

*Посвящается:
Тьерри, указавшему мне путь,
Элен, разделившей его,
Факс и Улиссу, сопровождавшим меня на этом пути*

Thibault Damour

SI EINSTEIN M'ÉTAIT CONTÉ

De la relativité
à la théorie des cordes

Édition mise à jour

Тибо Дамур

МИР ПО ЭЙНШТЕЙНУ

От теории относительности
до теории струн

Перевод с французского



Династия



Москва 2016

УДК 530.1:001.12
ББК 22.31г
Д16

Переводчик и научный редактор Владимир Белавин, к. ф.-м. н.
Редактор Вячеслав Ионов

Д16 Дамур Т. Мир по Эйнштейну: От теории относительности до теории струн / Тибо Дамур ; Пер. с фр. — М.: Альпина нон-фикшн, 2016. — 268 с.

ISBN 978-5-91671-485-2

Как зарождалась теория относительности? Как повлияли революционные идеи Эйнштейна на представления о пространстве и времени, на науку и технику? Каково их место и значение в современной науке? Книга дает читателю возможность проникнуть в мир Эйнштейна, разделить те особые моменты, когда ему удавалось приподнимать краешек большой завесы, постигая скрытые механизмы Вселенной. Автор шаг за шагом скрупулезно, но занимательно и доступно рассказывает об истоках и формировании идей Эйнштейна, показывает их борьбу с устоявшимися представлениями, непростой путь внедрения этих идей в головы физиков и философов и значение для нашего времени.

УДК 530.1:001.12
ББК 22.31г

Издание подготовлено при поддержке
Фонда Дмитрия Зимины «Династия»



Династия

Фонд некоммерческих программ «Династия» основан в 2002 году Дмитрием Борисовичем Зиминым, почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда — поддержка фундаментальной науки и образования в России, популяризация науки и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» — проект Фонда по изданию современных научно-популярных книг, отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена под эгидой этого проекта.

Более подробную информацию о Фонде «Династия» вы найдете по адресу www.dynastyfdn.ru.

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru.

ISBN 978-5-91671-485-2 (рус.)
ISBN 978-2-7491-2450-6 (фр.)

© Le Cherche Midi, 2005, 2012
© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина нон-фикшн», 2016

Содержание

<i>Однажды...</i>	7
Глава 1. Вопрос времени	9
Глава 2. Мировая шахматная доска	41
Глава 3. Упругое пространство-время	81
Глава 4. Эйнштейновская Игра в Мир	117
Глава 5. Свет и энергия как частицы	139
Глава 6. Спор со Сфинксом.....	173
Глава 7. Наследие Эйнштейна.....	197
<i>Примечания</i>	225
<i>Избранная библиография</i>	259
<i>Благодарности</i>	263
<i>Предметно-именной указатель</i>	265

Однажды...

Однажды мальчик лет пяти скучал в кровати, поскольку был болен. Чтобы помочь скоротать время, папа принес ему компас. Мальчика сильно удивило странное поведение стрелки компаса. В отличие от обычных предметов, эта стрелка упрямо держалась одного направления, как бы он ни поворачивал корпус, в котором она находилась. Почему это происходило? И что скрывалось за ее удивительным поведением?

Мальчика звали Альберт Эйнштейн. То глубокое удивление, которое он испытал, наблюдая за поведением намагниченной стрелки, запомнилось ему на всю жизнь. Этот случай стал основой того, что направляло затем всю его научную деятельность: ненасытного желания понять *истинный порядок, скрытый за внешним видом вещей*. Вот как писал он сам:

«...Я прекрасно знаю, что у меня нет никакого особого таланта. Любопытство, сосредоточенность и элементарное упрямство — вот что привело меня к моим результатам».

Прошло 100 лет с того «чудесного» 1905 г., когда Эйнштейн заложил основу двух величайших научных теорий XX в. — специальной теории относительности и квантовой теории; 90 лет с момента, когда он создал общую теорию относительности; 50 лет со дня его смерти. Однако имя Альберта Эйнштейна и сейчас продолжает восхищать и ученых, и людей, далеких от науки. Жизнь его не была безоблачной и монотонной, однако она всегда подчинялась единственной страсти: стремлению понять скрытое устройство Вселенной. Его успех в этом поиске был исключительным. Хотя вторая половина жизни Эйнштейна принесла меньше конкретных результатов, диапазон его инте-

ресов в этот период поразителен: только теперь мы начинаем находить ответы на вопросы, которые он ставил тогда.

Эта книга — не биография Эйнштейна. Мы практически не будем говорить о нем как о муже, отце, музыканте, борце за мир, сионисте. Мы не будем описывать его молодость, проведенную в Мюнхене, годы учебы в Цюрихе, трудности в поиске работы, научную карьеру, общественную жизнь в оживленном Берлине 1920-х гг., письмо, которое он написал Франклину Делано Рузвельту, с упоминанием возможности создания ядерной бомбы, или его жизнь отшельника в маленьком университетском городке в Принстоне. Еще меньше эта книга похожа на курс теории Эйнштейна или обзор современной физики. Мы хотели помочь читателю представить себя на месте Эйнштейна, чтобы разделить те особые моменты, когда ему удавалось «приподнимать краешек большой завесы», т. е. постигать некоторые скрытые механизмы Вселенной. Для человека его склада такие моменты составляют суть жизни. В своем «некрологе», автобиографических заметках, написанных в последние годы по просьбе издателя Пауля Артура Шлиппа, он попытался воспроизвести ход своих мысленных поисков, опуская обычные биографические подробности. Он писал:

«*Это действительно некролог?*» — может по праву спросить удивленный читатель. Я хочу ответить, что, по существу, да. Потому что в жизни человека моего склада имеет значение *то*, что он думает и *как* он думает, а не то, что он делает и чувствует. Вот почему мой некролог можно в основном свести к изложению идей, которые сыграли важную роль в моих исследованиях».

Мы надеемся, что читатель сможет до некоторой степени испытать ту «радость мысли», которой жил Эйнштейн до последнего дня своей жизни.

Немного практической информации перед тем, как мы приступим и дадим Эйнштейну возможность жить и думать о будущем перед нами. Чтобы легче было читать, технические детали и ссылки собраны в примечаниях в конце книги. Они совершенно не нужны для понимания текста и предназначены для тех любознательных, которые хотели бы узнать больше.

ГЛАВА 1

Вопрос времени

Но, что удивительно, чтобы преодолеть трудности [...] нужно было, как оказалось, лишь яснее осознать концепцию времени.

— ЭЙНШТЕЙН

Орел и воробей

Берн, Швейцария, май 1905 г.

Был необычайно ясный и солнечный¹ воскресный день, 1 мая. Наконец немного свободного времени после рабочей недели в патентном бюро в Берне! С утра Альберт Эйнштейн радовался, что можно заняться научной проблемой, не дававшей ему покоя уже много лет. Не то чтобы он думал над ней постоянно. Вовсе нет! Кроме нее на протяжении первых месяцев этого 1905 г. его мысли были заняты и другими научными исследованиями. 14 марта он отмечал свое 26-летие, внося последние штрихи в статью, которую обозначил для себя как «весьма революционную», где ставилась под сомнение волновая природа света. С конца марта и в течение всего апреля Эйнштейн писал работу, которая позже легла в основу его докторской диссертации: новый способ определения размера атомов и молекул. В начале мая он показал, что маленькие зерна пыльцы, помещенные в жидкость, должны совершать хаотические движения, отражающие молекулярные возбуждения, вызванные нагреванием, и ему удалось вывести законы этих движений². Начиная со среды 10 мая, когда он отправил эту последнюю работу в научный журнал, Эйнштейн использовал краткие мгновения свободы, чтобы снова погрузиться в задачу, не выходящую из головы вот уже 10 лет.

Десять лет размышлений для человека 26 лет от роду? Но это действительно так. Когда Эйнштейну было 16 лет, в 1895 г.,

у него вдруг возник вопрос: можно ли угнаться за лучом света и поймать его? Уже давно было известно³, что свет распространяется с конечной скоростью около 300 000 км/с. Но в соответствии с общепринятыми идеями о пространстве и времени, основанными на трудах Галилея, Декарта и Ньютона, ничто не мешало, в принципе, достичь такой скорости или даже превзойти ее. Ничто не мешало, таким образом, юному Эйнштейну представить наблюдателя, движущегося с той же скоростью, что и свет. Но что увидел бы такой наблюдатель, сидящий верхом на луче?

Молодой Альберт вспоминал восторженные объяснения своего дяди Якоба о предположительной природе света, предсказанной в середине XIX в. теоретическими расчетами Джеймса Клерка Максвелла и подтвержденной в 1887 г. в экспериментах Генриха Герца. Согласно этой теории, свет является электромагнитной волной, т. е. представляет волновое явление, в котором электрическое поле играет в «чехарду» с магнитным полем: в каждой точке пространства интенсивность и того, и другого поля регулярно колеблется между положительными и отрицательными значениями наподобие уровня воды в волне и эти два колебания смещены по отношению друг к другу таким образом, что, когда электрическое поле достигает своей максимальной или минимальной амплитуды, магнитное поле имеет нулевую амплитуду, и наоборот*. И, как в игре в чехарду (где бесконечное число «электрических пастухов» прыгает через бесконечное число «магнитных овец»), это двойное колебание распространяется в пространстве со скоростью 300 000 км/с подобно волнам на поверхности воды. Тогда могло показаться, что наблюдатель, движущийся с той же скоростью, что и электромагнитная волна, подобно серферу, скользящему на гребне волне, должен видеть не колебательное явление, а скорее, неподвижную конфигурацию электрических и магнитных полей, изменяющихся пери-

* Для наглядности используется более упрощенная картина, чем на самом деле. Описанный ход осцилляций относится на самом деле к векторному потенциалу A и его сопряженному импульсу $\Pi = dA/dt = -E$, тогда как $H = \text{curl}A$, где E , H — соответственно электрическое и магнитное поля. — *Прим. пер.*

одически в пространстве, но независящих от времени. Однако уравнения Максвелла, которые описывают конфигурации электрических и магнитных полей, не допускают подобных решений. Интуитивно молодой Альберт заключил отсюда, что, вероятно, просто невозможно передвигаться так же быстро, как свет.

Этот наивный «мысленный эксперимент» не выходил из головы Эйнштейна на протяжении всего периода обучения в Высшей технической школе Цюриха. Школа славилась по всей Европе качеством образования, а также высокой научной репутацией преподавательского состава. Например, физику в Политехе вел Генрих Вебер, автор значительных работ по теплоемкости твердых тел, таких как алмазы. Эйнштейн надеялся, что курс Вебера охватит последние достижения в теории электромагнитного поля. Но это оказалось не так. Курс не выходил за рамки того, что Эйнштейн уже и так знал, т. е. представлял собой обычное введение в теорию электромагнитного поля Максвелла⁴, а также обзор экспериментальных результатов Герца. В результате студент Альберт Эйнштейн «прогуливал» лекции Вебера, чтобы иметь возможность изучать самостоятельно новые книги по электромагнетизму и некоторые оригинальные статьи (в особенности работы Герца). Он также проводил много времени в новой и хорошо оборудованной исследовательской лаборатории Политехнического института и даже предложил поставить там эксперимент по измерению скорости движения Земли относительно эфира (это предложение было, однако, отвергнуто Вебером, который не сумел по достоинству оценить этого умного, но довольно наглого и самоуверенного студента). Эфиром называлась среда, в которой распространяются свет и электромагнитные волны. Для всех физиков XIX в. наличие «среды» казалось необходимым условием распространения света и электромагнитных полей, так же как воздух необходим для распространения звука.

Окончив в 1900 г. Политехнический институт, Эйнштейн продолжал думать о том, как определить скорость Земли относительно эфира. Он прочитал работу голландского ученого Хендрика Лоренца, где были описаны различные попытки экс-

периментально установить эту скорость и где отмечалось, что теория Максвелла, если ее рассматривать не в «покоящейся» по отношению к эфиру системе отсчета, а, например, в системе отсчета, связанной с Землей и движущейся относительно эфира, приобретает особые свойства, которые осложняют и, может быть, даже лишают наземных наблюдателей возможности обнаружить их движение относительно эфира. Вот к этим вопросам и решил вернуться Эйнштейн в этот прекрасный воскресный майский день: что видит наблюдатель, который пытается поймать пучок света (или электромагнитную волну)? А также: может ли наблюдатель, находящийся на Земле, обнаружить свое движение относительно эфира?

Но еще одно утро, проведенное в размышлениях в квартире на Безеншервиг, куда Эйнштейн недавно перебрался, не помогло прояснить эти вопросы. Хотя он умел сосредотачиваться, ему было трудно спокойно размышлять в этой маленькой квартире, где его жена Милева хлопотала по хозяйству и бегал маленький Ганс Альберт, недавно отпраздновавший свой первый день рождения. Эйнштейн решил, что лучше всего пригласить друга Микеле Анджело Бессо, обсудить вопросы с ним во время прогулки по холмам вокруг Берна. Тем более, что вот уже неделя, как Альберт покинул свою квартиру на Крамгассе в историческом центре города, поселился в районе Маттенхоф на окраине Берна и стал с Микеле почти соседом.

Микеле был его старинным другом в Берне. Впервые они повстречались на музыкальных вечерах в Цюрихе в то время, когда Эйнштейн готовился поступать в Политехнический, а Микеле уже заканчивал его. С самого момента знакомства они знали, что останутся друзьями на всю жизнь. У них было много общего. Конечно, причиной встречи стала любовь к музыке, но также их объединяла безграничная любознательность в сферах науки, литературы, искусства, философии... Кроме того, Альберт познакомил Микеле с его будущей женой, Анной Барбарой Винтелер, дочерью хозяина своей квартиры. Последний, «папа» Винтелер, был профессором кантональной средней школы в Аарау, где Альберт получил образование и готовился к вступительным

экзаменам в Политехнический университет. Вот уже более года, как Микеле присоединился к Альберту в качестве технического эксперта в Федеральном патентном бюро в Берне. Таким образом, они виделись каждый день в офисе, регулярно провожали друг друга домой и даже, с тех пор как стали соседями, ходили вместе на работу. Эти прогулки сопровождались оживленными дискуссиями на разнообразные темы. Когда обсуждения касались научных тем, над которыми работал Альберт, Микеле сравнивал себя с воробьем, взлетающим до небес вслед за орлом. Сам по себе воробей не мог бы летать так высоко, однако, уже поднявшись, мог на мгновение вспорхнуть выше орла.

Мысль увидеться с Микеле придала энергии Альберту. Он быстро спустился вниз по лестнице из своей квартиры. День только начинался. Без сомнения, Микеле уже позавтракал и был не прочь совершить *Passaggiata Scientifica*. Вскоре двое друзей легко шагали по холмам Гуртена, откуда открывался великолепный вид на Берн. Попробуем представить себе их живой диалог.

А.Э.: Я уверен, что старый добрый Галилей был прав: «движение неотлично от покоя».

М.Б.: Ты хочешь сказать, что нельзя обнаружить собственное движение в пространстве, если двигаться с постоянной скоростью и по прямой линии?

А.Э.: Да. И это должно касаться не только механических свойств...

М.Б.: ...бабочки, порхающие в трюме движущегося корабля, о которых говорит Галилей...

А.Э.: ... а также электромагнитных свойств и, в общем, всех законов физики. Так что я думаю, что понятие «эфир», которое они хотят нам вбить в голову, не имеет никакого смысла.

М.Б.: Ты полагаешь, что «абсолютного пространства» Ньютона, отождествляемого с эфиром, не существует? Существует лишь «относительное пространство» Лейбница?

А.Э.: Да, что-то в этом роде. Это настолько просто и элегантно, что, скорее всего, так и есть. И это бы объясняло заодно то, что Лоренц не очень изящно пытается продемонстрировать, собирая различные предположения и неубедительные рас-

четы. Но у меня возникает проблема со скоростью света. Если я признаю, что «все относительно», то движущийся наблюдатель, как парень, что бежит за светом, о котором я тебе говорил, не только никогда не сможет его догнать, но всегда будет видеть, что свет движется с одинаковой скоростью.

М.Б.: Но это же противоречит закону сложения скоростей! Давай вернемся к Галилею с его бабочками, порхающими в трюме корабля. Скорость бабочки относительно берега есть сумма ее скорости⁵ относительно корабля и скорости корабля относительно берега.

А.Э.: Да, это меня и смущает. Тем не менее я убежден, что скорость света должна быть всегда одинакова: 300 000 км/с. Независимо от наблюдателя, который ее измеряет.

М.Б.: Да, я понимаю, тут действительно какое-то противоречие. Ты хочешь, чтобы прибавление дополнительной скорости к 300 000 км/с давало бы снова 300 000 км/с! Как если бы требовалось, чтобы $1 + 1$ по-прежнему было равно 1, а не 2! Заметь... логически это не исключено. Просто надо изменить смысл символа плюс. Я помню курс Гурвица по математике в Политехе. Он приводил примеры законов, определяющих соотношения между числами с модифицированными правилами сложения, где можно было получить $1 + 1 = 1$.

А.Э.: Да, но сейчас мы говорим о старых добрых числах и об обычном сложении. В конце концов, мы просто складываем километры в секунду.

М.Б.: Хорошо, согласен. Но тогда давай разделим вопрос на части. Что такое один километр? И что значит одна секунда?

А.Э.: Постой... Точно! Мне кажется, я понял... Посмотри на часы на башне, там, в центре Берна. Если бы у нас был бинокль, мы могли бы увидеть время. Но это было бы не наше время. Необходимо учитывать время, которое требуется свету, чтобы прийти от часов до нас. Я думаю, это изменит концепцию времени для движущегося наблюдателя. Спасибо, Микеле! Я уверен, что теперь все получится. Сегодня вечером проверю, что конкретно это дает.

М.Б.: Воробей не понял, что орел узрел своим пронизательным взглядом, но рад, что был в состоянии помочь хоть немного.

Между тем *sol lucet omnibus*⁶, так что надо использовать этот чудесный денек!

Вечером того же дня Эйнштейн убедился, что действительно «все работает». На следующее утро при встрече он поблагодарил Микеле за указанный правильный путь. Он работает в редкие свободные моменты, которые остаются после рабочего дня, и в выходные (а еще нужно уделять время жене и ребенку) и шесть недель спустя, в конце июня, отправляет в *Annalen der Physik* основополагающую статью по теории относительности. Эта статья не содержит никаких ссылок на предыдущие научные работы, но заканчивается фразой: «В заключение я хочу сказать, что во время работы над рассматриваемой здесь проблемой мой друг и коллега М. Бессо постоянно оказывал мне неоценимую помощь и что я в долгу перед ним за многочисленные полезные предложения. Берн, июнь, 1905 г.»

Эта короткая статья Эйнштейна содержит один из самых важных научных результатов XX в. Она поражает «изяществом» и обладает аксиоматической безупречностью, достойной классических рассуждений эвклидовой геометрии, которую Эйнштейн так ценил, будучи ребенком. Ее логика развивается без видимых усилий, как лучшие музыкальные произведения Моцарта. Я настоятельно рекомендую каждому молодому (и не очень) заинтересованному читателю прочитать эту статью самому⁷, чтобы пережить один из ярчайших моментов торжества человеческой мысли. Ниже мы наметим ее логику и содержание.

Пространство и время до Эйнштейна

Итак, эти господа утверждают, что пространство является абсолютной реальностью, однако это приводит к большим сложностям.

— Лейбниц

Чтобы понять, насколько глубоко статья Эйнштейна, вышедшая в июне 1905 г., изменила тысячелетние представления о пространстве и времени, вернемся назад. Мы не будем пытаться

проследить медленный и извилистый путь развития понятий пространства и времени с момента зарождения геометрии у греков, через зашоренное Средневековье с его воззрениями в отношении материального мира и до тех пор, пока примитивные и беспомощные взгляды не трансформировались, наконец, в представления о мире как о бесконечной Вселенной, лишенной каких-либо конкретных качеств⁸. Начнем с понятий «абсолютного» пространства и времени в том состоянии, в каком они выкристаллизовались в «Математических началах натуральной философии» (*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*)⁹, сочинении Исаака Ньютона, написанном в 1686 г. Давайте прочитаем знаменитый комментарий (или *scholie*), который добавляет Ньютон после введения концептуальных основ своего трактата:

«Только что я определил смысл терминов, которые используются в этой книге и которые не являются общепринятыми. Что касается понятий времени, пространства, места и движения, то они знакомы всем; но следует отметить, что суждение об этих величинах исключительно в контексте их отношений с материальными предметами приводит к определенным заблуждениям.

Чтобы избежать этого, мы должны уточнить понятия времени, пространства, места и движения, поскольку каждое из них может быть *абсолютным* и *относительным*, *истинным* и *кажущимся*, *математическим* и *обыденным*.

I. Истинное и абсолютное математическое время без всякого отношения к чему-либо внешнему течет равномерно и называется длительностью. Относительное время, интуитивное и общепринятое, является лишь разумной внешней мерой измерения (точной или приблизительной) продолжительности посредством движения. Таковыми являются меры *часов*, *дней*, *месяцев* и т. д., меры, которые обычно используются вместо истинного времени.

II. Абсолютное пространство безотносительно к внешним вещам всегда остается одинаковым и недвижимым. Относительное пространство — это такая подвижная шкала измере-

ния, или мера пространства абсолютного, основанная на наших ощущениях, связанных с отношениями этой меры с каким-либо физическим телом. Относительное пространство обычно подменяет понятие недвижимого пространства. Так, местонахождение на Земле или на небе определяется расположением, которое оно имеет по отношению к Земле».

Для наших целей этот пассаж имеет принципиальное значение, в том числе в связи с той настойчивостью, с какой Ньютон демонстрирует различие времени и пространства «абсолютного» и всевозможных времен и пространств «относительных», т. е. тех, которые вступают в отношения с чувственным миром, иначе говоря, с тем, что человеческие чувства могут воспринимать. Революция Эйнштейна приведет (среди прочего) к пониманию времени и пространства как явлений, которые мы можем воспринимать органами чувств через посредство измерительных приборов: часов и различных измерительных эталонов. Поэтому тот новый взгляд, который Эйнштейн предложил в июне 1905 г. (и обобщил, как мы увидим, в 1915 г.), и называется *теорией относительности*.

Настойчивое стремление Ньютона возвести на пьедестал понятия времени и пространства имеет тройное начало. Во-первых, в других своих текстах Ньютон показывает, что, по существу, он идентифицирует «абсолютное время» с длительностью Бога, т. е. с тем «временем, которое видит Бог», тогда как «абсолютное пространство» отождествляется с *sensorium Dei*, т. е. практически с «телом Бога», поскольку *sensorium* означает некоторую «среду, в которой имеется возможность получать ощущения». Затем он стремится отличить свои идеи от идей своего вечного соперника, великого континентального ученого и философа Готфрида Вильгельма Лейбница. Действительно, для Лейбница время и пространство не являются «понятиями абсолютно реальными», но определяют лишь отношения между различными субстанциями. Прочитаем то, что он пишет Ньютону, скрывая истинного адресата под именем Кларк¹⁰, с использованием оборотов, характерных для Франции XVIII в.:

«Со своей стороны, я тут замечу еще раз, что держусь ПРОСТРАНСТВА, как чего-то чисто относительного, как и ВРЕМЯ, надобного для указания порядка сосуществования, подобно времени, определяющего порядок следования».

И, наконец, самое главное, Ньютон, будучи гениальным физиком, осознавал, что, постулируя *a priori* представления о пространстве и времени «абсолютном и математическом», он давал современной ему физике инструменты поразительной силы. Об этой силе свидетельствуют исключительные достижения, инициированные книгой «Математические начала натуральной философии» (и развитые в последующие три столетия). Эйнштейн открыто признавал, что Ньютон вымостил тот единственный путь прогресса, который возможен для его эпохи. Как писал Эйнштейн в конце своей жизни в одном отрывке¹¹, показывающем неожиданную протянувшуюся через века близость с Ньютоном: «Ньютон, прости меня, даже для человека твоей несравненной силы мысли и творчества в твою эпоху не было другого возможного пути, и ты его определил».

Виденье Лейбницем «относительности» пространства и времени было весьма глубоким и, как мы увидим, по-прежнему остается актуальным. В письмах к Кларку-Ньютому Лейбниц привел несколько аргументов в пользу своей концепции. Его возражения ньютоновскому мировоззрению были основаны на ненаблюдаемости абсолютного времени, абсолютного пространства или абсолютного движения. Именно свойство ненаблюдаемости станет одним из основных постулатов, положенных Эйнштейном в основу новой теории в 1905 г.: принципом относительности.

Основную идею, которая стоит за этим принципом, можно найти уже у Галилея. Галилей, конечно, не мог пользоваться термином «принцип относительности», появившимся позже. Но он дал ему весьма явную, хотя и очень интуитивную формулировку в своих диалогах, касающихся двух главнейших систем мира. В них Галилей предлагает читателям закрыться в трюме корабля и в этом замкнутом пространстве без возможности смотреть по сторонам понаблюдать за ходом разных явлений. Он предлагает, например, представить, как летают мухи

или бабочки или как опустошается бутылка, капля за каплей, в вазу, помещенную под ней. Когда судно находится в состоянии покоя, бабочки порхают во всех направлениях, не отдавая предпочтения каким-либо определенным направлениям, а капли из бутылки падают вертикально вниз. Затем Галилей просит читателей повторить те же наблюдения, когда судно движется со сколь угодно большой скоростью, при условии, что это движение является равномерным, т. е. при постоянной по величине и направлению скорости, без рывков и изменения курса. По его словам, явления, наблюдаемые в трюме, будут происходить в точности так же, как если бы судно находилось в состоянии покоя. Независимо от скорости движения корабля бабочки будут порхать во всех направлениях, не отдавая предпочтения какому-либо конкретному направлению, и капли всегда будут падать точно вертикально.

Другими словами, равномерное движение корабля как целого невозможно обнаружить участвующему в этом движении наблюдателю, который может наблюдать только то, что происходит внутри корабля. Современный читатель может применить описание Галилея к современным видам транспортных средств. Например, можно представить перелет на самолете с закрытыми иллюминаторами, где (в отсутствие турбулентности!) невозможно обнаружить движение самолета, наблюдая за происходящими внутри явлениями. Галилей резюмировал принцип относительности в краткой формулировке: «движение неотличимо от покоя». Понятно, что речь идет о равномерном движении (т. е. с постоянной скоростью и по прямой линии). Имея это в виду и зная, что невозможность установления равномерного движения следует из аксиом Ньютона, посмотрим, что говорит Лейбниц:

«Могли бы возразить, что реальность движения не зависит от наблюдения и что корабль может двигаться без того, чтобы тот, кто находится внутри, его замечал. Отвечу я, что движение не зависит от наблюдения, однако оно не является независимым от возможности наблюдения. Там нет никакого движения, где нет наблюдаемых изменений».

Эта настойчивость Лейбница (которую он возводит в свой основной принцип идентичности неразличимого) в отношении необходимости критерия наблюдаемости любой предполагаемой реальности весьма современна; возможно, именно он вдохновил Эйнштейна предложить новую точку зрения в 1905 г. Однако возражения Лейбница не впечатлили сторонников ньютоновского учения. Кроме того, следует признать, что в сравнении с монументальным синтезом Ньютона, который объяснил основные особенности механики Солнечной системы и позволил математически формализовать постоянно растущее число физических явлений, подход Лейбница, несмотря на свою концептуальную ясность и привлекательность, мало что мог предложить с точки зрения практического описания физических явлений. Однако критика Лейбница в отношении концепции абсолютного пространства и времени, а также абсолютного движения продолжает (возможно, подспудно) свой путь развития в умах людей. В частности, она выходит на поверхность (в новой форме) в трудах австрийского физика и эпистемолога Эрнста Маха, которого Эйнштейн читал и комментировал с большим интересом в Берне в кругу членов своего клуба дискуссий «Олимпийская академия»¹².

Таким образом, с начала XVIII в. физическая реальность рассматривалась всеми в рамках системы, предложенной Ньютоном. Пространство и время «абсолютны», т. е. должны существовать независимо от материи. Они определяют вмещительность реальности, в то время как материя суть содержание. Если бы мы удалили всю материю, то осталась бы огромная пустая рама — пространство, как пустая сцена после ухода актеров. И на этой пустой сцене время будет продолжать течь равномерно, несмотря на отсутствие какого-либо человеческого сознания или часов, чтобы жить в нем или измерить его. Эта концепция абсолютного времени казалась гармоничной, потому что виделась естественным обобщением психологического времени, с которым знаком каждый. Концепция абсолютного пространства, однако, казалась психологически дестабилизирующей, поскольку привычное для всех понятие пространства строится

на нашем опыте существования, связанном с Землей. Жизненное пространство обязательно имеет под собой «почву». Откуда возникает определенный дискомфорт, вызванный «потерей почвы под ногами», которой является абсолютное пространство Ньютона. Этот дискомфорт был одной из причин сопротивления идеям Коперника о движении Земли вокруг Солнца. Революция Коперника, развитая и подкреплённая идеями Галилея, Кеплера, Декарта и Ньютона, привела к разработке данной концепции пространства, призрачного и лишённого корней. Дискомфорт, вызванный понятием абсолютного пространства (представляемого в полной наготе в отсутствии материи), можно уловить в этом прекрасном тексте Джеймса Клерка Максвелла:

«В пространстве нет указателей [...] Мы находимся в море без волн и без звезд, без компаса и солнца, без ветра и течения, и мы не можем сказать, в каком направлении мы движемся».

Эфир: реализация абсолютного пространства

Точно так же Максвелл, обеспокоенный «отсутствием почвы», к которому приводит ненаблюдаемость пространства, внес существенный вклад в преобразование абстрактного абсолютного пространства Ньютона в почти осязаемую физическую среду «эфир». В начале XIX в. великий французский физик Огюстен Френель (умерший, увы, в 39 лет) показал посредством сочетания экспериментальных и теоретических результатов (некоторые из которых были предсказаны англичанином Томасом Юнгом), что свет представляет собой волновое явление. В отличие от Ньютона, который разработал теорию, в которой свет состоял из частиц, испускаемых светящимся телом, Френель убедил своих современников, что свет есть волновое явление. Точно так же как насекомое, движущееся по поверхности спокойного озера, создает волны, которые распространяются во всех направлениях по поверхности воды. Так же Френель осознал, что светящиеся тела возмущают «упругую среду», заполняющую все пространство, и генерируют там волны, которые распространяются со скоростью 300 000 км/с. Эта среда рас-

пространения световых волн была названа «светоносным эфиром», или «эфиром, несущим свет». Через 40 лет после Френеля Максвелл в своем фундаментальном труде о совместном распространении электрических и магнитных полей открыл нечто замечательное: электрические и магнитные поля распространяются в пустом пространстве в виде электромагнитной волны, в которой электрические и магнитные поля играют (как упоминалось выше) в «чехарду» друг с другом. Структура этих электромагнитных волн была именно того типа, который пришлось постулировать Френелю для объяснения явлений излучения¹³. Еще более замечательным было то, что, используя электрические и магнитные измерения, Максвелл смог предсказать с помощью вычисления значение скорости распространения электромагнитных волн — примерно 300 000 км/с. Это убедило его в том, что свет есть не что иное, как частный пример электромагнитных волн^{14, 15}. Максвелл выдвинул идею, что световые и электромагнитные волны распространяются в одной и той же «упругой среде». Эфир приобрел, таким образом, центральное значение в физике. Он стал невидимой материальной субстанцией, прозрачной и проницаемой (хотя и весьма упругой) для всех обычных тел. Эфир заполнял все пространство и оставался в покое. Он служил не только средой распространения света и электромагнитных волн, но и «средой обитания» всевозможных сил, действующих на обычную материю: гравитационных, электрических и магнитных. Например, магнитные силовые линии, проявленные с помощью железных опилок вокруг магнита, как предполагалось, свидетельствовали об определенной структуре эфира. В конце XIX в. значительная часть физиков придерживалась даже мнения, что обычное вещество представляет собой лишь концентрированный эфир и что, таким образом, «все являлось эфиром».

Для наших целей необходимо особо отметить, что эфир выступал (помимо прочего) в качестве альтернативной «почвы», пришедшей на смену стационарной земле докоперниковской цивилизации. «Заполняя» и «материализуя» абсолютное пространство Ньютона, он избавлял, в принципе, от дискомфорта, связанного

с ненаблюдаемостью этого абстрактного пространства. Дискомфорта, отраженного в приведенной выше цитате Максвелла: «[...] море без волн и без звезд, без компаса и солнца...» По всем этим причинам (научным и психологическим) все физики конца XIX в. были абсолютно убеждены в существовании и реальности эфира. В связи с этим забавно читать определение слова «эфир» во французской энциклопедии того времени *Nouveau Larousse Illustré* (изданной около 1903 г.), т. е. как раз перед эйнштейновской революцией:

«Эфир [...] Эфиром называется невидимый элемент, неосязаемый и невесомый, распространенный повсюду, как в пустоте, так и внутри тел прозрачных и непрозрачных, существование которого, являвшееся долгое время гипотетическим, приобретает, по-видимому, в настоящее время черты научной достоверности...»

Как будто по иронии судьбы, этот пассаж, подчеркивающий «научную достоверность» существования эфира, был написан незадолго до того, как молодой «технический эксперт третьего класса» патентного бюро в Берне основал современную физику, заявив (среди прочего) о несуществовании эфира! Этот текст в любом случае дает возможность почувствовать значимость концепции эфира в начале XX в. и показывает интеллектуальную смелость молодого Эйнштейна, который был готов ниспровергнуть наиболее устойчивые догматы науки своего времени.

Бабочки в трюме корабля

Чтобы закончить экскурс в базовые представления, казавшиеся очевидными всем ученым во времена Эйнштейна, продемонстрируем понимание отношений между развитием физических процессов, рассматриваемых в «движущейся системе отсчета», и тех же процессов, но рассматриваемых в «системе покоя». Для конкретности вернемся к ситуации, описываемой Галилеем: судно с трюмом, внутри которого происходит целый ряд явлений, таких как движение бабочек. Берег играет здесь роль «системы покоя», в отличие от корабля (и его груза), представ-

ляющего «движущуюся систему отсчета». Итак, нас интересует связь между описанием «реального» движения бабочки, таким как оно воспринимается наблюдателем внутри трюма, и описанием движения той же бабочки наблюдателем на берегу. Зададим следующий простой вопрос: если корабль движется вдоль берега со скоростью, скажем, 1 м/с и если бабочка перемещается относительно трюма и по направлению к передней части корабля, т. е. параллельно берегу со скоростью 2 м/с, то с какой скоростью бабочка движется относительно берега? Все ученые начала XX в. ответили бы на этот вопрос следующим образом.

Учитывая понятие абсолютного времени Ньютона, которое совпадает с интуитивным представлением о едином времени для всех людей и всех явлений, наблюдатель на причале и наблюдатель в трюме (так же как бабочки!) живут в одинаковой продолжительности времени. Таким образом, если рассматривается то, что происходит «в течение одной секунды», т. е. «одной секунды универсального времени, проживаемого как наблюдателем на причале, так и наблюдателем в трюме», то «очевидно», что «в течение этой секунды» корабль продвинется на один метр по отношению к причалу и бабочка продвинется в том же направлении на два метра по отношению к трюму. Но, учитывая понятие абсолютного пространства Ньютона, «также очевидно», что «один метр», измеренный в трюме, равен «одному метру», измеренному на причале. Таким образом, «в течение одной секунды» бабочка продвинулась бы по отношению к причалу на сумму этих расстояний, т. е. $(1 + 2 = 3)$ на три метра. Иначе говоря, скорость бабочки по отношению к причалу составляет 3 м/с, т. е. просто представляется суммой ее «фактической» скорости по отношению к трюму и скорости «смещения» корабля (и его трюма) по отношению к причалу. Этот «закон сложения скоростей» применяется в самом общем случае к любому движущемуся телу, а также к любому явлению распространения. Например, если заменить бабочку световым пучком, то можно заключить, что скорость светового пучка по отношению к причалу является суммой скорости корабля и скорости светового пучка по отношению к трюму. И таким образом, если

корабль имеет ненулевую скорость, то свет не может обладать одинаковой скоростью по отношению к причалу и по отношению к кораблю.

Все ученые начала XX в. представляли «эфир»¹⁶ как своего рода универсальный «причал» или «море без волн и... без приливов», определяющее «систему отсчета истинного покоя». Тогда как Земля представлялась им своего рода кораблем, находящимся в вечном движении в этом «море» и постоянно меняющим скорость из-за движения вокруг Солнца. Так как, по определению, свет распространяется в эфире с хорошо известной скоростью 300 000 км/с, они заключали, что скорость света относительно Земли определяется (векторной) суммой 300 000 км/с и «абсолютной» скорости Земли относительно эфира. В частности, скорость света, измеренная на Земле, должна была слегка отличаться от 300 000 км/с и изменяться в зависимости от сезона, а также относительной ориентации направления «абсолютного» перемещения Земли и направления рассматриваемого светового пучка.

В конечном счете, это предсказание (в частности, сделанное самим Максвеллом) открывало возможность доказать реальность существования эфира и, таким образом, положить конец дискомфорту, связанному с ненаблюдаемостью ньютоновского абсолютного пространства и омрачавшему, как заметил проницательный Лейбниц, красоту его концепции. Много усилий было сделано в конце позапрошлого века, чтобы экспериментально обнаружить движение Земли по отношению к эфиру. В частности, одним из наиболее точных был эксперимент американского физика Альберта Майкельсона, реализованный в Потсдаме, недалеко от Берлина, в 1881 г. и повторенный с повышенной точностью в Соединенных Штатах в сотрудничестве с химиком Эдвардом Морли в 1887 г. Хотя точность измерения была вполне достаточной, чтобы обнаружить ожидаемый эффект изменения скорости света от комбинирования его движения с движением Земли, Майкельсон был сильно удивлен, не обнаружив никакого изменения! Этот совершенно неожиданный результат подтолкнул ведущих ученых того времени (в том числе ирландца

Джорджа Фицджеральда, голландца Хендрика Лоренца и француза Анри Пуанкаре) к построению различных гипотез, направленных на объяснение ненаблюдаемости движения Земли относительно эфира. Это привело к публикации ряда научных работ, которые предвосхитили некоторые аспекты работы Эйнштейна, появившейся в июне 1905 г.

«Шаг»

В конце своей жизни в беседах с Абрахамом Пайсом — человеком, написавшим впоследствии наиболее полную биографию великого ученого — Эйнштейн в безличной форме ссылается на создание специальной теории относительности как на определенный «шаг» (от нем. *den Schritt*). Здесь подразумевается не только «шаг вперед», но и «продвижение по лестнице», подводящей к определенному порогу. Обратите внимание, что Эйнштейн не говорит о «скачке»¹⁷. Тем не менее он осознает, что создал в июне 1905 г. *серьезный концептуальный разрыв* с предыдущим образом мысли. Он также осознает глубокую природу этого концептуального разрыва и его прикладное значение (скорее в перспективе, а не сразу дающее возможность собирать урожай новых конкретных результатов). В действительности, хотя Эйнштейн не знал этого в то время, значительная часть *математических формул* из статьи 1905 г. уже была написана Лоренцом и Пуанкаре. И даже некоторые физические идеи, содержащиеся в статье Эйнштейна, можно найти независимо у его современников¹⁸. Периодически этот факт давал основание некоторым авторам¹⁹ «пересматривать» вклад Эйнштейна, принимая его на основании сравнения с результатами работ предшественников. Такой подход основан на непонимании концептуального «шага», сделанного Эйнштейном в июне 1905 г. Придерживаясь обозначенного стиля изложения и не вдаваясь в технические или исторические детали, попробуем оценить важность новизны подхода Эйнштейна.

Существенным моментом является то, что Эйнштейн отвергает ньютоновскую концепцию «абсолютного пространства и времени», так же как и концепцию «эфира», традиционно ото-

ждествляемого с абсолютным пространством. Надо было обладать большой смелостью, чтобы отказаться от всех концептуальных основ, которые на протяжении веков были столь полезны для развития физики и которые стали так близки каждому, что казались полностью соответствующими всем интуитивным представлениям о пространстве и времени.

Каким же образом Эйнштейн сумел отказаться от ньютоновских концепций? Отверг ли их сходу и чем заменил? Абсолютно «относительными» понятиями времени и пространства в том смысле, который предлагал Лейбниц? Нет. В действительности, Эйнштейн продвигается очень постепенно. Он начинает с того, что признает существование «системы покоя», по отношению к которой обычные представления о пространстве в смысле привычной евклидовой геометрии и о времени в ньютоновском смысле являются действительными. Он предполагает, что в данной «системе покоя» законы динамики Ньютона действительны в первом приближении и свет²⁰ распространяется в ней со скоростью 300 000 км/с. Такая отправная точка была абсолютно приемлема, полностью согласована и допустима для любого физика того времени (требовалось лишь идентифицировать предложенную Эйнштейном «систему покоя» с эфиром). Эйнштейн просто уточняет, что для того, чтобы придать ясный наблюдательный смысл понятию «времени» в этой системе, необходимо (мысленно) снабдить часами каждую точку этой системы отсчета²¹. Он замечает, что часы определяют лишь время событий, происходящих как раз там, где они находятся. Затем он обращает внимание на необходимость «синхронизации» всех часов точно так же, как два человека синхронизируют свои часы, регулируя стрелки одних, пока они не покажут то же время, что и другие. Он предлагает осуществлять синхронизацию часов, находящихся на расстоянии, посредством обмена световыми сигналами между ними, принимая во внимание время, за которое свет преодолевает расстояние между двумя часами. Время рассчитывается путем деления расстояния между часами на скорость света, т. е. на 300 000 км/с. До этого момента ничего нового. Все физики

были согласны с таким ходом рассуждения, который к тому же весьма напоминал метод синхронизации часов посредством использовавшегося повседневно в конце прошлого века телеграфного сообщения²².

Существенная новизна эйнштейновского подхода появляется позднее, когда он допускает наличие строгого ограничения — *принципа относительности* — для всех законов физики. Он понимает этот принцип в духе приведенной выше цитаты из Галилея: невозможность выявления какой-либо разницы в поведении локальных явлений, рассматриваемых в «системе покоя» либо в системе отсчета, находящейся в равномерном движении по отношению к системе покоя. Как уже говорилось, один из законов физики в покоящейся системе отсчета требует, чтобы свет распространялся с постоянной скоростью (300 000 км/с) независимо от направления своего распространения и скорости перемещения источника. Тогда в качестве первого следствия принципа относительности появляется требование, чтобы свет распространялся также с фиксированной скоростью 300 000 км/с в произвольной системе отсчета, перемещающейся равномерно по отношению к системе покоя.

Дойдя до этого этапа рассуждений Эйнштейна, все физики его времени должны были возразить: «Это абсурд! Согласно хорошо известному закону сложения скоростей, скорость света в движущейся системе отсчета должна быть *суммой* его скорости в системе покоя и скорости движения движущейся системы как целого. И эта сумма никогда не может быть равна 300 000 км/с». Но тогда, объясняет Эйнштейн, по сути²³ «хорошо известный закон сложения скоростей» является на самом деле лишь следствием *молчаливого предположения* о поведении законов и часов, находящихся в движении. Таким образом, эти предположения *a priori* не являются достоверными. Вспомним приведенный выше пример бабочки в трюме корабля. Если внимательно, шаг за шагом, разобрать этот пример, где корабль продвигается на «1 м/с», тогда как бабочка продвигается на «2 м/с», то мы увидим, что нужно сделать три независимых предположения для вычисления скорости бабочки по отноше-

нию к причалу. Для начала необходимо предположить, что *расстояние* в два метра, преодолеваемое бабочкой *в трюме*, эквивалентно *расстоянию* в два метра *на причале*. Затем нужно предположить, что *продолжительность* одной секунды, *проведенной в трюме*, эквивалентна продолжительности одной секунды, *проведенной на причале*. И наконец, что трюм и причал можно рассмотреть «в одно и тот же мгновение», т. е. понятие *одновременности* одинаково в трюме и на причале. Итак, по словам Эйнштейна, *a priori* нет оснований считать, что некоторый эталон, определяющий один метр при использовании в системе покоя, по-прежнему выглядит как предмет, имеющий длину один метр, если смотреть на него в движении. Аналогично, *a priori* нет оснований считать, что секундный интервал на часах, используемых в системе покоя, имеет ту же продолжительность в движении. И наконец, с помощью простых рассуждений Эйнштейн показывает, что если во всех системах отсчета установить одновременность событий, используя процесс синхронизации удаленных часов посредством обмена световыми сигналами (предположительно распространяющимися с фиксированной скоростью 300 000 км/с), то два события, происходящие «одновременно» в движущейся системе отсчета, *не являются одновременными* относительно системы покоя (и наоборот).

Расшатав, таким образом, многовековые представления о пространстве и времени, Эйнштейн показывает далее, как *сконструировать новые представления*. Для этой цели он использует те мощные средства, которые вытекают из самого принципа относительности. Требуя точного выполнения этого принципа, он заключает, каким образом должен восприниматься эталонный метр в движении для неподвижного наблюдателя, с какой кажущейся частотой отсчитывают секунды движущиеся часы по сравнению с часами в покое и как изменяется понятие одновременности для двух систем, находящихся в относительном движении. В результате он получает ряд математических формул, связывающих координаты пространства и времени одного и того же события (длину, ширину, высоту и датировку) согласно восприятию в системе покоя

и в системе, находящейся в равномерном движении²⁴. Возможно, Эйнштейн не знал, что эти математические формулы были написаны до него, в частности Лоренцом, и что они были детально изучены Пуанкаре²⁵. Едва ли это важно. Существенным моментом является то, что у Эйнштейна уравнения приобрели совершенно новый физический смысл. Действительно, никто из современников Эйнштейна не ставил под сомнение понятие ньютоновского абсолютного пространства-времени. Для них среди различных переменных, входящих в эти уравнения, лишь длина, ширина, высота и время в системе покоя, связанной с абсолютным пространством (и эфиром), представляли *настоящие* координаты пространства и времени. Другие переменные были либо *кажущимися* координатами, либо просто вспомогательными величинами. Позднее мы вернемся к этому важному различию между Эйнштейном и его оппонентами.

После получения уравнений, связывающих пространственно-временные координаты одного и того же события в двух разных системах отсчета, Эйнштейн обсуждает их физическую интерпретацию, а затем выводит модифицированную форму закона сложения скоростей в своей новой теории. Наконец, он убеждается, что в новом законе «добавление» произвольной скорости, «не превышающей пороговой», к скорости света по-прежнему дает скорость, равную (по абсолютной величине) скорости света. Таким образом, круг замыкается: Эйнштейн демонстрирует совместимость принципа относительности и того принципа, в соответствии с которым свет всегда распространяется с одинаковой скоростью. Кроме того, все это теоретическое рассуждение (так же, как и остальная часть статьи) делает абсолютно «излишним» введение понятий «световой эфир» и «абсолютное пространство». Эйнштейн больше к этому не возвращается, однако такое простое замечание подписывает смертный приговор понятиям, считавшимися «очевидными» всеми его современниками.

На этом мы завершаем обзор первой части июньской статьи Эйнштейна 1905 г., которую он определяет для себя как «кине-