомной бомбой, посмеетесь над его шутками и откроете не один сейф. Буквально. Здесь также изложены размышления Фейнмана о компьютерах будущего, ответственности ученых перед обществом, связи науки и религии.

Радость познания

Цена 355 руб.



2 67 98066 05853 8



РАДОСТЬ
ПОЗНАНИЯ

Э К С К Л Ю З И В Н А Я К Л А С С И К А